UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Departamento de Ingeniería Estructural y Mecánica

E.T.S. de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación.

CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNIONES PEGADAS SOMETIDAS A AMBIENTES RADIACTIVOS EN SISTEMAS DE ALINEACIÓN DE DETECTORES DE PARTÍCULAS.

CHARACTERIZATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF ADHESIVE JOINTS SUBJECTED TO RADIACTIVE ENVIRONMENTS IN PARTICLE DETECTOR ALIGNMENT SYSTEMS.

TESIS DOCTORAL

Autor: D. Enrique Calvo Alamillo

Directores: Dr. D. Ramón Sancibrián Herrera

Dr. D. Fernando Viadero Rueda

Santander, diciembre de 2015

CERN-THESIS-2016-412

A mi familia.

I: Agradecimientos.

Quisiera dejar constancia en esta memoria mi reconocimiento a la labor prestada por un amplio grupo de personas e instituciones, que han hecho posible la consecución de esta tesis doctoral.

En primer lugar agradecer el esfuerzo y la dedicación prestada por los co-directores de la tesis *Ramón Sancibrián* y *Fernando Viadero* a lo largo del desarrollo de esta investigación. Agradecimiento que hago extensivo a todo el personal del área de Ingeniería Mecánica del departamento de Ingeniería Estructural y Mecánica de la Universidad de Cantabria y al Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y los Materiales, especialmente a *Isidro Carrascal* y *Soraya Diego* sin cuyo apoyo y esfuerzo no se habría logrado realizar una parte importante de esta tesis.

Para hacer posible el desarrollo de esta tesis ha sido fundamental la estrecha colaboración y trabajo con mis compañeros del:

Laboratorio Europeo de Física de Partículas (CERN), en especial quería agradecer el trabajo y colaboración del personal de la sección Large Scale Metrology y de la oficina gabinete de Ingeniería e Integración de CMS, particularmente a su responsable *Gerard Faber,* bajo cuya supervisión he pasado largas temporadas en el CERN. Así como a todos los compañeros y técnicos de apoyo que han trabajado a lo largo de los años en el sistema de alineación de CMS, especialmente a *Gyorgy Bencze* y *Zoltan Szillasi*, responsables del sub-sistema de alineación BARREL de CMS, por su estrecha colaboración durante los años de calibración de componentes en los ISR, Instalación en el P5 y procesamiento de resultados.

Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (Ciemat), en particular me gustaría mostrar mi agradecimiento a mis compañeros del departamento de Investigación Básica y de la Unidad de Electrónica: *Barcala, Chércoles, Cristina, Cruz, Navarrete, Oller, Marcos, Moli, Nica, Pedro, Yañez* y muchos otros, con algunos de los cuales he compartido largas estancias en el CERN y prolongadas y tediosas noches de instalación y puesta a punto del sistema en la caverna experimental de CMS. Especial mención merecen en el departamento de Tecnología los compañeros de: la Unidad de Fabricación por los miles de componentes que han realizado para el sistema LINK; la unidad de Irradiación Náyade en la división de Materiales de Interés Energético, particularmente *Mario Rodríguez* y *Pedro Pablo Valdivieso*, por el apoyo prestado durante la caracterización de los diferentes dispositivos y probetas que han sido irradiados en sus instalaciones; la División de Química, destacando a *Marta Fernández*, por su apoyo durante los tratamientos superficiales realizados en sus instalaciones; y la unidad de Caracterización Microestructural y Microanálisis, *Gonzalo de Diego* y *David Sauce,* por su ayuda en el estudio del tratamiento superficial aplicado a las probetas caracterizadas.

Instituto de Física de Cantabria (IFCA), particularmente me gustaría agradecer a *Alberto*, *Alicia*, *Amparo*, *Celso*, *David*, *Fernando*, *Gervasio*, *Iván*, *Javier*, *Jesús*, *Mar*, *Martin*, *Marcos*, *Pablo*, *Pupi*, *Rafa*,… por los muchos años compartidos durante el desarrollo, puesta en funcionamiento y operación del sistema de alineación LINK del detector CMS.

Gracias y perdón al resto de personas e instituciones que han participado en algún grado durante el desarrollo de esta investigación y que no aparecen expresamente mencionadas en este documento, sin cuya ayuda no se habría obtenido el presente resultado.

Para finalizar, y no por eso menos importante, mi sincero agradecimiento a *Antonio Ferrando* y *Teresa Rodrigo*, por ser los artífices que me animaron a comenzar la realización de esta tesis doctoral, que me han apoyado durante todos estos años de desarrollo y ayudado en la realización de esta memoria.

Muchas gracias a todos,

Madrid, diciembre de 2015.

Enrique Calvo Alamillo.

II: Resumen.

El trabajo desarrollado en esta tesis está enmarcado dentro del experimento de física de partículas CMS (Compact Muon Solenoid), instalado en el Gran Colisionador Hadrónico (LHC, Large Hadron Collider) del CERN (Laboratorio Europeo de Física de Partículas), ubicado en los alrededores de la ciudad de Ginebra.

Como el nombre ya indica, una de las características principales del diseño de CMS es la medida precisa del momento de unas partículas denominadas muones. Esta se realiza mediante una combinación de las medidas realizadas por el sub-detector central de trazas o TRACKER situado en la parte mas interna, rodeando al punto de interacción, y el sub-detector de muones ("cámaras de muones") en la zona más externa del detector CMS. La determinación del momento de una partícula cargada se realiza a través de una reconstrucción muy precisa de la trayectoria que sigue la partícula al atravesar los diferentes sub-detectores, inmersos estos en potentes campos magnéticos disponibles en CMS. Para poder conseguir realizar la medida con la precisión requerida, se debe conocer la posición relativa de los distintos sub-detectores con precisiones sub-milimétricas. El posicionamiento de los componentes activos del detector se realiza mediante una combinación de la información que proporciona el sistema opto-mecánico de alineación de CMS y la información que suministran las propias partículas al atravesar el detector. Este trabajo de investigación se ha centrado en el sub-sistema de alineación LINK, que es el que une el sub-sistema de alineación del TRACKER, con los sub-sistemas de alineación de los detectores de muones ENDCAP y BARREL.

El detector CMS es uno de los cuatro grandes detectores experimentales que operan en el LHC. El Colisionador entró en funcionamiento en Marzo del año 2010, con una energía centro de masas de 7 TeV, alcanzando los 8 TeV durante el año 2012, energía con la que ha estado trabajando hasta Febrero del año 2013. Con los datos obtenidos durante esos primeros años de operación, LHC ha publicado importantes resultados, siendo el más relevante el descubrimiento del bosón Higgs en 2012, que ha marcado un hito en el desarrollo de la física de partículas y que dio lugar a la concesión del Premio Nobel de Física a F. Englert y P.W. Higgs en 2013.

El acelerador y sus detectores han permanecido en parada técnica durante los dos últimos años, para la realización de tareas de mantenimiento y mejora. En verano de 2015 ha comenzado una nueva etapa de operación a una energía centro de masas de 13 TeV, y con una luminosidad nominal de 10^{34} cm^{-2} s^{-1}. Una vez termine la vida útil del LHC en su actual configuración, se va a llevar a cabo una actualización y mejora, con un incremento de la Luminosidad, que alargará su vida varios años más de lo previsto inicialmente y que necesitará el

rediseño de muchos de sus componentes tanto del acelerador como de los experimentos en él instalados.

CMS es uno de los dos detectores de propósito general disponibles en el colisionador LHC. Tiene una simetría cilíndrica alrededor de la dirección en la que circulan los haces de partículas y centrada en el punto de colisión de estos, y esa simetría se mantiene en los distintos sub-detectores que lo componen. Es un detector muy compacto, de unas14000 toneladas, más de 21 m de longitud y de unos 16 m de diámetro, que cuenta con un imán solenoide de 3.8 T, que somete a sus diversos sub-detectores a grandes campos magnéticos, necesarios para curvar la trayectoria de las partículas cargadas, y de esa forma permitir la medición precisa de su impulsión y realizar su identificación.

El detector durante los períodos de operación está sometido a intensas fuerzas magnéticas inducidas por el imán (~10000 toneladas), variaciones térmicas de varios grados centígrados y el propio peso de las estructuras que lo componen; estas solicitaciones causan desplazamientos, rotaciones y deformaciones, del orden de centímetros y miliradianes sobre las estructuras que componen CMS. Por ello se hace necesario un sistema de alineación que monitorice en todo momento la posición relativa de las diferentes estructuras y dispositivos de detección que lo componen, permitiendo de esa forma determinar las posiciones reales que ocupan los componentes activos de detección de los distintos sub-detectores para así poder realizar una correcta reconstrucción de la trayectoria de la partícula que los atraviesa.

El sistema de alineación LINK consiste en un conjunto de fuentes flotantes de luz láser que generan una serie de rayos de referencia que son interceptados por componentes opto-mecánicos y electrónicos de detección, configurados en lo que se denomina ‘monitor de posición multipunto’, situados sobre posiciones conocidas de elementos a monitorizar. El conjunto de rayos de referencia conectan entre sí los tres sub-sistemas de alineación interna de CMS. Los componentes de detección más relevantes son los sensores de posición semitransparentes, llamados ASPD (Amorphous Silicon Position Detectors). Cuando los haces de luz están dentro del área activa de los sensores ASPD el sistema obtiene la posición relativa de los diferentes detectores entre sí, siendo la posición de origen de estos rayos irrelevante para el principio de medida que realiza este sistema.

En el presente trabajo se ha investigado en el desarrollo y validación de un sistema de alineación compacto, para su implementación en detectores de partículas de última generación como es CMS, que puede funcionar en altos campos magnéticos de hasta 4 T, soportar altas dosis de radiación del orden de 10^5 Gy, 2×10^{14} neutrones/cm^2 y 2×10^{14} protones/cm^2, con gradientes de temperaturas de algunos grados, y que permita reconstruir de forma continua, la posición del sub-detector central del TRACKER respecto a los sub-

detectores de muones situados sobre el ENDCAP y el BARREL de CMS, con precisiones de unas 200 μm. Un robusto diseño y una adecuada elección de componentes permiten que el sistema opere de forma estable durante más de 10 años, con mínimo mantenimiento.

Durante este proceso de investigación, de forma individual: se han desarrollado, calibrado y validado ASPDs, electrónica asociada a los diferentes dispositivos de detección y sistemas de lectura y control, software de reconstrucción y muchos componentes mecánicos de alta precisión; se han seleccionado, calibrado y validado distanciómetros, inclinómetros, fibras ópticas, óptica colimadora, prismas ópticos, sondas de temperatura y sondas de campo magnético.

De forma colectiva, se han desarrollado, calibrado y validado los dispositivos opto-mecánicos y/o estructuras compuestas, que incluyen diferentes componentes en su interior, como son las estructuras LDs (LINK Disc), ARs (Alignment Ring), TPs (Transfert Plate), LBs (Laser Box), LLs (Laser Level) y DB (Detector Box). Para ello se han desarrollado complejos dispositivos de calibración en el laboratorio de Metrología del IFCA y el laboratorio de los ISR del CERN.

Para que el sistema de alineación sea estable y funcione correctamente se necesita que lo sea la base donde van fijados los diferentes dispositivos que integran el sistema, y debido a las restricciones de compacidad y minimización de material que imperan en algunas zonas del detector, muchos de los componentes, así como partes estructurales del sistema van a disponer de uniones pegadas. Estas uniones adhesivas podrían ser un foco de inestabilidades si la unión se degrada por las condiciones de uso, principalmente por la radiación que recibe. También es muy importante garantizar que durante los períodos de mantenimiento, en los cuales los componentes pueden estar sometidos a impactos fortuitos, no se producen modificaciones de la geometría, como consecuencia de la degradación que haya podido producirse en las características mecánicas iniciales por efecto de la radiación. Por ello, uno de los puntos centrales de esta tesis está dirigido a comprobar la estabilidad estructural (dimensional y resistiva) de las uniones pegadas disponibles en el sistema LINK, exponiendo estas a los niveles de radiación que está previsto que reciban los componentes del sistema en todo el tiempo de su funcionamiento. Así se ha estudiado las variaciones dimensionales que puede experimentar el pegamento utilizado en la zona de unión, y también su posible fragilización, incidiendo principalmente en las propiedades mecánicas de energía absorbida frente a impactos. De este estudio se concluye que las uniones pegadas utilizadas tienen una estabilidad dimensional muy buena, con variaciones de espesor por debajo de 1 μm y 35 μrad (siendo compatibles con ausencia de movimientos), bajo las condiciones

de uso previstas en el detector CMS, y de igual forma estas uniones van a mantener las propiedades mecánicas frente a impacto en un buen nivel resistivo durante toda la vida de operación del experimento, mostrando incluso una pequeña tendencia a la mejora de propiedades para las dosis de este período, pero que son incluso compatibles con cero. Obteniendo una resistencia media al impacto (resiliencia) de 2428-3163 J/m^2, para los adherentes con tratamiento superficial 'suave' y con tratamiento 'agresivo' una resistencia media de 3393 J/m^2, con una desviación estándar por debajo del 8 % entre los valores medios obtenidos a los diferentes niveles de irradiación ensayados, hasta 2071 KGy.

Finalmente se ha analizado el funcionamiento del sistema de alineación LINK, en condiciones reales de operación, durante varios años, a través de los datos que proporciona el sistema. Esto ha permitido conocer los movimientos que se producen sobre las estructuras de CMS y el tiempo que necesita el detector para alcanzar la estabilidad mecánica de sus estructuras. Una vez alcanzada la estabilidad mecánica del detector, CMS puede asegurar la buena reconstrucción geométrica de las partículas cargadas detectadas. De los estudios de caracterización del sistema de alineación se concluye que el sistema LINK permite la reconstrucción geométrica de las localizaciones espaciales relativas y orientaciones angulares entre las cámaras de muones y el TRACKER, con una precisión por debajo de 150 μm en distancias y de unos 40 μrad en la reconstrucción angular. Así mismo se ha determinado que el detector, en condiciones nominales de operación, es decir, al alcanzar la intensidad de campo magnético de 3.8 T, se estabiliza al cabo de 24 h funcionando, y a partir de ese momento los movimientos o rotaciones observadas están por debajo de la resolución del sistema de alineación (~40 μm y ~30 μrad).

III: Abstract.

The work developed in this thesis is done in the frame of CMS (Compact Muon Solenoid) a particle physics experiment installed in the Large Hadron Collider (LHC) of the CERN (European Laboratory for Particle Physics), near the city of Geneva.

As its name indicates, the Compact Muon Solenoid detector is a muon spectrometer and the detection and precise momentum measurement of these particles is favored. This is done through a combination of measurements undertaken by the central TRACKER detector, located in the innermost part of the Detector, surrounding the point of interaction, and the muon chamber system, located in the outermost zone of the detector CMS. The determination of the momentum of a charged particle is performed through a very precise reconstruction of the trajectory that the particle lefts when passing through the different sub-detectors, which are immersed in a powerful solenoidal magnetic field. In order to be able to accomplish the measure with the accuracy required one has to know the relative position of the various sub-detectors with sub-millimetric precision. This is the role of the LINK Alignment System, that makes the link between the inner Tracker Alignment System and the Barrel Muon Chambers and Endcap Muon Chambers inner Alignment Systems.

In fact, the positioning of the active components of the detector is obtained through a combination of the information provided by the CMS opto-mechanical alignment system and the information supplied by the own particles when passing through the detector.

The CMS experiment is one of the big four detectors that operate in the colliding areas of LHC. The Large Hadron Collider went into operation in March 2010, with a center of mass energy, for proton-proton collisions, of 7 TeV, reaching the 8 TeV during 2012. This energy was maintained until February 2013.

With the data obtained during those early years of operation, LHC has published important results, being the more relevant the discovery of the Higgs boson in 2012, which has marked a milestone in the development of particle physics, and resulted in the granting of the Nobel Prize in Physics to F. Englert and P. W. Higgs in 2013.

The accelerator and its detectors have remained in technical stop during the last two years for the completion of maintenance and improvement. In the summer of 2015 has begun a new phase of operation with a center of mass energy of 13 TeV, and with a nominal luminosity of 10^{34} cm^{-2} s^{-1} for proton-proton collisions. Those will be the working conditions until 2018. By then is expected a new stop of activities and an upgrade of the collider, with an increase in the luminosity, that will need the redesign of many of the components of both accelerator and experiments.

CMS is one of the two general purpose detectors available in the LHC. It has a cylindrical symmetry around the direction in the circulating particle beams and it is centered at the Interaction Point. That symmetry is maintained for the various

sub-detectors that compose the Detector. CMS is a very compact detector, with a weight of about 14000 tons, more than 21 m in length and about 16 m in diameter. At the heart of CMS sites a 13 m long, 6 m inner diameter, 4T superconducting solenoid, which provides a large bending power: 12 Tm. The return field is large enough to saturate 1.5 m of iron, allowing 4 muon stations to be integrated to ensure robustness and full geometrical coverage.

In operation, at 3.8 T the solenoid induces an axial force of about 10000 tons. If in addition one considers thermal variations of several degrees Celsius and the own weight of the structures; is easy to understand that it will appear displacements of the order of centimeters and rotations and/or deformations in the milliradians, on the structures that conform CMS. Therefore it is necessary to develop an alignment system to monitor at any time the relative position of the different structures and the detection devices, thus allowing to determine the actual positions occupied by the active components of detection of the various sub-detectors in order to perform a correct reconstruction of the trajectory of the particle charged particles..

The LINK Alignment System consists of a set of sources of floating laser lights that generate a series of rays of reference that are intercepted by opto-mechanical and electronic detection components, hat configures a 'multipoint position monitor', located on known positions of elements to be monitored.

The set of reference rays connect the three sub-systems of internal alignment of CMS: Tracker Internal alignment, Muon Systems (Barrel and Endcaps) internal alignments and The Link Alignment System to relate the position of the various elements of the muon system with the position of the Tracker body, and to monitor the relative movements between both systems.

The most relevant components of detection are the semitransparent position sensors, called ASPD (Amorphous Silicon Position Detectors). When the beams of light are within the active area of the sensors ASPD, the system gets the relative position of the different detectors between them.

The present work has performed the development and validation of a compact alignment system, for its implementation in particle detectors of the last generation as CMS is, which can operate in magnetic fields of up to 4 T, withstand high radiation doses in the order of 10^5 Gy, 2×10^{14} neutrons/cm^2 and 2×10^{14} protons/cm^2, with gradients of temperature of a few degrees, and needing to reconstruct at any moment, the position of the sub-detector of the central TRACKER with respect to the muon detectors located on the ENDCAP and BARREL of CMS, with precisions of some 200 micrometers.

A robust design and an adequate choice of components should allow the system to operate in a stable manner for more than 10 years, with minimal maintenance.

During the process of investigation we have developed, calibrated and validated ASPDs, the associated electronics of the different detection devices, the readout and control systems, and the reconstruction software for many mechanical components of high precision. In addition, we have selected

calibrated and validated different types of distancemeters, inclinometers, optical fibers, collimators, optical prisms, temperature sensors and magnetic field probes.

During the work, opto-mechanical devices and/or composite structures, which include different inside components, as the LDs (LINK Discs), ARs (Alignment Rings), TPs (Transfer Plates), LBs (Laser Boxes), LLs (Laser Levels) and DBs (Detector boxes) were developed, validated and calibrated. To do this it was necessary to developed complex calibration devices in the laboratory of Metrology of the IFCA and in the one of the CERN ISR Hall.

To make the alignment system working in a reliable manner it will be need that the physical attaches of the different devices that make up the system remain stable. However, due to the restrictions of compactness and minimization of material in some areas of the detector, many of the components, as well as structural parts of the system are going to need adhesive joints. These adhesive connections could be a source of instability if the union is degraded due to the conditions of use as in particular the received radiation. It is also very important to ensure that during maintenance periods, in which the components can be subjected to accidental impacts, no geometry modifications occur.

For this reason, one of the central points of this thesis is devoted to check the structural stability (dimensional and resistive) of the adhesive joints included in the LINK system by exposing these joints to the radiation levels expected to receive during the time of operation. It has therefore been studied the dimensional variations that can experience the glue used in the adhesive joints, and also their possible embrittlement, focusing mainly on the mechanical properties of the energy absorbed from eventual impacts. The conclusion of this particular study is that the bonded connections used have a very good dimensional stability, with variations of thickness below 1 μm and 35 μrad (still compatible with absence of movements), under the intended conditions of use in the CMS detector. In the same way these connections maintain the impact mechanical properties in a good resistive level throughout the life of operation of the experiment, showing even a small trend towards improving properties for the dose of this period. They show a medium strength to the impact (resilience) of 2428-3163 J/m^2, for the adherent with a surface treatment 'soft' and a strength to the impact of 3393 J/m^2 using 'aggressive' treatment , with a standard deviation below the 8 % between the average values obtained at different levels of irradiation tested, up to 2071 KGy.

Finally, the data provided by the LINK Alignment System along several years of operation, in real conditions, was analyzed. This has allowed knowing the movements that occur on the structures of CMS and the time required by the detector to achieve the mechanical stability of their structures. Once you have reached the mechanical stability of the detector, CMS can ensure good geometric reconstruction of the charged particles detected.

The characterization studies of the alignment system permits to conclude that the LINK system allows the reconstruction of the relative geometric space locations and orientations angular between the muon chambers and the tracker, with a precision below 150 μm in distances and about 40 μrad in the angular

reconstruction. It was in addition determined that the detector, in nominal conditions of operation, gets its mechanical stability 24 h after the working 3.8 T field intensity is reached, in the sense that as from that moment lineal motions or rotations observed are below the sensors resolution (~40 μm for displacements and ~30 μrad for rotations).

IV: Contenido.

	Página:
I: Agradecimientos.	I. pág.
II: Resumen.	II. pág.
III: Abstract.	III. pág.
IV: Contenido	IV. pág.
V: Acrónimos.	V. pág.
VI: Lista de figuras.	VI. pág.
VII: Lista de tablas.	VII. pág.
Capítulo 1: Introducción.	Capítulo 1. pág.
1.1. Antecedentes.	3
1.2. Objetivo de la tesis.	5
1.3. Descripción del desarrollo de la memoria.	6
Capítulo 2: El colisionador LHC y el experimento CMS.	Capítulo 2. pág.
2.1. El LHC	2
2.2. CMS.	7
2.2.1. El detector central de trazas, TRACKER.	12
2.2.1.1. Detector de Pixeles de Silicio.	14
2.2.1.2. Detector de Microtiras de Silicio.	15
2.2.2. El calorímetro electromagnético, ECAL.	17
2.2.3. El calorímetro hadrónico, HCAL.	19
2.2.4. El sistema de detección de muones.	21
2.2.5. El imán superconductor y el hierro de retorno.	24
2.2.6. El campo magnético y los movimientos esperados.	28
2.2.7. Niveles de radiación.	35
Capítulo 3: El sistema de alineación de CMS.	Capítulo 3. pág.
3.1. Sistema de alineación del TRACKER.	4
3.2. Sistema de alineación del BARREL.	9
3.3. Sistema de alineación del ENDCAP.	13
3.4. Sistema de alineación global LINK.	16
3.4.1. Principio de medida del sistema de alineación LINK de CMS.	24
3.4.2. Dispositivos leídos y controlados por el sistema LINK.	28
3.4.3. Sistemas de lectura, control y software de reconstrucción.	36
Capítulo 4: Estudios realizados a los dispositivos del sistema de alineación LINK.	Capítulo 4. pág.
4.1. Sistema Láser.	3
4.1.1. Transmisión de la luz por el interior de una fibra.	5
4.1.1.1. Efecto de la radiación en las fibras ópticas.	6
4.1.1.2. Efecto de la radiación γ sobre la absorción de luz en fibras monomodo.	7
4.1.1.3. Efecto de la radiación γ y neutrones sobre la absorción de luz en la fibra Nufern S630.	10
4.2. Sensores	13
4.2.1. Fotodetectores matriciales semi-transparentes de silicio amorfo (ASPD).	13
4.2.1.1. Caracterización de los ASPDs.	13
4.2.1.2. Monitorizado de las prestaciones del sistema de alineación multipunto.	17
4.2.1.3. Resistencia frente a irradiación con γ y neutrones y envejecimiento por iluminación intensa.	20
4.2.2. Inclinómetros electrolíticos.	22
4.2.2.1. Caracterización de los inclinómetros.	22

4.2.2.2. Efectos inducidos por la Temperatura. 24
4.2.2.3. Resistencia frente a la irradiación γ y con neutrones. 25
4.2.2.4. Efectos que induce el Campo Magnético. 26
4.2.3. Distanciómetros. 28
4.2.3.1. Caracterización del OMRON Z4M–W100. 28
4.2.3.1.1. Comportamiento frente a la radiación. 30
4.2.3.1.2. Comportamiento frente al campo magnético. 30
4.2.3.2. Caracterización de los potenciométricos. 31
4.2.3.2.1. Efectos medioambientales. 31
4.3. Componentes opto-mecánicos. 32
4.3.1. 'Laser Box' o Caja de luz láser. 32
4.3.1.1. Efectos de la irradiación sobre los prismas ópticos y sus uniones pegadas. 34
4.3.1.1.1. Efecto de la irradiación γ sobre los vidrios. 35
4.3.1.1.2. Efecto de la irradiación γ sobre los recubrimientos. 36
4.3.1.1.3. Efecto de la irradiación sobre los adhesivos ópticos. 36
4.3.1.1.3.1. Estabilidad de la unión. 36
4.3.1.1.3.2. Transmitancia del adhesivo bajo irradiación γ. 39
4.3.1.1.3.3. Transmitancia del adhesivo frente a irradiación con rayos γ y neutrones. 41
4.3.2. 'Detector Boxes' o Cajas de detección. 42
4.3.3. 'Laser Level' o Nivel laser. 45
4.3.4. Estructura de alineación del sistema LINK. 47
4.3.4.1. El Alignment Ring (AR) o Anillo de Alineación. 53
4.3.4.1.1. Banco de calibración para el AR. 55
4.3.4.2. Plataforma de transferencia de medida ME1/1 (TP) 58
4.3.4.2.1. Calibración de la TP. 59
4.3.4.3. Perfiles Radiales (RPs) y Longitudinales (LPs). 60
4.3.4.3.1. Calibración de los RPs y LPs. 62
4.3.4.4. Link Disc (LD). 64
4.3.4.4.1. Banco de calibración para el LD. 67
4.3.4.5. Simulaciones MEF a la estructura de alineación LINK. 70

Capítulo 5: Estudio de la estabilidad dimensional y de la resistencia a impacto, de los insertos pegados, frente a irradiación. Capítulo 5. pág.
5.1. Estado del arte y necesidad. 1
5.2. Unión adhesiva: antecedentes. 3
5.2.1. Definiciones 3
5.2.2. Mecanismos de adhesión y modos de fallo. 4
5.2.2.1. Mecanismos de adhesión. 4
5.2.2.1.1. Teoría de la adhesión mecánica. 4
5.2.2.1.2. Teoría de la adhesión por interdifusión. 5
5.2.2.1.3. Teoría de la adhesión electrostática 6
5.2.2.1.4. Teoría de la Adsorción. 6
5.2.2.2. Modos de fallo de una junta adhesiva. 8
5.2.3. Ventajas e inconvenientes de una junta adhesiva. 9
5.2.4. Clasificación de los adhesivos. 10
5.2.4.1. Adhesivos pre-polimerizados. 10
5.2.4.2. Adhesivos Reactivos. 11
5.2.4.2.1. Adhesivos acrílicos tenaces. 12
5.2.4.2.2. Adhesivos anaeróbicos tenaces. 13
5.2.4.2.3. Cianoacrilatos tenaces. 14
5.2.4.2.4. Poliuretanos. 15
5.2.4.2.5. Epoxis rígidos. 15
5.2.4.2.5.1. Comparativa frente a otros adhesivos. 17
5.2.5. Pre-tratamientos superficiales aplicados a una junta adhesiva. 18
5.2.5.1. Desengrasado. 20
5.2.5.2. Pre-tratamientos mecánicos. 20
5.2.5.3. Pre-tratamientos químicos y electroquímicos. 21

5.2.5.3.1. Ataque con ácido crómico (CAE). 22
5.2.5.3.2. Anodizado con ácido sulfúrico (SAA). 23
5.2.5.3.3. Anodizado con ácido crómico (CAA). 24
5.2.5.3.4. Anodizado con ácido fosfórico (PAA). 25
5.2.6. Diseño de la junta adhesiva. 26
5.2.6.1. Tipos de uniones adhesivas y solicitaciones. 27
5.2.6.2. Recomendaciones para el diseño de una junta adhesiva. 29
5.2.6.3. Influencia de los parámetros geométricos de la junta solapada. 32
5.2.6.4. Comportamiento de una junta adhesiva bajo cargas de impacto. 34
5.2.7. Control de calidad de la junta adhesiva. 35
5.2.7.1. Ensayos no destructivos. 36
5.2.7.2. Ensayos destructivos normalizados aplicados a las juntas adhesivas. 38
5.2.7.2.1. Métodos de ensayo de la resistencia a la cizalladura por impacto en juntas pegadas 39
5.2.8. Efectos de la radiación sobre los adhesivos. 41
5.2.9. Análisis tensional de la junta adhesiva. 49
5.2.9.1. Unión solapada sometida a cargas cuasi-estáticas. 49
5.2.9.2. Unión solapada sometida a cargas dinámicas de impacto. 61
5.3. El adhesivo Araldit 2011. 65
5.4. Secuencia del desarrollo experimental seguido para la caracterización de las juntas adhesivas utilizadas. 68
5.4.1. Estabilidad dimensional. 69
5.4.2. Resistencia frente a impacto. 70
5.5. Definición de las probetas. 71
5.5.1. Utillaje de adaptación para ensayo Izod en la máquina utilizada. 73
5.5.2. Fabricación de probetas. 73
5.6. Tratamiento superficial de los sustratos a unir. 74
5.6.1. Rugosidad superficial de las probetas. 76
5.6.1.1. Parámetros de rugosidad controlados. 77
5.6.1.2. Resultados de rugosidad superficial de las probetas en función del tratamiento. 80
5.7. Pegado de probetas. 90
5.8. Irradiación de la unión adhesiva de las probetas. 93
5.8.1. Unidad de irradiación Náyade. 94
5.8.2. Disposición de las probetas. 95
5.8.3. Dosimetría FRICKE. 96
5.8.4. Niveles de irradiación recibida por las probetas. 98
5.9. Estabilidad dimensional de las probetas. 102
5.9.1. Parámetros evaluados en las probetas P_I. 103
5.9.2. Parámetros evaluados en las probetas P_{II}. 106
5.9.3. Estabilidad tras la primera campaña de irradiación. 108
5.9.4. Estabilidad frente a humedad. 112
5.9.5. Estabilidad tras la segunda campaña de irradiación. 115
5.9.6. Estabilidad temporal. 117
5.10. Ensayo de impacto sobre las probetas. 121
5.10.1. Primera campaña de ensayos. 124
5.10.2. Segunda campaña de ensayos. 130
5.10.2.1. Probetas de la primera tanda de irradiaciones (P_{II}). 131
5.10.2.2. Probetas de la segunda tanda de irradiaciones (P_{II}') 137

Capítulo 6: Resultados del Sistema de alineación LINK. Capítulo 6. pág.

6.1. Medidas de resolución del LINK en 2006 durante las pruebas del imán. 1
6.1.1. Descripción del sistema de alineación instalado durante las pruebas del imán. 1
6.1.2. Visión general de los resultados del sistema LINK durante el 4

MTCC.
6.1.3. Conjunto de datos tomados y su calidad. 7
6.1.3.1. Información del sistema de láseres y ASPDs. 7
6.1.3.2. Monitoreo de los movimientos lineales. 8
6.1.3.2.1. Distancia Axial. 8
6.1.3.2.2. Distancia Radial. 9
6.1.3.3. Movimientos angulares. 10
6.1.4. Reconstrucción de los resultados. 11
6.1.4.1. Descripción de COCOA. 11
6.1.4.2. Resultados de la reconstrucción de COCOA. 12
6.1.5. Resumen y conclusiones. 18
6.2. Estabilidad de CMS entre 2008 y 2010. 19
6.2.1. Tiempo de estabilización de CMS en condiciones de operación. 20
6.2.2. Cálculo de T_S: método y resultados. 24
6.2.3. Estabilidad de CMS a largo plazo. 28
6.2.3.1. Períodos y dispositivos del sistema LINK monitorizados. 28
6.2.3.2. Resultados observados. 29
6.2.4. Resumen y conclusiones. 31
6.3. Estabilidad y movimiento de las estructuras de CMS observadas por el LINK entre el 2008 y el 2013. 32
6.3.1. Ciclos del imán y períodos de estabilidad. 32
6.3.2. Ejemplos de resultados monitorizados de las variables tomadas para estudiar la estabilidad mecánica. 37
6.3.2.1. Distancia axial relativa ΔZ (TP-CSC ME1/1). 37
6.3.2.2. Distancia radial relativa ΔR (TP-CSC ME1/2). 39
6.3.2.3. Distancia radial relativa ΔR (MAB-CSC ME1/2). 41
6.3.2.4. Rotación angular Δφ (MAB). 43
6.3.3. Resultados de la distancia axial Z (LD-AR) en los ciclos magnéticos durante los años de operación de CMS. 45
6.3.4. Estudio de las distancias ΔZ (LD-AR) observadas durante los períodos de estabilidad estudiados en los años de operación de CMS. 48
6.3.4.1. Temperaturas observadas en el volumen de CMS comprendido entre el LD y AR. 51
6.3.4.2. Correlación de ΔZ (LD-AR) con la temperatura. 53
6.3.5. Resumen y conclusiones. 56

Capítulo 7: Conclusiones. Capítulo 7. pág. 9

7.1. Líneas de investigación futuras.

Capítulo 8: Conclusions. Capítulo 8. pág. 9

8.1. Future research lines.

Referencias. Referenc.
Apéndice A. Apéndice A
Apéndice B. Apéndice B

V: Acrónimos.

AENOR	Asociación Española de Normalización y Certificación.
ALICE	A Large Ion Collider Experiment.
AN	Apertura Numérica.
AR	Alignment Ring.
ARC	Anti-reflection Coating (recubrimiento anti-reflejante).
ASPD	Amorphous Silicon Position Detectors.
ATLAS	A Toroidal LHC ApparatuS.
BD	Back Disc.
BH	Bulkhead.
BPix	Barrel Pixel.
BS	Divisor de Haz láser (Beam Splitter).
CAA	Anodizado con ácido crómico (Chromic Acid Anodization).
CAE	ataque con ácido crómico (Chromic Acid Etches).
CAF	CERN Analysis Facility.
CDA	Curva de Distribución de Amplitud.
CDF	Dollider Detector Fermilab.
CERN	Centre Europeen Research Nuclear (Laboratorio Europeo de Física de Partículas).
CFRP	Polímero reforzado con fibra de carbono (Carbon Fiber-Reinforced Polymer).
Ci	Curio, representa $3,7 \times 10^{10}$ desintegraciones nucleares por segundo (Becquerels (Bq)).
CIDA	Centro de Investigación y Desarrollo de la Armada.
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas.
CLIC	Compact Linear Collider.

CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor.
CMS	Compact Muon Solenoid.
COCOA	CMS Object Oriented Code for Optical Alignment.
CRAFT	Cosmics Run At Four Tesla.
CSC	Cathode Strip Chambers (Cámaras de pista catódicas).
CSs	Super-Cristales.
CTE	Coefficient of Thermal Expansion (Coeficiente de Expansión Térmica).
Cut-off	Longitud de Onda de Corte.
CVD	Chemical Vapour Deposition.
D0	Named for its location on the accelerator ring.
DB	Detector Box (Caja de Detección).
DCOPs	Digital CCD Optical Position Sensors.
DCS	Sistema general de Control del Detector (Detector Control System).
DT	Drift Tubes (tubos de deriva).
EB	Electron Beam Welding (Soldadura por haz de electrones).
EB	Zona cilíndrica o barril del calorímetro electromagnético.
EDR	Engineering Design Review.
EE	Tapa o Endcap del calorímetro electromagnético.
ELMB	Embedded Local Monitor Board.
FCC	Future Circular Collider.
FEIO	Font- End I/O.
FERMILAB	Fermi National Accelerator Laboratory.
FPix	Forward Pixel.
FPL	Ataque con ácido Forest Products Laboratory.
Gy	Gray= 1J/kg.

HB	Parte central o Barril del calorímetro Hadrónico.
HE	Tapas o Endcap del calorímetro Hadrónico.
HF	Parte alejada del IP 10 m o Forward del calorímetro Hadrónico.
HLT	High Level Trigger.
HO	Parte Externa del calorímetro Hadrónico.
IFCA	Instituto de Física de Cantabria.
ILC	International Lineal Collider.
INFN	Istituto Nazionale di Fisica Nucleare.
IP	Interaction Point (Punto de interacción).
IPE	Institut für Physikalische Electronik.
L	Luminosidad, es uno de parámetros más importantes de un detector, junto con su energía. Es la medida del número de colisiones que pueden producirse en un detector por centímetro cuadrado y segundo.
LB	Laser Box.
LCC	Linear Collider Collaboration.
LD	LINK Disc.
LEB	Local Electronic Board.
LEIR	Low Energy Ion Ring.
LEP	Large Electron-Positron.
LET	Linear Energy Transfer.
LHC	Large Hadron Collider.
LHCb	A Large Hadron Collider Beauty Experiment for Precision Measurements of CP Violation and Rare Decays.
LHCf	Large Hadron Collider forward.
Linac2	Linear accelerator 2.
Linac3	Linear accelerator 3.

LL	Nivel Laser (Laser Level).
LP	Longitudinal Profile.
LS1	Long Shutdown 1.
LSP	Laser Shock Processing (Laser Shock Peening).
LSZH	low-smoke zero halogen.
LTD	Laser Tracker Device.
MAB	Module for the Alignment of Barrel.
MEF	Método de los Elementos Finitos (Finite element method (FEM)).
MFD	Mode Field Diameter.
MMC	Máquinas de Medición por Coordenadas.
MTCC	Magnet Test and Cosmic Challenge.
NDE	Evaluaciones No Destructivas (Nondestructive Evaluation).
NIEL	Non-ionizing Energy Loss.
NIR	Near Infrared.
PA	Poliamida.
PAA	Anodizado con ácido fosfórico (Phosphoric Acid Anodization).
PAV	Polialcohol vinílico.
PE	Polietileno.
PEG	Polietilenglicol.
PP	Patch Panel.
PR	Prisma Romboide.
PS	Proton Synchrotron.
PSB	Proton Synchrotron Booster.
PVP	Polivinilpirrolidona.
PVSS II	Es un sistema SCADA.

rad	1 Gy= 100 rad= 1J/kg.
RDB	Relational Database.
RF	Radio Frecuencia.
R_M	Radio de Molière, para una cascada electromagnética de alta energía, es el radio del cilindro cuyo eje coincide con el momento de la partícula incidente tal que fuera de él se deposita el 10% de la energía.
ROOT	Es un software modular orientado a objetos, para entornos de trabajo científico.
ROSE	Research and development On Silicon for future Experiment.
RP	Radial Profile.
RPC	Resistive Plate Chambers (Cámaras de placas resistivas).
RTP	Resistance Temperature Detectors.
SAA	Anodizado con ácido sulfúrico (Sulfuric Acid Anodization).
SB	Zona cilíndrica del Preshower.
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition.
SCU	Unidad Acondicionadora de Señal (Signal Conditioning Unit).
SE	Región de las tapas del Preshower.
SEE	Efecto de un solo evento (Single Event Effets).
SLM	Straight Line monitor.
SPS	Super Proton Synchrotron.
SWE	Staebler-Wronski Effect.
SX5	Área de instalación en superficie, en el punto 5 del LHC.
TEC±	TRACKER EndCaps.
TeV	Tera Electrón Voltio ($1 \times 10^{12} \times 1.602 \times 10^{-19} = 1.6 \times 10^{-7}$ julios).

TEVATRON	Fue un sincrotrón que aceleró protones y antiprotones hasta una energía de 1 TeV.
T_g	Temperatura de transición vítrea.
THS	Taylor-Hobson Sphere.
TIB	TRACKER Inner Barrel.
TID	Total Ionizing Dosis.
TID±	TRACKER Inner Disks.
Tier-0	CERN Data Centre.
TL	Transfer Line.
TOB	TRACKER Outer Barrel.
TOTEM	TOTal cross section, Elastic scattering and diffraction dissociation Measurement at the LHC.
TP	ME1/1 Transfer Plate (Plataforma de transferencia de medida ME1/1).
UX5	Caverna experimental situada a 100 m de profundidad, en el punto 5 del LHC.
X_0	Longitud de radiación, se define como la distancia que debe recorrer un electrón en el material para que su energía se reduzca un factor e (~ 63.2%).
λ_I	Longitud de interacción, es la distancia media que recorrerá un hadrón antes de interactuar con el material.

VI: Lista de Figuras.

Figura	Capítulo 2.	Pg.
2.1	Esquema del complejo de aceleradores del CERN	1
2.2	Vista general del emplazamiento de los componentes del LHC.	3
2.2A	Sección transversal del crio-dipolo. En milímetros.	4
2.3	Esquema de los experimentos que componen el LHC.	6
2.4	Representación vectorial del momento de una partícula	8
2.5	Representación física de η sobre la sección longitudinal de CMS	8
2.6	Representación gráfica de la Fuerza de Lorentz.	9
2.7	Vista en perspectiva del detector CMS.	10
2.8	Vista longitudinal de CMS.	11
2.9	Vista transversal de CMS.	11
2.10	Ilustración de la trayectoria reconstruida por un muón, electrón, hadrón y fotón, sobre un sector de la sección transversal de CMS.	12
2.11	Densidad de partículas cargadas en función de la distancia al IP, con 4T y sin campo magnético.	13
2.12	Esquema de la sección longitudinal del TRACKER.	14
2.13	Vista 3D del Detector de Pixeles de Silicio de CMS y panel FPix.	14
2.14	Módulos del TIB, montados sobre una de las capas.	15
2.15	Rueda del TOB y vista del TOB+ completamente instrumentado.	16
2.16	Modulo compuesto de 2 sensores, del anillo 6 del TEC y vistas frontal y lateral del TEC.	16
2.17	Distribución del calorímetro electromagnético de CMS.	17
2.18	Sección longitudinal del ECAL.	18
2.19	Distribución del calorímetro hadrónico sobre una sección	20

longitudinal de un cuarto de CMS.

2.20 Vista de una mitad del HB del HCAL, compuesta por 18 módulos, preparada para ser insertada dentro del hueco del criostato. Y Sección transversal de uno de los módulos. 20

2.21 Vista del HE-, montado sobre el Endcap de CMS. Y sección longitudinal del HE. 21

2.22 Sección longitudinal de un cuarto de CMS con los diferentes tipos de detectores empleados en las regiones del espectrómetro de muones: cámaras de deriva (DTs), RPCs y CSCs. 22

2.23 Tubo de deriva de CMS y supercapa 23

2.24 Cámara de deriva y rueda YB-2 de CMS con todas las cámaras instaladas. 23

2.25 Cámara de pista catódica (CSC) y distribución de la estación de CSCs del Endcap ME2. 24

2.26 Solenoide de CMS y descenso a la caverna experimental UXC5 de la rueda central de CMS. 25

2.27 Sección del conductor y de uno de los cinco módulos del solenoide de CMS. 25

2.28 Distribución de la fuerza total Axial y Radial (por radian) inducida por el campo magnético sobre las diferentes partes de la estructura del hierro de retorno. 27

2.29 Distribución de edificios y zonas en el Punto 5 del LHC y sección longitudinal USC55 del área experimental donde se encuentra CMS. 27

2.30 Mapa del campo magnético de un cuarto del plano longitudinal de CMS y curva B-H del acero de construcción usado en L3, mostrando valor máximo y mínimo de la permeabilidad magnética del material. 28

2.31 Mapa de campo magnético y de líneas del campo de la mitad de CMS, cada línea del campo representa un incremento del flujo magnético de 6 Wb. 29

2.32 Desplazamiento horizontal (izq.) y vertical (der.) en mm de la rueda central (YB0) de CMS, debido a la gravedad. 31

2.33 Desplazamiento horizontal (izq.) y vertical (der.) en mm de las ruedas central YB±1 e YB±2 de CMS, debido a la gravedad. 31

2.34	Desplazamiento Vertical del Endcap de CMS debido a la gravedad (izq.) y por la gravedad y el campo magnético (der.), en metros.	32
2.35	Desplazamiento en Z del Endcap de CMS debido a la gravedad (izq.) y por la gravedad y el campo magnético (der.), en metros.	32
2.36	Desplazamiento en Z del Endcap de CMS debido al campo magnético, en metros.	33
2.37	Dosis absorbida en Gy en CMS. Corresponden a la luminosidad equivalente esperada para los 10 años de operación.	36
2.38	Flujo de neutrones en CMS y la caverna UXC55. Corresponde a una simulación FLUKA con el máximo valor de luminosidad del LHC (10^{34} cm^{-2} s^{-2}).	37
2.39	Flujo de partículas cargadas (hadrones y muones) en CMS y la caverna UXC55. Corresponde a una simulación FLUKA con el máximo valor de luminosidad del LHC (10^{34} cm^{-2} s^{-2}).	37

Figura **Capítulo 3.** **Pg.**

3.1	Vista esquemática longitudinal y transversal del sistema de alineación de CMS.	3
3.2	Vista longitudinal de un cuarto de plano del TRACKER. Trazos purpura representan módulos de microtiras simples y los blanco de doble-cara, las líneas negras los módulos del pixel. También se muestran los rayos del sistema de alineación, los beam splitter (B) y el tubo de alineación (A) del sistema de alineación láser. Alignment Ring (AR), nexo con Sist. Alin. LINK.	5
3.3	Tubos de alineación del TRACKER, que distribuye la luz del rayo láser de entrada a 4 sub-estructuras distintas relacionándolas entre sí (ray 1).	6
3.4	Esquema de elementos implicados en la transferencia de medida del TRACKER al LINK.	8
3.5	Modelo 3D de la estructura TEC y AR.	8
3.6	Vista esquemática del sistema de alineación del BARREL. La medida de las 250 DTs se basa en las 36 estructuras MABs y 6 Z-bar para la medida en Z, todos estos elementos están conectados ópticamente entre sí.	9

3.7	MAB activo de la rueda YB±2 con la distribución de los elementos situados sobre su estructura.	10
3.8	Banco de calibración de los MABs en la zona de los ISR del CERN.	11
3.9	Principio de la medida y referenciación de las DTs.	11
3.10	Banco de calibración de las DTs en la zona de los ISR del CERN.	12
3.11	MAB de la rueda YB+2 con las marcas de referencia para la fotogrametría y referenciación mediante fotogrametría digital de los MABs y DTs de la rueda YB+2.	12
3.12	Vista esquemática de la geometría y componentes del sistema de alineación del ENDCAP. Los elementos cuadrados representan sensores DCOPs.	13
3.13	Vista esquemática transversal de las líneas SLM (izquierda) y axial 'Transfer Line' (derecha) del sistema de alineación ENDCAP.	14
3.14	Rueda YE+2 de CMS donde se muestra la situación de los componentes del sistema de alineación ENDCAP de una SLM sobre la estación de muones ME+2. En el recuadro inferior-derecho aparece la YE+1 indicando la situación de los sensores de proximidad sobre la ME+1.	14
3.15	Vista isométrica de una 'Transfer Plate' de la ME4 (izquierda) y de dos CSCs internas de la ME2 (derecha).	15
3.16	Representación esquemática de los componentes del sistema de alineación LINK sobre un cuadrante ZR de CMS.	17
3.17	Región del TRACKER, donde se muestra el AR+ instalado, totalmente instrumentado y listo para entrar en funcionamiento (Enero 2015).	18
3.18	Región η=3 vista hacia el IP, Se muestra el LD+ instalado y totalmente instrumentado.	19
3.19	Región η=3 vista desde el IP, Se muestra el LD- instalado y totalmente instrumentado. Y detalle del extremo opuesto de los LPs con pantallas para sensor de proximidad Z del TRACKER.	19
3.20	Detalle de la parte inferior de la de la ranura practicada sobre el YN1, vista desde la región de η=3. Y ranura con el RP instrumentado insertado.	20

3.21	Detalle de la parte inferior de YN1, vista desde la región de η=3, con el LINK Disc instalado sobre los RP.	20
3.22	Izquierda, detalle de la parte superior de YN-1, vista desde la región de ME1/1. Derecha, momento de la inserción del RP en una ranura de YN+1.	21
3.23	Región ME 1/1 y zona inferior de la ME 1/2 (lado negativo).	22
3.24	Izquierda, dispositivo mecánico montado sobre CSC de la ME 1/1 (lado positivo). Derecha, ME 1/1 Transfer Plate abierta (lado negativo).	22
3.25	Región ME 1/2 (lado negativo).	23
3.26	Región del MAB (lado positivo).	24
3.27	Esquema de los caminos de luz que siguen los 3 tipos de rayos láser disponibles en el sistema LINK sobre un cuadrante RZ de CMS.	25
3.28	Banco de calibración de las estructuras del sistema de alineación LINK, en la zona de los ISR del CERN.	26
3.29	AR (negativo) y su panel de conexiones (PP) en la región del Tracker, detalle PP del AR y colimador FC5-TiFS-NIR de la firma Micro Laser.	28
3.30	ASPD del sistema LINK. Y estructura interna del foto-detector.	29
3.31	Inclinómetros utilizados en el sistema de alineación LINK.	30
3.32	Esquema del interior de un inclinómetro electrolítico.	30
3.33	Principio de funcionamiento por triangulación láser del distanciómetro y OMRON Z4M‑W100 con su electrónica amplificadora de señal.	32
3.34	Principio de funcionamiento de un sensor potenciométrico.	33
3.35	Distanciómetros SLS095-10 y 18FLPA50, utilizados por el sistema de alineación LINK.	33
3.36	Esquema del funcionamiento de una RTD midiendo con la configuración de 4 hilos.	35
3.37	Esquema de una sonda SENTRON AG 2H-VH-11 con su sistema de coordenadas CMS (Izq.). Efecto Hall (Der.).	36
3.38	Esquema de la estructura del sistema de lectura y control del sistema de alineación LINK.	37

3.39	Crates del Sistema de Alineación LINK situados en los racks de los 'Balconies' de CMS, donde se encuentran las tarjetas ELMBs y LEBs.	38
3.40	Sección trasversal de la caverna experimental UXC55 donde está situado CMS, que muestra esquemáticamente la salida de cables y fibras del sistema LINK sobre las ruedas YB±2, desde el PP situado en la región de los MAB hasta los racks en los 'Balconies' (cables) o PP a pie de rueda (fibras) y su salida hacia la caverna de servicios USC55.	39
3.41	Arquitectura del sistema de adquisición de datos utilizado por el sistema de alineación LINK.	40
3.42	Diferentes figuras de los paneles que aparecen en el software PVSS para la monitorización del sistema de alineación LINK. Panel principal con las 12 líneas de cuadrantes del LINK, panel donde aparece la medida sobre un ASPD y panel de lectura donde se están leyendo los valores de inclinómetros.	41

Capítulo 4.

Figura		Pg.
4.1	Configuración experimental para realizar el estudio de atenuación en fibras ópticas irradiadas.	8
4.2	En la figura de la izquierda, aparece la atenuación inducida a las fibras 3M-I, 3M-II, OFS y Corning, para la longitud de onda de 630 nm. A la derecha se muestra la atenuación para la fibra de Nufern a 670 nm. Ambas expresadas en función a la dosis total acumulada.	9
4.3	Esquema de la configuración experimental utilizada para la medida activa, de la atenuación de la fibra, en la instalación NAYADE.	10
4.4	Esquema de la distribución de componentes utilizada en la medida activa de la atenuación de la fibra.	11
4.5	La grafica de la izquierda representa la atenuación óptica que sufre la fibra en función de la dosis de gammas recibida para 681 nm. A la derecha se muestra la atenuación óptica que experimenta la fibra para una fluencia total de 2×10^{14} cm^{-2} neutrones, para las longitudes de onda de 630, 670, 681 y 785 nm.	12
4.6	Ciclotrón MGC-20E de ATOMKI, utilizado para realizar las pruebas de resistencia frente a neutrones de los componentes del sistema LINK.	12
4.7	Esquema del Banco de calibración para los ASPDs.	14

4.8	Ejes del ASPD (izquierda) y esquema de la deflexión producida al atravesar un ASPD (derecha).	15
4.9	Ejemplo de la reconstrucción de la señal de una mancha del haz láser sobre la coordenada X (izquierda) e Y (derecha) del ASPD.	15
4.10	Distribución de la transmitancia medida sobre el conjunto de todos los ASPDs del sistema LINK.	17
4.11	Disposición experimental para la prueba del sistema de alineación multipunto, utilizando hasta 12 ASPDs atravesados por el mismo haz. Izquierda, disposición de 5 ASPDs formando una línea de 5.5 m. Centro, disposición con 12 ASPDs formando una línea de 13 m. Derecha, disposición de 12 ASPDs formando una L de 20 m, mediante un penta-prisma que gira el haz 90º.	18
4.12	Disposición experimental para la iluminación prolongada con 9 LEDs sobre 4 ASPDs.	22
4.13	Configuración experimental para la caracterización de los inclinómetros utilizados por el sistema de alineación LINK.	23
4.14	Configuración experimental para el inclinómetro 1D M756, sobre el electroimán clásico disponible en el Laboratorio de Metrología del IFCA.	27
4.15	Configuración experimental para los inclinómetros 1D M756 y 2D M756 en el electroimán CERN M1.	28
4.16	Configuraciones experimentales para la caracterización de los distanciómetros ópticos, en el laboratorio de Metrología del IFCA. Izquierda, caracterización relativa. Derecha, caracterización absoluta.	29
4.17	Configuración experimental para la caracterización de los potenciómetros, en el laboratorio de Metrología del IFCA.	31
4.18	Elementos que componen una Laser Box.	33
4.19	Elementos de ajuste para la calibración y fijación del LB.	34
4.20	Variación de la Reflectancia y Transmitancia del Silicio Fundido de grado óptico (Izquierda) y del BK7-G18, con triple tratamiento anti-reflejante estándar (Derecha), tras 10 MRad de irradiación.	35
4.21	Variación de la Reflectancia de los recubrimientos reflejantes depositados sobre vidrio BK7-G18, tras 10 MRad de	36

irradiación.

4.22 Configuración experimental de la medición por contacto realizada sobre el retro-reflector de BK7. En la figura de la izquierda se encuentran los 3 prismas pegados entre sí que componen un retro-reflector. La figura central muestra la medición del retro-reflector irradiado con 10 MRad. Y la figura derecha muestra la MMC con el retro-reflector sobre su mesa durante una medición. 37

4.23 Gonio-espectrómetro VIS y esquema de la medida realizada sobre las probetas circulares y rectangulares de BK7-G18 unidas con diferentes sistemas adhesivos. 38

4.24 Transmitancia (en %) de las probetas de BK7-G18 unidas mediante diferentes métodos adhesivos, en función de la longitud de onda, para varios niveles de irradiación. 40

4.25 Transmitancia (en %) de las probetas de Cuarzo Sintético unidas mediante diferentes métodos adhesivos, en función de la longitud de onda, para varios niveles de irradiación. 41

4.26 Transmitancia (en %) de las probetas de BK7-G18 unidas mediante NOA61 (izquierda) y Cuarzo Sintético unidas mediante LOCTITE (derecha), en función de la longitud de onda, para 15 MRad y una fluencia total de neutrones de $5 \times 10^{14} \pm 37\%$ cm^{-2}. 42

4.27 Sistema de referencia local del ASPD (Izquierda). Encapsulado de un Detector Box, perteneciente a la posición ME1/2 top, lado Z+ (Derecha). 43

4.28 Encapsulado de un Detector Box, perteneciente a la posición ME1/2 top, lado Z+, mostrando sus elementos y puntos de referencia. 43

4.29 Encapsulado de un Detector Box, perteneciente a la posición ME1/2 top, lado Z+ (Izquierda) y a la posición ME1/2 bottom, lado Z+ (Derecha). 44

4.30 Encapsulado de un Detector Box, perteneciente a la posición MAB, lado Z+. 45

4.31 Encapsulado de una TP, perteneciente a la posición 75º, lado Z+. 45

4.32 Encapsulado de un LL, perteneciente a la posición 15º, lado Z+. 46

4.33 LL de la posición 135º, lado +Z, instalado en su MAB, durante el proceso de referenciación mediante fotogrametría digital 47

(izquierda). Encapsulado de un LL, perteneciente a la posición 15º, lado –Z (derecha).

4.34 Estructura de alineación del sistema de alineación LINK de CMS. 48

4.34A Distribución de los Bancos de Calibración situados en el área de los ISR, para el sistema de alineación BARREL y LINK. 50

4.34B Banco de Calibración del sistema de alineación LINK en los ISR. 51

4.34C Estándar 'socket' del CERN, montado sobre una mecánica interface de regulación, que va fijado sobre hormigón (Izq.). Montaje de un fotodetector matricial 2D para ser utilizado en el posicionamiento de rayos láser respecto al centro de la esfera de Taylor-Hobson de los 'socket' CERN (Cent.). 'Target' utilizado para la medición de la red con el Laser Tracker (Der.). 52

4.35 Alignment Ring del lado positivo (AR+Z). 53

4.36 Detalle de una de las 3 fijaciones del AR al Pilar del BD (Izq.). Mecánica de ajuste del Colimador del AR (Der.). 54

4.37 Banco de Calibración para los ARs en el área de los ISR. 56

4.38 AR+ durante la realización de la fotogrametría digital en el banco de calibración de los ISR (Izq). AR- con los 6 rayos de los colimadores pasando por los centros de las esferas de Taylor-Hobson, situadas en los puntos de la red geodésica cercanos (Der.). 57

4.39 TP del lado Z negativo instrumentada con los 'targets' de fotogrametría, durante su calibración en el área de los ISR. 59

4.40 TP y dispositivos circundantes, montado sobre la YE+1, con los 'targets' de fotogrametría colocados, durante una campaña de referenciación de estos elementos respecto al sistema global de CMS. 60

4.41 Detalle del RP fijado sobre la TP (Izq.). Detalle de la Fijación del RP sobre el LD (Der.). 61

4.42 Apoyo rótula del LP en la parte baja del RP (Izq.). Detalle del apoyo rótula del LP montado en CMS (Der.). 61

4.43 Detalle del apoyo deslizante intermedio del LP, sobre el calorímetro hadrónico (Izq.). Detalle del extremo del LP que llega al AR (Der.). 62

4.44	Banco de calibración de los perfiles radiales (Superior). 'Targets' de fotogrametría colocados sobre los agujeros de referencia del RP (Inferior).	63
4.45	Banco de calibración de los perfiles longitudinales, donde se ven los detalles de los target de fotogrametría utilizados sobre los extremos del perfil.	64
4.46	Detalle de la sección del LD, donde se muestra la distribución interna de capas de fibra de carbono que forman la estructura (Izq). Detalle del inserto inferior de la LB, con 'PIN' para reposicionado (Der.).	65
4.47	LD del lado negativo de CMS, con los insertos que traía de fábrica (Izq.). Operación de pegado del inserto para el inclinómetro, posicionado respecto a insertos del LB, sobre el LD del lado positivo (Cent.). Operación de pegado de los insertos de fotogrametría (PG)/'Survey' sobre el LD+ (Der.).	65
4.48	LD del lado positivo de CMS totalmente instrumentado.	66
4.49A	Banco de calibración del LD, en posición horizontal, en el área de los ISR.	67
4.49B	Banco de calibración del LD, en posición vertical respecto a su AR, en el área de calibración de los ISR.	68
4.50	Detalle de la calibración del LD en posición horizontal (Izq.). Detalle de la calibración del LD en posición vertical (Der.).	69
4.51	Deformación experimentada por la membrana tipo sándwich de 20 mm espesor y Ø=2 m, a ser sometida a un gradiente de 1 ºC.	73
4.52	Modelos planos de alambres simulando la estructura de alineación LINK.	74
4.53	Modelo sólido simulando la estructura de alineación LINK.	76
4.54A	Resultados de desplazamientos (Izq.) y rotaciones (Der) que sufre la estructura LINK, con carga térmica de +3 ºC, al encender el imán (valores en m y en rad).	76
4.54B	Resultados de desplazamientos (Izq.) y rotaciones (Der) que sufre la estructura LINK, con carga de gravedad y térmica de +3 ºC, en la situación de montaje, con el imán apagado (valores en m y en rad).	77
4.55	Modelo sólido del LD sobre apoyos isostáticos (Izq.). Desplazamientos totales que sufre el LD con cargas de	78

gravedad y térmicas de +3 ºC (Der.).

Figura	Capítulo 5.	Pg.
5.1	Esquema de una Unión Adhesiva.	3
5.2	Equilibrio de tensiones de una gota líquida sobre una superficie sólida.	7
5.3	Distribución de tensiones en una unión adhesiva y otra soldada por puntos.	9
5.4	Representación esquemática de las etapas de polimerización por poliadición y policondensación.	11
5.5	Efecto que el tratamiento superficial, de una unión de aleación de aluminio con epoxi sumergido en agua a 50ºC, tiene sobre la durabilidad de la junta adhesiva (Fuente ref. [236]).	19
5.6	Esquema de funcionamiento de un LSP.	21
5.7A	Representación de la superficie creada tras un ataque FPL (Izq.). Estéreo-micrografía electrónica de barrido de una superficie atacada con FPL (Der.). Fuente Ref. [231].	22
5.7B	Componentes del sistema de alineación LINK, que van fijados sobre el Link Disk (LD) a los que se le aplicó un tratamiento CAE, para su pegado sobre la rueda y componentes con tratamiento SAA, para su pegado en la rueda, en el caso de la pieza de la figura derecha.	23
5.8	En la figura de la izquierda (fuente Ref. [241]) se aprecia una representación de la capa de óxido creada tras el anodizado. En la de la derecha aparece un conjunto de piezas, pertenecientes al montaje de una rótula del LD que va pegada en su interior y cuyas piezas tienen el tratamiento SAA.	24
5.9	Representación de la capa de óxido formada con el proceso CAA (Fuente Ref. [229]).	25
5.10	Representación de la capa de óxido formada con el proceso PAA (Fuente Ref. [229]).	25
5.11	Esquema de los diagramas tensión-deformación en materiales elástico frágil (Izquierda), elastoplástico (Centro) y elástico no lineal (Derecha).	26
5.12	Variación de la resistencia de la unión adhesiva en función de la anchura y longitud de solapamiento de la junta (fuente Ref. [230]).	32

5.13	Distribución de tensiones esquemática, en los extremos pegados de una junta solapada, con el adhesivo rematado en esquina y en ángulo (fuente Ref. [231].	33
5.14	Representación de la relación entre la resistencia de una junta adhesiva y el factor de junta (fuente Ref.[230]).	33
5.15	Tensión de rotura de uniones a solape en función del espesor del adhesivo de poliuretano (fuente Ref.[243]).	34
5.16	Carga estática y de impacto que absorbe una junta solapada con 4 adhesivos distintos (fuente Ref. [232]).	35
5.17	Tipos de defectos que pueden aparecer en una unión adhesiva.	36
5.18	Soporte de sujeción de una probeta estándar para ensayos de impacto Izod en adhesivos.	39
5.19	Dimensiones de las probetas normalizadas para ensayo de impacto de adhesivos.	40
5.20	Clasificación de los materiales en función de su resistencia a radiación (Fuente Ref. [37]).	42
5.21	Resultados de los test de flexión realizados a probetas de epoxi sin irradiar e irradiadas a diferentes dosis, en vacío y al aire (Fuente Ref. [34]).	43
5.22	Efectos de la radiación sobre las resinas termoestables (Fuente Ref. [35]).	44
5.23	Clasificación de la resistencia frente a irradiación de las resinas termoestables y materiales compuestos (Fuente Ref. [37]).	44
5.24	Efecto de la radiación gamma sobre probetas de Araldit 2011 sometidas a tracción según ISO R-527 (Izq.) y sobre ensayos de pelado según ASTM D 1876 con adherentes compuestos de fibra de vidrio con epoxi (Der.).	47
5.25	Efecto de la radiación gamma sobre probetas de ensayos de pelado según ASTM D 1876, pegadas con Araldit 2011, con adherentes de aluminio, y tratamiento superficial previo de chorreado con arena (Izq.) o con desengrasado más ataque superficial con sosa caustica (Der.).	48
5.26	Efecto de los neutrones rápidos sobre probetas de ensayos de pelado según ASTM D 1876 (pero reduciendo la superficie pegada a 1 cm^2), pegadas con Araldit 2011, con adherentes	48

de aluminio, y tratamiento superficial previo de chorreado con arena.

5.27 Deformación esquemática en una junta solapada simple con adherente rígido (Izq.) o elástico (Der.). 49

5.28 Análisis de tensiones según la teoría de Volkersen. 50

5.29 Análisis de tensiones según la teoría de Goland y Reissner. Aplicando una carga pequeña (Superior) o una carga suficiente para deformar la junta (Inferior). 53

5.30 Comparación de los resultados de Goland-Reissner y Volkersen con elementos finitos (Fuente Ref. [229]). 56

5.31 Deformación transversal causada por el efecto Poisson sobre una junta solapada simple. 56

5.32 Desarrollo de las distribuciones de tensión y deformación por cortadura en una junta solapada doble, sobre la que se incrementa gradualmente la carga aplicada (Izq.), según teoría de Hart-Smith y curvas tensión deformación a cortadura de un adhesivo, mostrando diferentes modelos matemáticos alternativos (Der.) (Fuente Ref. [232]). 57

5.33 Geometría de la junta simulada y condiciones de contorno utilizadas en todos los casos (Fuente Ref. [229]). 57

5.34 Resultado del análisis tensional por elementos finitos a distintas juntas adhesivas (Fuente Ref. [229]). 59

5.35 Comparativa de tensiones a las que se ve sometida una junta solapada simple con el extremo de la zona pegada acabada en esquina respecto a la acabada en chaflán de 45º (Fuente Ref. [229]). 60

5.36 Esquema de una muestra utilizada para un test de impacto en cuña. 62

5.37 Esquema de un sistema de Hopkinson utilizado para caracterizar juntas solapadas. 62

5.38 Desalineaciones que pueden darse al impactar el martillo sobre la probeta, en un test de resistencia a la cizalladura por impacto. 63

5.39A Distribuciones de tensiones de tracción y cortadura en el punto medio de la capa de adhesivo por unidad de carga aplicada, en un ensayo de resistencia a la cizalladura por impacto (Fuente Ref. [253]). 64

5.39B	Distribuciones de tensiones principales máximas en la zona superior de la capa de adhesivo (U) y en la inferior (L) por unidad de carga aplicada, en un ensayo de resistencia a la cizalladura por impacto (Fuente Ref. [253]).	64
5.40	Resistencia a cortadura de juntas metálicas según ISO 4587, con un pre-tratamiento de chorreado con arena (Fuente Ref. [166]).	67
5.41	Resistencia a cortadura de juntas no metálicas según ISO 4587, con un pre-tratamiento de ligera abrasión superficial y desengrase con alcohol (Fuente Ref. [166]).	67
5.42	Resistencia a cortadura de una junta en función de la temperatura, según ISO 4587: (a) curado durante 7 días a 23ºC y (b) curado durante 24 h a 23º más 30 minutos a 80ºC (Fuente Ref. [166]).	67
5.43	Resistencia a cortadura de una junta frente al envejecimiento por temperatura. Curado durante 16 h a 40º C. (Fuente Ref. [166]).	67
5.44	Probetas de impacto tipo $P_{II}{}^{t}$ con distintas secciones pegadas.	71
5.45	Dimensiones de las probetas P_{II} y $P_{II}{}'$ utilizadas para el estudio de la energía absorbida por impacto (Izq.) y de las probetas P_{I} utilizadas para el estudio de la estabilidad de la unión adhesiva (Der.), frente a la irradiación.	72
5.46	Utillaje de adaptación de probeta Izod con instrumentación Charpy, y que corresponde a la disposición con martillo de 5 J (Izq.). Representación 3D de la disposición con martillo de 5 J (Centro) y de 50 J (Der.).	73
5.47	Pieza 'base' de las probetas, donde aparece su número grabado mediante un lápiz eléctrico vibratorio.	74
5.48	Desengrasado en máquina de ultrasonidos, previo al ataque con ácido, de las piezas que componen las probetas.	74
5.49	Material utilizado para realizar el preparado: Dicromato potásico (Izq.), pesaje del dicromato en báscula de precisión (Central izq.), medida del ácido sulfúrico (Central der.) y medida del agua a la salida de la máquina (Der.).	75
5.50	Piezas de las probetas durante la fase de calentamiento previo a su introducción en la disolución (Izq.). Aspecto que presenta la mezcla en tres momentos distintos del tratamiento (Der).	76

5.51	Notación empleada para describir los parámetros de rugosidad superficial.	77
5.52	Parámetros R calculados sobre el perfil de rugosidad superficial.	79
5.53	Medición de la rugosidad en la coordenada 'y' sobre la pieza 'tapa' de la probeta P_{II} nº. 52, con el rugosímetro Perthometer M1. Aquí se muestran las diferentes probetas evaluadas, con los sistemas de referencia utilizados en cada una de ellas.	80
5.54	Variación de R_a en función del nivel de agresión superficial, comparando: las piezas 'base' de las probetas en la dirección x (zona izquierda del gráfico), las piezas 'base' en la dirección y (zona central) y las piezas 'tapa' (zona derecha).	89
5.55	Variación de la relación R_v/R_p en función del nivel de agresión superficial, comparando: las piezas 'base' de las probetas en la dirección x (zona izquierda del gráfico), las piezas 'base' en la dirección y (zona central) y las piezas 'tapa' (zona derecha).	89
5.56	Variación de R_{sk} y R_{ku} en función del nivel de agresión superficial, comparando: las piezas 'base' de las probetas en la dirección x (zona izquierda del gráfico), las piezas 'base' en la dirección y (zona central) y las piezas 'tapa' (zona derecha).	90
5.57	Probetas P_{II} y P_I durante su proceso de curado.	91
5.58	Probetas P_{II}' durante su proceso de curado.	92
5.59	Temperatura y humedad relativa a que han estado sometidas las probetas durante el proceso de curado y algunos ensayos de la estabilidad dimensional, (aparecen agrupados los diferentes períodos de estudio).	92
5.60	Vista exterior de la Instalación Náyade (Izq). Vista superior de la piscina, donde se muestra la distribución de fuentes agrupadas en 6 lotes (Der. Superior). Porta muestras escogido para el ensayo, colocado en el centro del lote de fuentes utilizada (Der. Inferior).	94
5.61	Fuentes utilizadas en la instalación Náyade, son varillas cilíndricas de 100 mm de longitud (Izq.) y porta muestras que pertenece al dispositivo de irradiación GIII (exterior) (Centro). Distribución de las probetas en el interior del porta muestras (Der.).	95
5.62	Disposición que tienen las probetas dentro del volumen útil disponible, en el interior del dispositivo porta muestras que se ha utilizado, para su irradiación en la instalación Náyade.	96

5.63	Dosímetros utilizados para realizar la dosimetría FRICKE, montados en el útil que los posiciona dentro del porta muestras utilizado.	97
5.64	Cronograma utilizado para la primera campaña de irradiación de las probetas P_I y P_{II} estudiadas.	100
5.65	Cronograma utilizado en la segunda campaña de irradiación de las probetas P_I y P_{II}' estudiadas.	101
5.66	Aspecto que presentan las probetas que han sido sometidas a la primera (fila superior) y segunda campaña (fila inferior) de irradiación.	102
5.67	MMC Mitutoyo EURO C-574 APEX del Ciemat durante el proceso de control dimensional de una probeta P_I (Izq.). Detalle durante el control a la probeta P_I (Centro). Detalle durante el control a la probeta P_{II} (Der.). En las figuras aparece el sistema de referencia utilizado en el control de las probetas P_I y P_{II}.	103
5.68	Ventana del programa MCOSMOS, donde aparecen los diferentes puntos tomados sobre la probeta P_I y los elementos creados con estos.	104
5.69	Ventana del programa MCOSMOS, donde aparecen los diferentes puntos tomados sobre la probeta P_{II} y los elementos creados con estos.	106
5.70	Posible distorsión que produce la irradiación en la junta adhesiva.	108
5.71	Estabilidad dimensional de las probetas P_{II}, tras la primera campaña de irradiación.	112
5.72	Comparativa de la estabilidad dimensional de las probetas P_{II}, sometidas a una humedad del 90%RH y 26ºC durante una semana, respecto a las de referencia en condiciones ambientales normales.	115
5.73	Estabilidad dimensional temporal de la junta adhesiva para las probetas P_I-*1* hasta P_I-*5*.	117
5.74	Estabilidad dimensional temporal de la junta adhesiva para las probetas P_I-*6* hasta P_I-*10*. Son las probetas de referencia de las P_I-*6* hasta P_I-*10.*	117
5.75A	Estabilidad dimensional temporal de la junta adhesiva para las probetas P_{II}-*1* hasta P_{II}-*6*.	118

5.75B	Estabilidad dimensional temporal de la junta adhesiva para las probetas P_{II}-*7* hasta P_{II}-*12*. Son las probetas de referencia de las P_{II}-*1* hasta P_{II}-*6.*	118
5.75C	Estabilidad dimensional temporal de la junta adhesiva para las probetas P_{II}-*49* hasta P_{II}-*56*.	118
5.75D	Estabilidad dimensional temporal de la junta adhesiva para las probetas P_{II}-*57* hasta P_{II}-*64*. Son las probetas de referencia de las P_{II}-*49* hasta P_{II}-*56.*	119
5.75E	Estabilidad dimensional de la junta adhesiva para las probetas P_{II}-*9* hasta P_{II}-*12*.	119
5.75F	Estabilidad dimensional de la junta adhesiva para las probetas P_{II}-*49* hasta P_{II}-*54*.	119
5.76	Máquina de ensayo de impacto utilizada, con el utillaje de adaptación a las probetas P_{II} y P_{II}‘ instalado (Izq.). Fundamento del ensayo Izod (Der.).	121
5.77	Selección del área de adhesivo que ha quedado pegada a la superficie de la pieza ‘base’, mediante tratamiento de imágenes, en las probetas P_{II}, números 6, 7 y 8.	123
5.78	Probetas P_{II}, números 25, 26 y 27, ensayadas durante la primera campaña; donde se aprecia el chaflán de adhesivo sobrante, en la esquina formada por ambas piezas de cada probeta, sobre la cara de impacto. En el lateral derecho de la cara de impacto se observa la huella descentrada dejada por el péndulo al impactar sobre las probetas (Izq.). Distribución del adhesivo en ambos sustratos tras la rotura (Der.).	125
5.79A	Representación gráfica de los resultados obtenidos por grupos de irradiación, en la primera campaña de ensayos, sobre las probetas P_{II}. Para dosis de 50 KGy, 10 KGy y sin irradiar.	127
5.79B	Representación gráfica de los resultados obtenidos por grupos de irradiación, en la primera campaña de ensayos, sobre las probetas P_{II}. Para dosis de 100 KGy y 303,1 KGy.	128
5.80	Resistencia de las probetas P_{II}, frente a la radiación recibida por la junta adhesiva, durante la primera campaña de ensayos IZOD.	129
5.81	Probetas P_{II}’, números 25 al 31, ensayadas durante la segunda campaña. En la cara de impacto se observa la huella dejada por el péndulo al impactar sobre las probetas (Superior). Distribución del adhesivo despegado en ambos	130

sustratos tras la rotura (Inferior), se observa la relación de la dirección de rotura con la posición de la huella del péndulo.

5.82A Representación gráfica de los resultados obtenidos por grupos de irradiación, en la segunda campaña de ensayos, sobre las probetas P_{II}. Para dosis de 10 KGy y sin irradiar. 133

5.82B Representación gráfica de los resultados obtenidos por grupos de irradiación, en la segunda campaña de ensayos, sobre las probetas P_{II}. Para dosis de 50 KGy, 100 KGy y 303,1 KGy. 134

5.83 Curva Fuerza-Tiempo de la probeta P_{II} 9 (Izq.), irradiada a 303 KGy; P_{II} 46 (Cent.), irradiada a 10 KGy; y P_{II} 51 (Der.), sin irradiar, durante la segunda campaña de ensayos. Impacto ligeramente descentrado a la derecha. 135

5.84 Curva Fuerza-Tiempo de la probeta P_{II} 12 (Izq.), irradiada a 303 KGy; P_{II} 21 (Cent.), irradiada a 100 KGy; y P_{II} 49 (Der.), sin irradiar, durante la segunda campaña de ensayos. Impacto centrado. 135

5.85 Resistencia de las probetas P_{II}, frente a la radiación recibida por la junta adhesiva, durante la segunda campaña de ensayos IZOD. 136

5.86A Representación gráfica de los resultados obtenidos por grupos de irradiación, en la segunda campaña de ensayos, sobre las probetas P_{II}'. Para dosis de 50 KGy, 10 KGy y sin irradiar. 140

5.86B Representación gráfica de los resultados obtenidos por grupos de irradiación, en la segunda campaña de ensayos, sobre las probetas P_{II}'. Para dosis de 100 KGy, 303,1 KGy y 2070,88 KGy. 141

5.87 Curva Fuerza-Tiempo de la probeta P_{II}' 2 (Sup. Izq.), irradiada a 303 KGy; P_{II}' 17 (Sup. Cent.), irradiada a 100 KGy; y P_{II}' 28 (Sup. Der.), irradiada a 50 KGy; P_{II}' 38 (Inf. Izq.), irradiada a 10 KGy; P_{II}' 56 (Inf. Cent.), sin irradiar; y P_{II}' 45 (Inf. Der.), irradiada a 2071 KGy; durante la segunda campaña de ensayos. Impacto descentrado. 142

5.88 Curva Fuerza-Tiempo de la probeta P_{II}' 5 (Sup. Izq.), irradiada a 303 KGy; P_{II}' 14 (Sup. Cent.), irradiada a 100 KGy; y P_{II}' 27 (Sup. Der.), irradiada a 50 KGy; P_{II}' 37 (Inf. Izq.), irradiada a 10 KGy; P_{II}' 59 (Inf. Cent.), sin irradiar; y P_{II}' 20 (Inf. Der.), irradiada a 2071 KGy; durante la segunda campaña de ensayos. Impacto centrado. 143

5.89 Resistencia de las probetas P_{II}', frente a la radiación recibida por la junta adhesiva, durante la segunda campaña de 144

ensayos IZOD.

Figura	Capítulo 6.	Pg.
6.1	Vista transversal del sistema de muones del barrel donde se indican los elementos instalados durante la prueba del imán.	2
6.2	Representación esquemática de los componentes del sistema de alineación LINK sobre un cuadrante ZR de CMS, durante las pruebas del imán.	2
6.3	Ilustración del efecto de movimiento permanente y cuasi-elástico durante los ciclos de encendido y apagado del imán de la *fase I* del MTCC.	5
6.4	Ilustración del efecto de movimiento cuasi-elástico durante los ciclos de encendido y apagado del imán de la *fase II* del MTCC.	6
6.5	Esquema de la deformación que se produce entre las ruedas de CMS como resultado del campo magnético (Izq.). Resultado del movimiento relativo que se produce entre el YE1 y el TRACKER, en función de la intensidad del campo magnético (Der.).	6
6.6	Reconstrucción de la posición de impacto del láser sobre los ASPDs en la coordenada Z y Rφ, en función del campo magnético, en los tres cuadrantes estudiados durante el MTCC.	8
6.7	Residuos definidos como diferencia en posición (mm) entre los valores ajustados a B=0T y los valores de fotogrametría (a) y diferencia en Rφ (b) y en Z (c) entre los valores reales medidos por el sensor y los simulados de la intersección de haz laser con éste. Un parámetro importante que se introduce en COCOA es la precisión de los valores medidos.	14
6.8	Sistemas de coordenadas locales de las CSCs (a) situadas sobre la YE+1 y de los MABs (b) de la YB+2.	15
6.9	Esquema donde se muestra un cuadrante RZ del sistema de alineación LINK de CMS. Las medidas de distancia que se han utilizado para estudiar la evolución de la deformación han sido R (MAB- CSC ME1/2), Z (TP-CSC ME1/1) y Z (LD-AR).	20
6.10	Datos del sistema de alineación LINK tomados durante el CRAFT08 y CRAFT09, en el RUN de datos de estabilización, que muestran: intensidad de campo magnético (a y b); desplazamiento relativo ΔZ (LD-AR) en el cuadrante φ=75º del lado positivo de CMS (c y d); desplazamiento relativo ΔZ (TP-	21

CSC ME1/1) en el cuadrante φ=315º del lado negativo de CMS (e y f).

6.11 Datos del sistema de alineación LINK tomados durante el CRAFT08 y CRAFT09, en el RUN de datos de estabilización, que muestran: desplazamiento radial relativo ΔR (MAB-CSC ME1/2) en el cuadrante φ=15º del lado positivo de CMS (a y b); desplazamiento radial relativo ΔR (TP-CSC ME1/2) en el cuadrante φ=15º del lado negativo de CMS (c y d); variación angular Δφ (MAB) en el cuadrante φ=15º del lado positivo de CMS (e y f). 23

6.12 Datos del sistema de alineación LINK tomados durante el CRAFT08 y CRAFT09, en función del tiempo transcurrido una vez alcanzado 3.8T en CMS: desplazamiento relativo ΔZ (LD-AR) en el cuadrante φ=75º del lado positivo de CMS (a y b); desplazamiento relativo ΔZ (TP-CSC ME1/1) en el cuadrante φ=315º del lado negativo de CMS (c y d). 24

6.13 Datos del sistema de alineación LINK tomados durante el CRAFT08 y CRAFT09, en función del tiempo transcurrido una vez alcanzado 3.8T en CMS: desplazamiento radial relativo ΔR (MAB-CSC ME1/2) en el cuadrante φ=15º del lado positivo de CMS (a y b); desplazamiento radial relativo ΔR (TP-CSC ME1/2) en el cuadrante φ=15º del lado negativo de CMS (c y d); variación angular Δφ (MAB) en el cuadrante φ=15º del lado positivo de CMS (e y f). 25

6.14 Datos del sistema de alineación LINK del CRAFT09, donde se muestra la distribución ΔZ (LD-AR) después de un tiempo t'_0 tras alcanzar 3.8 T, en el cuadrante φ=315º del lado positivo de CMS: t'_0= 0 h (a), t'_0= 2 h (b); t'_0= 3 h (c); t'_0= 4 h (d). La estabilización de las variaciones por debajo de 40 μm se alcanza al cabo de 2 o 3 h. 26

6.15 Mediciones tomadas por el inclinómetro del MAB situado en el cuadrante φ=15º del lado positivo de CMS, durante los períodos P1, P3, P5 y P7, en función del tiempo. Los valores límites superior e inferior de la figura representan la resolución del inclinómetro (±30 μrad). 30

6.16 Mediciones ΔZ (LD-AR) tomadas por el distanciómetro situado en la posición angular φ=15º del lado positivo de CMS, durante los períodos P1, P3, P5 y P7, en función del tiempo. El área rayada indica el límite de la resolución del distanciómetro (±40 μm). 31

6.17 Intensidad de campo magnético de CMS durante el período 2008 al 2013, en función del número de dato tomado por el sistema LINK. 36

6.18 Evolución de la distancia relativa axial ΔZ (TP-CSC ME1/1) en función del número de dato LINK, para los periodos de estabilidad considerados, para diferentes posiciones. 38

6.19 Evolución de la distancia relativa axial ΔR (TP-CSC ME1/2) en función del número de dato LINK, para los periodos de estabilidad considerados, para diferentes posiciones. 40

6.20 Evolución de la distancia relativa axial ΔR (MAB-CSC ME1/2) en función del número de dato LINK, para los periodos de estabilidad considerados, para diferentes posiciones. Se han escogido las posiciones que muestran los mayores movimientos detectados. 42

6.21 Evolución de la rotación Δφ (MAB) en función del número de dato LINK, en los periodos de estabilidad considerados, para algunos ciclos magnéticos, en diferentes posiciones. Δφ se muestra respecto a la inclinación inicial del inclinómetro con B=0 T. 44

6.22 Evolución de la rotación Δφ (MAB) en función del número de dato LINK, para los periodos de estabilidad considerados, en diferentes posiciones. 45

6.23 Movimiento Z (LD-AR) observado durante el año 2011, en todas las posiciones instrumentadas de CMS, en función del número de dato LINK. 46

6.24 Movimiento relativo ΔZ (LD-AR), para el cuadrante φ=75º del lado positivo de CMS, durante el primer ciclo magnético del 2012. Histograma de eventos tomados (Superior). Evolución de ΔZ en función del número de evento LINK (Centro). Evolución de ΔZ en función de la intensidad de campo magnético (Inferior). 47

6.25 Valores medios de ΔZ (LD-AR) monitorizados durante los 42 períodos de estabilidad considerados. Se muestran los dos valores extremos observados en cada período de operación estudiado: los puntos negros representan el valor de máxima aproximación entre el LD y el AR (valores negativos), mientras que los círculos representan la separación máxima (valores positivos). 49

6.26 ΔZ (LD-AR) monitorizados para las posiciones indicadas en función del número de dato LINK durante el SP mostrado. 50

6.27 Temperatura media en el volumen situado entre el LD y el AR en la región η=3 de CMS, en función del número de dato LINK, para las mismas posiciones mostradas en la figura 6.26. 51

6.28 Monitorizado de la temperatura durante el SP1 del año 2010 en función del número de dato LINK. Se han tomado dos datos diarios por lo que la mayoría de puntos representan dos medidas superpuestas. Las figuras 'LD' muestran el valor medio de las 6 sondas de temperatura situadas sobre este, las figuras 'AR' muestran el valor medio de las dos sondas que se encuentran sobre esta estructura y las que tienen 'Z' se refieren al valor medio entre los valores LD y AR. 52

6.29 ΔZ (LD-AR) en las 6 posiciones distintas de CMS monitorizadas, en función de la temperatura media correspondiente a cada lado Z, durante SP para el año en cuestión. 54

6.30 Correlación de la medida ΔZ (LD-AR) con los cambios de temperatura, en la posición dada, durante el SP estudiado. 55

VII: Lista de Tablas.

Tabla	Capítulo 2.	Pg.
2.1	Principales parámetros del LHC.	5
2.2	Parámetros del imán de CMS.	26
2.3	Valores máximo y mínimo del campo al que se verán sometidos los dispositivos del sistema de alineación LINK en CMS.	30
2.4	Tolerancias de fabricación y montaje de algunas partes del detector, así como los movimientos absolutos y relativos (al TRACKER), a los que se verán sometidos los dispositivos montados sobre las ruedas de CMS durante su funcionamiento, en mm.	34
2.5	Dosis de diferentes tipos de partículas a las que se verán sometidas algunas regiones de CMS donde se encuentran componentes del LINK, durante los 10 años de operación del detector.	38

Tabla	Capítulo 3.	Pg.
3.1	Precisión de montaje (RMS, en μm) de los componentes del TRACKER. Los valores se dan respecto al elemento sobre el que se montan (ej. Sensor en Módulos 10 μm).	5
3.2	Características de los modelos de inclinómetros usados por el sistema de alineación LINK.	31
3.3	Principales características del distanciómetro OMRON Z4M-W100.	32
3.4	Características fundamentales de los potenciómetros SLS095-10 y 18FLPA50	33

Tabla	Capítulo 4.	Pg.
4.1	Principales características de las fibras monomodo seleccionadas para el sistema LINK.	8
4.2	Atenuación inducida sobre las fibras 3M-II, OFS y Nufern con una dosis total de 75 kGy, para diferentes longitudes de onda.	9
4.3	Resultados de la deformación inducida por la irradiación sobre una unión pegada óptica.	38
4.4	Resultados de las medidas ópticas de deformación (en μrad),	39

producida por la irradiación sobre la unión adhesiva, en BK7-G18.

4.5 Resultados de las medidas ópticas de deformación (en μrad), producida por la irradiación sobre la unión adhesiva, en Cuarzo Sintético. 39

4.6 Valores teóricos de compensación necesaria en las fijaciones sobre los pilares de los ARs, para las esferas y espaciadores, durante su instalación en Enero de 2015. Los valores permiten una tolerancia de ±0.01 mm. 54

4.7 Posición actual de los ARs respecto al sistema global de CMS. 55

4.8 Coordenadas del Banco de Calibración para los ARs en el área de los ISR. 55

4.9 Coordenadas del Banco de Calibración de los LDs, en el área de los ISR. 68

4.10 Desplazamientos relativos que sufren las posiciones donde se asientan las TPs, durante el encendido del imán de CMS. Los desplazamientos correspondientes a la coordenada X son despreciables. 71

4.11 Propiedades mecánicas del acero al carbono del disco YN1 de CMS. 71

4.12 Valores de los materiales utilizados para la simulación de la estructura de alineación LINK. 73

4.13 Desplazamientos y rotaciones que sufre el LD con el encendido del imán, por cargas de gravedad y con gradientes de temperatura. 74

4.14 Desplazamientos y rotaciones que sufre la estructura LINK con el imán apagado (posición de instalación), por cargas de gravedad y con gradientes de temperatura. 75

4.15 Desplazamientos y rotaciones que sufre la estructura LINK y el LD con el encendido del imán, por cargas de gravedad y con gradientes de temperatura. 76

4.16 Desplazamientos y rotaciones que sufre el LD, apoyado isostáticamente sobre 3 fijaciones, por cargas de gravedad y gradientes de temperatura. 77

Tabla **Capítulo 5.** **Pg.**

5.1 Resistencia al pelado de juntas de Cu y Ni con epoxi (Fuente ref. [233]). 5

5.2	Tipos de uniones atómicas y moleculares y sus energías típicas (Fuente ref. [236]).	6
5.3	Designación de los modelos de rotura de las uniones adhesivas.	8
5.4	Propiedades generales de los adhesivos reactivos más utilizados (Fuente ref. [229]).	17
5.5	Tipos de uniones adhesivas.	27
5.6	Modos de aplicación de las fuerzas sobre las uniones adhesivas.	28
5.7	Recomendaciones para realizar un buen diseño de junta adhesiva.	32
5.8	Mallado utilizado para el análisis mediante elementos finitos en esas juntas típicas de uniones adhesivas (Fuente Ref. [229]).	58
5.9	Características del adhesivo Araldit 2011 (Fuente Ref. [166]).	65
5.10	Tiempos medios para alcanzar un mínimo de resistencia a cortadura en una junta, en función de la temperatura de curado (Fuente Ref. [166]).	66
5.11	Propiedades del adhesivo Araldit 2011, según una serie de ensayos normalizados (Fuente Ref. [166]).	66
5.12	Ensayo de fatiga sobre una junta solapada simple según DIN 53285. Curado durante 20 minutos a 100ºC (Fuente Ref. [166]).	66
5.13	Resultados de los ensayos de probetas de impacto tipo $P_{II}{}^{t}$ con distintas secciones pegadas.	72
5.14	Definición de los tres niveles de agresividad utilizada en los tratamientos superficiales y sustratos a los que son aplicados.	75
5.15	Variables y elementos evaluados en el estudio de la rugosidad.	81
5.16	Resultados de las medidas de rugosidad realizadas a las piezas que componen las probetas evaluadas, comparadas con la fuerza y energía de rotura frente a impacto.	81
5.17	Gráficos de las medidas de rugosidad, de las piezas que componen las probetas evaluadas.	85
5.18	Fotografías del estado superficial de las piezas que forman las probetas en los 5 supuestos de estado superficial distintos. Realizadas a ×50 aumentos (tamaño regla 500 μm), ×200 aumentos (tamaño regla 500 μm), ×20 aumentos, ×90	87

aumentos. El eje de medición de la rugosidad 'x', en las piezas que componen las probetas, se corresponde con la horizontal de las fotografías y el eje 'y' con la vertical.

5.19 Resumen de las condiciones obtenidas, en cada uno de los 5 supuestos de estado superficial, para las piezas que componen las probetas. 88

5.20 Espesor del adhesivo, en mm, aplicado en las probetas P_I, P_{II} y P_{II}'. 93

5.21 Resultados de la dosimetría FRICKE llevada a cabo con 8 dosímetros. Mostrando los resultados de la posición Exterior e Interior del porta muestras utilizado para irradiar nuestras probetas. 98

5.22 Dosis recibidas por cada grupo de probetas estudiadas y tiempos de irradiación, durante la primera campaña. 99

5.23 Dosis recibidas por cada grupo de probetas estudiadas y tiempos de irradiación, durante la segunda campaña. 99

5.24 Dosis acumuladas por cada una de las probetas utilizadas en el estudio. 101

5.25 Valores de referencia de las probetas P_I utilizados durante el estudio de estabilidad dimensional. 105

5.26 Valores de referencia de las probetas P_{II} utilizados durante el estudio de estabilidad dimensional. 107

5.27 Resultados de la estabilidad dimensional de las probetas P_I, tras la primera campaña de irradiación. Mostrando los valores medios de las variaciones angulares y de distancia, y las deviaciones estándar, que se obtienen de la evaluación de los planos de referencia tomados sobre las probetas, antes y después de la irradiación. 109

5.28 Resultados de la estabilidad dimensional de las probetas P_{II}, tras la primera campaña de irradiación. Mostrando los valores medios de las variaciones angulares y de distancia, y las deviaciones estándar, que se obtienen de la evaluación de los planos de referencia tomados sobre las probetas, antes y después de la irradiación. 111

5.29 Resultados de la estabilidad dimensional de las probetas P_I, frente a la humedad ambiental, tras la primera campaña de irradiación. Mostrando los valores medios de las variaciones angulares y de distancia, y sus deviaciones estándar. Estos se 113

obtienen de la evaluación de los planos de referencia tomados sobre las probetas, antes y después de ser introducidas en la cámara climática.

5.30 Resultados de la estabilidad dimensional de las probetas P_{II}, frente a la humedad ambiental, tras la primera campaña de irradiación. Mostrando los valores medios de las variaciones angulares y de distancia, y sus desviaciones estándar. Estos valores se obtienen de la evaluación de los planos de referencia tomados sobre las probetas, antes y después de ser introducidas en la cámara climática. 115

5.31 Resultados de la estabilidad dimensional de las probetas P_I, tras la segunda campaña de irradiación. Mostrando los valores medios de las variaciones angulares y de distancia, y sus desviaciones estándar. Estos se obtienen de la evaluación de los planos de referencia tomados sobre las probetas, antes y después de esta irradiación. 116

5.32A Resultados obtenidos en la primera campaña de ensayos, con las probetas P_{II}, a 23º C. Para dosis de 303,1 KGy y 100 KGy. 125

5.32B Resultados obtenidos en la primera campaña de ensayos, con las probetas P_{II}, a 23º C. Para dosis de 50 KGy, 10 KGy y sin irradiar. 126

5.33 Resultados obtenidos en la segunda campaña de ensayos, con las probetas P_{II}. 132

5.34A Resultados obtenidos en la segunda campaña de ensayos, con las probetas P_{II}'. Para dosis de 303,1 KGy y 100 KGy. 137

5.34B Resultados obtenidos en la segunda campaña de ensayos, con las probetas P_{II}'. Para dosis de 50 KGy, 10 KGy y sin irradiar. 138

5.34C Resultados obtenidos en la segunda campaña de ensayos, con las probetas P_{II}'. Para dosis de 2070,88 KGy. 139

Tabla **Capítulo 6.** **Pg.**

6.1 Medida del desplazamiento relativo (mm) de Z entre el AR situado en el TRACKER y el LD situado en la YE1, durante la fase I del MTCC. 9

6.2 Medida del desplazamiento relativo (mm) de Z entre la TP y las CSCs de la posición ME1/1 de la rueda YE1, durante las dos fases del MTCC. 9

6.3 Desplazamiento relativo (mm) en R entre las TPs y la parte inferior de las CSC de la ME1/2, medidos durante ambas fases del MTCC. 10

6.4 Desplazamiento relativo (mm) en R entre las estructuras MABs y la parte superior de las CSC de la ME1/2, medidos durante ambas fases del MTCC. 10

6.5 Diferencias en posición (mm) y orientación (mrad) entre los valores ajustados a B=0 al comienzo la fase I del MTCC utilizando COCOA y los valores nominales o medidos para YE+1 y YB+2. 13

6.6 Diferencias en posición (mm) y orientación (mrad) entre los valores ajustados a B=0 en la fase I del MTCC utilizando COCOA y los valores obtenidos por fotogrametría para las CSCs de la ME1/1 y ME1/2 y los MABs. 14

6.7 Diferencias en posición (mm) y orientación (mrad) entre los valores ajustados a B=0 al final de la fase I del MTCC utilizando COCOA y los valores del comienzo, para las YE+1 e YB+2 (respecto al TRACKER), CSCs de la ME1/1 y ME1/2 y los MABs. 15

6.8 Diferencias en posición (mm) y orientación (mrad) entre los valores ajustados a diferentes valores de B y B=0 T al final de la fase I del MTCC utilizando COCOA, para el YE+1 (respecto al TRACKER). 16

6.9 Diferencias en posición (mm) y orientación (mrad) entre los valores ajustados a diferentes valores de B y B=0 T al final de la fase I del MTCC utilizando COCOA, para la YB+2 (respecto al TRACKER). 16

6.10 Diferencias en posición (mm) y orientación (mrad) entre los valores ajustados a diferentes valores de B=3.8 T y B=0 T en la fase I del MTCC utilizando COCOA, para las CSCs de la ME1/1 y ME1/2 y los MABs. 17

6.11 Diferencias en posición (mm) y orientación (mrad) entre los valores ajustados a diferentes valores de B y B=0 T al final de la fase I del MTCC utilizando COCOA, para la CSC de la ME1/2 situada a 255º (respecto a YE+1). 17

6.12 Diferencias en posición (mm) y orientación (mrad) entre los valores ajustados a diferentes valores de B y B=0 T al final de la fase II del MTCC utilizando COCOA, para el YB+2 (respecto a YE+1). 18

6.13 Diferencias en posición (mm) y orientación (mrad) entre los valores ajustados a diferentes valores de B y B=0 T al final de la fase II del MTCC utilizando COCOA, para la CSC de la ME1/2 situada a 255º (respecto a YE+1). 18

6.14 Ejemplo de la determinación de T_S para la variable ΔZ (LD-AR) después de un tiempo t'_0 tras alcanzar 3.8 T, en el cuadrante φ=315º, durante el CRAFT09. Las columnas muestran las distribuciones de los valores medios, RMS, Δ_{min} y Δ_{max}. En este ejemplo la variación por debajo de 40 μm se alcanza antes de las 3 h. 27

6.15 Resultados de los cálculos de estabilización en ambos RUNs del CRAFT08 y CRAFT09 para las 5 variables estudiadas. Se muestran los valores más altos de todas las posiciones angulares estudiadas. La estabilización de todas las variables observadas se alcanza 13.5 h después de llegar el imán al valor de 3.8 T. 27

6.16 Máximo movimiento esperado para ΔZ, ΔR y Δφ después de transcurrir T_S=13.5 h, calculado de los datos registrados por el sistema de alineación LINK de CMS durante los RUNs del CRAFT08 y CRAFT09. 28

6.17 Períodos monitorizados por el sistema de alineación LINK de CMS durante el 2010. Uno o más encendidos y apagados del imán se han realizado entre cada uno de los períodos. Los datos iniciales tomados en cada período comienzan transcurridas unas 24 h con el imán funcionando a 3.8 T. 28

6.18 Comparación entre las observaciones realizadas por el sistema de alineación LINK en los diferentes períodos estudiados durante el año 2010. Los valores mostrados se han tomado una vez transcurridas las primeras 24 h de funcionamiento del imán a 3.8 T. En la tabla se muestran los valores mayores de cada período, siendo P1 el primero después de cerrar las ruedas de CMS. 30

6.19 Ciclos magnéticos y períodos de estabilidad durante el año 2008. El primer dato considerado durante un SP se toma 24 horas después de alcanzar la intensidad de campo magnético de operación. 33

6.20 Ciclos magnéticos y períodos de estabilidad durante el año 2009. El primer dato considerado durante un SP se toma 24 horas después de alcanzar la intensidad de campo magnético de operación. Durante el ciclo 14 hubo 5 períodos de estabilidad. 34

6.21 Ciclos magnéticos y períodos de estabilidad durante el año 2010. El primer dato considerado durante un SP se toma 24 horas después de alcanzar la intensidad de campo magnético de operación. Durante el ciclo 13 hubo 5 períodos de estabilidad. 34

6.22 Ciclos magnéticos y períodos de estabilidad durante el año 2011. El primer dato considerado durante un SP se toma 24 horas después de alcanzar la intensidad de campo magnético de operación. 35

6.23 Ciclos magnéticos y períodos de estabilidad durante el año 2012. El primer dato considerado durante un SP se toma 24 horas después de alcanzar la intensidad de campo magnético de operación. Durante el ciclo 2 hubo 2 períodos de estabilidad. 35

6.24 Ciclos magnéticos y períodos de estabilidad durante el año 2013. El primer dato considerado durante un SP se toma 24 horas después de alcanzar la intensidad de campo magnético de operación. 35

6.25 Eficiencia de operación anual, del procedimiento de toma de datos de física en CMS, durante el período 2008 al 2010. 37

6.26 Períodos de estabilidad utilizados como ejemplo donde se muestra el máximo valor ΔZ (TP-CSC ME1/1) obtenido en μm, para las posiciones analizadas. El signo delante de φ indica el lado Z de CMS. El signo negativo en ΔZ indica una aproximación entre la TP y la CSC, mientras que el positivo una separación. El OO significa sensor fuera de servicio. 39

6.27 Períodos de estabilidad utilizados como ejemplo donde se muestra el máximo valor ΔR (TP-CSC ME1/2) obtenido en μm, para las posiciones analizadas. El signo delante de φ indica el lado Z de CMS. El signo negativo en ΔR indica una aproximación entre la TP y la CSC, mientras que el positivo una separación. El OO significa sensor fuera de servicio. 40

6.28 Períodos de estabilidad utilizados como ejemplo donde se muestra el máximo valor ΔR (MAB-CSC ME1/2) obtenido en μm, para las posiciones analizadas. El signo delante de φ indica el lado Z de CMS. El signo negativo en ΔR indica una aproximación entre el MAB y la CSC, mientras que el positivo una separación. El OO significa sensor fuera de servicio. 42

6.29 Períodos de estabilidad utilizados como ejemplo donde se muestra el máximo valor Δφ (MAB) obtenido en μrad, en las posiciones analizadas. El signo delante de φ indica el lado Z de CMS. El signo positivo en Δφ indica un giro en torno al eje Z con un sentido del eje X hacia el Y. El OO significa sensor fuera de servicio. 43

6.30 Valores medios de ΔZ (LD-AR) durante la operación a 3.8 T en las distintas posiciones monitorizadas de CMS, de los ciclos magnéticos considerados. El error mostrado es la desviación estándar de la media. Cuando solamente se ha considerado un 48

ciclo magnético el error es la resolución del sensor. El OO significa sensor fuera de servicio.

6.31 Valores de temperatura medios monitorizados en el volumen comprendido entre el LD y el AR para los períodos de estabilidad-año mostrados en la figura 6.27. 52

6.32 Parámetros de la correlación (6.13) para los datos tomados como ejemplo, en los 6 años estudiados. 56

Capítulo 1: Introducción.

El objetivo fundamental de la física de partículas es el estudio de los constituyentes de la materia en su nivel más elemental, y de las fuerzas responsables de sus interacciones. Este objetivo se alcanza en la actualidad, principalmente, mediante la realización de experimentos con aceleradores.

El desarrollo de la física de partículas está por tanto íntimamente relacionado con el de los aceleradores de partículas y los detectores y la evolución de estas máquinas depende muy estrechamente de la actividad investigadora que se lleva a cabo a nivel mundial. En España, ésta se enmarca dentro del contexto del Programa Nacional de Física de Partículas y Grandes Aceleradores, integrado en el Plan Nacional de I+D+i [1], este campo está considerado como prioritario en nuestro país desde 1983 e íntimamente conectado con el Programa experimental del CERN (Laboratorio Europeo de Física de Partículas en Ginebra, Suiza) [2], referente mundial en este área de la Investigación Básica.

La investigación en Física de Partículas implica el uso y desarrollo de sofisticada tecnología e ingeniería, en el límite de lo actualmente disponible, y requiere de un personal cada vez más especializado y preparado en el campo de la instrumentación experimental, con el que poder contribuir al diseño y llevar a buen puerto estos novedosos instrumentos, que hacen posible la realización de complejos experimentos. Aspectos muy relevantes de esta investigación son la relación con la industria y la transferencia de conocimientos y tecnología a otras áreas de la ciencia e industria. Las innovaciones creadas por científicos e ingenieros pueden ser aplicadas a muchos otros campos, como el de las comunicaciones e información tecnológica, medicina, energía, medio ambiente y educación. Por otra parte, la magnitud y complejidad de los proyectos en curso requieren de una amplia colaboración con la industria, en particular para la producción masiva de componentes.

Hasta hace muy pocos años el mayor acelerador de partículas en funcionamiento fue el Tevatrón [3], ubicado en el laboratorio FERMILAB (Chicago, EEUU) [29]. Se trataba de un colisionador Protón-Antiprotón, que disponía de dos puntos de colisión: los detectores CDF [4] y D0 [5]. El Tevatrón permitía obtener una energía centro de masas de hasta 2 TeV, con una Luminosidad (L) de 2×10^{32} cm^{-2} s^{-1}. La luminosidad es una medida del número de cruces haz-haz por centímetro cuadrado y por segundo y por tanto proporcional a la frecuencia de las colisiones. FERMILAB es el segundo laboratorio de física de partículas más importante a escala mundial tras el CERN.

El Tevatrón fue superado ampliamente, con la puesta en funcionamiento del moderno colisionador LHC (Large Hadron Collider) [6], del CERN, que inyectó los primeros haces de partículas en la segunda mitad del 2008, y que debido a una fuga de helio líquido, se tuvo que parar hasta finales del 2009, siendo en Marzo del 2010 cuando tuvo lugar la primera colisión a 7 TeV de energía de centro de masas. En el año 2012 alcanzó los 8 TeV. El acelerador estuvo en operación hasta principios de 2013 en que se procedió a realizar una parada, de unos 2 años, para su mantenimiento y mejora lo que le ha permitido operar, a partir del verano de 2015, en condiciones próximas a las de diseño: 13 TeV de energía centro de masa y una Luminosidad nominal de 10^{34} cm^{-2} s^{-1}. Este colisionador protón-protón necesita de unos potentes detectores de partículas de última generación: ALICE [7], ATLAS [8], CMS [9] y LHCb [10], situados en sus cuatro áreas de colisión, para poder proceder a la detección e identificación de las partículas. Estas modernas máquinas además de ser las más grandes y complejas son también las más precisas jamás construidas.

Con los datos obtenidos en los años 2010 a 2013, LHC ha estado publicando importantes resultados, siendo el más relevante el descubrimiento del bosón de Higgs en 2012, que marcó un hito en el desarrollo de la física de partículas y dio lugar a la concesión del Premio Nobel de Física a F.Englert y P.W. Higgs, en 2013 [30].

En paralelo a los trabajos con LHC y desde hace varios años, un intenso programa de I+D+i esta también actualmente en curso para el estudio de la siguiente generación de aceleradores y sus detectores como es la colaboración LCC (Linear Collider Collaboration) [11], que engloba a los investigadores que forman parte de los dos candidatos de aceleradores lineales a construir en un futuro próximo: el acelerador lineal ILC (International Lineal Collider) [12] y el CLIC (Compact Linear Collider) [13], cuya ubicación está aún por decidir. Por otro lado, desde el pasado año se está estudiando la opción de un nuevo colisionador circular, el FCC (Future Circular Collider) [14], que se ubicaría en el CERN, y sería el post-LHC. Aunque entre ambos va a llevarse a cabo una actualización y mejora del sistema que alargará la vida del LHC varios años más de lo previsto, con un incremento de la Luminosidad, lo que dará lugar a una ingente cantidad de datos que traerá como consecuencia que las condiciones de diseño de muchos de los componentes en los detectores serán ampliamente superados y tendrán que realizarse actualizaciones y mejoras de los mismos. Estos nuevos proyectos requerirán investigar y desarrollar tecnología punta que a su vez da lugar a un gran desarrollo tecnológico subsidiario en todos los campos de los que se nutre la física de partículas como los materiales superconductores, criogenia, muy alto vacío, grandes imanes superconductores, sensores y detectores cada vez más precisos, investigación en materiales altamente resistentes a la radiación, sofisticados procesos de

ingeniería para la integración y ensamblaje de detectores, mayor capacidad de cálculo, almacenamiento y distribución de datos, etc.

1.1. Antecedentes.

Los aceleradores son máquinas que se encargan de incrementar la energía de haces de partículas cargadas y de su guiado, por medio de campos electromagnéticos, con el objeto de hacerlas colisionar cuando han adquirido la energía deseada. Producto de las colisiones entre partículas es la creación de otras nuevas partículas que pueden ser estudiadas en los detectores situados en las áreas de colisión.

Desde que se inventara y desarrollara el primer acelerador de partículas, un ciclotrón, por Ernest Orlando Lawrence a principio de la década de los años 30 del siglo pasado (que le valió el Nobel de física en el 1939 [15]), estas máquinas han ido creciendo en volumen y complejidad, lo que ha dado lugar a un impresionante avance en la física de partículas.

Los colisionadores, según su forma, se clasifican en 'lineales' y 'circulares'. Y según el tipo de partícula cargada que aceleren en 'leptónicos', 'hadrónicos' o de 'iones'.

Los experimentos que se pueden realizar en estos aceleradores se denominan de 'blanco fijo' si los haces de partículas, al salir del acelerador son guiados para chocar contra un blanco fijo, detrás del cual se habrá instalado el detector para tratar de identificar y medir el resultado de ese choque o experimentos de colisión si los haces de partículas, que van circulando en sentidos opuestos, se hacen "chocar" entre sí, en el interior de un detector.

La cantidad de energía que pierden las partículas y el proceso mediante el que la pierden, depende de su naturaleza, su propia energía y el material que atraviesan. Las partículas se pueden reconocer por las huellas que dejan al producir perturbaciones en la materia de la que están compuestas los detectores de partículas. Con estas huellas podemos llegar a identificar el tipo de partícula que es, su energía, la carga eléctrica y el punto donde se originó. Este proceso de identificación puede llegar a ser muy complejo cuando han sido muchas partículas a la vez las que han dejado su huella en el detector.

Cada nuevo experimento suele requerir un elevado trabajo de I+D+i en los detectores y la electrónica asociada. Un nuevo detector se diseña en función de la física que se pretenda estudiar y suele conllevar nuevos retos y avances en su campo. No existe un detector de partículas universal, aunque existen unos tipos de detectores llamados de propósito general, como es el caso del détector CMS (Compact Muon Solenoid) y ATLAS (A Toroidal LHC Appparatus) del acelerador LHC, en el CERN, que intentan dar cobertura a un amplio

espectro de las mismas, lo cual lleva aparejado un significativo aumento de su complejidad.

La evolución de los experimentos de física de partículas ha estado muy estrechamente relacionada a la evolución de la tecnología de sus componentes. Los detectores de partículas de última generación, que van asociados a los últimos aceleradores experimentales, son mucho más complejos y precisos que sus predecesores, para poder dar respuesta a las cuestiones planteadas por la física de partículas actual, lo cual lleva implícito una mayor resolución de medida de los sub-detectores que los componen.

En esta tesis nos vamos a centrar en uno de los más complejos experimentos en física de partículas, el experimento CMS que coge su nombre del detector CMS, instalado en una de las cuatro áreas de trabajo del colisionador LHC. En CMS es crucial la medida precisa del momento de unas partículas denominadas muones, que se realiza mediante una combinación de las medidas realizadas por el sub-detector central de trazas o TRACKER [16] y el sub-detector de muones ("cámaras de muones") en la zona más externa del detector CMS [17]. La medida del momento de muones se realiza a través de una medida precisa de su trayectoria al atravesar los diferentes sub-detectores inmersos en potentes campos magnéticos. Para poder conseguir realizar la medida con la precisión requerida en los actuales experimentos se debe conocer la posición relativa de los distintos sub-detectores con precisiones sub-milimétricas.

El posicionamiento de los componentes del detector se realiza mediante la combinación de la información proporcionada por sistemas de alineación construidos ad-hoc para cada detector y la información de las propias partículas cargadas al atravesar el detector. En este primer caso, los sistemas de alineación opto-mecánicos utilizan diferentes tecnologías [18, 32], interferométricas como Frequence Scan Interferometry (FSI) o Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI), Rasnik, Laser Beacon o creación de planos de luz, monitores de rectitud y distancia, métodos mecánicos y monitores multipunto, que miden de forma continua la posición de líneas láser de referencia a lo largo de varios puntos de medida dentro del volumen del detector. Este último es el utilizado en el detector CMS.

La combinación de fuerzas de gravedad, cambios de temperatura y fuerzas del campo magnético que actúan sobre toda la estructura del detector, tanto durante el encendido del imán y de los sub-detectores que lo componen, cómo en su operación continua a lo largo del tiempo, dan lugar a que los elementos que componen estos sub-detectores estén desplazados de sus correspondientes posiciones nominales y no sean estables dentro de los niveles de precisión espacial requeridos, esto da lugar a que sea necesario un

sistema de alineación que monitorice de forma continua en el tiempo las posiciones relativas entre estos sub-detectores con la precisión necesaria.

Para que este sistema de alineación sea estable se necesita que la base donde se fija el mismo sobre CMS lo sea también, y debido a los requerimientos de compacidad y minimización de material que imperan en las regiones centrales del detector, muchas de las partes estructurales del sistema de alineación de CMS van a estar compuestas de uniones pegadas. Pero estas uniones van a estar sometidas a altas dosis de radiación durante los prolongados períodos de operación del detector, lo cual puede dar lugar a cambios en las propiedades mecánicas de las mismas, lo que se puede traducir en modificaciones dimensionales de los elementos que van fijados sobre la unión pegada y por tanto de los valores de calibración iniciales de los componentes del sistema de alineación y por otro lado en perdida de propiedades resistivas de la unión y de sus propiedades para absorber impactos.

Investigaciones sobre degradación de materiales y componentes, que han sido expuestos a radiaciones ionizantes, se han llevado a cabo dentro del ámbito de reactores nucleares, reactores de fusión, aceleradores de altas energías, instalaciones médicas o industriales, proyectos espaciales, etc. En el CERN, se han desarrollado a lo largo de las últimas décadas, una serie de estudios conducentes a ver la influencia de la radiación sobre ciertas propiedades de algunos materiales orgánicos e inorgánicos usados en aceleradores de partículas [35, 36 y 38], recubrimientos de cables o fibras [33 y 37] y de algunas uniones pegadas, mediante una serie de adhesivos [34, 39, 40 y 41]. Todo este material ha servido de base para la selección y diseño de las uniones adhesivas utilizas en el sistema de alineación de CMS.

Dentro de este prolongado trabajo de investigación, hemos desarrollado una serie de estudios específicos a una serie de dispositivos utilizados para el sistema de alineación, que no estaban totalmente cubiertos por los estudios de irradiaciones previos. Estos serán descritos ampliamente durante el desarrollo de los capítulos 4 y 5 de esta investigación.

1.2. Objetivo de la tesis.

El detector CMS alberga estructuras de grandes dimensiones y muy pesadas. Este detector es un cilindro de más de 20 m de longitud, 16 de diámetro y unas 14000 toneladas de peso, en cuyo interior se encuentra un imán solenoidal de 3.8 T que va a someter a los diversos sub-detectores a unos campos magnéticos muy intensos necesarios para curvar la trayectoria de las partículas cargadas y permitir la medida precisa de su impulsión y su posible identificación.

Las fuerzas magnéticas, el propio peso de las estructuras y las variaciones de temperatura durante largos períodos de operación del detector dan lugar a desplazamientos y deformaciones, del orden de centímetros.

En el presente trabajo se investiga en el desarrollo y la validación de un sistema de alineación compacto (sistema LINK), para su implementación en detectores de partículas de última generación, que pueda funcionar en las particulares condiciones que se requieren en el interior de un detector como CMS, con las características de muy altos campos magnéticos y altas dosis de radiación a los que se verán sometidos todos sus componentes, y que permita reconstruir de forma continua, con la precisión y estabilidad necesaria la posición del sub-detector de trazas, que está en el centro del mismo, con los sub-detectores de muones, que están en la parte más externa del detector.

Dentro de este proceso de validación del sistema, uno de los puntos remarcables de este estudio está dirigido a comprobar la estabilidad de las uniones estructurales pegadas que tiene el sistema LINK, con los niveles de radiación recibidos, en el período de utilización del mismo. Investigando tanto desde el punto de vista de variaciones dimensionales que pueda experimentar el pegamento en la zona de unión, como su posible fragilización y perdida de propiedades mecánicas de energía absorbida frente a impactos. La forma de proceder para la realización de los ensayos y los resultados obtenidos para este estudio van a ser ampliamente descritos a lo largo el capítulo 5.

1.3. Descripción del desarrollo de la memoria.

Tras la sección inicial donde se encuentran los **Agradecimientos**, **Resumen**, **Abstract**, **Contenido**, **Acrónimos**, **Lista de Figuras** y **Lista de Tablas**, el presente documento se estructura en capítulos, donde se abordan los diferentes apartados importantes del desarrollo de la tesis:

Comienza el **primer** capítulo por una Introducción donde se sitúa el trabajo en el contexto del campo en el que se ha desarrollado. Aquí se marcan los objetivos y se describe su desarrollo.

En el capítulo **segundo**, se procede a dar una breve descripción del acelerador de partículas LHC y del detector CMS dotado del sistema de alineación objeto de esta tesis. En este capítulo se describirán las condiciones operacionales a las que va a estar sometido el sistema de alineación LINK del detector CMS.

En el **tercer** capítulo se describirá con cierto grado de detalle el sistema completo de alineación que opera en el detector CMS.

Este sistema de alineación está dividido en varios subsistemas, que se ocupan de realizar una alineación interna de los diferentes sub-detectores que intervienen en la medida de la trayectoria de los muones: el Central de Tazas o

TRACKER, que se encuentra en la parte central del detector CMS, y los detectores de muones, el del BARREL, que está en la parte externa de las cinco ruedas que forman la parte central del detector CMS y el del ENDCAP, que es el subsistema de alineación que relaciona los diferentes elementos que componen las ruedas externas que cierran el detector por los extremos. Siendo el subsistema de alineación LINK, el que relaciona globalmente la medida obtenida entre los diferentes subsistemas mencionados, obteniendo como resultado de sus medidas la posición relativa entre los diferentes subsistemas de alineación del detector de partículas CMS, en un sistema de referencia común.

En el **cuarto** capítulo, ya se describe en detalle el sistema de alineación LINK, desarrollando su estructura, los elementos que lo componen, así como los test que se han llevado a cabo para la validación de este estudio y sus componentes. Se garantiza que el sistema podrá operar en grandes campos magnéticos, fuertes niveles de irradiación y con rangos de movimientos esperados, respetando las fuertes limitaciones de espacio en todos los emplazamientos donde se ubica la instrumentación de alineación dentro del detector CMS.

El **quinto** capítulo describe algunos de los estudios que se han realizado sobre el sistema de alineación LINK de CMS, centrándose sobre la estabilidad dimensional y la resistencia al impacto de todos los insertos que van pegados sobre las estructuras del sistema, frente a los niveles de irradiación a los que van a ser sometidos estos a lo largo del período de operación del detector CMS. El estudio resistivo se ha visto necesario, y está motivado por las incidencias que han tenido lugar durante los períodos de instalación y mantenimiento del detector CMS, ya que el sistema, al estar distribuido por todo el volumen del detector y en la parte externa de cada subsistema de detección, está muy expuesto a golpes fortuitos o elementos que se caen durante la manipulación o instalación de componentes cercanos, en períodos de mantenimiento, controles dimensionales realizados por el personal del CERN, etc. En paralelo, aprovechando la infraestructura puesta en servicio para el desarrollo del estudio de la resistencia al impacto, se va a realizar un estudio de la estabilidad dimensional de unión pegada de estos insertos en función del nivel de irradiación recibido, comprobando si ésta da lugar a deformaciones en las juntas adhesivas y acotando su valor. La estabilidad es importante ya que se debe tener en cuenta que muchos de los elementos sensibles del sistema van a ir montados sobre insertos pegados a las estructuras del sistema de alineación LINK, de forma que si la unión adhesiva sufre distorsión, ésta se transmitirá a los componentes sensibles del sistema y en definitiva producirá una degradación de las medidas obtenidas con el sistema de alineación LINK.

Este capítulo consta de una primera parte en la que se describe el estado del arte de las uniones adhesivas: donde se exponen sus ventajas e inconvenientes, se muestran las principales teorías de la adhesión, se describen brevemente los distintos grupos de adhesivos, centrando la atención en los estructurales que son los que han sido utilizados en este estudio. A continuación se describen los pre-tratamientos superficiales que se aplican a las juntas adhesivas para mejorar su resistencia, argumentando la idoneidad del tratamiento de *ataque con ácido crómico* que se ha seleccionado para un número importante de componentes del sistema y el *anodizado duro negro*, utilizado en el caso de los componentes que sufren desgaste y que están situados en los pasajes por donde transcurren las líneas de los láseres que se utilizan en el sistema de alineación. Más adelante se mencionan los elementos que han de ser tenidos en cuenta en la realización del diseño de la junta adhesiva y su influencia en la resistencia de la misma. Posteriormente se describen los métodos más usuales para realizar el control de calidad de las juntas adhesivas, centrando la atención en el *ensayo destructivo de resistencia a la cizalladura por impacto en juntas pegadas* UNE-EN ISO 9653, seleccionado para el desarrollo de este estudio. Seguidamente se describen los efectos que produce la radiación sobre los adhesivos, para lo que se ha tenido en cuenta fundamentalmente la información disponible en las bases de datos del CERN, que fueron creadas específicamente para ayudar a realizar la selección de materiales y adhesivos que van a trabajar en ambientes radiactivos, y de aquí se ha seleccionado la resina epoxi *Araldit® 2011*, para su utilización en el pegado de los insertos utilizados por el sistema LINK, argumentando su utilización a partir de estos datos frente a la radiación. Y por último se describe el comportamiento tensional a que se ve sometida una junta adhesiva, mencionando las principales teorías utilizadas.

En la segunda parte de este capítulo, se describe el desarrollo experimental que se ha llevado a cabo, para la obtención de los resultados que aquí se detallan: En primer lugar se va a describir brevemente como se desarrollan los test necesarios para el estudio de la *estabilidad dimensional* y su *resistencia frente a impacto*. Seguidamente se especifican las probetas que se han utilizado y los *tratamientos superficiales* que se les han aplicado, mostrando los resultados de la *rugosidad* obtenida, y detallando la forma de realizar los pegados de las piezas que forman las probetas. Más adelante se describe el procedimiento utilizado para realizar la irradiación de las probetas de forma homogénea, describiendo la infraestructura *Náyade* utilizada para realizar estas irradiaciones. Más adelante se detalla la metodología seguida para la realización del control dimensional de las probetas antes y después de someterlas a irradiación, humedad o cambios estacionales, y que va a permitir obtener la estabilidad temporal de la junta adhesiva, limitando a estos resultados las posibles distorsiones que puede sufrir la junta, durante su vida

operacional en CMS. Y por último se describe el ensayo de impacto realizado, con los resultados obtenidos.

Y como resultado del estudio llevado a cabo en este capítulo, se puede llegar a la conclusión de la idoneidad del adhesivo seleccionado, que permite garantizar el mantenimiento de las propiedades resistivas de las juntas adhesivas y de su estabilidad dimensional, frente a irradiación, durante toda la vida operacional prevista del sistema de alineación LINK de CMS, incluso prolongarla más allá de este período, en previsión de las futuras mejoras que se van a realizar sobre el LHC y CMS, para así poder mantener operando varios años más estos experimentos.

En el **sexto** capítulo, se muestran los resultados publicados de las medidas realizadas sobre la resolución del sistema de alineación LINK en el 2006, durante las pruebas del imán del detector CMS, los de la estabilidad de CMS entre el 2008 y el 2010, y los movimientos y la estabilidad de las estructuras de CMS observadas por el sistema entre el 2008 hasta su parada por mantenimiento y mejora en el 2013.

En el **séptimo** capítulo se presentan las conclusiones del trabajo desarrollado. En particular se muestran las conclusiones a que ha dado lugar este prolongado estudio sobre el sistema de alineación general LINK.

Por último, en el capítulo **octavo** titulado ‘Conclusions’, se realiza una traducción literal al inglés del capítulo séptimo del presente documento.

A continuación se encuentran las referencias que han servido de ayuda durante la redacción de la memoria de la tesis doctoral.

En la parte final de la memoria se encuentran los **Apéndices** que complementan el desarrollo del capítulo 5.

Capítulo 2: El colisionador LHC y el experimento CMS.

Durante los primeros años de la década de los 80, mientras estaba realizándose el diseño y construcción del experimento Large Electron-Positron (LEP) en el CERN, ya se estaba trabajando en su sucesor, el proyecto del Gran Colisionador de Hadrones (LHC) [20], que se aprobó en el consejo del CERN en diciembre de 1994. A continuación, entre 1996 y 1998 se aprobó y se comenzó la construcción de los cuatro experimentos que irían situados en los correspondientes puntos de colisión ALICE [21], ATLAS [22], CMS [23] y LHCb [24]. Con el paso del tiempo se han unido al LHC otros dos pequeños experimentos, TOTEM (TOTal cross section, Elastic scattering and diffraction dissociation Measurement at the LHC) [25, 31], instalado junto al detector CMS, y LHCf (Large Hadron Collider forward) [19, 26] junto a ATLAS.

El CERN dispone de un complejo de aceleradores [6], consistente en una sucesión de máquinas que van incrementando la energía de un haz de partículas dado (en general electrones, positrones, protones, antiprotones o iones pesados) hasta llegar a la necesaria para ser inyectado en el LHC. La mayoría de los aceleradores de la cadena son en ocasiones utilizados en experimentos de blanco fijo a bajas energías.

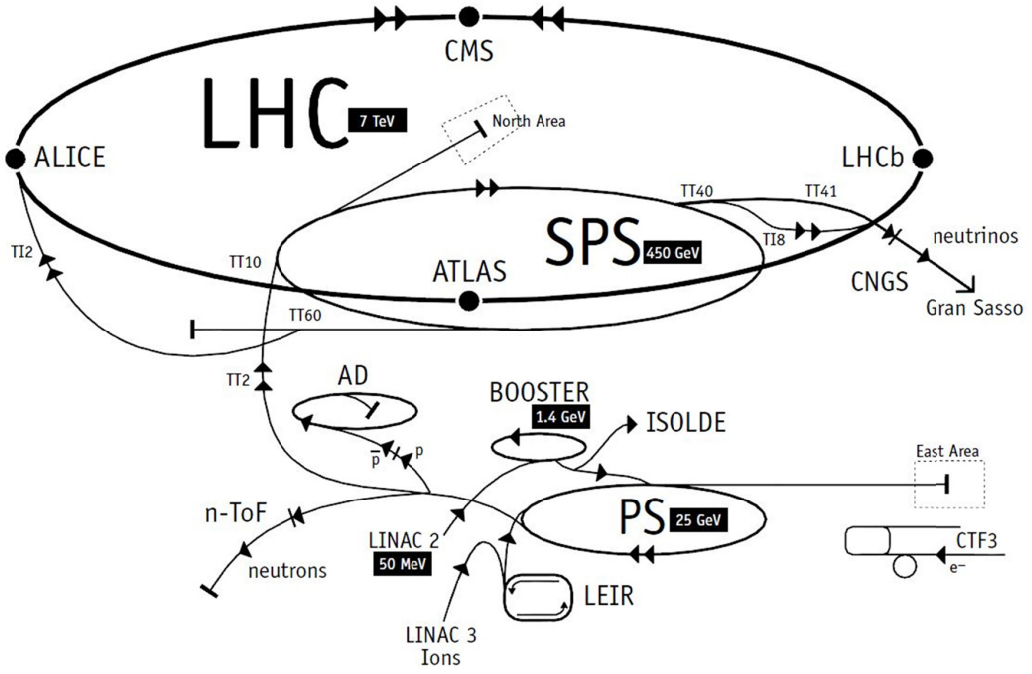


Figura 2.1: *Esquema del complejo de aceleradores del CERN.*

La figura 2.1 muestra esquemáticamente la cadena de aceleradores que existe en el CERN y que alimentan el haz de partículas del LHC. El LHC está diseñado para acelerar protones o iones de plomo.

Para conseguir protones, la operación comienza tomando átomos de hidrógeno a los que se les elimina el electrón. Los haces de protones así obtenidos son inyectados en el PS Booster (PSB) con una energía de 50 MeV desde el Linac2, que los acelera a su vez hasta 1.4 GeV. Este haz de protones alimenta al PS (Proton Synchrotron) en el que se aceleran hasta 25 GeV. Desde aquí son enviados al SPS (Super Proton Synchrotron), que los hace llegar a 450 GeV. Y a esa energía son inyectados en el LHC, en ambos sentidos. LHC acelerará los haces hasta conseguir su energía nominal: 7 TeV en cada sentido.

En el caso de los iones de plomo, la producción se hace a partir de una muestra de plomo de muy alta pureza que es calentada hasta unos 500º C en que se evapora. El vapor se ioniza mediante una corriente de electrones. Los iones pasan al Linac3 que los acelera hasta 4.2 MeV/u (energía por nucleón), desde este son enviados hasta el LEIR (Low Energy Ion Ring) donde son acelerados hasta 72 MeV/u. Con esa energía son transferidos al PS, que los acelera hasta 5.9 GeV/u. Desde aquí pasarán al SPS hasta adquirir la energía de 177 GeV/u y por último llegaran al LHC donde se inyectan en ambos sentidos del acelerador, para ser acelerados hasta energías de colisión del orden de 2.76 TeV/u.

2.1. El LHC.

El Large Hadron Collider [20], Large (Grande), 27 km de circunferencia, Hadron (Hadrón) porque acelera hadrones cargados (protones o iones), y Collider (Colisionador) puesto que los haces circulan en sentido opuesto para colisionar en las cuatro áreas de cruce en que se encuentran los detectores antes mencionados.

Esta máquina se ha diseñado para generar colisiones protón-protón con una energía centro de masas de 14 TeV y con una luminosidad de 10^{34} cm^{-2} s^{-2}. En el caso de colisionar iones de plomo, la luminosidad es 2×10^{27} cm^{-2} s^{-2} y la energía centro de masas de 1148 TeV. Estos dos parámetros son los que mejor definen las prestaciones de un colisionador.

La luminosidad es una medida del número de cruces haz-haz por centímetro cuadrado y por segundo, por tanto proporcional a la frecuencia de las colisiones.

$$L = \frac{1}{4\pi}\frac{N_1 N_2 f}{\sigma_x \sigma_y} \qquad (2.1)$$

Donde N_i es el número de partículas que viaja en cada paquete en cada uno de los haces opuestos ($1{,}15\cdot10^{11}$ en el caso del LHC), f la frecuencia de cruce entre paquetes (40,08MHz en nuestro caso), σ_x (σ_y) tamaño de la sección transversal del paquete, en la dirección X (Y) en el punto de interacción de los haces, unos 16 μm en cada dirección.

El producto de la sección eficaz de interacción haz-haz por la luminosidad determina la frecuencia de la reacción o número de sucesos de un determinado tipo por segundo: R = σ x L.

El LHC está situado en un túnel de unos 3 m de diámetro y de unos 27 km de circunferencia, situado entre la frontera Suiza y Francesa, a unos 100 m de profundidad media, con una ligera inclinación de 1.4 %, estando a unos 175 m bajo el monte Jura, en Francia y a unos 50 m del lado suizo. La figura 2.2 muestra una vista esquemática de esta situación.

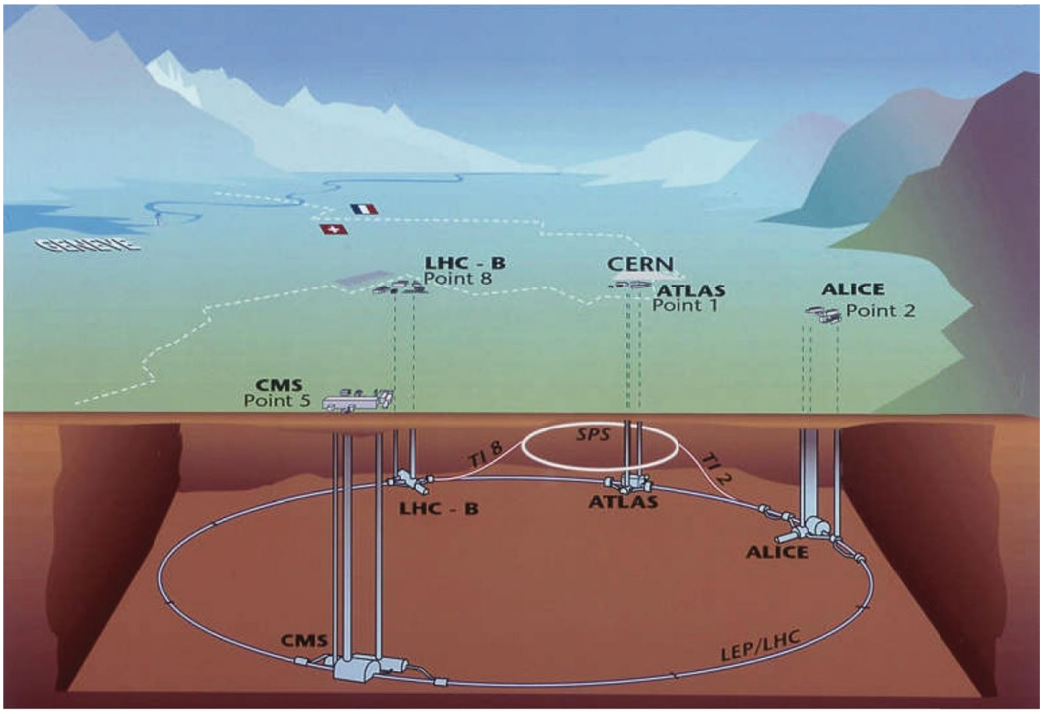


Figura 2.2: *Vista general del emplazamiento de los componentes del LHC.*

El LHC está compuesto de imanes y cavidades de radiofrecuencia que albergan dos tubos de vacío por los que circulan dos haces de partículas en sentidos opuestos. Hay 1232 dipolos (Figura 2.2A) magnéticos superconductores de 14,3 m de largo cada uno, que se encargan del curvado de los haces y de mantenerlos en sus posiciones nominales. De otro lado en ciertos puntos del acelerador se sitúan las cavidades de radio frecuencia, que son las dan el impulso a las partículas cada vez que pasan por ellas. A los protones, por ejemplo, se les incrementa la energía en unos 0.5 MeV por cada vuelta que dan al LHC. Por último, otra serie de imanes focalizan los haces de partículas en las zonas próximas a los cuatro puntos donde se sitúan los detectores, concentrándolos en el punto de interacción (IP) en un diámetro medio de unos 16 μm.

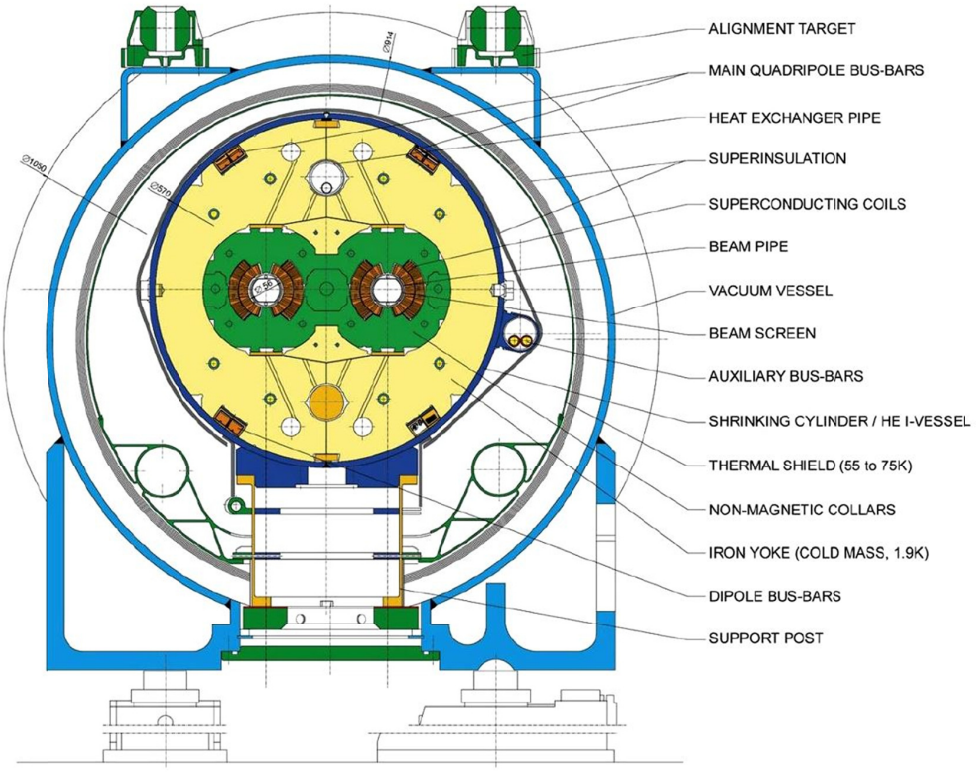


Figura 2.2A: *Sección transversal del crio-dipolo. En milímetros.*

Los haces de protones provienen del SPS a una energía de 450 GeV estructurados en paquetes de $1{,}15 \times 10^{11}$ partículas, ocupando una longitud de unos 76 mm, con una distancia media entre paquetes de unos 7 m, lo que nos da 2808 paquetes en cada haz. Llenar cada uno de los dos haces del LHC lleva unos 4'2" de tiempo al SPS. Los haces son acelerados durante unos 20 minutos en el LHC, hasta llegar a la energía nominal de 7 TeV. La vida media de los haces es de unas 10 horas dado que la población de protones disminuye debido fundamentalmente a las colisiones. Al cabo de ese tiempo los haces son desviados al exterior y se procede a un nuevo llenado.

En la tabla 2.1 podemos encontrar una serie de parámetros que describen las características nominales destacables del LHC.

Circunferencia	26658,883 m
Temperatura de operación del dipolo	1,9 K
Número total de imanes (dipolos, cuadrupolos, sextupolos, octupolos, decapolos, dodecapolos)	9300
Número de dipolos	1232
Número de cuadrupolos	858
Nº de arcos (2450 m longitud)	8
Nº de secciones rectas (545 m longitud)	8
Principal sistema de Radio Frecuencia (RF)	400.8 MHz
Voltaje del Sistema de 400 MHz RF a 7 TeV	16 MV
Número de cavidades de RF	8 por haz

Energía nominal, protones	7 TeV
Energía nominal, iones de Pb	2,76 TeV/nucleón
Energía nominal centro de masas, iones de Pb	1148 TeV
Energía centro de masas, protones	14 TeV
Pico del campo dipolar magnético	8,3 T
Corriente en el dipolo principal	11800 A
Densidad de energía en cada dipolo	500 kJ/m
Longitud del dipolo principal	14,3 m
Diámetro interior en el Dipolo	56 mm
Distancia entre ejes en el dipolo (1.9 K)	194,00 mm
Distancia entre ejes en el dipolo (293 K)	194,52 mm
Composición de la aleación superconductora	Nb_Ti (47% Ti)
Máxima corriente sin resistencia (1,9 K a 8,33 T)	17000 A
Máxima corriente sin resistencia (1,9 K a 0 T)	50000 A
Mínima distancia entre "paquetes".	~7 m
Espacio de tiempo entre paquetes	24,95 ns
Luminosidad	10^{34} $cm^{-2}\cdot s^{-1}$
Corriente en el haz	0,54 A
Nº de paquetes (bunches) por haz de protones	2808
Longitud del paquete	76 mm
Nº de protones por bunch (en el arranque)	$1{,}15\cdot 10^{11}$
Energía almacenada en el haz	360 MJ
Energía almacenada en los imanes	11 GJ
Vida media del haz (Beam lifetime)	~ 10 h
Número de cruces por segundo (Average crossing rate)	40,08 MHz
Nº de colisiones por segundo	600 millones
Ángulo total de cruce (punto de colisión)	280 µrad

Tabla 2.1: *Principales parámetros del LHC.*

En la figura 2.3 se muestra un esquema de los experimentos instalados en el LHC, donde se puede apreciar la división del mismo en 8 sectores, octantes, de igual longitud, compuestos por 8 secciones rectas de 545 m, donde se encuentran los detectores u otros elementos del acelerador, que unen entre sí 8 arcos de la circunferencia de 2450 m de longitud. Los haces de partículas se cruzan en cuatro puntos para asegurar que tanto el haz externo e interno tienen el mismo desarrollo longitudinal.

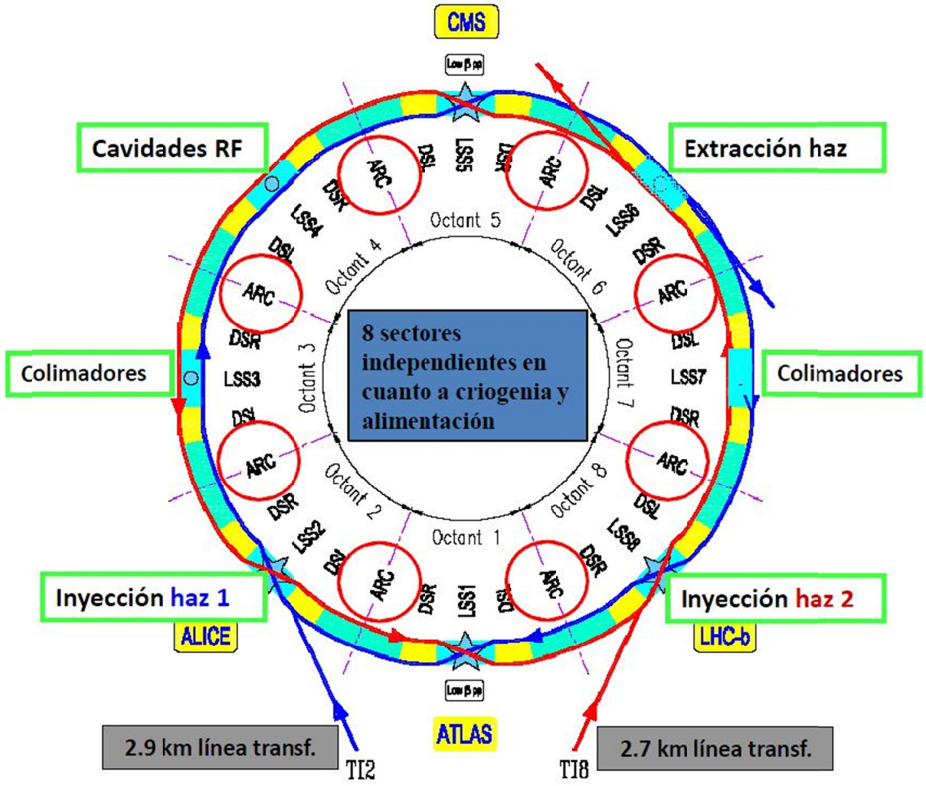


Figura 2.3: *Esquema de los experimentos que componen el LHC.*

En el año 2008 se inyectaron los primeros haces de partículas en el LHC, pero debido a una fuga de helio líquido entre los sectores 3 y 4, se provocó una fuerte explosión el 19 de septiembre, LHC se paró hasta finales del 2009 para proceder a su reparación. En marzo de 2010 tuvo lugar la primera colisión con una energía centro de masas de 7 TeV (la mitad de la nominal). Durante el año 2012 se subió a 8 TeV, energía centro de masas con la que ha estado funcionando hasta principio de 2013, cuando se realizó la primera gran parada (2 años) prevista para mantenimiento y mejora del acelerador y sus detectores. El colisionador se puso de nuevo en funcionamiento en la primavera de 2015 con una energía centro de masas de 13 TeV.

La energía de un protón a 7 TeV equivale a

$$7\times10^{12}\,\text{eV} \times 1.6\text{x}10^{-19}\,\text{J/eV} = 1{,}12\times10^{-6}\,\text{J}$$

con lo que la energía que lleva cada paquete de $1.15\text{x}10^{11}$ partículas es de

$$1{,}12\times10^{-6}\,\text{J/protón} \times 1{,}15\times10^{11}\,\text{protones/paquete} = 1{,}288 \times 10^{5}\,\text{J}$$

que es una cifra equivalente a la de un coche de 1300 kg circulando a 50 km/h. Recordemos que 2808 de estos paquetes de partículas circulan por el interior de cada uno de los tubos del LHC.

2.2. CMS.

En este trabajo de investigación nos vamos a centrar en uno de los más complejos experimentos de física de partículas, el detector CMS (Compact Muon Solenoid) [9, 23]. Como su nombre indica es un detector compacto que dispone de un gran imán superconductor en su parte central. Es junto con ATLAS, uno de los dos detectores de propósito general disponibles en el LHC. El detector CMS está situado a unos 100 m bajo tierra junto al pueblo francés de Cessy, que corresponde al P5 del LHC, y se encuentra situado en la posición diametralmente opuesta al detector ATLAS, en el círculo de 27 km de circunferencia del acelerador LHC.

El experimento CMS es una de las mayores colaboraciones científicas de la historia, implica unos 4300 físicos, ingenieros, técnicos, estudiantes y personal soporte de 182 centros de investigación distribuidos en 42 países.

Desde un punto de vista conceptual, un detector de propósito general debería tener forma esférica alrededor del punto de colisión, pero mecánicamente sería muy difícil su consecución, por lo que se opta por la forma cilíndrica. El detector consiste en una serie de capas concéntricas de detectores que analizan las propiedades de las partículas que los atraviesan y que permiten medir la energía y momento de cada una.

Los requerimientos del diseño original que se pusieron a CMS, desde el punto de vista de física de partículas, fueron [9]:

-Un sistema de identificación y medida del momento de muones de gran eficiencia y precisión.

-El mejor calorímetro electromagnético posible compatible con el sistema de muones.

-Un detector central de partículas, TRACKER, de alta calidad y compatible con los dos puntos anteriores.

-Un calorímetro hadrónico con la mayor cobertura espacial posible, ~4π.

-Económicamente viable.

El momento transverso de una partícula se define como el producto de su masa por su velocidad, siendo una magnitud vectorial.

$$\mathbf{p}\ (p_x,p_y,p_z)=m \times \mathbf{v} \qquad (2.2)$$

Utilizaremos letras negritas para indicar el carácter vectorial de una variable.

Para especificar las tres coordenadas del momento se utiliza un sistema de coordenadas esféricas, centrado en el punto de colisión, quedando **p** (|p|, θ y φ), donde θ es el ángulo polar y φ es el acimutal, definido como se representa en la figura 2.4.

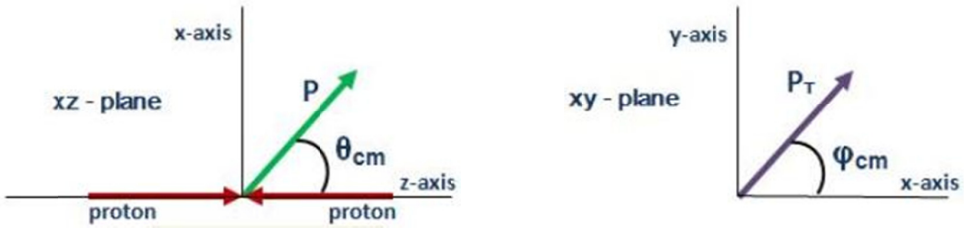


Figura 2.4: *Representación vectorial del momento de una partícula.*

Por otro lado en lugar del módulo del momento se suele utilizar la componente trasversal del mismo, p_T, la cual se calcula a partir de la energía transversal depositada en los calorímetros.

Una variable geométrica muy útil para la descripción del sistemaes la denominada seudorapidez que equivale a:

$$\eta = -ln\,[tan(\theta/2)] \qquad (2.3)$$

Estando su valor comprendido entre $-\infty$ y $+\infty$.

En la figura 2.5, podemos ver la representación gráfica del valor η, sobre una sección longitudinal de CMS, que por tener geometría cilíndrica el valor de X e Y, se representa por R.

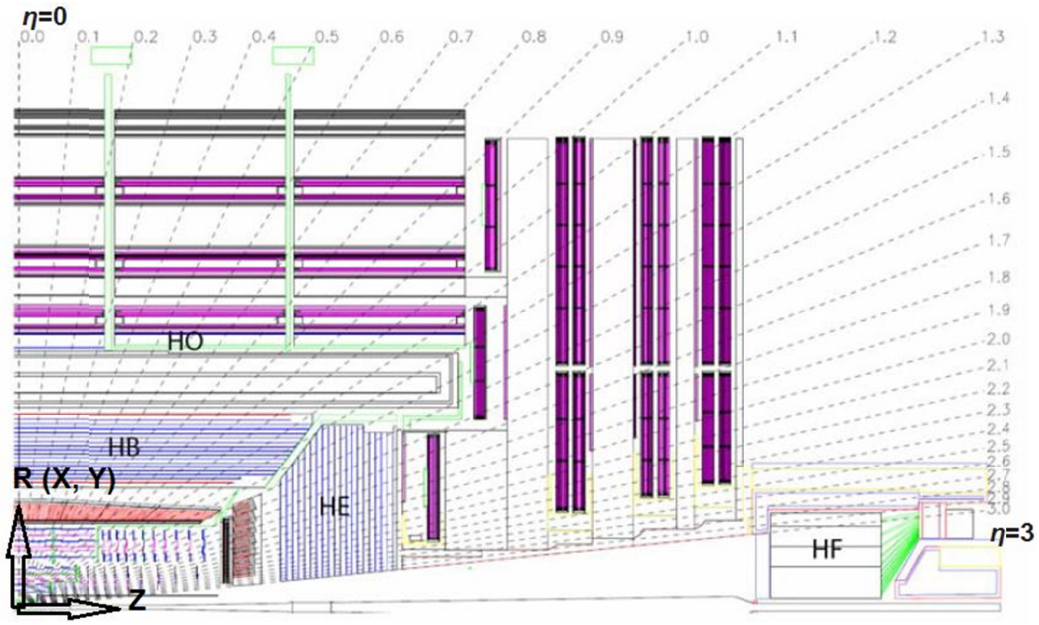
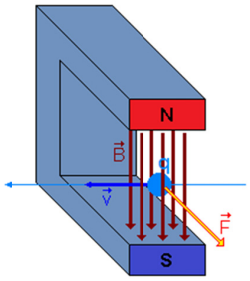


Figura 2.5: *Representación física de η sobre la sección longitudinal de CMS.*

Puesto que los protones que colisionan frontalmente tienen valores prácticamente idénticos en velocidad y dirección y por tanto igual valor en el módulo de momento lineal, el momento total de las partículas creadas ha de ser cero tras la colisión, $\sum \mathbf{P}_i = \mathbf{0}$.

Una partícula, con una carga q, moviéndose dentro de un campo magnético **B**, experimenta una fuerza **F** (fuerza de Lorentz, Figura 2.6) igual a su carga por el producto vectorial de su velocidad **v** por el campo **B**.



$$\mathbf{F} = q \times [\mathbf{v} \times \mathbf{B}] \qquad (2.4)$$

Figura 2.6: *Representación gráfica de la Fuerza de Lorentz.*

Por definición, la fuerza de Lorentz es perpendicular a la velocidad de la partícula y al campo magnético. Lo que implica que sobre una carga que se mueva paralelamente a un campo magnético la fuerza inducida es cero, por tanto solamente es importante la componente de la velocidad transversal al campo.

$$F = q \times v_T \times B$$

Y cuando la partícula se mueve dentro de un campo estático, como es en CMS, lleva una trayectoria helicoidal, siendo el eje del helicoide paralelo al campo, mientras la velocidad de la partícula permanece constante.

Teniendo en cuenta la expresión de la fuerza centrípeta que se induce sobre la partícula, donde m es la masa de la partícula y R el radio de curvatura en el plano perpendicular al campo magnético.

$$F = m \times v_T^2 / R \qquad (2.4)$$

Que igualando ambas expresiones queda, $q \times v_T \times B = m \times v_T^2 / R$

Y operando quedaría, $q \times B \times R = m \times v_T$

Expresión que es el momento transversal de la partícula,

$$P_T = q \times R \times B \qquad (2.5)$$

De este importante parámetro del detector se deduce la necesidad de conocer con mucha precisión la trayectoria del paso de las partículas a través de las distintas capas de sub-detectores de CMS, ya que la incertidumbre en el conocimiento de esa R, afectará al conocimiento del valor del momento de la partícula. Y de aquí la necesidad de conocer con gran precisión la posición de estos elementos detectores, para ello se hará uso del sistema de alineación del detector CMS.

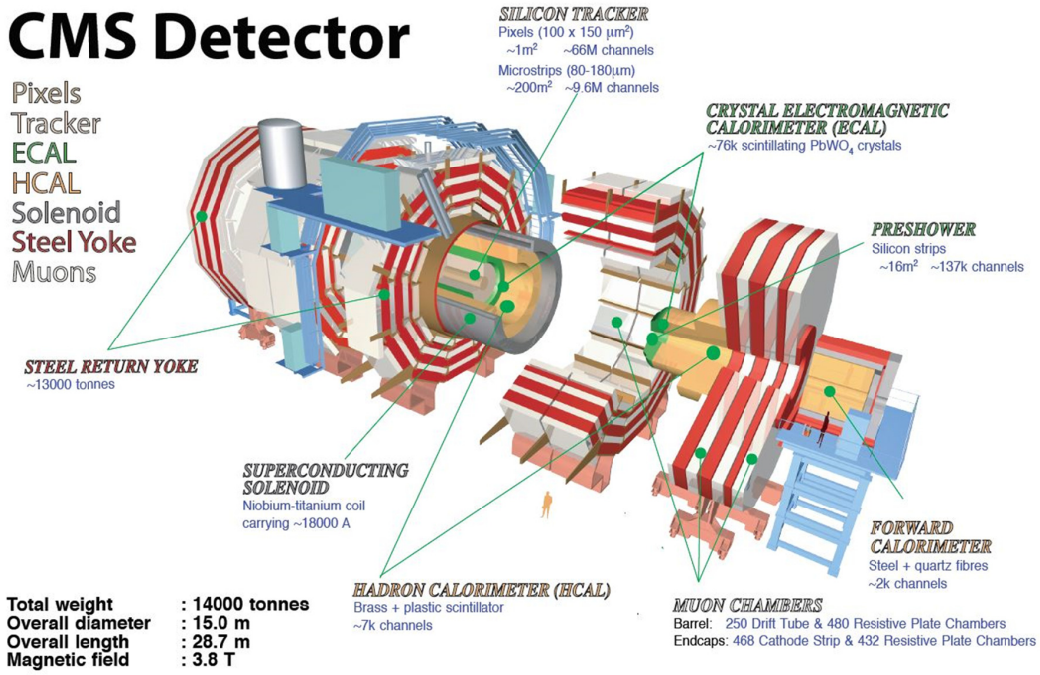


Figura 2.7: *Vista en perspectiva del detector CMS.*

En la figura 2.7 podemos observar la composición de CMS. Descartando los calorímetros muy hacia adelante, CMS es un cilindro, construido alrededor del tubo de vacío del LHC por el que circulan las partículas, de 21,6 m de longitud y unos 15 m de diámetro, con un peso de unas 14000 toneladas. El detector está compuesto por una serie de sub detectores, en diferentes capas concéntricas. Cada uno de los cuales se ocupa de la detección y medida de unos determinados parámetros de física.

El sistema de coordenadas adoptado por CMS (Figuras 2.8 y 2.9) tiene su origen en el punto de interacción (IP), el eje X apunta hacia el centro del colisionador, el eje Y es perpendicular al anterior, situándose ambos ejes en el plano transverso de CMS, formando con la vertical de la gravedad un ángulo de 1.234%, y definiéndose el eje Z en la dirección del producto vectorial de X sobre Y, que coincide con la dirección de las líneas de campo magnético. El ángulo azimutal φ, se encuentra en el plano XY, cuyo sentido va desde el eje X al Y. Y la coordenada radial en este plano se denota por R. El ángulo polar θ, se mide en el plano ZY, desde el eje Z.

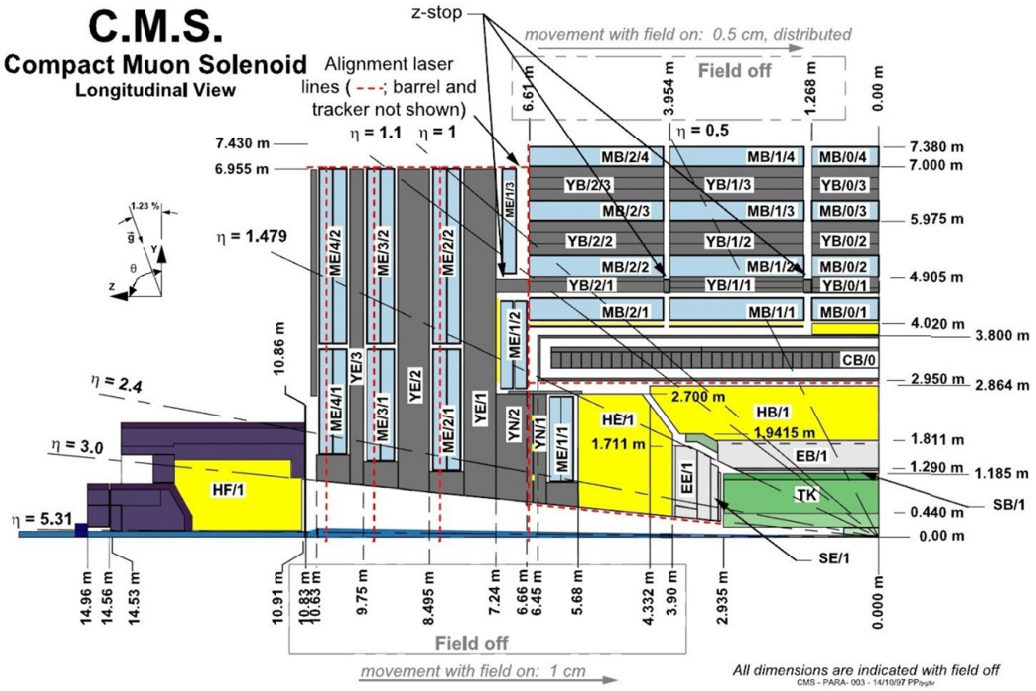


Figura 2.8: *Vista longitudinal de CMS.*

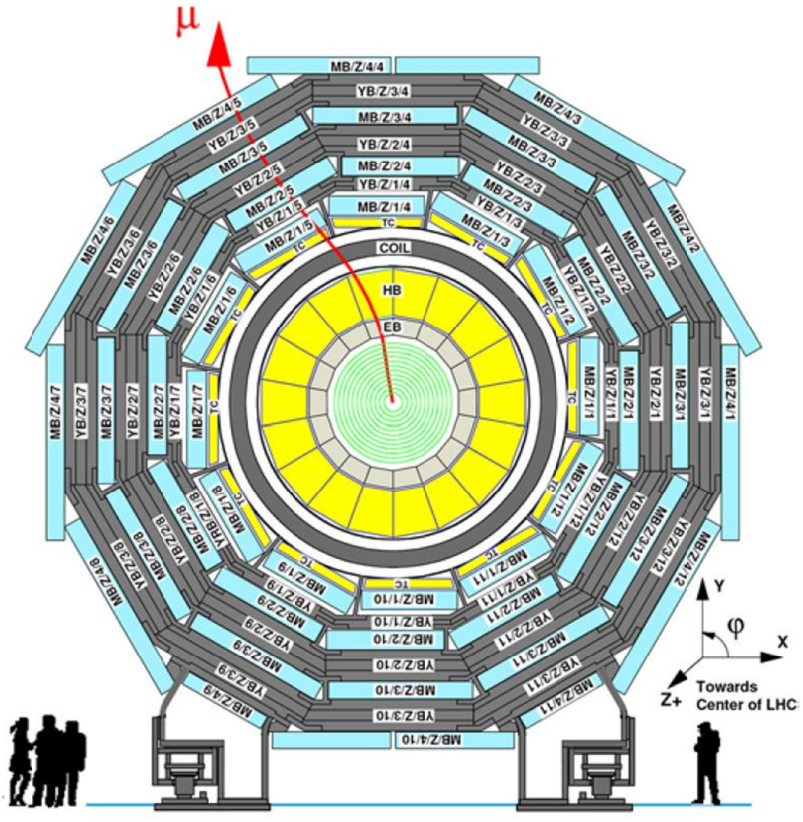


Figura 2.9: *Vista transversal de CMS.*

El detector CMS está distribuido alrededor de un gran solenoide superconductor de alto campo magnético, unos 4 T, con un diámetro interno de unos 6 m y unos 13 m de longitud. Los principales elementos de CMS desde el interior hasta la parte más externa, (ver en las figuras 2.7, 2.8, 2.9 y 2.10) son:

-Tubo de vacío, por cuyo interior circulan los haces de partículas.

- Detector central de trazas (TRACKER), utilizado para medir con precisión las trazas que dejan las partículas cargadas.

-Calorímetro electromagnético (ECAL), que rodea al TRACKER y mide la energía de fotones y electrones.

-Calorímetro hadrónico (HCAL), mide la energía de hadrones y jets operando conjuntamente con ECAL.

-Imán solenoidal superconductor de unos 4 T que rodea a HCAL.

-Hierro de retorno del campo magnético del imán.

-Espectrómetro de muones, permiten medir el momento de los muones en combinación con el TRACKER.

En la figura 2.9 se describe gráficamente cómo funcionan los distintos sub-detectores que componen el detector de partículas CMS, pudiéndose apreciar la relevancia de cada uno según sea la partícula que lo atraviesa.

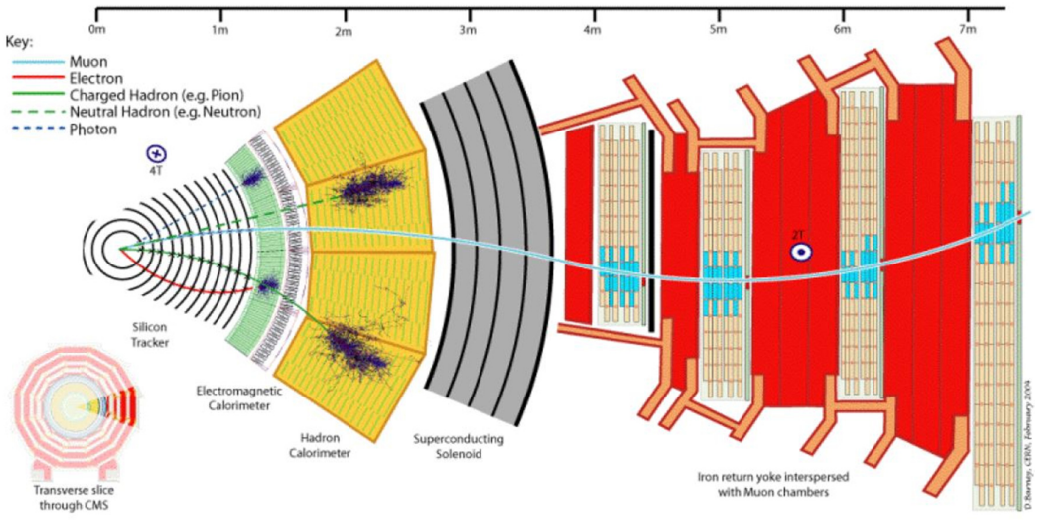


Figura 2.10: *Ilustración de la trayectoria reconstruida por un muón, electrón, hadrón y fotón, sobre un sector de la sección transversal de CMS.*

2.2.1. El detector central de trazas, TRACKER.

Un objetivo importante del programa de física del detector CMS depende de la capacidad de este para reconstruir trazas de partículas cargadas y medir con alta resolución su momento y el lugar en que se han originado, su vértice origen (este puede ser el punto de interacción o IP, o un vértice secundario,

desplazado del IP). Se ha demostrado, por la experiencia en previos detectores de partículas, que disponer de un TRACKER [16, 23 y 27] preciso y robusto dentro de un intenso campo magnético, proporciona gran capacidad de identificación y reconstrucción de partículas cargadas (muones, electrones y jets), así como de identificar vértices de producción.

Otras características que ha de cumplir este sub-detector son: ha de tener un rápido tiempo de respuesta (si es posible por debajo de los 25 ns, que es la frecuencia de cruce de los paquetes de haces), ha de tener una resistencia a la radiación acorde con los altos niveles a los que se verá sometido en esta zona próxima a la de colisión y una mínima cantidad de material. Para atender a este último requisito, la estructura soporte está hecha en fibra de carbono y compuesto de un tubo exterior soporte de 5300 mm de longitud, 2380 mm de diámetro interno y espesor 30 mm. Esta estructura es de tipo *sándwich:* 2 mm de espesor en las pieles externas tipo 950-1/T300, rellenas con 26 mm de Nomex. Los objetivos de rapidez de respuesta y resistencia a radiación se consiguen utilizando detectores de silicio.

Los objetivos de rapidez de respuesta y resistencia a la radiación se consiguen utilizando detectores de silicio. El TRACKER está situado alrededor del tubo de vacío, tiene una longitud de unos 6 m y un diámetro de unos 2,4 m. Debido a la alta luminosidad del LHC, en cada cruce (cada 25 ns) se generaran y se moverán por el TRACKER, unas 1000 partículas cargadas. La identificación de patrones de trazas necesitará, por tanto, una alta granularidad. La presencia del campo magnético modifica el perfil de la densidad de partículas cargadas. En ausencia de campo la densidad de las trazas cargadas cae como $1/r^2$, siendo r la distancia desde el punto de colisión, pero bajo un campo magnético de 4T, esta densidad de trazas decrece de forma más gradual y pronunciada, como se puede apreciar en la figura 2.11.

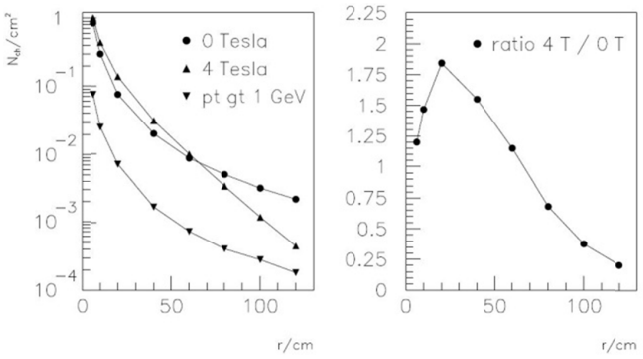


Figura 2.11: *Densidad de partículas cargadas en función de la distancia al IP, con 4T y sin campo magnético.*

De esta figura podemos deducir que, con un radio de unos 20 cm, la densidad de partículas cargadas con campo magnético de 4T es el doble que sin él, igualándose para un radio de aproximadamente 65 cm, reduciéndose la cantidad de partículas cargadas al pasar este punto, hasta llegar a un factor 4 en la parte más externa del TRACKER. Estos resultados tienen una gran influencia en el diseño de este sub-detector. Como podemos apreciar en la

figura 2.12, donde cada línea representa un módulo del detector y las líneas dobles representan a los módulos de doble-cara, los cuales se utilizan para medir la trayectoria en la otra coordenada.

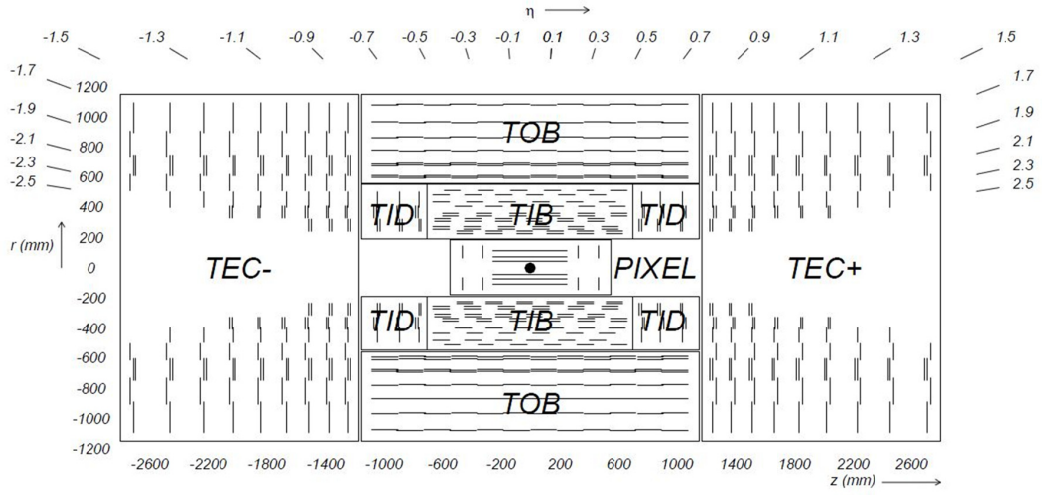


Figura 2.12: *Esquema de la sección longitudinal del TRACKER.*

Este diseño se organiza en ruedas extremadamente ligeras, instrumentadas completamente con detectores basados en silicio. En la parte más interna se encuentra el detector de vértices (PIXEL), compuesto por detectores de píxeles de silicio, en varias capas, a las que siguen otras de microtiras de silicio.

2.2.1.1. Detector de Pixeles de Silicio (PIXEL).

Está compuesto por una parte cilíndrica de tres capas concéntricas (BPix) de detectores de pixeles de silicio, con un tamaño de pixel de 100×150 μm^2, alrededor del punto de interacción, con radios a 44, 73 y 102 mm, siendo su longitud de 530 mm, centrado en el IP. En los extremos de estas, haciendo la función de tapas, se encuentran dos discos (FPix) detectores de pixeles por cada lado, que se extienden entre los radios de aproximadamente 60 mm hasta 150 mm y situados en las posiciones Z=±345 mm y Z=±465 mm. En total, PIXEL consta de unos 45 millones de canales de lectura. En la figura 2.13 podemos apreciar su distribución espacial, compuesta de 1440 módulos.

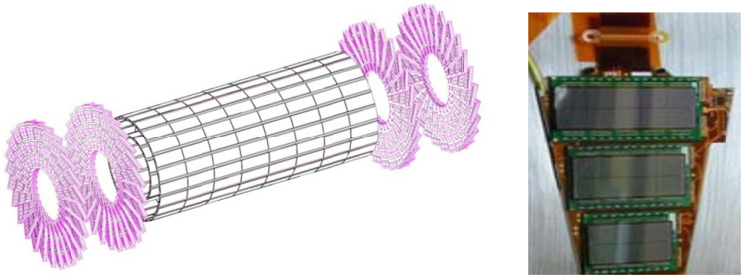


Figura 2.13: *Vista 3D del Detector de Pixeles de Silicio de CMS y panel FPix.*

Mediante esta distribución espacial se consigue una cobertura en seudorapidez entre -2.5< η < +2.5. Con estas tres capas se consiguen 3 puntos de muy alta precisión espacial sobre la trayectoria de las partículas cargadas, en Rφ y Z, alcanzando una resolución espacial de unas 15 μm.

El sistema de pixeles está diseñado para poder ser reemplazado en cualquier momento de forma independiente, ya que es la zona de CMS que más irradiación sufre. Es el componente de CMS que se instala al final, justo antes del cierre. Su estructura va soportada en unos railes muy precisos dentro del cilindro TIB del TRACKER.

2.2.1.2. Detector de Microtiras de Silicio.

El detector de microtiras de silicio se encuentra situado, radialmente, en la región comprendida entre 200 mm y el final del TRACKER a 1160 mm. En la figura 2.12 podemos ver su distribución dentro del TRACKER. Está compuesto por 3 subsistemas diferentes:

-El TIB (TRACKER Inner Barrel), compuesto por 4 capas cilíndricas de detectores de microtiras de silicio y el TID (TRACKER Inner Disks), compuesto por 3 discos, a cada lado del TIB, cerrando este volumen que llega hasta un radio de 550 mm y una Z de ± 1180 mm. Estos tienen las tiras paralelas al haz de partículas, siendo su anchura de 80 μm en las capas 1 y 2 y de 120 μm en las capas 3 y 4, en el TIB, dando lugar a una resolución en la medida de un punto de 23 μm y 35 μm, respectivamente. En el TID el ancho de las tiras varía entre 100 μm y 141 μm. Utilizándose detectores de microtiras de 320 μm de espesor.

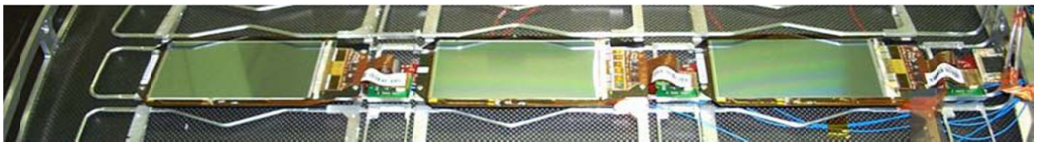


Figura 2.14: *Módulos del TIB, montados sobre una de las capas.*

-El TOB (TRACKER Outer Barrel), que se encuentra rodeando al anterior volumen, consiste en 6 capas cilíndricas de detectores de silicio que llegan hasta el radio más externo del TRACKER a 1160 mm y la Z de ± 1180 mm. Está compuesto por tiras de 183 μm de anchura en las cuatro primeras capas y de 122 μm en la 5 y 6. Y proporciona una resolución en la medida de un punto de 53 μm y 35 μm, respectivamente. En este volumen se utilizan detectores de microtiras de 500 μm de espesor.

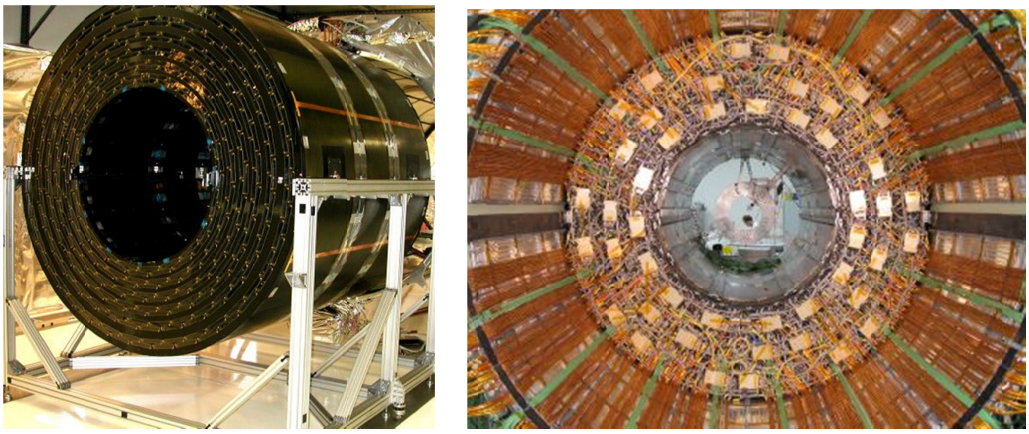


Figura 2.15: *Rueda del TOB y vista del TOB+ completamente instrumentado.*

-Los TEC± (TRACKER EndCaps), son las tapas que cierran los dos sistemas anteriores, se encuentran situados entre Z= ± 1240 mm y Z= ± 2820 mm. Y radio entre 225 mm y 1135 mm. Distribuyéndose los detectores sobre 9 discos en cada uno de los lados, de hasta 7 anillos. La anchura de estas microtiras radiales varía entre 97 µm y 184 µm, proporcionando hasta 9 puntos en la trayectoria de la partícula. El espesor de los detectores de microtiras es de 320 µm en los anillos más internos y de 500 µm en los 3 externos.

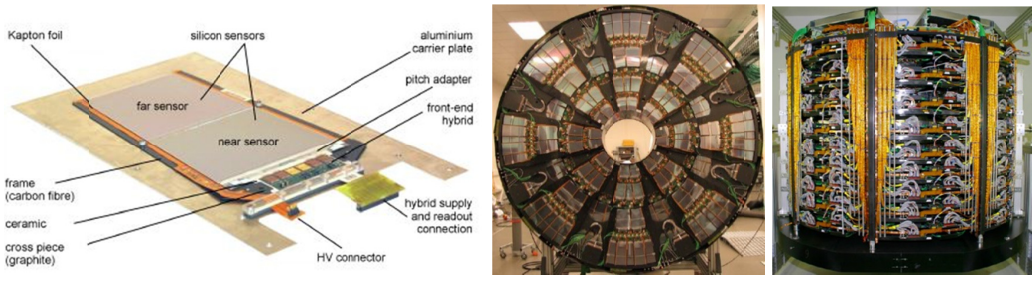


Figura 2.16: *Modulo compuesto de 2 sensores, del anillo 6 del TEC y vistas frontal y lateral del TEC.*

Adicionalmente, las dos primeras capas y anillos del TIB y TID y TOB, así como los anillos 1, 2 y 5 de los TECs tienen sensores doble-cara, segmentados de forma a poder proporcionar una medida de la segunda coordenada (Z en la zona cilíndrica y r en los discos), con una resolución en la medida del punto de 230 µm en el TIB y 530 µm en el TOB.

Este subdetector está compuesto por 9.3 millones de microtiras agrupadas en 15148 módulos, cubriendo una superficie total de 198 m^2. Está diseñado para que sobreviva durante al menos unos 10 años de funcionamiento del LHC, sometido a grandes dosis de irradiación, con fluencias equivalentes a 1.6 × 10^{14} neutrones de 1 MeV por cm^2, para la capa más interna. Para evitar la degradación en las prestaciones del sensor debido a la irradiación, el detector se mantendrá a una temperatura de -20ºC.

2.2.2. El calorímetro electromagnético, ECAL.

La función de este subdetector es absorber la energía de fotones y electrones que le llegan y generar una señal proporcional a la energía que depositan en su interior.

El calorímetro electromagnético [23, 42] está compuesto de cristales centelladores de $PbWO_4$, 61200 en la parte central y 7324 en cada una de las dos tapas de cierre. El $PbWO_4$ tiene una densidad de 8.28 g/cm^3, suficiente para la absorción de fotones y electrones de alta energía, con espesores moderados de material. La luz que proporcionan estos cristales es leída por fotodiodos de avalancha (APDs) en la región cilíndrica y por fotodiodos de vacío (VPTs) en las dos tapas. La distribución espacial de los cristales está situada según una geometría proyectiva con respecto al IP, recubriendo en su totalidad el TRACKER, con una excelente resolución en energía, debido a la fina granularidad de los cristales.

Las principales ventajas de este cristal centellador [23, 28] son: rapidez de centelleo (el 80% de la luz que produce se emite en unos 25 ns), alta densidad que permite crear un calorímetro compacto, resistencia a la radiación, baja longitud de radiación X_0 (8.9 mm) y pequeño radio de Molière R_M (21.9 mm). La longitud de radiación (X_0) se define como la distancia que recorre un electrón en el material para que su energía se reduzca, en un factor e (~ 63.2%). El radio de Molière, para una cascada electromagnética de alta energía, es el radio del cilindro cuyo eje coincide con el momento de la partícula incidente tal que fuera de él se deposita menos del 10% de la energía.

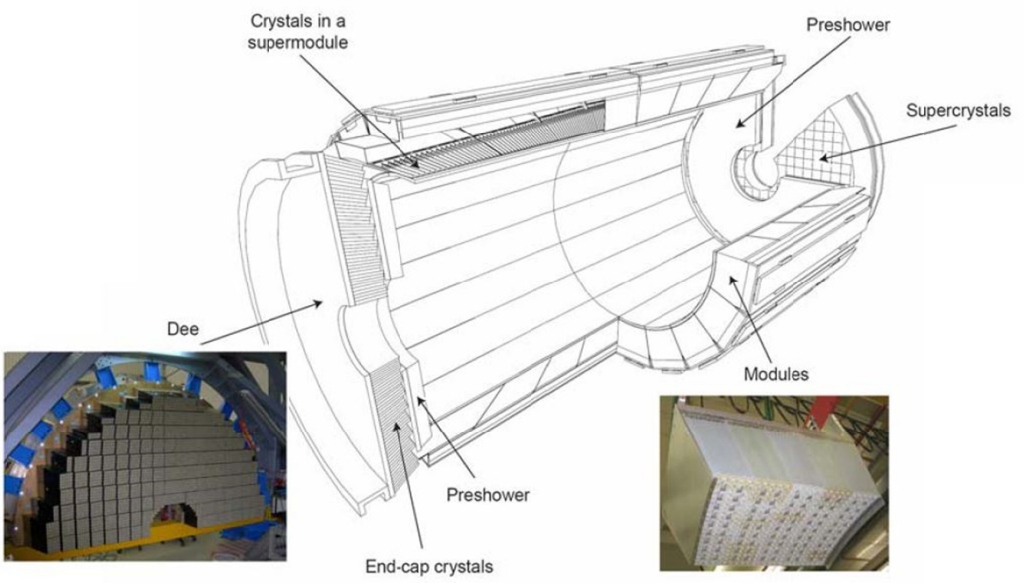


Figura 2.17: *Distribución del calorímetro electromagnético de CMS.*

En las figura 2.17 podemos ver una representación 3D del ECAL y una sección longitudinal en la figura 2.18, en las que pueden observarse:

-Una zona cilíndrica o Barril (EB) que cubre la zona de seudorapidez $|\eta|<1.479$. Formado por cristales con sección transversal de 22×22 mm^2 en la parte frontal, 26 × 26 mm^2 en la parte trasera y 230 mm de longitud (~25.9 X_0). El borde de la cara frontal se sitúa a un radio interno de 1290 mm. Los cristales están encajados en unas estructuras alveolares, llamadas sub-módulos, con una pared de 0.1 mm de espesor, compuesta de una capa de aluminio cubriendo el sensor y dos capas de fibra de vidrio con resina epoxi a continuación. La distancia nominal entre dos cristales es de 0.35 mm dentro de un sub-módulo y de 0.5 entre sub-módulos. Los sub-módulos, que pueden ser de diferente morfología en función de su posición, a su vez van ensamblados entre sí formando la estructura del detector. Cada módulo puede contener entre 400 a 500 cristales, cada cuatro módulos se ensamblan formando un súper-módulo, que puede contener unos 1700 cristales. Los módulos están ensamblados dentro de una estructura con mayores alveolos, para contenerlos, de 4 mm de pared de aluminio. El volumen total de esta parte son unos 8.14 m^3, con un peso de unos 67.4 t.

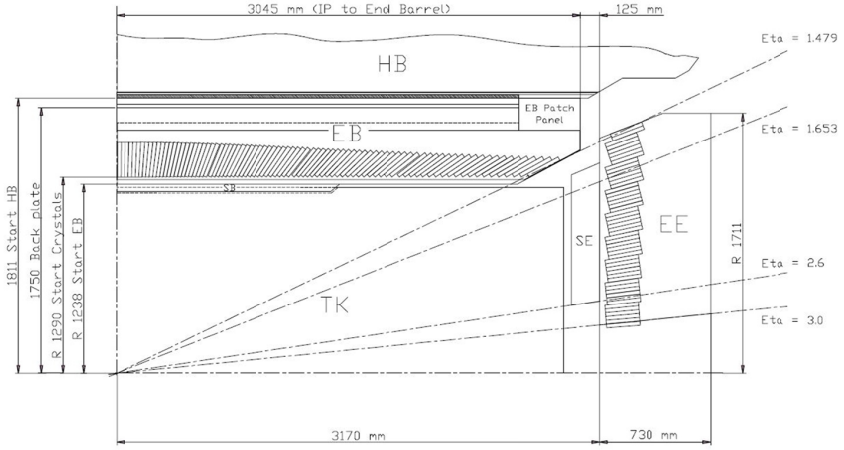


Figura 2.18: *Sección longitudinal del ECAL.*

-Unas tapas o Endcap (EE) que cubren la zona de seudorapidez de $1.479<|\eta|<3.0$. La distancia longitudinal entre el punto de interacción y el comienzo del endcap es de 3154 mm, con el imán funcionando a 3.8 T. Esta posición se comprime 16 mm por efecto de las fuerzas que produce el campo magnético sobre la estructura de CMS.

Los endcaps están formados por cristales prismáticos de 30×30 mm^2 en la cara posterior y de 28.62×28.62 mm^2 en la frontal, con una longitud de 220 mm (24.7 X_0). Estos al igual que los del barril van agrupados en estructuras alveolares de fibra de carbono de 5×5 cristales, llamados super-cristales (SCs). Cada endcap está dividido a su vez en dos partes, en forma de D, cada una con 138 SCs estándares y 18 con morfología especial en las partes internas y externas del círculo. Cada D está compuesta por 3662 cristales. El volumen total de las tapas es de 2.9 m^3, con un peso de 24 t.

-Generadores de pre-cascadas o Preshower, cubriendo la zona de seudorapidez 0<|η|<0.9 en la región del barril (SB) y 1.65<|η|<2.61 en las tapas (SE), situados en la parte frontal de los cristales. El Preshower es, de hecho, un calorímetro formado por dos planos ortogonales de detectores de silicio de 61x61 mm^2 de área activa, dividido cada uno de ellos en 32 tiras de 1.9 mm entre centros y 320 μm de espesor. Se utilizan un total de 4304 detectores con 137728 canales en total. Cada capa de detectores está precedida de una fina capa de absorbente de Al-Pb, con un espesor total de 2.8 X_0 para una incidencia normal. El Preshower tiene una precisión típica de unas 300 μm, en la determinación de la posición de impacto de la partícula.

ECAL necesita operar a 18 ±0.1 ºC para el buen funcionamiento y prestaciones de sus componentes. En la zona del preshower la temperatura será de -5ºC para mantener las prestaciones de los detectores de silicio durante el tiempo de vida de este experimento. Este último ha de tener aislantes térmicos y calentadores en las zonas exteriores para garantizar que no produce distorsiones térmicas sobre los detectores vecinos.

2.2.3. El calorímetro hadrónico, HCAL.

El calorímetro Hadrónico de CMS (HCAL) [23, 43, 44 y 45], se encuentra envolviendo completamente al ECAL y junto a éste será utilizado para la determinación de energías y direcciones de las cascadas de partículas (jets), así como la energía transversa faltante. Y ayudará a la identificación de electrones, fotones y muones. El diseño del calorímetro hadrónico requiere una buena hermeticidad, buena granularidad transversal, moderada resolución de energía y suficiente profundidad para contener las cascadas de partículas que se produzcan en su interior. Este calorímetro está compuesto de capas de latón (70% Cu y 30% Zn) de densidad 8.53 g/cm^3, como material absorbente, con una longitud de radiación X_0=14.9 mm y una longitud de interacción λ_I =164.2 mm (definiéndose la longitud de interacción (λ_I) cómo la distancia media que recorrerá un hadrón antes de interactuar con el material), entre estas capas de latón se intercala un plástico centellador que generará señales luminosas, al paso de las partículas, que serán guiadas a través de fibras al exterior donde serán leídas por unos fotosensores.

Está compuesto por una parte central o Barril (HB) y unas tapas o Endcaps (HE) cubriendo en total una región de pseudorapidez |η|<3.0. El calorímetro se encuentra en el interior del imán, por lo que sus materiales han de ser amagnéticos. Para aumentar la profundidad de muestreo de las cascadas en la región |η|<1.4 se he implementado un calorímetro hadrónico Externo (HO), en la región exterior al solenoide, con una única capa de centellador.

HB es la parte del calorímetro hadrónico que cubre la región |η|<1.3, encontrándose situado entre los radios R=1770 mm, exterior del ECAL, y R=2950 mm, radio interno del imán. El HB se divide en dos partes iguales, que se insertan una por cada lado del criostato del imán superconductor, montándose sobre este, mediante unas guías deslizantes montadas a tal efecto en el centro. Como el HB es muy rígido comparado con el criostato, se he tenido sumo cuidado en asegurarse que la carga se distribuye uniformemente sobre estas guías. Su peso total es de unas 1130 t.



Figura 2.19: *Distribución del calorímetro hadrónico sobre una sección longitudinal de un cuarto de CMS.*

Cada una de las dos mitades del HB está formada por capas de latón absorbente de unos 50 mm, entre las que se encuentran las placas de centellador plástico de 4 mm de espesor. Estas mitades se encuentran formadas por 18 módulos, cada uno de los cuales cubre 20º, las capas más internas y externas del calorímetro tienen función estructural, por lo que se ha utilizado acero inoxidable para su construcción.

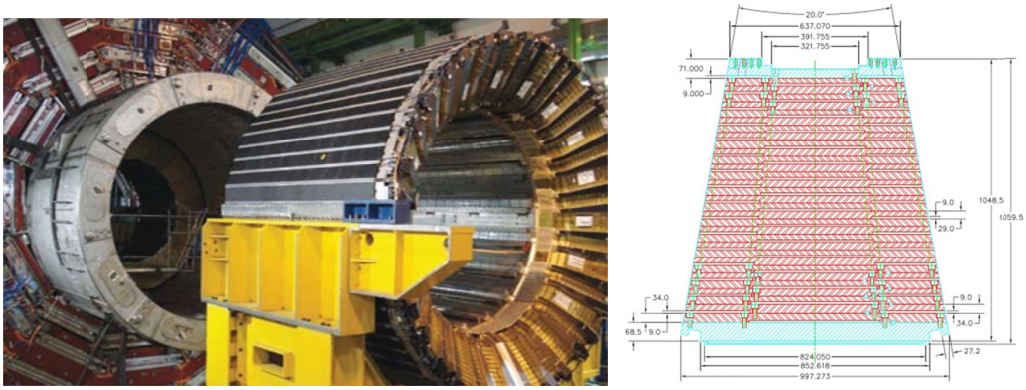


Figura 2.20: *Vista de una mitad del HB del HCAL, compuesta por 18 módulos, preparada para ser insertada dentro del hueco del criostato. Y Sección transversal de uno de los módulos.*

Los HE, están formados por capas de latón absorbente de unos 80 mm, entre las que se ubican las placas de plástico centellador de 9 mm. En la figura 2.21 podemos ver el HE de la posición negativa montado sobre el Endcap de CMS, así como una sección longitudinal que muestra cómo van unidas entre sí las capas de absorbente, formando una estructura auto-portante de unas 300 t, cada tapa.

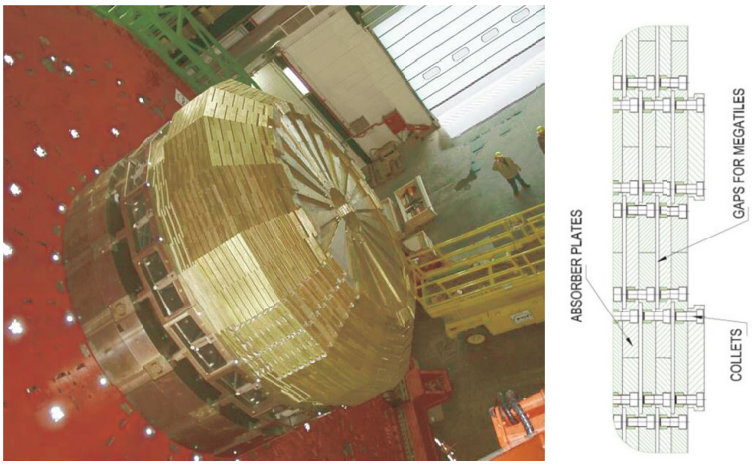


Figura 2.21: *Vista del HE-, montado sobre el Endcap de CMS. Y sección longitudinal del HE.*

En la región 3.0<|η|<5.2, a 11.2 m de IP (ver figura 2.19), se encuentra situado el calorímetro a pequeño ángulo, o Forward (HF), compuesto de hierro como absorbente y fibras de cuarzo como material activo. En esa región el campo magnético es residual, pero las dosis de radiación son muy altas. El peso de cada HF es de unas 240 t.

2.2.4. El sistema de detección de muones.

La tarea del sistema de detección de muones de CMS [17, 23] es identificar, seleccionar y proporcionar una medida precisa de su momento. La elección de la tecnología utilizada viene limitada por la gran superficie de detección a cubrir y por los diferentes tipos de fondos de radiación existentes. Para alcanzar los objetivos de eficacia y reconstrucción local del momento, se requiere una resolución espacial del orden de 100 μm en las cámaras de muones.

Los muones de bajo momento, hasta 0.1 TeV, se pueden medir con mucha precisión en el TRACKER, utilizando el campo magnético de 3.8 T, pero para los muones de alto momento, entre 0.1 TeV y varios TeV, se necesitan mayores longitudes de traza para obtener unas trayectorias razonables y mejor precisión de P_T, para ello se utilizan las cámaras de muones situadas entre el hierro de retorno del imán, obteniendo longitudes de traza de 6 a 10 metros.

Los tres principales requisitos del espectrómetro de muones son:

-Identificación de los muones. El masivo absorbente colocado antes de llegar a este sistema sirve como filtro a otro tipo de partículas, ya que estos tienen una gran capacidad de penetración dentro de la materia.

-Funciones de trigger (disparo) al paso de las partículas. Los muones proporcionan una traza bastante limpia que sirve para seleccionar muchos procesos físicos.

-Medida precisa del momento transverso de los muones, en combinación con la información proporcionada por el TRACKER.

El sistema de muones está colocado en el exterior de los calorímetros y del imán. En la figura 2.10 se puede observar que, aparte de los neutrinos, las únicas partículas que atraviesan todos los sistemas internos y el imán son los muones (los neutrinos que son partículas que pueden recorrer grandes distancias sin prácticamente interactuar con la materia). Lo muones realizarán pequeñas deposiciones de energía fundamentalmente mediante ionización. La identificación de los muones está garantizada en CMS, ya que se dispone de al menos 10 longitudes de interacción en los calorímetros, antes de llegar a la primera estación de medida de muones, y de otras 10 antes de la última, debida al hierro de retorno del imán donde están insertadas estas. Los muones son las únicas partículas cargadas que pueden alcanzar la última estación de medida.

El sistema de muones consiste en cuatro estaciones colocadas de forma alternada entre el hierro de retorno del imán superconductor. Consta de una parte central o Barrel, donde las capas son concéntricas (ver figura 2.9), que cubre la región $|\eta|<1.3$ y de unas tapas o Endcap donde las estaciones de muones se distribuyen formando discos perpendiculares al eje de CMS, cubriendo la región $0.8<|\eta|<2.4$ (ver figura 2.22).

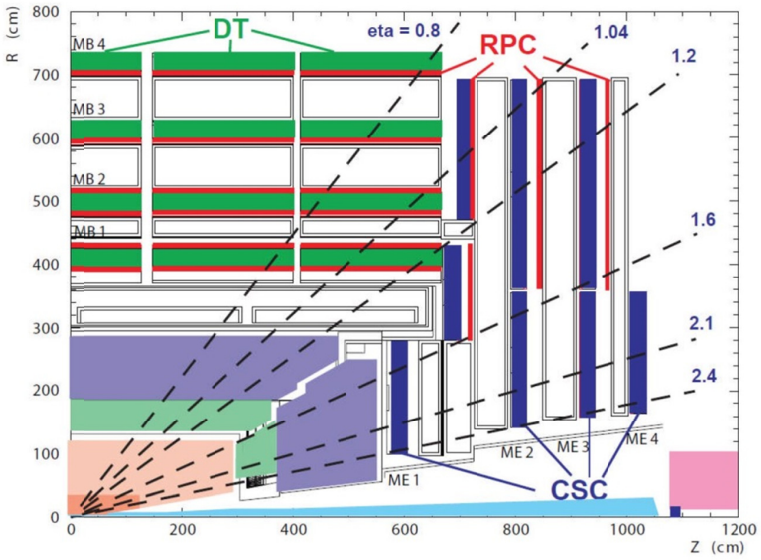


Figura 2.22: *Sección longitudinal de un cuarto de CMS con los diferentes tipos de detectores empleados en las regiones del espectrómetro de muones: cámaras de deriva (DTs), RPCs y CSCs.*

El sistema de muones utiliza tres tipos de detectores gaseosos:

-Cámaras de tubos de deriva (DT), para el Barrel. En esta zona el campo magnético es de baja intensidad y la tasa de partículas que llega es pequeña. Se trata de cámaras de 42 × 13 mm^2 de sección llenas de una mezcla gaseosa de Ar-CO_2. Cada tubo tiene un hilo de ánodo (figura 2.23) sometido a un potencial positivo generando así un campo eléctrico en el volumen de detección. La coordenada en el plano perpendicular al hilo se obtiene a partir del tiempo de deriva hacia el ánodo de los electrones producidos en el gas por

el paso de la partícula. Cada estación contiene 12 capas de DT, distribuidas en 3 grupos (supercapas) de 4 capas cada uno (figuras 2.23 y 2.24), las dos supercapas exteriores, con los hilos paralelos al eje del haz, miden la coordenada φ, con una precisión de unas 100 μm y la supercapa intermedia, con los hilos perpendiculares a los anteriores, mide la coordenada polar θ, con precisiones del orden de 150 μm. El área total cubierta por estos detectores es de unos 18000 m^2.

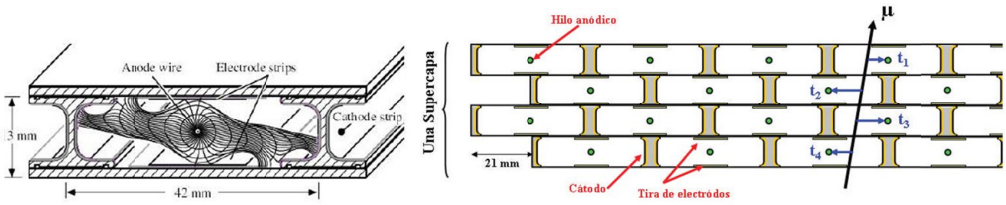


Figura 2.23: *Tubo de deriva de CMS y supercapa.*

La rigidez estructural se garantiza a través de una estructura tipo sándwich de panel de abeja de aluminio pegada entre las supercapas. En las figuras 2.8 y 2.9 y 2.22, podemos ver la distribución espacial de las cámaras de deriva y su nomenclatura. En total son 250 cámaras distribuidas en las 5 ruedas del Barrel.

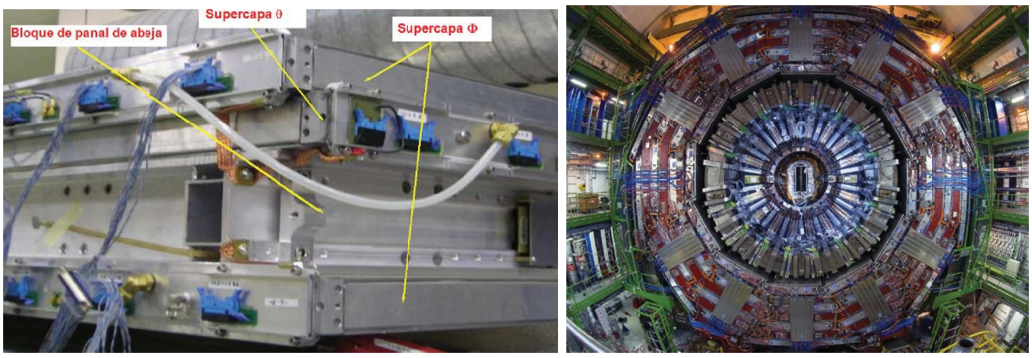


Figura 2.24: *Cámara de deriva y rueda YB-2 de CMS con todas las cámaras instaladas.*

-Cámaras de pista catódica (CSC), en los Endcap. Estas van ubicadas en las regiones laterales del detector, en los discos del hierro de retorno, donde el campo es muy intenso e inhomogéneo y la tasa de partículas es alta. Las CSCs son cámaras proporcionales multihilos donde el plano de cátodos está segmentado en pistas radiales (Figura 2.25). Los hilos se disponen perpendicularmente a las pistas, siendo paralelos al plano del cátodo. La avalancha que se genera alrededor de un hilo, por el paso de la partícula, pasa al plano de cátodos, permitiendo una lectura bidimensional, con una coordenada del hilo y otra de las pistas. Las Cámaras contienen una mezcla gaseosa de Ar-CO_2-CF_4. Una cámara CSC contiene 6 planos separados por una capa rigidizadora de sándwich de panel de abeja. La resolución espacial de estas varía entre las 75 μm de las estaciones más internas hasta las 150 μm, en las posiciones exteriores. Las CSCs tienen forma trapezoidal, para cubrir la superficie circular de las distintas capas de cámaras que van en los Endcaps, como podemos apreciar en las figuras 2.8 y 2.9 y 2.22. Aquí se

muestra además la nomenclatura utilizada para las 540 CSCs que componen los Endcaps de CMS. Estas cubren una superficie total de unos 5000 m^2.

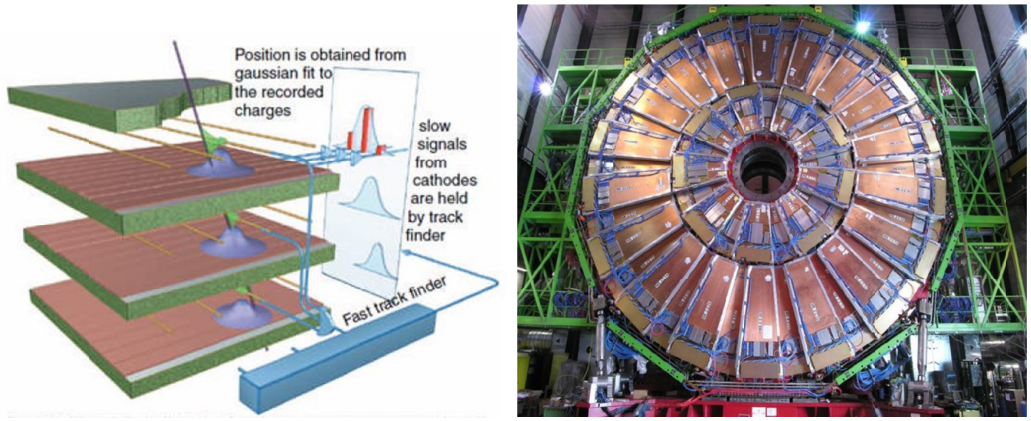


Figura 2.25: *Cámara de pista catódica (CSC) y distribución de la estación de CSCs del Endcap ME2.*

-Las cámaras de placas resistivas (RPC), en el Barrel y Endcap, que son detectores de gas que combinan una resolución espacial razonable de unos 10 mm en Rφ y una resolución temporal del nanosegundo, siendo la base del sistema de trigger (disparo) y de selección de los muones.

Se han intercalado 6 capas de RPCs en la zona del Barrel del sistema de muones, situándose 2 series de cámaras RPCs sobre ambas caras de los DTs de las dos primeras estaciones de muones. La tercera y cuarta solamente disponen de una RPC en la cara interior de los DTs. En los Endcap solamente se dispone de un plano de RPCs en cada una de las tres primeras estaciones de muones.

Una cámara RPC consiste en dos placas paralelas de material muy resistivo (Baquelita), separadas por un espacio de algunos milímetros de gas. Las superficies externas están cubiertas de grafito, formando los cátodos, a los que se le aplica una alta tensión. Cuando cruza un muon, la avalancha de electrones generada induce una señal a las pistas de aluminio situadas en el exterior de los cátodos, donde es leída dicha señal.

2.2.5. El imán superconductor y el hierro de retorno.

El imán de CMS [47, 23] es el mayor elemento en términos de tamaño, peso y rigidez estructural de todo el detector. Una importante característica del imán de CMS es su intensidad nominal de 3.8 T. Este es un parámetro básico de diseño que viene impuesto por la física que se quiere estudiar con CMS. Este es necesario para maximizar las prestaciones del detector, puesto que la resolución de la medida del momento de la partícula es proporcional a la intensidad del campo magnético. Además debe ser lo suficientemente grande para contener en su interior el TRACKER y los calorímetros de CMS (excluyendo los situados a pequeño ángulo).

Se trata de un imán solenoidal superconductor (figura 2.26), cuya bobina está dentro de un criostato de acero inoxidable 304, refrigerado mediante helio líquido a 4.2 ºK, de 13 metros de longitud, un diámetro interno de 6 m y un hierro de retorno de 21 m de longitud por 14 m de diámetro externo, con un peso total de más de 10000 t, que se encuentra envolviéndolo completamente (Figuras 2.7, 2.8 y 2.9). El hierro de retorno además se utiliza como estructura soporte de los diferentes elementos que forman CMS.

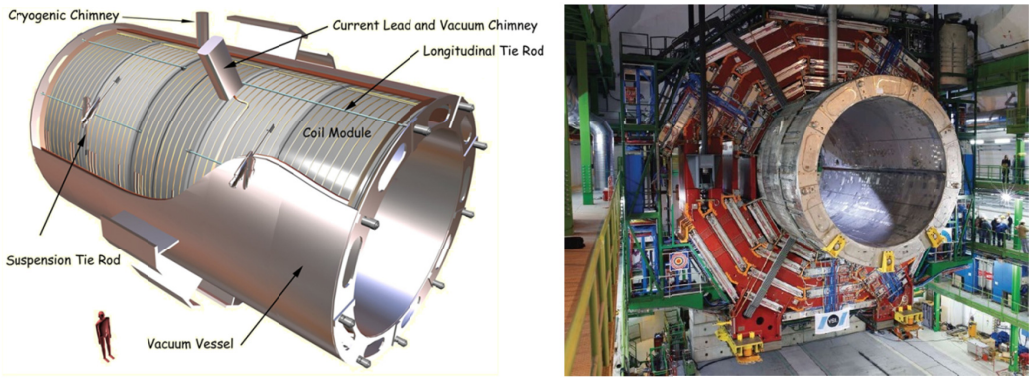


Figura 2.26: *Solenoide de CMS y descenso a la caverna experimental UXC5 de la rueda central de CMS.*

El solenoide está compuesto de cinco módulos, fabricados de forma independiente (Figura 2.27), conectados mecánica y eléctricamente entre sí, formando un único cuerpo.

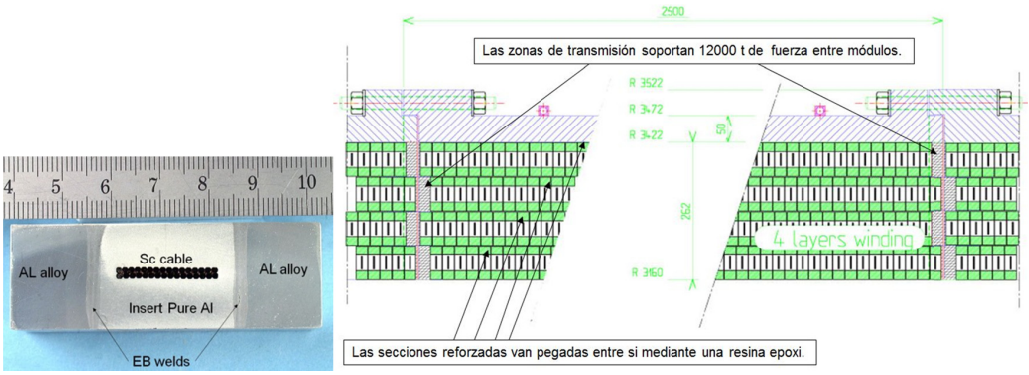


Figura 2.27: *Sección del conductor y de uno de los cinco módulos del solenoide de CMS.*

Cada módulo está bobinado con cuatro capas de superconductor de Nb-Ti embebido en aluminio puro que va soldado mediante haz de electrones (EB) en ambos lados a una aleación de aluminio de alta resistencia cómo refuerzo, este sistema está especialmente diseñado para resistir las fuerzas magnéticas y térmicas inducidas sobre él. Las 4 capas van pegadas entre sí mediante una resina epoxi. Este solenoide está compuesto por un total de 2168 vueltas de bobinado. El solenoide se verá sometido durante su operación a unas fuerzas de compresión axiales de unas 12000 t y la resina epoxi a unas presiones equivalentes de unos 64 bares.

En la tabla 2.2 podemos ver los principales parámetros del imán desarrollado para CMS.

General parameters	
Magnetic length	12.5 m
Cold bore diameter	6.3 m
Central magnetic induction	4 T
Total Ampere-turns	41.7 MA-turns
Nominal current	19.14 kA
Inductance	14.2 H
Stored energy	2.6 GJ
Cold mass	
Layout	Five modules mechanically and electrically coupled
Radial thickness of cold mass	312 mm
Radiation thickness of cold mass	3.9 X_0
Weight of cold mass	220 t
Maximum induction on conductor	4.6 T
Temperature margin wrt operating temperature	1.8 K
Stored energy/unit cold mass	11.6 kJ/kg
Iron yoke	
Outer diameter of the iron flats	14 m
Length of barrel	13 m
Thickness of the iron layers in barrel	300, 630 and 630 mm
Mass of iron in barrel	6000 t
Thickness of iron disks in endcaps	250, 600 and 600 mm
Mass of iron in each endcap	2000 t
Total mass of iron in return yoke	10 000 t

Tabla 2.2: *Parámetros del imán de CMS.*

El hierro de retorno está formado por grandes anillos de acero al carbono, constituidos por piezas que han sido ensambladas mecánicamente mediante tornillos y pasadores de posición, para garantizar las tolerancias de montaje. En líneas generales se compone de 5 ruedas centrales independientes y 2 tapas cerrando el campo, compuestas a su vez por 3 ruedas cada una (figura 2.7). La rueda central, en la que está ensamblado el criostato del imán está fija a la caverna, las otras diez ruedas, que se sitúan a ambos lado de esta, son móviles para permitir el acceso entre ruedas y así poder llegar a los componentes que van instalados en ellas. Estas se van a ver sometidas a grandes fuerzas axiales [48], que según las estimaciones calculadas mediantes programas de elementos finitos serán del orden de 10000 t en la rueda YE1, durante el funcionamiento del imán, siendo inducidas por el efecto del campo magnético sobre la estructura de acero al carbono del hierro del retorno (figura 2.28). Esto producirá unas deformaciones del orden de centímetros sobre esta estructura del hierro de retorno, que como se ha dicho es sobre la que van asentados todos los sistemas que componen el detector CMS, lo que inducirá

desplazamientos entre los componentes, después de su montaje inicial, que deberán ser monitorizados por el sistema de alineación de CMS.

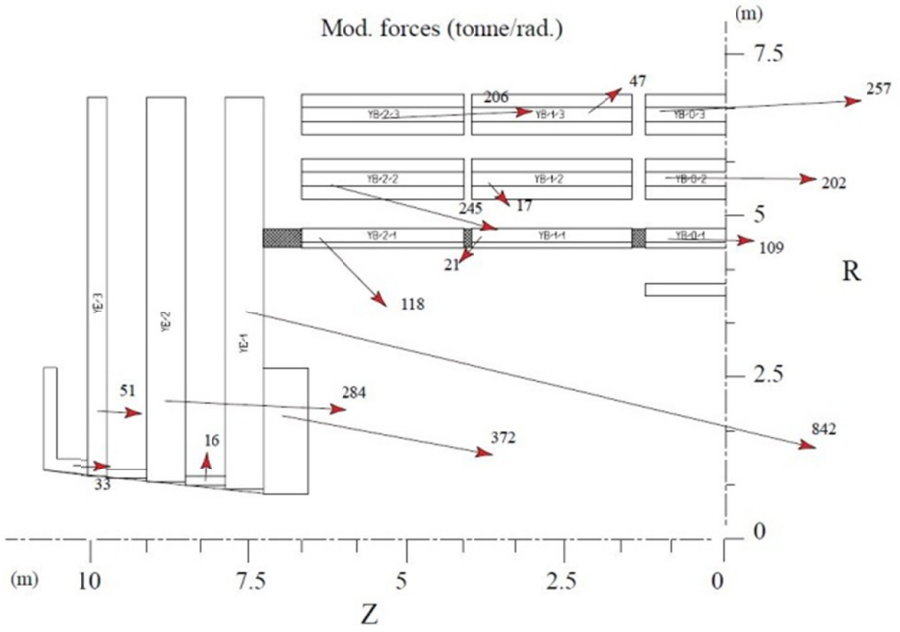


Figura 2.28: *Distribución de la fuerza total Axial y Radial (por radian) inducida por el campo magnético sobre las diferentes partes de la estructura del hierro de retorno.*

El imán se diseñó para ser ensamblado y comprobado en el exterior de la caverna experimental de CMS, en el área de instalación SX5 (Figura 2.29) situado en la superficie del punto 5 del LHC. Posteriormente fue bajado mediante un puente grúa de unas 2800 t especialmente creado para tal efecto, a la caverna experimental UXC55, a unos 100 m bajo tierra, donde se procedió a finalizar la instrumentación de todas las ruedas de CMS, con los diferentes detectores que se han descrito en el presente capítulo, para su puesta en servicio definitiva a finales del año 2009.

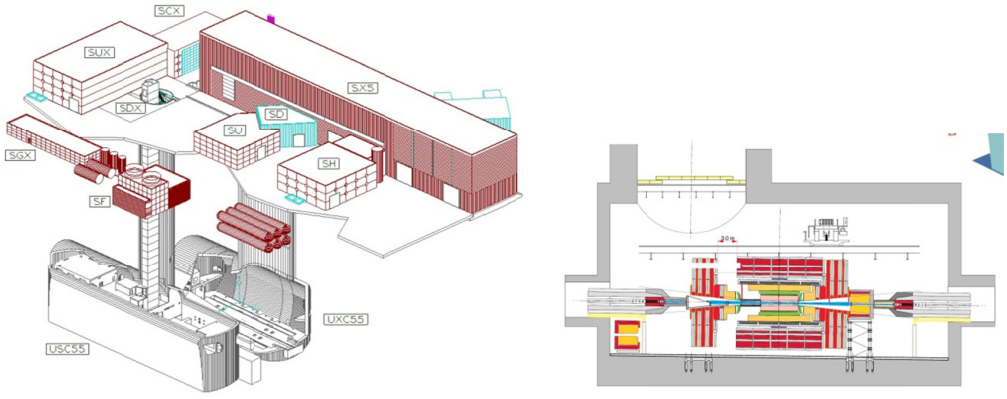


Figura 2.29: *Distribución de edificios y zonas en el Punto 5 del LHC y sección longitudinal USC55 del área experimental donde se encuentra CMS.*

2.2.6. El campo magnético y los movimientos esperados.

En esta sección se describirá de forma concisa las condiciones del campo magnético que se dan en las diferentes regiones del detector y que hay que tener en cuenta para asegurarnos el funcionamiento de los componentes del sistema de alineación que van instalados en CMS. Por otro lado una consecuencia importante del campo magnético es las deformaciones que induce sobre la estructura del hierro de retorno del imán, lo que se traduce en movimientos de los componentes del sistema de alineación que van asentados sobre esta estructura. Estas deformaciones exigen adaptar el rango de los componentes que van en las diferentes posiciones con los movimientos a los que se verán sometidos durante su operación dentro del detector, por ello también se muestran las estimaciones de movimientos esperados de las distintas estructuras.

El campo de CMS [47] se calculó en su inicio mediante diferentes programas de elementos finitos Poisson en el CERN, CASTEM en el CEA-Saclay y ANSYS en el INFN-Genova y la Universidad de Wisconsin, utilizando un modelo axil-simétrico sobre una sección de un cuarto de plano longitudinal de CMS (Figura 2.30), aproximando un polígono de 12 lados a un cilindro, utilizando para los cálculos una curva B-H obtenida de las medidas realizadas al acero de construcción enviado de Rusia y Francia, para la construcción del imán del experimento L3, obteniendo las curvas máximas y mínimas de permeabilidad del material, debido a las in-homogeneidades del mismo. Resultando una región de campo contante en la zona interna del solenoide, pero no en el exterior.

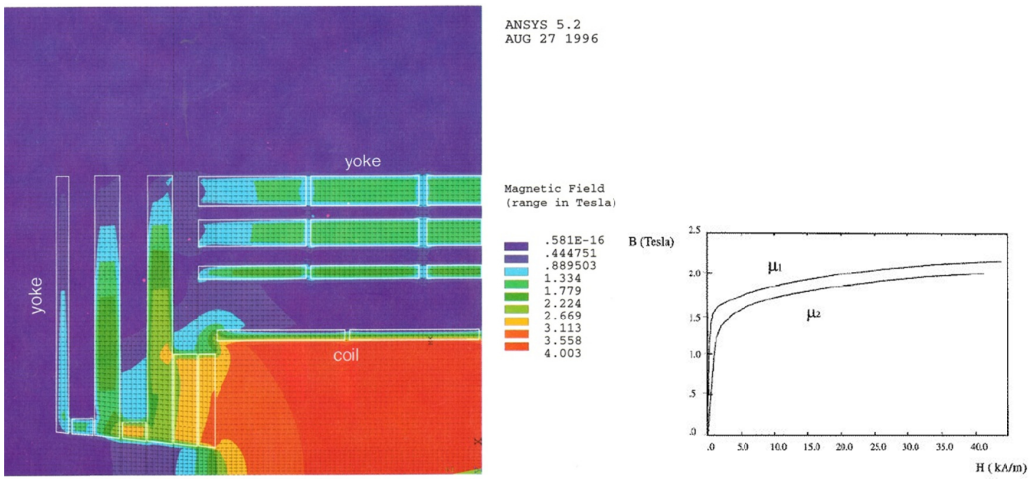


Figura 2.30: *Mapa del campo magnético de un cuarto del plano longitudinal de CMS y curva B-H del acero de construcción usado en L3, mostrando valor máximo y mínimo de la permeabilidad magnética del material.*

Debido a su gran intensidad, el campo de retorno en la región del Endcap donde va el espectrómetro de muones saturará el hierro circundante y al ser una geometría relativamente compleja el campo no será uniforme. Esto no

ocurre en la región del barril donde el campo en estas regiones debería permanecer relativamente uniforme.

Los modelos se han ido desarrollando con el tiempo, ajustándose cada vez más a la geometría real. Estos modelos han sido validados mediante ensayos realizados sobre el imán real en el área de instalación SX5, ayudándose para ello de sistemas diseñados expresamente para la realización de medidas con sondas de efecto Hall [49, 50] en puntos estratégicos. Estas medidas han servido también para corregir las estimaciones realizadas y ajustar el modelo teórico, ya que este no puede predecir las in-homogeneidades provocadas por pequeñas imperfecciones en el acero, permeabilidad del hierro de retorno, desalineamientos de los componentes durante su instalación o leves asimetrías en el diseño del detector. En general se ha visto que la relación entre los valores medidos y los calculados con TOSCA en la zona del barrel está en torno a 0.97, con una desviación estándar de 0.07 y sobre 0.93 en los Endcap con una desviación estándar de 0.04, aunque en algunos puntos hubo discrepancias del orden del 22% en la región del barrel y del 14% en los endcaps. En cambio, en la región homogénea interna del solenoide, la variación entre la estimación y la medición fue menor del 0.1% [51 y 52]. En la figura 2.31 podemos una estimación del campo magnético más reciente, realizada con TOSCA.

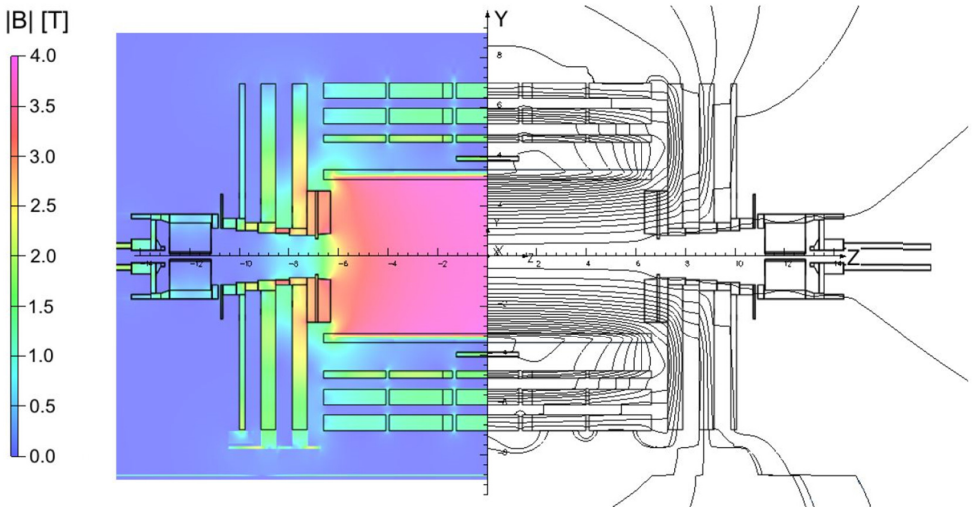


Figura 2.31: *Mapa de campo magnético y de líneas del campo de la mitad de CMS, cada línea del campo representa un incremento del flujo magnético de 6 Wb.*

El entorno del campo magnético debe ser tenido en cuenta en el diseño del sistema de alineación de CMS, a la hora de realizar la selección de los componentes que lo forman, garantizando que estos funcionen en las condiciones de intensidad y gradientes de campo a que estén sometidos en función de su posición espacial dentro de CMS. Para ello se han buscado tecnologías de los sensores utilizados dentro de este sistema cuya respuesta no presente una dependencia con el campo magnético, o con el gradiente, y en el caso de tener cierta dependencia en la señal eléctrica, deberá comprobarse que el error inducido permanece dentro de los requisitos de precisión del

sistema o sino será necesaria realizar una calibración para parametrizar ese valor de salida.

Además, aunque la mayoría del flujo magnético se reconduce por el hierro de retorno de CMS, el campo residual fuera del detector es del orden de 0.05 T en varios metros alrededor del hierro de retorno, con lo que la electrónica que se sitúe en las zonas aledañas a CMS puede verse también afectada. Incluso a distancias de varias decenas de metros, donde se encuentran las salas de servicios de CMS, el campo residual es del orden de 0.0005 T.

En la tabla 2.3, se muestran los valores de campo en diferentes regiones de CMS donde van instalados dispositivos del sistema de alineación LINK del detector, a los que nos referiremos más adelante.

ZONA de CMS		Componente Radial (Teslas)	Total (Teslas)
TRACKER	Máximo	0.8	3.8
	Mínimo	0.02	3.7
η=3	Máximo	2.5	4.0
	Mínimo	0.08	0.9
YN1	Máximo	1.1	3.1
	Mínimo	0.1	1.3
ME1/1	Máximo	1.1	3.1
	Mínimo	0.05	0.3
ME1/2	Máximo	1.1	1.8
	Mínimo	0.3	0.3
MAB	Máximo	0.8	1.3
	Mínimo	0.6	0.6

Tabla 2.3: *Valores máximo y mínimo del campo al que se verán sometidos los dispositivos del sistema de alineación LINK en CMS.*

Volviendo a las grandes fuerzas (Figura 2.28) que experimentan las estructuras del hierro de retorno, en la figuras 2.32 a 2.36, podemos ver las estimaciones de deformaciones que se realizaron mediante ANSYS en las diferentes ruedas de CMS. Las figuras 2.32 y 2.33 muestran los desplazamientos que se producen en la estructura de la YB0 (central) y las ruedas YB±1 e YB±2, debidos principalmente a la gravedad. Aquí el campo magnético no produce una influencia apreciable debido a la geometría de la misma y del campo en esta zona, al igual que será relativamente poco apreciable el desplazamiento en Z. En las figuras 2.34, 2.35 y 2.36 se muestran las deformaciones que se producen en las ruedas del Endcap, en la dirección vertical (Y). En Z, horizontalmente, debido a su geometría, serán despreciables. En estas ruedas la componente de la fuerza del campo magnético, además de la gravedad, será origen importante de los desplazamientos inducidos a la estructura.

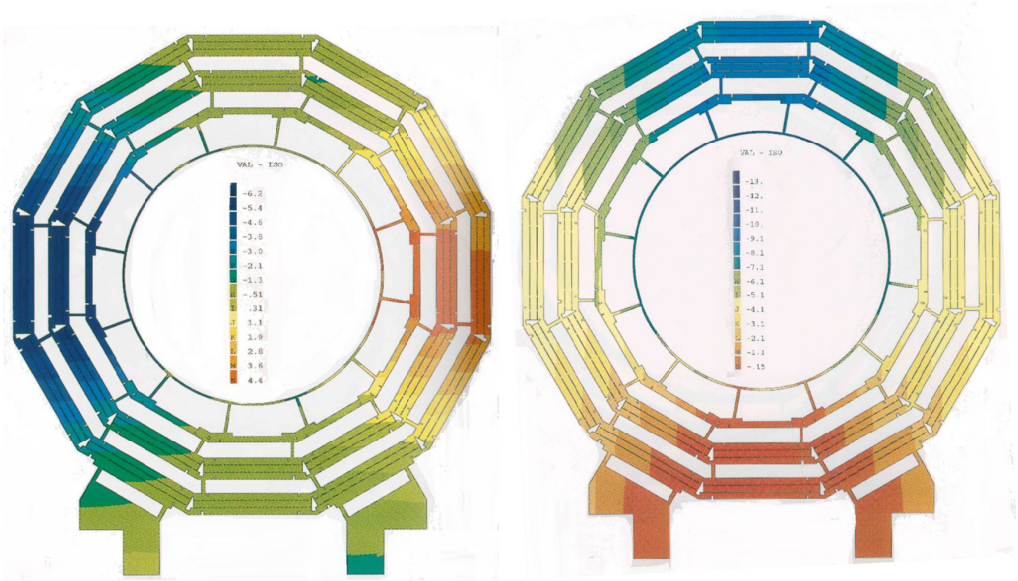


Figura 2.32: *Desplazamiento horizontal (izq.) y vertical (der.) en mm de la rueda central (YB0) de CMS, debido a la gravedad.*

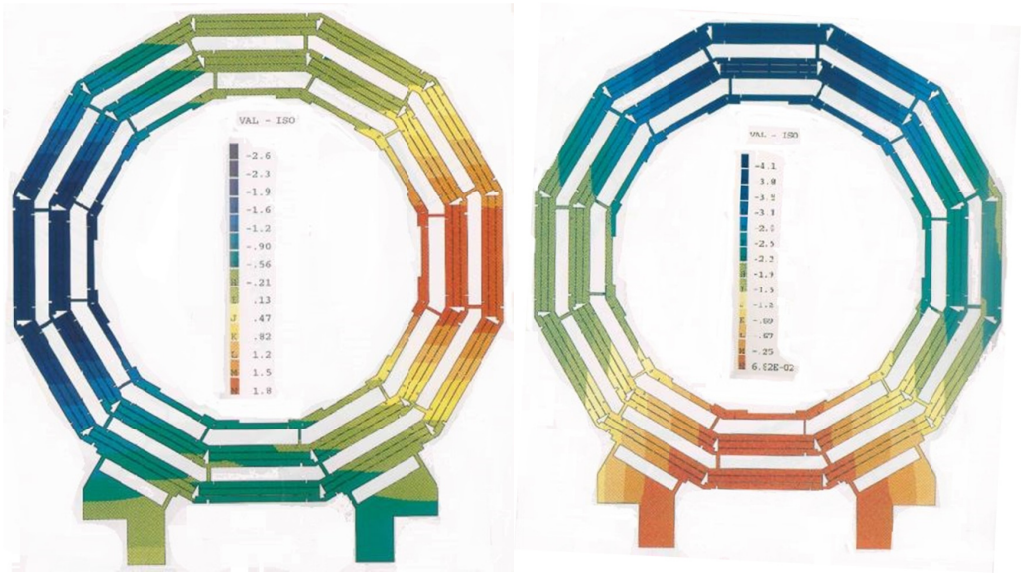


Figura 2.33: *Desplazamiento horizontal (izq.) y vertical (der.) en mm de las ruedas central YB±1 e YB±2 de CMS, debido a la gravedad.*

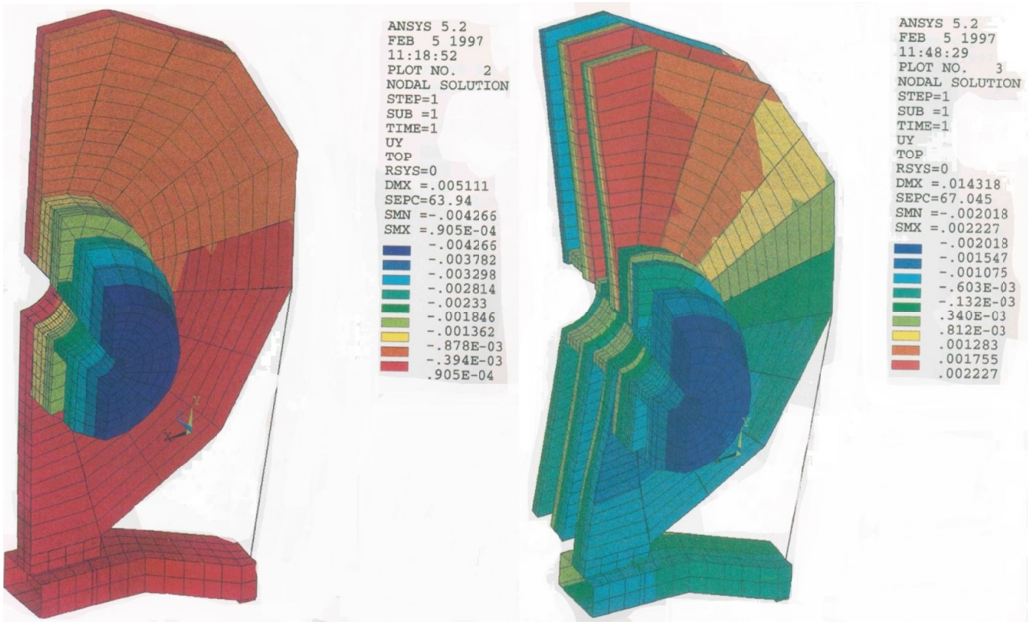


Figura 2.34: *Desplazamiento Vertical del Endcap de CMS debido a la gravedad (izq.) y por la gravedad y el campo magnético (der.), en metros.*

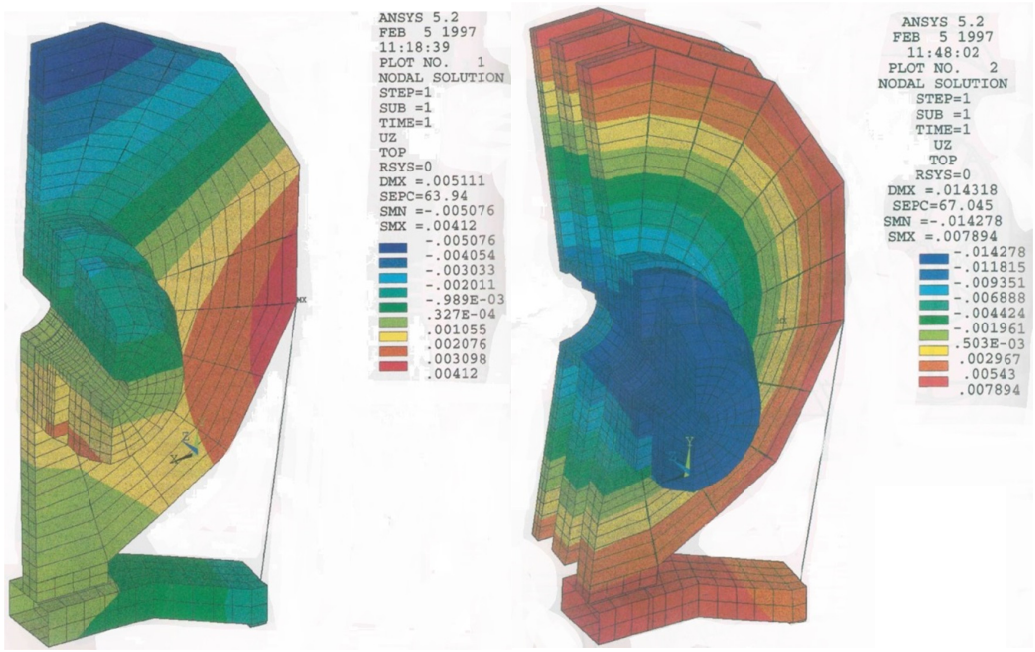


Figura 2.35: *Desplazamiento en Z del Endcap de CMS debido a la gravedad (izq.) y por la gravedad y el campo magnético (der.), en metros.*

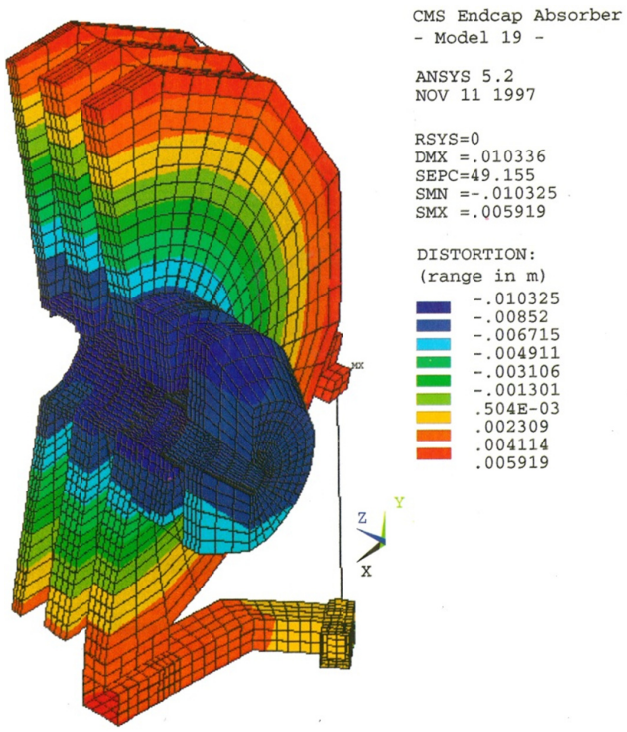


Figura 2.36: *Desplazamiento en Z del Endcap de CMS debido al campo magnético, en metros.*

A partir de estos valores se pueden estimar los desplazamientos relativos a la región del TRACKER (considerada un sólido rígido por su baja deformación) que se producen al encender y apagar el imán, entre los diferentes componentes del sistema de alineación LINK. Para ello se tuvieron en cuenta las tolerancias de fabricación y montaje de diseño de las diferentes ruedas del hierro de retorno de CMS [16, 17, 27, 42, 43 y 47]. Todos estos parámetros previos fueron tenidos en cuenta en la búsqueda y selección de los diferentes dispositivos de medida utilizados en el sistema de alineación, así como en las tolerancias requeridas en su montaje. Los diferentes valores se resumen en la tabla 2.4. En base a los valores de esta tabla ha sido seleccionado el rango de cada elemento del sistema de alineación LINK.

Todos los componentes del sistema de alineación, una vez instalados en CMS, han sido referenciados por el personal de la sección del 'Large Scale Metrology' (EN/MEF-SU) del CERN [46, 53], para obtener su posición real de instalación y así poder utilizar esos valores, como valores de inicio del sistema de alineación, dentro de los programas de reconstrucción de medida utilizados por el sistema.

Posición CMS	Coor.	Tol. Fabric.	Tol. Montaje	Deformación Desplz. Relv.	Deformación Desplz. Abs.
YB+2	x	± 1	± 2.5	±2	±2
	Y	± 1	± 2.5	0, -4	0, -4
	z	± 1	± 2.5	0	-5
YB+1	x	± 1	± 2.5	±2	±2
	Y	± 1	± 2.5	0, -4	0, -4
	z	± 1	± 2.5	0	-3
YB-2	x	± 1	± 2.5	±2	±2
	Y	± 1	± 2.5	0, -4	0, -4
	z	± 1	± 2.5	0	5
YB-1	x	± 1	± 2.5	±2	±2
	Y	± 1	± 2.5	0, -4	0, -4
	z	± 1	± 2.5	0	3
YB0	x	± 1	± 2.5	± 6.5	± 6.5
	Y	± 1	± 2.5	0, -10	0, -10
	z	± 1	± 2.5	0	0
YE+1	x		+0, -15	0	0
YE+2	Y		+0, -15	2, -4	2, -4
YE+3	z		+0, -15	3, -15	-2, -20
YE-1	x		+0, -15	0	0
YE-2	Y		+0, -15	2, -4	2, -4
YE-3	z		+0, -15	-3, 15	2, 20
YN+1	x	+0, -4		0	0
YN+2	Y	+0, -4		0, -2	0, -2
	z	+0, -2		-9, -15	-14, -20
YN-1	x	+0, -4		0	0
YN-2	Y	+0, -4		0, -2	0, -2
	z	+0, -2		9, 15	14, 20
HE+	x			0	0
	Y			0, -2	0, -2
	z			-11, -15	-16, -20
HE-	x			0	0
	Y			0, -2	0, -2
	z			11, 15	16, 20
LINK	x	± 0.15	± 0.5	± 6.5	± 6.5
	Y	± 0.15	± 0.5	2, -10	2, -10
	z	± 0.15	± 0.5	± 15	± 20

Tabla 2.4: *Tolerancias de fabricación y montaje de algunas partes del detector, así como los movimientos absolutos y relativos (al TRACKER), a los que se verán sometidos los dispositivos montados sobre las ruedas de CMS durante su funcionamiento, en mm.*

2.2.7. Niveles de radiación.

Otro requisito que van a tener que cumplir los componentes del sistema de alineación de CMS, va a ser el de la resistencia al alto nivel de radiación al que van a estar sometidos durante la vida operacional del detector. Este va a depender principalmente de posición geométrica (R y η) en que se encuentre el componente en cuestión [17, 47].

A la luminosidad y energía centro de masas nominales (14 TeV y ~10^{34} cm^{-2} s^{-1}) y dependiendo de las condiciones de operación se producirán una media de entre 20 y 40 colisiones en cada cruce de paquetes, produciendo varios miles de partículas de alta energía. Una buena parte de ellas viajarán longitudinalmente, en la dirección del tubo de vacío por donde circula el haz, escapando alcanzar material sensible y por tanto su detección, pero otras se emitirán con un momento transverso suficiente para llegar a los detectores cercanos y causar daño por irradiación en sus materiales.

Los efectos de la radiación sobre materiales y componentes [55] pueden ser divididos en dos categorías: Efectos acumulativos y Efecto de un solo evento 'Single Event Effets' (SEE).

-Los electos acumulativos se deben a la creación o activación de defectos microscópicos en el dispositivo, que acumulados a lo largo del tiempo causan efectos medibles conducentes, en último término, a la perdida de funcionalidad del mismo. Estos se dividen a su vez en dos tipos: el daño por ionización 'Total Ionizing Dosis' (TID) y el daño por desplazamiento.

Los efectos TID se deben a la energía depositada en el material por la radiación en forma de ionización. Depende fundamentalmente de la cantidad de energía absorbida, independientemente del tipo de radiación. La unidad internacional de medida es el Gy (1 Gray= 1J/kg), siendo también muy utilizado el rad (1 Gy= 100 rad). La carga depositada, para una dosis dada, depende del material absorbente, por lo que debe hacer referencia al mismo. Estos efectos pueden ser provocados por hadrones cargados (protones o piones), electrones, rayos gamma y rayos X.

El daño por desplazamiento se produce por perdida de energía no ionizante que causa desplazamiento de átomos, en los materiales con estructura cristalina. Se suele expresar el daño en términos de fluencia (partículas/cm^2). Puesto que el daño inducido es una función del tipo de partículas y su energía, se utiliza la NIEL (Non-ionizing Energy Loss) cómo parámetro para correlacionar los efectos observados en diferentes entornos de radiación. Para convertir un entorno complejo en uno más simple y monoenergético usualmente se parametriza en función del denominado 'neutrones a 1 MeV equivalentes' [56 y 57]. Este tipo de daño se puede producir por neutrones, protones, piones y electrones.

-Los SEE se deben a la ionización directa producida por una sola partícula (hadrón cargado, neutrón o ión pesado), capaz de depositar la

suficiente energía como para interrumpir el buen funcionamiento del componente. La mayoría de datos SEE se refieren a test de irradiaciones con iones pesados y la sensibilidad del componente a los mismos se expresa en términos de LET (Linear Energy Transfer) de la partícula incidente. Debido a la naturaleza estadística de esta, es posible hablar de la probabilidad de ocurrir un SEE, en función del dispositivo y la naturaleza del flujo de partículas.

En el sistema de alineación tenemos materiales (adhesivos, vidrios, polímeros o semiconductores), elementos sensores y electrónicos susceptibles de sufrir daño por la radiación. Para poder hacer una estimación del daño que pueden sufrir estos elementos primeramente hemos de hacer la estimación del nivel de radiación a que se verán sometidos, esto saldrá de los estudios de simulaciones realizadas sobre el entorno de radiación que habrá en el LHC. Para ello se utilizan potentes programas de simulación de sucesos y transporte, en el caso de CMS el código utilizado es la simulación Montecarlo FLUKA [54], herramienta de propósito general para cálculo de transporte e interacción de partículas con la materia, que cubre un extenso rango de aplicaciones que abarcan desde blindajes para aceleradores a diseño de target, calorimetría, activación, dosimetría, física de neutrinos, rayos cósmicos, radioterapia, etc.

En los siguientes gráficos se muestran una serie de mapas de niveles de radiación a los que se verán sometidos los materiales que se utilicen en CMS y tasa de dosis a una máxima luminosidad del LHC, para diferentes tipos de partículas. Diez años de operación del LHC equivalen a unos 5×10^7 segundos de operación a máxima luminosidad del LHC.

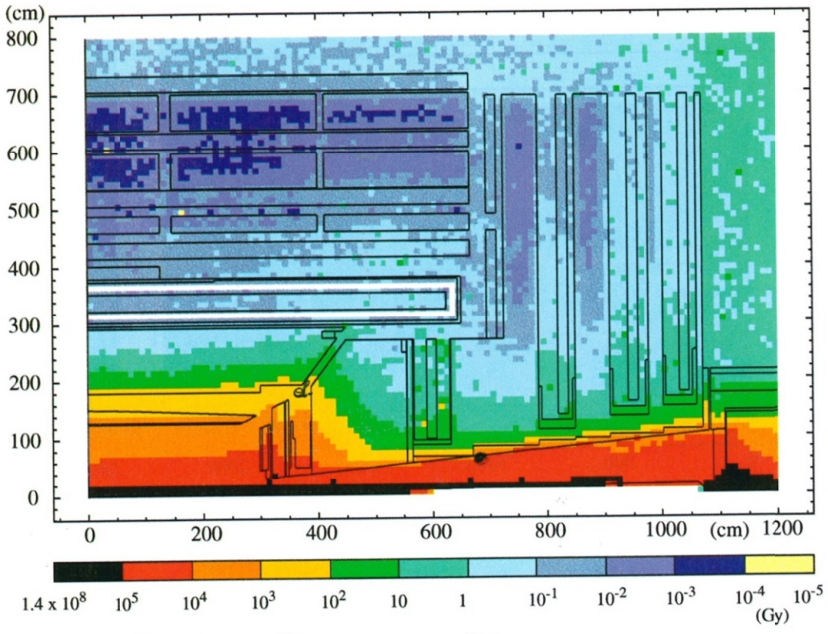


Figura 2.37: *Dosis absorbida en Gy en CMS. Corresponden a la luminosidad equivalente esperada para los 10 años de operación.*

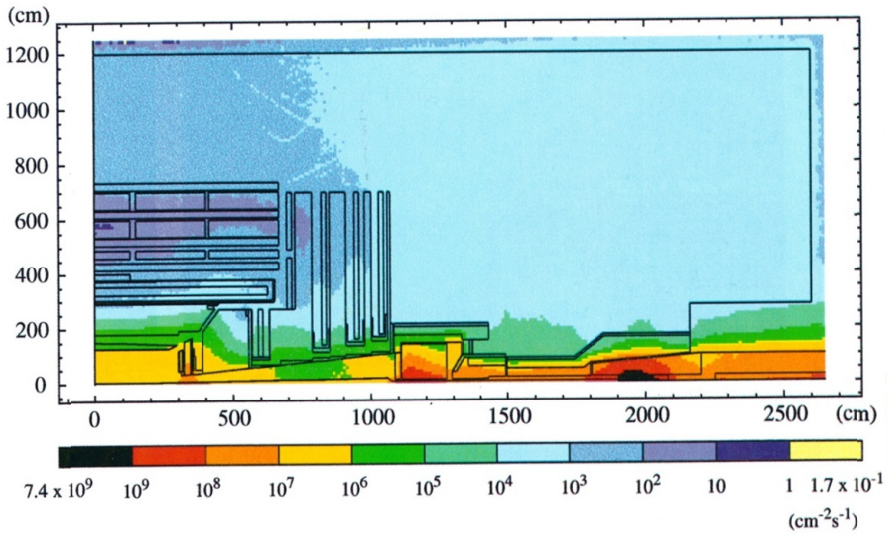


Figura 2.38: *Flujo de neutrones en CMS y la caverna UXC55. Corresponde a una simulación FLUKA con el máximo valor de luminosidad del LHC (10^{34} cm^{-2} s^{-2}).*

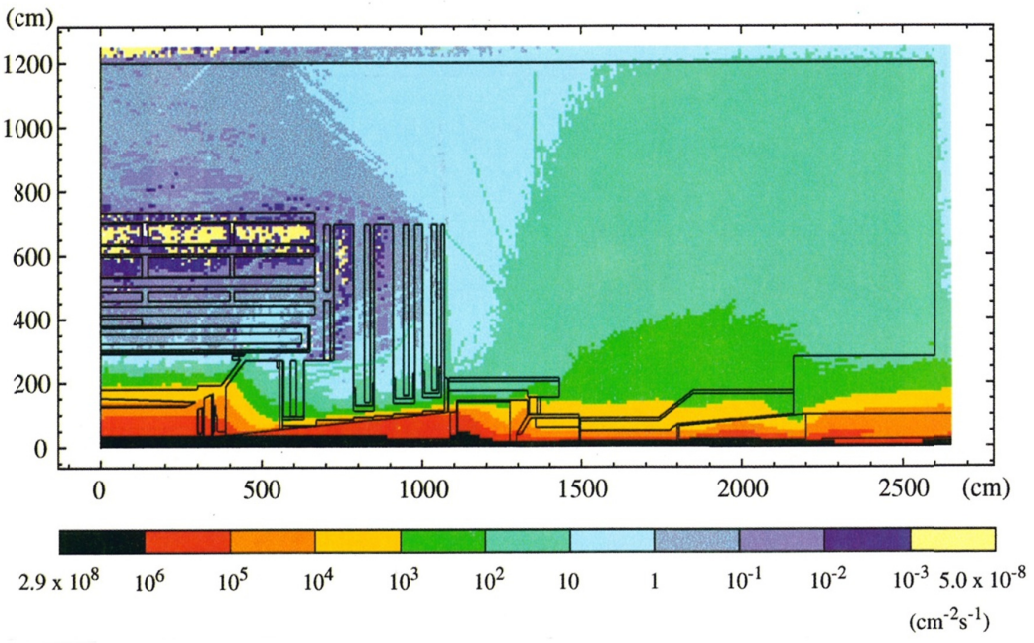


Figura 2.39: *Flujo de partículas cargadas (hadrones y muones) en CMS y la caverna UXC55. Corresponde a una simulación FLUKA con el máximo valor de luminosidad del LHC (10^{34} cm^{-2} s^{-2}).*

El sistema de alineación LINK de CMS, tiene elementos situados en posiciones muy próximas al haz de partículas, estando sometidos sus dispositivos a niveles de dosis de las más altas que se van a recibir dentro de CMS. Por tanto se han realizado una serie de test conducentes a validar los distintos

dispositivos del LINK frente a los niveles de radiación a que se verán sometidos durante su vida operacional.

En la siguiente tabla se resumen estos valores para los componentes de diferentes regiones de CMS. En los ensayos que se describen en los capítulos 4 y 5 se utilizaron estos valores, para definir las condiciones a las que se verán sometidos los distintos componentes del LINK.

ZONA de CMS		TID (Gy)	Fluencia (neutrones/cm^2)	Fluencia (protones/cm^2)
TRACKER	Máximo	100×10^3	2×10^{14}	2×10^{14}
	Mínimo	10×10^3	1×10^{14}	6×10^{11}
η=3	Máximo	100×10^3	2×10^{14}	2×10^{14}
	Mínimo	100	5×10^{12}	5×10^{9}
YN1	Máximo	100	5×10^{12}	5×10^{9}
	Mínimo	0.1	1×10^{10}	1×10^{5}
ME1/1	Máximo	100	1×10^{11}	1×10^{8}
	Mínimo	0.001	1×10^{10}	1×10^{4}
ME1/2	Máximo	10	1×10^{11}	1×10^{8}
	Mínimo	0.001	5×10^{9}	1×10^{4}
MAB	Máximo	10	1×10^{11}	1×10^{8}
	Mínimo	0.001	5×10^{9}	1×10^{4}

Tabla 2.5: *Dosis de diferentes tipos de partículas a las que se verán sometidas algunas regiones de CMS donde se encuentran componentes del LINK, durante los 10 años de operación del detector.*

Capítulo 3: El sistema de alineación de CMS.

El sistema de alineación de los grandes detectores de partículas de última generación [17, 23, 32 y 58], ha adquirido una importancia considerable debido a la necesidad de mejorar la precisión en la reconstrucción de la trayectoria de las partículas, a su paso por los diferentes sistemas de detección de las mismas dentro del detector, para así poder cumplir con los nuevos objetivos fijados por la física de partículas.

Para CMS se habían puesto cómo condiciones de diseño, entre otras, tener un sistema de identificación de muones de gran eficacia y precisión, el mejor calorímetro electromagnético posible compatible con el sistema de muones, la mayor cobertura espacial posible en el hadrónico y un detector central de trazas de alta calidad y compatible con los anteriores sistemas. Para obtener las prestaciones óptimas del espectrómetro de muones en toda la región del rango de momento, desde el GeV hasta la región del TeV, las diferentes cámaras de muones han de estar alineadas entre sí con gran precisión: de 75 μm a 200 μm en la región del Endcap, 150 μm para la primera capa de cámaras de muones y 350 μm para la última, en la región del Barrel. Las cámaras de muones deberán estar alineadas con respecto al sistema central del TRACKER con una precisión mejor que 200 micras [59, 60 y 61].

El sistema de muones está instalado sobre grandes estructuras que no pueden ser consideradas como solidos rígidos. Por tanto, el sistema de alineación deberá considerar las siguientes fuentes de desalineación:

-Tolerancias de construcción de los diferentes elementos que componen los diferentes sub-sistemas de detección de partículas en CMS. Estas han sido medidas durante las fases de calibración de componentes en sus correspondientes configuraciones experimentales. Los datos obtenidos pueden ser tenidos en cuenta en la reconstrucción de la medida, si se considera que los valores obtenidos son superiores a los teóricos permitidos.

-Tolerancias de instalación y cierre del detector. Estas dan lugar a desplazamientos de los componentes de CMS y por consiguiente del sistema de alineación del orden de milímetros, respecto a sus posiciones teóricas. Muchos componentes de CMS, así como los elementos del sistema de alineación, una vez instalados en el detector han sido referenciados por el personal del 'Large Scale Metrology' (EN/MEF-SU) del CERN [46, 53], que proporcionan unos valores iniciales para el sistema de alineación.

-Las fuerzas que el campo magnético del imán induce sobre la estructura de retorno del imán, donde van fijados diferentes sub-sistemas de detección, dando lugar a desplazamientos de los componentes de CMS y de los elementos del sistema de alineación del orden de centímetros, respecto a sus posiciones teóricas de partida.

-Los efectos de dependencia temporal, como pueden ser los efectos producidos por las variaciones de humedad relativa ambiental o las

inestabilidades térmicas (del orden de 5ºC) que conllevarán a la expansión/contracción de los materiales, y que pueden dar lugar a desalineaciones en torno al milímetro.

En el sistema de alineación para CMS se han considerado las siguientes especificaciones de diseño:

-Proporcionar una información precisa de las posiciones relativas de los detectores que componen el Barrel y el Endcap entre sí, así como de estas con respecto al detector central de trazas.

-Todos los movimientos deben ser monitoreados de forma que las posiciones espaciales de los detectores queden definidas de forma univoca. Además, el sistema debe proporcionar una medida global absoluta, de sus posiciones, con las precisiones antes indicadas.

-El sistema ha de ser fiable, de mantenimiento simple, de bajo coste, capaz de funcionar en entornos de alto nivel de irradiación, en presencia de alto campo magnético y debe poder encenderse y apagarse sin pérdida de precisión.

Para controlar estos movimientos se utiliza un sistema de alineación opto-mecánico, con detectores electrónicos, que mide de forma continua la posición de las cámaras de muones respecto al detector central de trazas. Esta información se utiliza a-posteriori, para hacer correcciones durante la reconstrucción de las trazas que se hace off-line. El rango dinámico del sistema, así como las tolerancias necesarias en los caminos de paso de los haces láser, han sido determinados por los valores de des-alineamiento posibles (ver 2.2.6).

El sistema de alineación está organizado en cuatro grandes bloques:

-Sistema local, para la medida relativa interna entre los elementos de detección del TRACKER (TRACKER Alignment System).

-Sistema local, de medida relativa interna entre los dispositivos del espectrómetro de muones del BARREL (BARREL Alignment System).

-Sistema local, de medida relativa interna entre los dispositivos del espectrómetro de muones del ENDCAP (ENDCAP Alignment System).

-Sistema global o de relación de los tres sistemas locales anteriores (LINK Alignment System).

El sistema está constituido por tres planos de alineación R-Z, definidos cada 60º en φ comenzando en φ=15º, basados en la segmentación en 12 elementos del detector de muones del Barrel. Dentro de cada plano, los 3 sub-detectores de CMS (TRACKER, BARREL y ENDCAP) están unidos entre sí mediante el sistema LINK. En la Figura 3.1, se describe de forma esquemática este sistema, mostrándose los diferentes caminos de las líneas ópticas mediante líneas continuas y discontinuas a través de CMS.

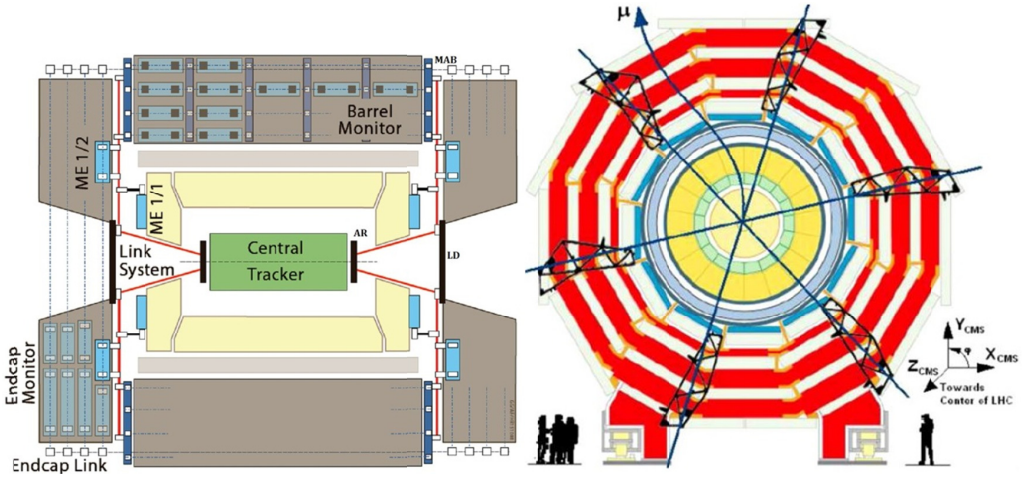


Figura 3.1: *Vista esquemática longitudinal y transversal del sistema de alineación de CMS.*

Para poder realizar la medida de las características físicas de las partículas, la geometría de los elementos detectores que componen CMS tienen que conocerse con un alto grado de precisión, en particular se necesita conocer la posición de un elemento individual dentro del sub-detector, la posición de los sub-detectores entre sí y la posición de CMS respecto al haz de partículas que circula por el tubo de vacío del LHC [18].

Podemos diferenciar tres fases dentro del desarrollo de un sistema de alineación:

La primera fase consiste en el diseño y construcción de los módulos individuales, asegurándose que cada componente esté referenciado correctamente mediante un control de calidad dimensional durante su fabricación. Los elementos activos de un detector (hilos, pixeles, etc) suelen ir agrupados en módulos para facilitar su integración en el sistema completo del sub-detector. Los elementos activos de estos módulos, se referencian cada uno de forma independiente para poder ser considerados sólidos rígidos, para ello se definen una serie de marcas fiduciales que sirvan como sistema de referencia local del mismo.

Seguidamente se hace una medida relativa de todos los módulos montados sobre su estructura soporte en el sub-detector. Así la posición de un componente activo queda definida por seis grados de libertad respecto a una red de marcas fiduciales.

La estabilidad mecánica y rigidez de la estructura soporte se estiman a partir de la repetición de medidas de las marcas fiduciales bajo condiciones que simulan las de operación.

En la segunda fase se realiza el ensamblaje de los diferentes módulos dentro del detector, proporcionando información geométrica de esas posiciones reales comparadas respecto a las teóricas. Para ello se repite el mapa de marcas fiduciales de la fase anterior comprobando las deformaciones y tensiones

introducidas durante la instalación. En esta fase se realiza una referenciación del subdetector a la red geodésica externa de la caverna UXC55, en la que se instala. Esta red consiste en una serie de puntos estables localizados de forma estratégica sobre la superficie de la misma y cuyas coordenadas son conocidas con mucha precisión respecto al haz de partículas, actuando como una gran red de calibración espacial de CMS. De esta forma se consigue una posición inicial para todos los módulos respecto al sistema de referencia global de CMS, considerándose estos valores como la geometría de partida del detector completamente montado.

Por último la tercera fase se desarrolla durante el funcionamiento de CMS. En esta puede darse el caso que la imprecisión mecánica de la posición de los elementos activos sea mayor a la requerida por la física, o puede ser necesario utilizar conjuntamente dos sub-detectores para realizar la medida en cuestión, además, va a ser necesario monitorizar los movimientos que se van a producir durante el encendido y apagado del imán, debido a su magnitud. Por todo ello se requiere un sistema de alineación (alineación hardware), posterior a la instalación de los módulos de elementos activos en el detector, cuya información en tiempo real, de los movimientos producidos durante la operación del detector, permitirá reconstruir la geometría.

Durante el funcionamiento de los detectores también se utilizan las propias trazas de las partículas para relacionar la posición entre los diferentes elementos activos del detector (alineación software). El alineamiento por trazas puede hacerse utilizando muones cósmicos o con muones producidos en las propias colisiones. Las partículas que atraviesan verticalmente el detector son útiles para la calibración de los componentes de la región central del Barril y las que lo atraviesan longitudinalmente para la calibración del Endcap.

El proceso de alinear con trazas puede ser más lento ya que necesita acumular suficiente estadística para alcanzar las precisiones requeridas y sobre todo estará afectado por efectos sistemáticos o por ambigüedades no presentes en el sistema de alineación hardware [62]. De hecho, la información proporcionada por las trazas se combina con la de la alineación hardware, obteniéndose una geometría final del detector que posteriormente es utilizada por el software de reconstrucción de CMS.

3.1. Sistema de alineación del TRACKER.

El detector central de trazas se divide mecánicamente en 6 tipos de sub-estructuras, mostradas en las Figuras 2.12 y 3.2:

-Los módulos del pixel están agrupados en dos estructuras: Barrel Pixel (BPix) y Forward Pixel (FPix).

-Los módulos de microtiras se componen de cuatro tipos de estructuras, Tracker Inner Barrel (TIB), Tracker Outer Barrel (TOB), Tracker Inner Disks (TID) y Tracker Endcaps (TEC).

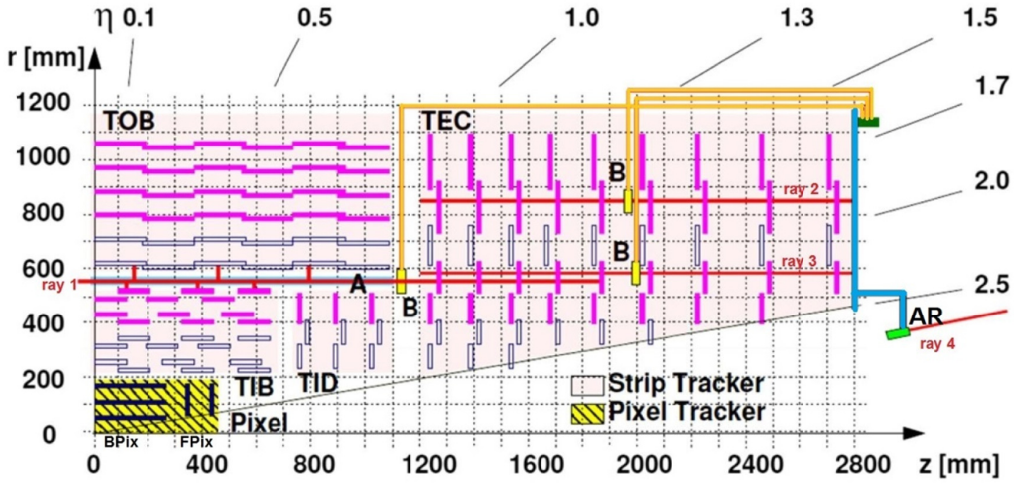


Figura 3.2: *Vista longitudinal de un cuarto de plano del TRACKER. Trazos purpura representan módulos de microtiras simples y los blanco de doble-cara, las líneas negras los módulos del pixel. También se muestran los rayos del sistema de alineación, los beam splitter (B) y el tubo de alineación (A) del sistema de alineación láser. Alignment Ring (AR), nexo con Sist. Alin. LINK.*

Las prestaciones del sistema de alineación del TRACKER [16, 23, 32, 27, 63, 64 y 65], que cubre la región Z≤ ~2750 y R≤ ~1200 mm, están muy influenciadas por las precisiones de los elementos detectores utilizados y la estabilidad de la estructura soporte sobre la que se asientan. Los elementos detectores tienen una gran granularidad, y están posicionados respecto a los módulos con una precisión de unas 10 μm; los 1440 módulos del detector de pixeles tienen una resolución intrínseca de unos 10 μm en Rφ y 20 μm en Z; en los 15148 módulos del detector de microtiras puede variar entre 20-60 μm dependiendo del tipo de sensor. En la tabla 3.1 están descritas las precisiones de montaje de los diferentes componentes dentro del TRACKER.

TIB		TID		TOB		TEC	
Sensor	10	Sensor	10	Sensor	10	Sensor	10
Module	180	Module	54	Module	30	Module	20
Shell	450	Ring	185	Rod	100	Petal	70
Cylinder	750	Disc	350	Wheel	140 ($r\phi$), 500 (z)	Disc	150
Tube		Cylinder	450	Tube	1000	TEC	600
		Tube		CMS		Tube	

Tabla 3.1: *Precisión de montaje (RMS, en μm) de los componentes del TRACKER. Los valores se dan respecto al elemento sobre el que se montan (ej. Sensor en Módulos 10 μm).*

La estabilidad se garantiza utilizando estructuras de fibra de carbono ligeras y rígidas, diseñadas para conseguir una estabilidad mecánica por debajo de las 100 μm, frente a las variaciones de temperatura, humedad y cargas mecánicas.

Cualquier inestabilidad que se produzca en el posicionamiento de los detectores se monitoriza a través del sistema de alineación del TRACKER, capaz de medir variaciones de la posición de los componentes de 10 μm.

Este sistema de alineación tiene dos funciones fundamentales:

-Permitir una operación estable de los algoritmos de reconstrucción de patrones de traza. Necesario para los niveles más altos del sistema de 'trigger' (HLT) que hacen uso de la información procedente del tracker para la selección de sucesos. En esta fase la posición de cada módulo ha de ser conocida solamente con una precisión en torno a 100 μm.

-Conseguir una precisión final de la medida (análisis off-line) inferior a la intrínseca de los módulos de detección, del orden de 10 μm en los módulos de microtiras de silicio.

El sistema de alineación laser del TRACKER utiliza una red de rayos laser infrarrojos (1070 nm) para monitorizar la posición de las 6 sub-estructuras entre sí, no de los módulos individuales. Debido a la imposibilidad de monitorizar cada módulo, se utiliza un alineamiento doble, uno hardware, que alcanza unos 100 μm de precisión y otro con trazas para llegar a los 10 μm.

La base de medida de este sistema son los detectores de silicio del que está compuesto este sub-detector [63]. El silicio es parcialmente transparente a la luz infrarroja, con lo que para hacer cada módulo transparente a esta luz láser se elimina la metalización que tienen por uno de los lados, en una pequeña región alrededor de la posición teórica (Ø10 mm) por donde debe pasar el rayo, añadiéndose además un tratamiento anti reflejante con objeto de aumentar su transmisión. Cuando un rayo incide sobre un detector de silicio, la fracción de luz absorbida inducirá una señal en este, mientras que la luz del rayo transmitida incidirá sobre el siguiente detector dando otra señal, pudiendo atravesar esa luz transmitida varios detectores (Figura 3.2). De esta forma si se producen movimientos relativos entre los detectores podrán ser monitorizados al producirse movimientos en la posición de impacto del rayo de referencia. En los lugares de la estructura soporte donde pueda verse obstruido el rayo, se pueden utilizar divisores de haz (Beam Splitter), para dirigir el rayo a través de la trayectoria necesaria (Figura 3.3).

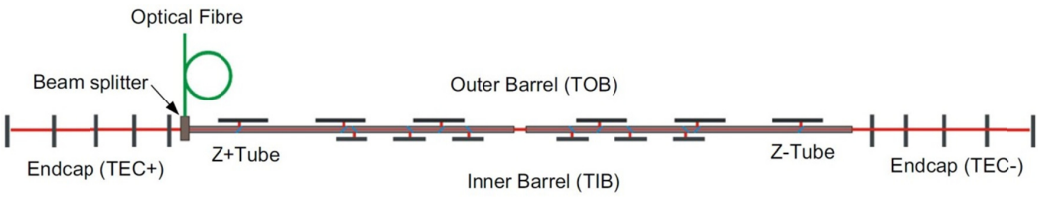


Figura 3.3: *Tubos de alineación del TRACKER, que distribuye la luz del rayo láser de entrada a 4 sub-estructuras distintas relacionándolas entre sí (ray 1).*

Los módulos de silicio del tracker están organizados en cilindros (TIB y TOB) y en pétalos (TEC) con una simetría de dieciséis elementos. El sistema de alineamiento está embebido directamente en la estructura de fibra de carbono de las diferentes sub-estructuras del Tracker. Por otra parte, al hacerse llegar

los rayos directamente sobre los detectores montados en los módulos se consigue una medida directa, evitándose la propagación de errores mecánicos. Estos módulos de silicio tienen una resolución de unas 20 μm, usados como detectores de luz.

El sistema de alineación interno (Figura 3.2) se compone de 40 rayos laser que vienen a través de fibras, de unos 100 m de longitud, desde una sala (Laser Room) de la zona de servicios USC55 de CMS. Cada TEC se alinea internamente a través de 16 rayos, 8 rayos distribuidos simétricamente en el plano Rφ (ray 2) que atraviesan los módulos de silicio a la altura del anillo sexto, en los 9 discos que componen esta sub-estructura y otros 8 rayos (ray 3) que atraviesan los módulos a la altura del cuarto anillo. Para relacionar ambos TECs y estos con las sub-estructuras TIB y TOB se utilizan 8 rayos (ray 1), que cruzan todo el TRACKER a través de un tubo de alineación (montado sobre TOB), que dispone de 12 'divisores de haz' en su interior que van reflejando un 10% de la luz incidente hacia diferentes posiciones internas de la estructura del TRACKER (figura 3.3). Una vez que se realiza la alineación interna del TRACKER mediante el procedimiento descrito, a través del sistema hardware (el número de medidas será lo suficientemente redundante como para poder reconstruir las posiciones de los detectores sin conocer las posiciones iniciales de los láseres) y las trazas, el TRACKER se puede considerar un sólido rígido con una precisión en torno a las 10 μm.

Con los datos de las posiciones y orientaciones de los módulos del TRACKER conocidos, ya se pueden relacionar estos con los detectores de muones, a través del sistema de alineación LINK. La transferencia entre ambos sistemas será puramente mecánica (Figura 3.1, 3.2 y 3.4), se realiza a través del Alignment Ring (AR) (Figura 3.5), una estructura de fibra de carbono de gran rigidez que se fija isostáticamente mediante 3 pilares a la última rueda del TEC, Back Disc (BD), que es la rueda décima, es un rueda con estructura sándwich de fibra de carbono y tiene la función de dar rigidez al conjunto y a la vez servir de blindaje térmico del tracker (-20ºC), frente a la temperatura ambiente exterior. Cubriendo el TEC está otro disco de sándwich de fibra de carbono (Figura 3.4), el Bulkhead (BH), está desligado mecánicamente del TEC y fijado directamente sobre el tubo soporte del TRACKER, este tiene función de panel de conexiones para el TEC y el Pixel y de cierre térmico del TRACKER. La transferencia mecánica se realizó midiendo una serie de puntos de referencia sobre los discos del TEC y del AR mediante MMC (máquinas de medición por coordenadas) y mediante procedimientos topográficos de gran precisión. Para relacionar, de forma absoluta, estas medidas respecto a la gravedad se dispone de dos inclinómetros incrustados en el BD y de otros dos sobre el AR, los cuales pueden medir giros de estas estructuras en torno a X y Z con precisiones de pocos microradianes.

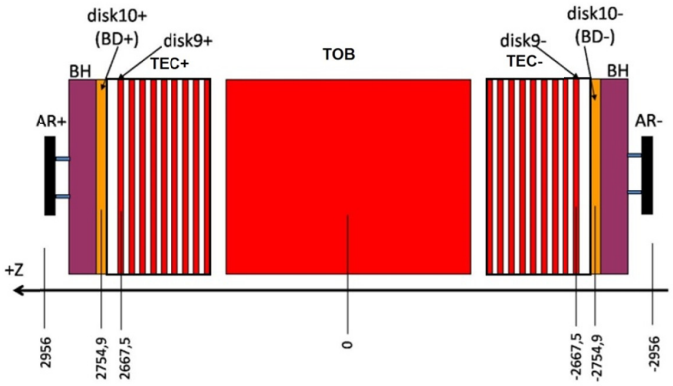


Figura 3.4: *Esquema de elementos implicados en la transferencia de medida del TRACKER al LINK.*

Al AR llegan 6 fibras acopladas a 6 colimadores fijados al anillo, de los que parten 6 rayos laser (ray 4) de longitud de onda 681 nm con sus posiciones y orientaciones calibradas respecto a la gravedad, mediante los 2 inclinómetros disponibles en la estructura AR (Figura 3.5), relacionando el sistema de alineación interna del TRACKER con el sistema de alineación interna BARREL y ENDCAP de las cámaras de muones. Además se dispone de inclinómetros sobre los sistemas BARREL y ENDCAP que nos relacionan directamente variaciones angulares respecto al TRACKER. El AR dispone además de 3 distanciómetros en Z que monitorizan los movimientos respecto a unos perfiles longitudinales del sistema LINK, descritos más adelante.

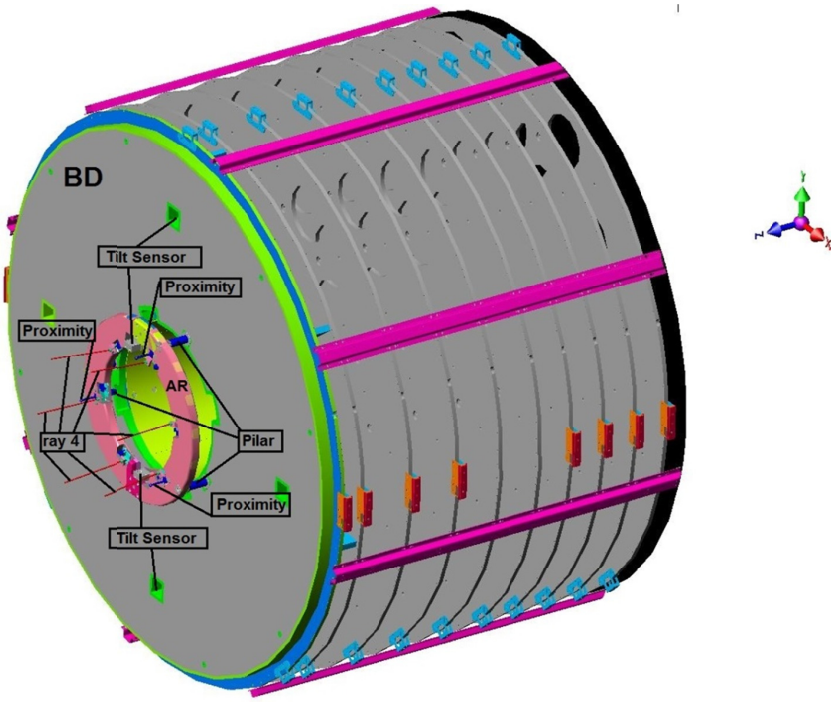


Figura 3.5: *Modelo 3D de la estructura TEC y AR.*

3.2. Sistema de alineación del BARREL.

El sistema de alineación interno del BARREL de CMS [17 y 23] se basa en la medida del posicionamiento relativo de las 250 cámaras de tubos de deriva (DT) que hay entre el hierro de retorno de las 5 ruedas de esta zona del detector. La medida de la posición de estas cámaras se realiza respecto a 36 estructuras de fibra de carbono (Figura 3.6), situadas entre las ruedas YBs del hierro, llamadas MABs (Module for the Alignment of Barrel), en ellas se encuentran los elementos de medición del sistema [66], el elemento principal son las videocámaras que se encargan de monitorizar la posición de las fuentes de luz LED situadas en los extremos de las cámaras de muones, DTs. También se dispone de conexiones diagonales en las que unos MAB disponen de videocámaras (Plano Pasivo) que están observando los LEDs de otros MABs (Plano Activo). La distancia en Z entre los MABS se mide con gran precisión a través de 6 estructuras lineales de fibra de carbono llamadas Z-bar, situadas sobre el criostato del imán, sobre estas van colocados una serie de LEDs que son monitorizados desde videocámaras en los MABs activos. A través de los MABs se relaciona la posición de las DTs del Barrel con las CSCs del Endcap y con el Tracker a través del sistema de alineación global LINK.

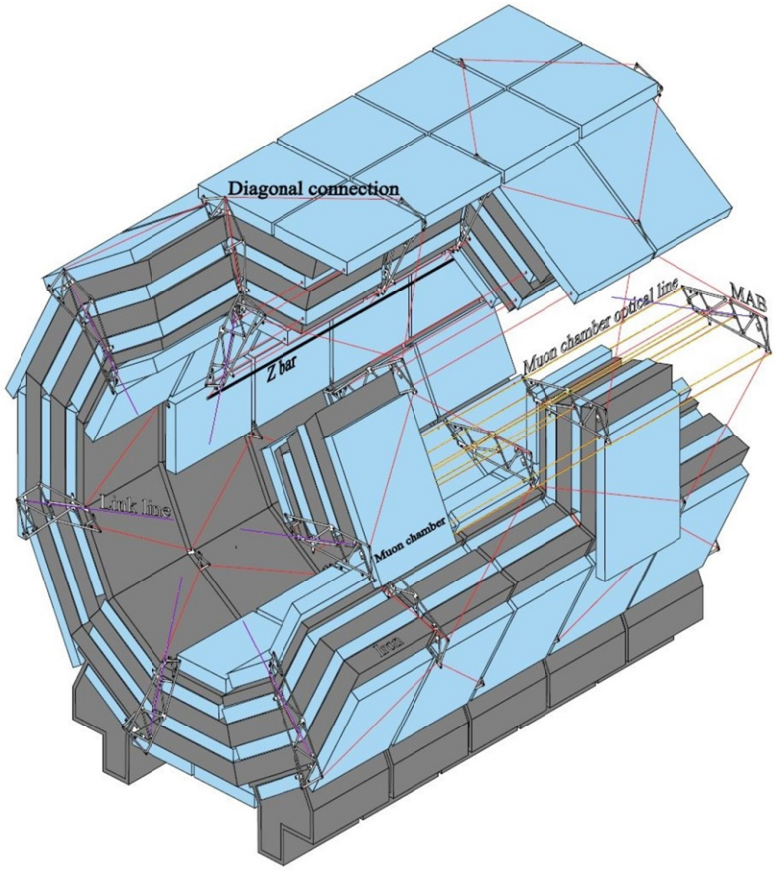


Figura 3.6: *Vista esquemática del sistema de alineación del BARREL. La medida de las 250 DTs se basa en las 36 estructuras MABs y 6 Z-bar para la medida en Z, todos estos elementos están conectados ópticamente entre sí.*

El sistema de alineación Barrel necesita realizar la medida entre las cámaras situadas en el mismo sector cilíndrico, con una precisión en torno a los 100 µm y de unas 250 µm entre diferentes sectores. Es un sistema altamente redundante con unos 9000 medidas para determinar ~3000 grados de libertad, de los MAB y de las 250 DTs. El posicionamiento de las RPCs (Resistive Plate Chamber) es necesario conocerlo al nivel del *mrad* y como estas van fijadas sobre las DTs, el sistema de monitorización de éstas servirá para el de las RPCs con las precisiones requeridas.

Las estructuras rígidas MABs están fabricadas con tubos de fibra de carbono unidos mediante placas del mismo material, donde se sitúan los diferentes elementos de medición del sistema. Estas estructuras están fijadas isostáticamente sobre el hierro de retorno del imán en 3 puntos. La estructura fue diseñada para mantener una estabilidad geométrica por debajo de las 100 µm teniendo en cuenta las cargas gravitatorias y las variaciones de humedad y temperatura [67]. Los MABs están dispuestos en 12 planos RZ, distribuidos simétricamente en φ, 6 son planos activos (24 MABs) conectados al sistema LINK y otros 6 son planos pasivos (12 MABs). Los MABs son considerados sólidos rígidos, con geometría calibrada, y 6 grados de libertad. Cada uno de los MAB dispone de 8 'Camera Box' (C_i) que observan los LED montados sobre los DTs (Figura 3.7). Las 'Camera Box' consiste en una caja de fibra de carbono dentro de la cual se encuentran un sensor de video matricial CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) de 384 × 288 pixeles con 12 µm de tamaño de pixel y una lente. Cada MAB dispone además de 4 fuentes de luz LED, en los planos activos, o 4 'Camera Box' (D_i), en los pasivos, proporcionando las conexiones diagonales. En los planos activos los MABs disponen de una 'Camara Box' (Z-Cam) que realiza la medición de la posición de la coordenada Z, observando las fuentes de luz montadas sobre las Z-bars. En total el sistema dispone de 360 'Camara Box' de diferentes tipos.

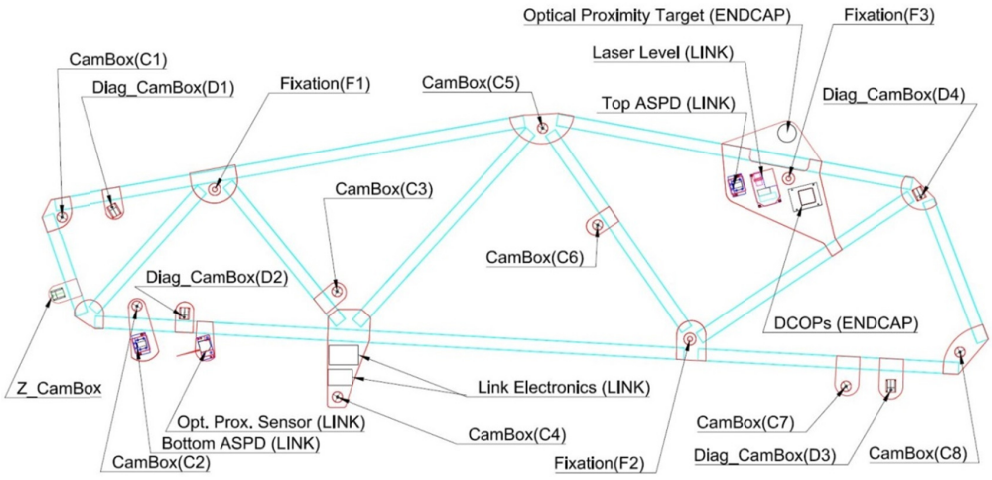


Figura 3.7: *MAB activo de la rueda YB±2 con la distribución de los elementos situados sobre su estructura.*

Los MABs más exteriores, los 12 que van montados sobre las ruedas YB±2, son los que conectan con el sistema LINK, conteniendo ciertos componentes

específicos de este sistema como son un 'Laser Level', 2 ASPD (Amorphous Silicon Position Detectors) y un sensor de proximidad óptico. Y también disponen de elementos para conexión directa con el sistema de alineación ENDCAP: un sensor de medida matricial DCOPs (Digital CCD Optical Position Sensors) y un 'target' para un sensor de proximidad óptico montado en el Endcap.

Los MABs con sus correspondientes marcas fiduciales sobre sus dispositivos de medida y la estructura han sido calibrados de forma precisa sobre un banco (Figura 3.8) dedicado a este fin [69], los errores de calibración de este banco son inferiores a 50 μm. Los resultados aparecen en el documento [207].



Figura 3.8: *Banco de calibración de los MABs en la zona de los ISR del CERN.*

El principio de medida de la posición de las DTs respecto a los MABs (Figura 3.9), consiste en colocar sobre las 4 esquinas de las cámaras, en los pasajes de alineación de 50×66 mm^2, unas estructuras de aluminio llamadas 'LED-Holder' en las que van insertadas 10 fuentes de luz (6 que son visibles desde un lado y 4 por el contrario) visible LED [68] (10000 fuentes en total para las 250 DTs), estas son monitorizadas desde las 'Camara Box' localizadas en los MABs. Los 'LED-Holder' están situados a unos 500 mm del lateral del DT. Las posiciones R y φ de la fuente de luz se determinan calculando el centroide de la distribución de intensidad de luz recibida por cada uno de los sensores CMOS de la 'Camara Box', en las 4 esquinas de los DTs. La Z se obtiene por triangulación midiendo la separación entre dos fuentes de luz próximas montadas en el mismo LED-Holder, cuya distancia es 20 mm, esta es medida en dos esquinas solamente mediante los mismos sensores.

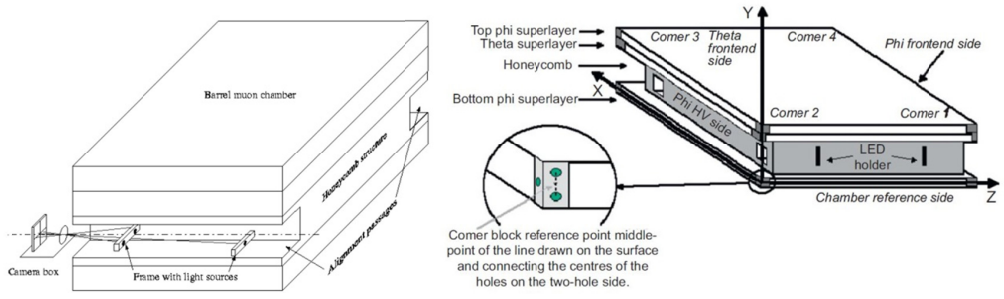


Figura 3.9: *Principio de la medida y referenciación de las DTs.*

La alineación interna de cada cámara de muones, es decir la posición de los hilos ánodos respecto a los pasajes de alineamiento, no se realiza directamente por el sistema, sino a través de dos pasos. El primero consiste en la referenciación de los hilos respecto a unas marcas localizadas en las esquinas (Corner Block) de cada DT durante su construcción con precisiones por debajo de las 60 µm. Y el segundo paso consiste en hacer la referenciación de los LED-Holder respecto a las marcas de referencia de las DTs con una precisión mejor de 30 µm. Para este último paso se utilizó un banco de calibración (Figura 3.10) en la zona de los ISR del CERN [70, 71].



Figura 3.10: *Banco de calibración de las DTs en la zona de los ISR del CERN.*

Este sistema permite absorber errores de posicionamiento de los MABs en cada rueda de ±5 mm y un des-alineamiento entre ruedas de ±10 mm.

Una vez instaladas las DTs y los MABs en CMS, las posiciones iniciales de estos elementos respecto a las ruedas del BARREL (YBs) se determinan mediante fotogrametría digital (Figura 3.11).

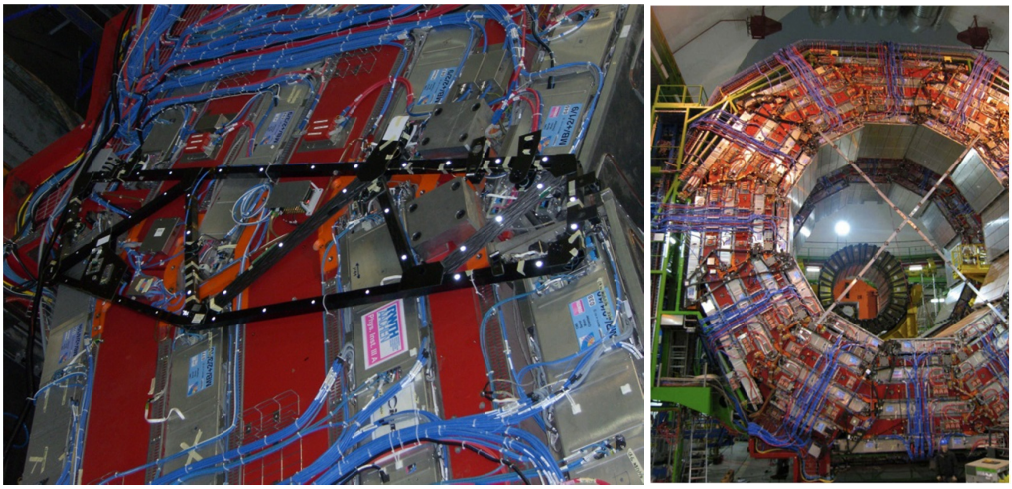


Figura 3.11: *MAB de la rueda YB+2 con las marcas de referencia para la fotogrametría y referenciación mediante fotogrametría digital de los MABs y DTs de la rueda YB+2.*

3.3. Sistema de alineación del ENDCAP.

El sistema de alineación de las cámaras de muones del ENDCAP [17, 23 y 72] está diseñado para monitorizar de forma continua y exacta la posición actual relativa de las 540 CSCs (durante la reciente parada LS1 se instalaron las últimas 72 CSCs en ME4/2) entre sí, relativas al BARREL, respecto al TRACKER (a través del sistema de alineación LINK) y finalmente con respecto al sistema de coordenadas global de CMS. El sistema medirá directamente una sexta parte de las CSCs, el resto se alinean mediante trazas que atraviesan la zona de superposición entre cámaras vecinas. Debido al campo magnético y la gravedad, como hemos explicado en el capítulo anterior, las CSCs montadas sobre el hierro de retorno del ENDCAP van a sufrir movimientos sustanciales, de varios centímetros entre la posición de inicio con el imán apagado y encendido. El sistema de alineación deberá medir estas deformaciones monitorizando en todo momento la posición absoluta de las CSCs en el plano Rφ con una precisión de 75 a 200 μm, en función de la posición R (las precisiones de R y Rφ están directamente relacionadas, siendo necesaria en la R unas 400 μm). En la dirección Z se necesita una precisión de medida en torno a 1 mm con un rango dinámico de unos 20 mm.

El sistema de alineación ENDCAP quedó fijado en el 'CMS Muon YE1 EDR-08 (Engineering Design Review) en Diciembre de 2002 [73]. Utiliza una compleja disposición de cinco tipos de sensores para transferir y monitorizar las coordenadas φ, R y Z (Figura 3.12).

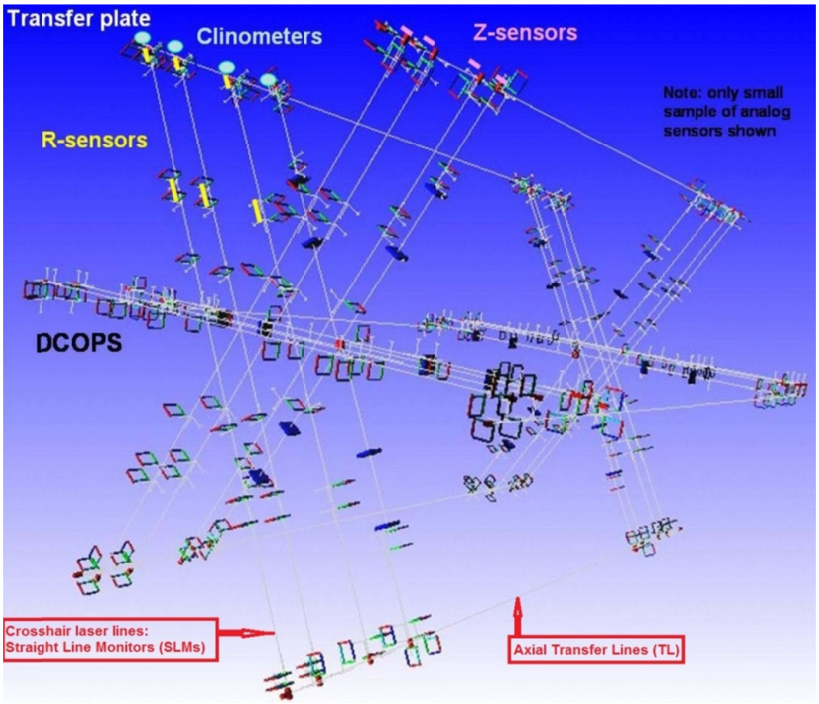


Figura 3.12: *Vista esquemática de la geometría y componentes del sistema de alineación del ENDCAP. Los elementos cuadrados representan sensores DCOPs.*

El elemento principal del sistema de monitorización es la SLM (Straight Line Monitor). Cada rueda ME del Endcap dispone de 3 SLMs situadas en el plano Rφ y cada SLM consiste en dos rayos laser emitidos casi radialmente que generan unas líneas rectas de referencia que alcanzan a los sensores DCOPs situados sobre 4 CSCs (Figuras 3.13 y 3.14), llegando hasta las 'Transfer Lines' situadas en los bordes del hierro de retorno, de esta forma se consigue una referencia relativa de las CSCs respecto a estos láseres de referencia. El sistema se complementa con sensores de distancia radiales R, que nos miden la posición radial de las CSCs, sensores de distancia axiales Z, para la medida axial entre estaciones de CSCs y un sensor de inclinación para monitorizar la inclinación del sistema mecánico (Transfer Plate) sobre el que se montan los láseres, DCOPs de referencia y sensores de distancia Z (Figura 3.15).

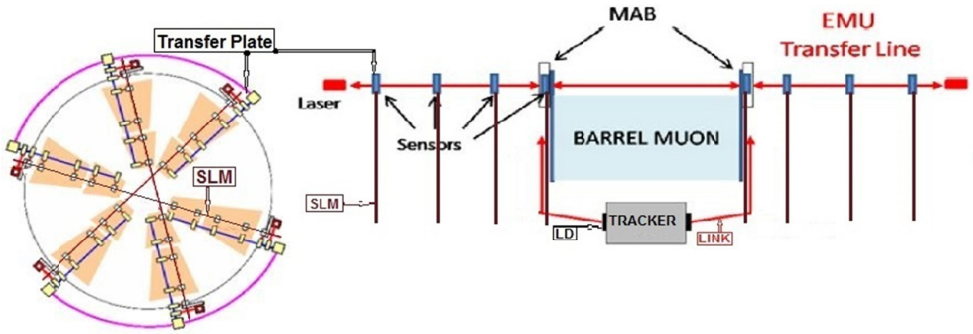


Figura 3.13: *Vista esquemática transversal de las líneas SLM (izquierda) y axial 'Transfer Line' (derecha) del sistema de alineación ENDCAP.*

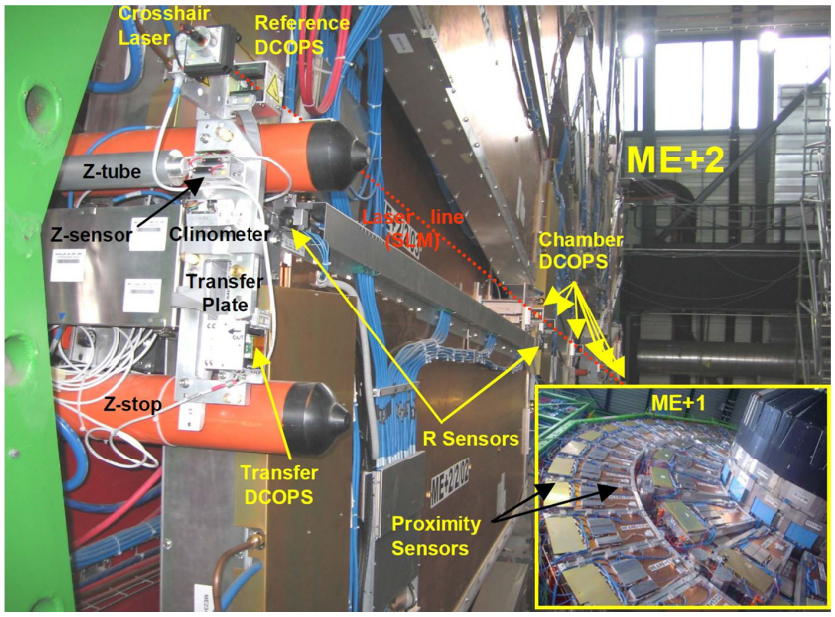


Figura 3.14: *Rueda YE+2 de CMS donde se muestra la situación de los componentes del sistema de alineación ENDCAP de una SLM sobre la estación de muones ME+2. En el recuadro inferior-derecho aparece la YE+1 indicando la situación de los sensores de proximidad sobre la ME+1.*

En el primer disco del ENDCAP, el anillo externo de CSCs, las cámaras ME1/3, son las únicas del sistema ENDCAP que no se solapan entre sí en φ, con lo que ha sido necesario implementar sensores de proximidad midiendo hacia las cámaras vecinas en Rφ (Figura 3.14, recuadro inferior-derecho). Además, el anillo más interno de cámaras, ME1/1, se miden a través del sistema de alineación LINK, que estará presente también sobre las ME1/2, donde se relaciona el sistema LINK con el ENDCAP.

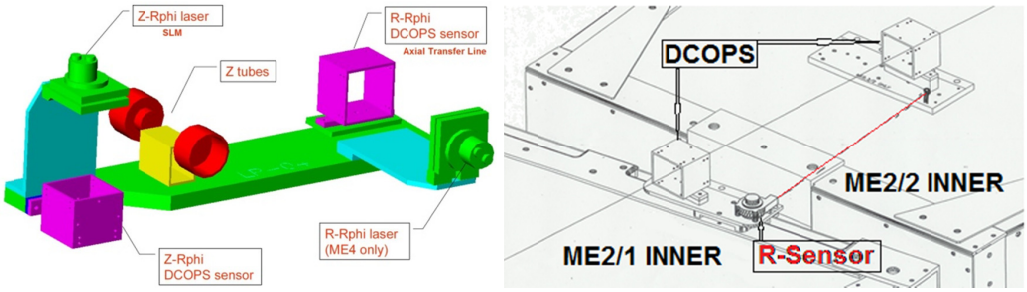


Figura 3.15: *Vista isométrica de una 'Transfer Plate' de la ME4 (izquierda) y de dos CSCs internas de la ME2 (derecha).*

El otro elemento importante del sistema son las 'Transfer Lines' axiales, que están situadas en 6 posiciones exteriores del hierro de CMS, simétricamente distribuidas en φ, y paralelas al eje Z. En esta los rayos pasan a través de una serie de sensores DCOPS axialmente situados sobre las 'Transfer Plates' de otras ruedas del hierro y de los MABs (nexo con el sistema BARREL y LINK) situados sobre las YB±2, monitorizando los desplazamientos relativos de los sensores respecto a los rayos láser guía. Además se complementan con medidas de distancia en Z, a través de tubos calibrados y sensores de proximidad en sus extremos, situados en las 'Transfer Plates', que llegan hasta los MABs citados anteriormente.

Los DCOPS están montados sobre las 'Transfer Plate' y sobre las CSCs mediante pasadores cilíndricos de precisión, siendo su tolerancia de montaje de unas 50 μm. Estos sensores disponen de 2048 pixeles de 14 μm, el sensor está encapsulado en un perfil rectangular a través del que pueden pasar los rayos laser entrantes por ambos lados. Las medidas de las coordenadas R y Z se complementan mediante potenciómetros lineales analógicos y dispositivos ópticos que están en contacto con tubos de aluminio calibrados.

Los sensores analógicos se calibraron, en todo su rango, con una precisión lineal de unas 6 μm, siendo la incertidumbre en la calibración absoluta de la distancia de 100 μm en R y de 53 μm para los Z. Los DCOPS se referenciaron respecto a los agujeros para los pasadores de precisión con un error menor a 50 μm.

Cada CSC y dispositivo de alineación está equipado con 'targets' para poder realizar fotogrametría digital sobre ellos y obtener su posición de inicio con el imán apagado, respecto al sistema de coordenadas global de CMS.

3.4. Sistema de alineación global LINK.

El sistema de alineación global LINK de CMS [17, 23, 32, 58 y 74], tiene la función de monitorizar de forma continua y precisa la posición de los espectrómetros de muones del BARREL y ENCAP, con relación al detector central de trazas (TRACKER), con precisiones de unas 150 μm en posición y 40 μrad en orientación. El sistema también realiza la alineación interna de los anillos ME1/1 y ME1/2 de las CSCs en el ENDCAP.

Consiste en un conjunto de fuentes de luz láser flotantes, que generan rayos de referencia, y una serie de componentes opto-mecánicos y electrónicos de detección, configurados en lo que se denomina monitor de posición multipunto, conectando entre sí los tres sub-sistemas de alineación interna de CMS. Cuando los haces de luz están dentro del área activa de los sensores de posición semitransparentes, llamados ASPD (Amorphous Silicon Position Detectors), la posición de origen de estos rayos es irrelevante para el principio de medida que realiza este sistema.

El sistema de alineación LINK quedó parcialmente fijado y validado a través de sucesivas revisiones (EDRs), en el 'CMS Muon Alignment EDR-3' [75] de Noviembre de 2000, 'CMS Muon Alignment EDR-06' [76] de Febrero de 2002 y 'CMS Muon YE1 EDR-08 [73] en Diciembre de 2002. Está diseñado y probado para trabajar con alta radiación y campo magnético, en un espacio muy reducido, y conseguir gran precisión de medida en distancias largas. Las pruebas realizadas sobre el mismo se describirán en los próximos capítulos.

La geometría básica del sistema LINK tiene una segmentación en 3 planos RZ distribuidos cada 60º en φ (Figura 3.1), empezando en φ=15º. El sistema tiene simetría especular respecto al plano XY. Esta segmentación se basa en la geometría de 12 elementos del detector de muones BARREL. Cada plano se divide en 4 cuadrantes, que se pueden considerar 'iguales' a la hora de describir los componentes del sistema (Figura 3.16).

Los caminos de luz siguen el contorno interno del detector y para minimizar la interferencia con los diferentes sub-detectores, se encuentran en los bordes de los mismos, siguiendo en la medida de lo posible, la región de cierre entre ruedas. El sistema LINK se subdivide en 6 regiones (las coordenadas que aparecen en la descripción de las siguientes regiones están dadas con el imán apagado):

1. Región del **TRACKER.** En esta región los elementos están situados en los dos extremos del Tracker, en el espacio libre que hay hasta llegar a la estructura del ENDCAP. Aquí nos encontramos, sobre la última rueda del TEC del TRACKER (Figuras 3.5 y 3.17), montados sobre el mismo ensamblaje mecánico, 2 sensores de inclinación 2D (miden φ y θ), temperatura y otro de campo magnético. Sobre esta rueda, montada mediante tres pilares con fijaciones isostáticas, va la estructura tipo sándwich de fibra de carbono AR (Alignment Ring), instrumentada con otros 2 sensores de inclinación 2D, temperatura y campo magnético, montados sobre un mismo ensamblaje mecánico. También se dispone de 3 sensores de proximidad que dan la posición en Z (midiendo sobre 3 LPs (perfiles longitudinales (R=284, Z≈3027)

hacia el LD (Figura 3.19)) y 6 fuentes de luz láser (R≈ 250, Z≈2970, formando un ángulo de θ=5.7º respecto al eje Z) que van recorriendo toda la región del camino de luz, pasando sobre las CSCs de la ME1/2 del ENDCAP hasta llegar a los MABs de la YB2 del BARREL, suministrando una referencia directa entre los 3 sub-sistemas de alineación. Todos los elementos del AR han sido relacionados entre sí mediante un complejo sistema de calibración descrito más adelante.

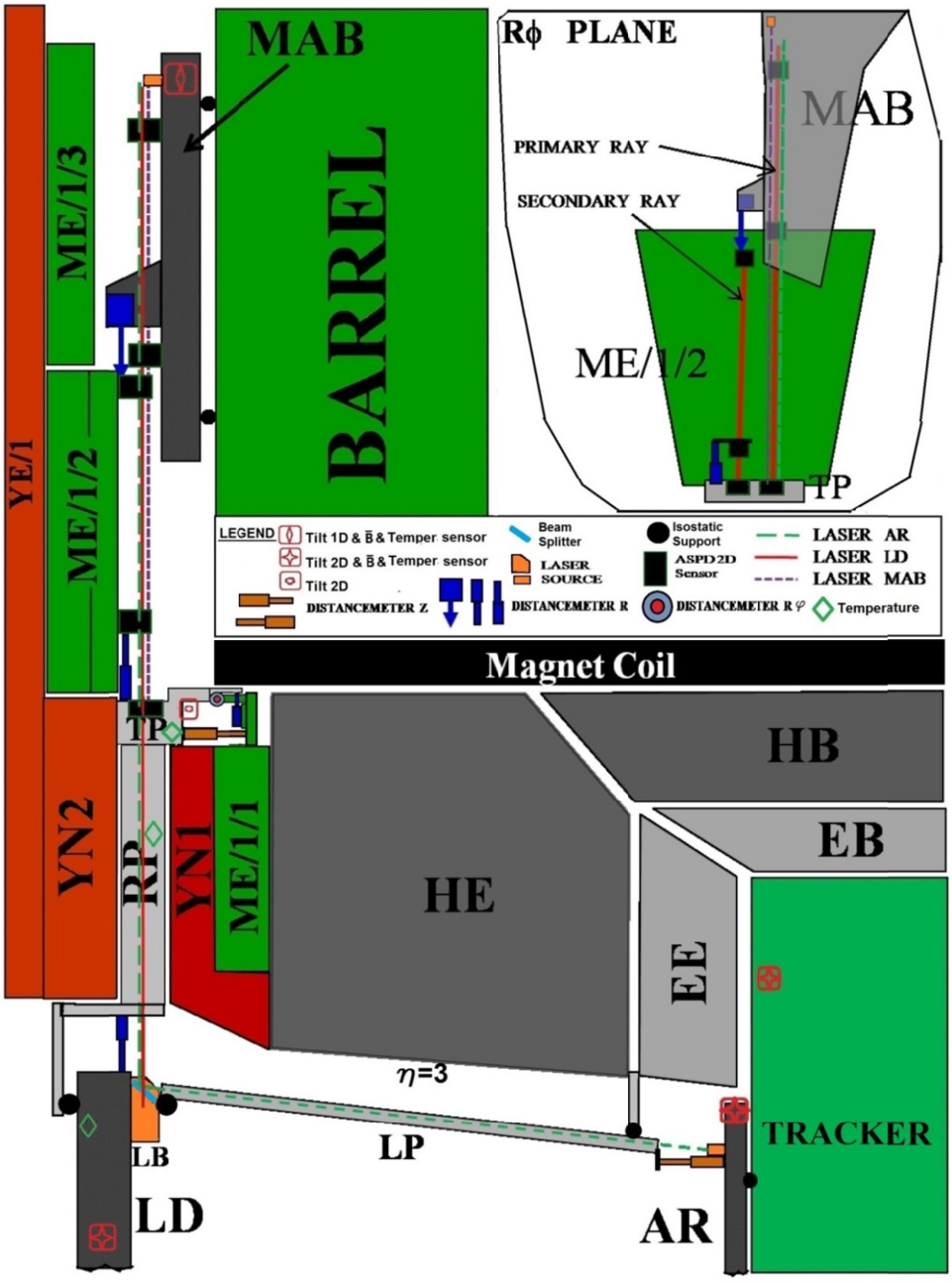


Figura 3.16: *Representación esquemática de los componentes del sistema de alineación LINK sobre un cuadrante ZR de CMS.*

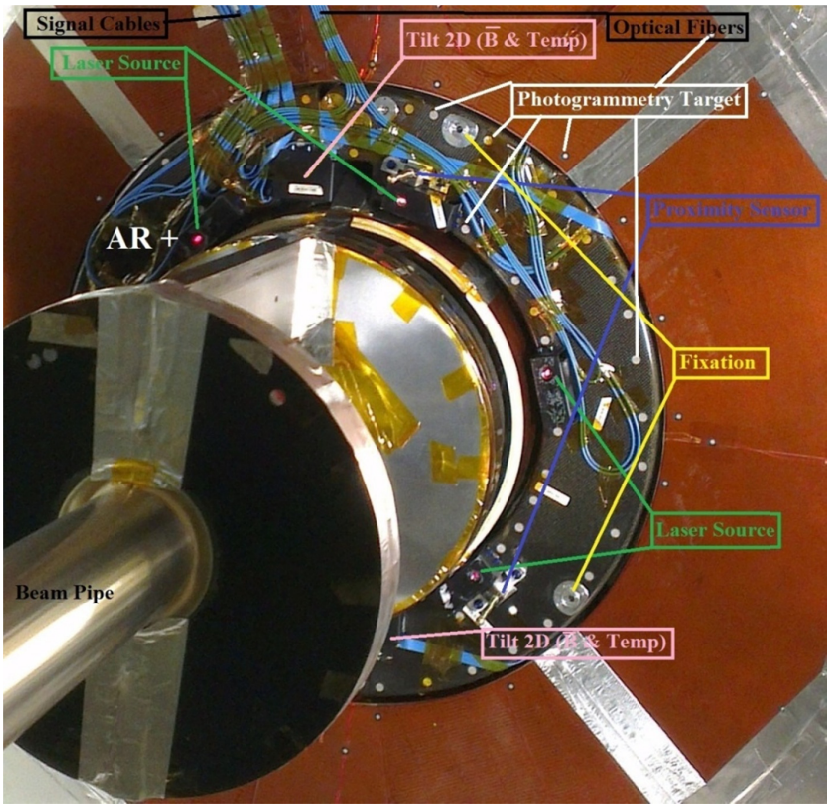


Figura 3.17: *Región del TRACKER, donde se muestra el AR+ instalado, totalmente instrumentado y listo para entrar en funcionamiento (Enero 2015).*

2. El sistema continúa en la región **η=3** (Figuras 3.18, 3.19 y 3.21), donde encontramos 3 Perfiles Longitudinales (LP) de aluminio, sobre los que están midiendo su posición, en una pantalla fijada a estos, los sensores de proximidad Z anteriores, y por cuyo interior circulan protegidos 3 de los 6 rayos de luz que parten del AR (los situados a φ=75º, 195º y 255º). En el otro extremo del mismo encontramos la estructura de fibra de carbono LD (LINK Disc, Z≈6719), que es la base del sistema de alineación LINK, sobre la que se encuentran las fuentes de luz (R≈629, Z=6667.5) encapsulados en lo que denominamos Laser Box (LB). Esta LB produce 2 rayos de luz láser paralelos (50 mm), mediante un prisma romboidal, que circulan radialmente sobre el plano Rφ, uno hacia los ASPDs que se encuentran en los MAB (primario) y otro hacia los que se encuentran sobre las ME1/2 (secundario). El LB también dispone de un divisor de haz (Beam Splitter (BS)) que refleja radialmente el rayo que procede del AR. Sobre la estructura LD también se encuentran 6 sondan de temperatura y un montaje mecánico que dispone de un sensor de inclinación 2D, temperatura y campo magnético idéntico a los del Tracker. Hasta este disco llegan los tres perfiles longitudinales que transportan la medida en Z del Tracker y que se sujetan sobre tres rótulas huecas en el LD. Los LP disponen de un punto de apoyo deslizante en la zona (Z=3988). Los componentes del LD han sido relacionados entre sí mediante un complejo sistema de calibración descrito más adelante.

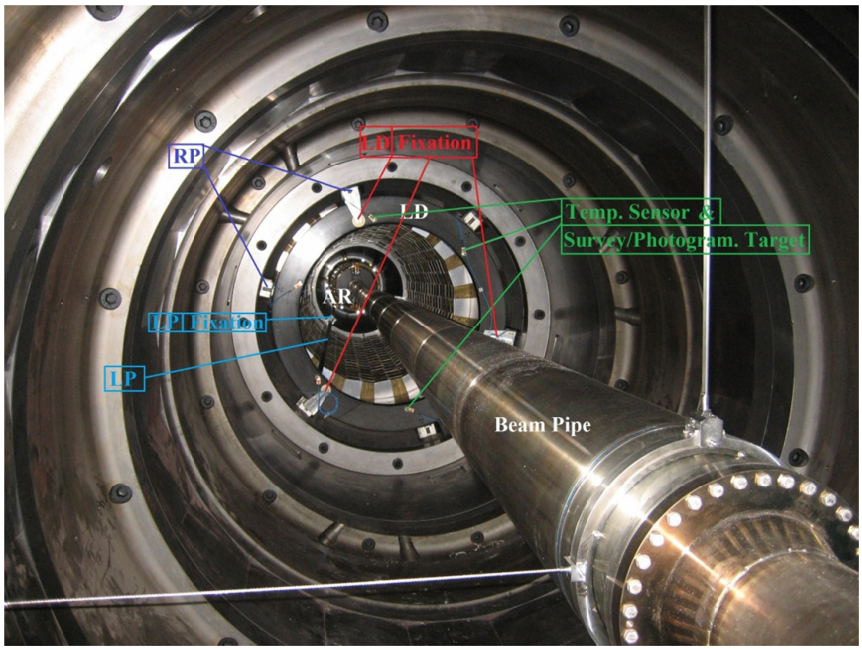


Figura 3.18: *Región η=3 vista hacia el IP, Se muestra el LD+ instalado y totalmente instrumentado.*

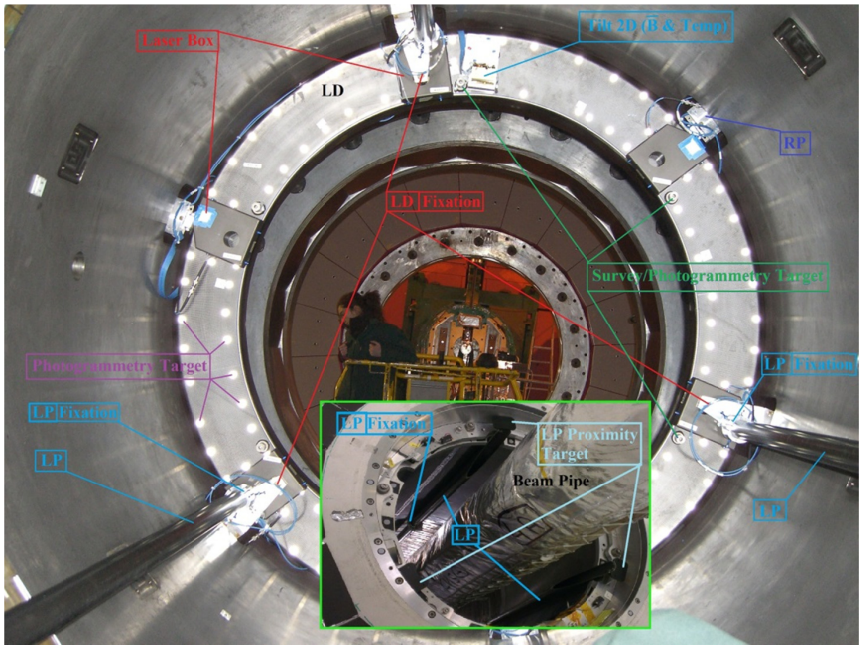


Figura 3.19: *Región η=3 vista desde el IP, Se muestra el LD- instalado y totalmente instrumentado. Y detalle del extremo opuesto de los LPs con pantallas para sensor de proximidad Z del TRACKER.*

3. En la región **YN1** (Figuras 3.20, 3.21 y 3.22), el sistema circula por 6 ranuras rectangulares (110 × 70 mm2), fresadas radialmente sobre esta (Z=6670), donde se encuentran 6 Perfiles Radiales (RP), tubos de aluminio, por cuyo

interior circulan los rayos que vienen del LD y AR y que están fijados rígidamente cada uno sobre una plataforma de transferencia de medida llamada 'ME1/1 Tranfer Plate' (TP), situada en Z=6667.5 y R=2630. A mitad de cada tubo se encuentra situada una sonda de temperatura y en el extremo inferior del mismo se encuentra un sensor de proximidad que mide la coordenada R respecto a 6 pantallas situadas sobre el LD (R=656, Z=6685.5). El interior del tubo está dividido en 3 zonas, por las que suben el haz primario, el secundario y los cables y fibras que dan servicio al LD y al sensor de proximidad y temperatura que se encuentran sobre el RP. Estos tubos funcionan mecánicamente como vigas empotradas en su extremo superior, en la TP, 3 de ellos (los situados a φ=75º, 195º y 255º) tienen la función de soportar isostáticamente el LD.

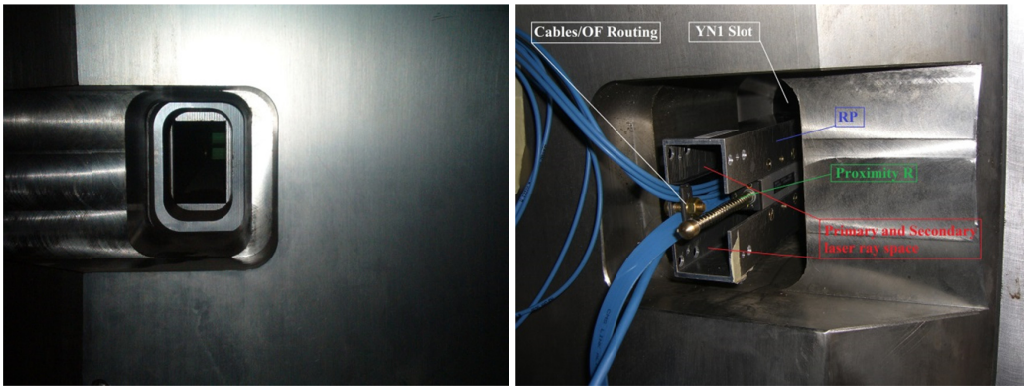


Figura 3.20: *Detalle de la parte inferior de la de la ranura practicada sobre el YN1, vista desde la región de η=3. Y ranura con el RP instrumentado insertado.*

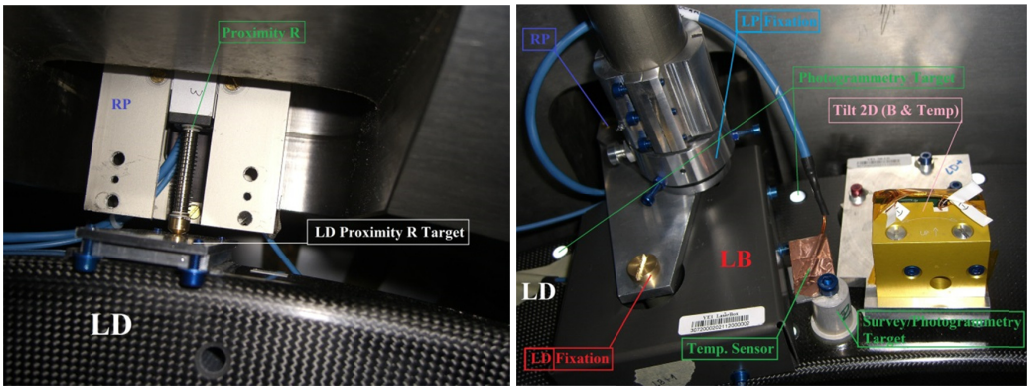


Figura 3.21: *Detalle de la parte inferior de YN1, vista desde la región de η=3, con el LINK Disc instalado sobre los RP.*

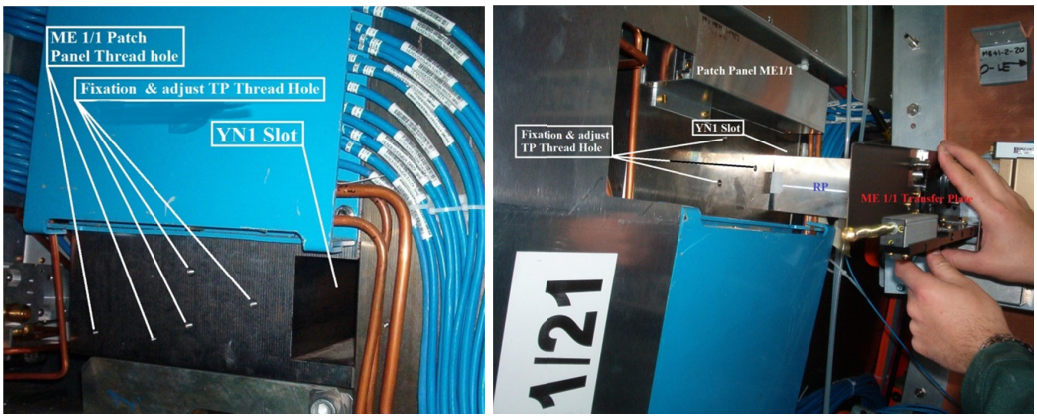


Figura 3.22: *Izquierda, detalle de la parte superior de YN-1, vista desde la región de ME1/1. Derecha, momento de la inserción del RP en una ranura de YN+1.*

4. A continuación se encuentra la región **ME1/1** (Figura 3.23), donde se encuentran 6 'ME1/1 Tranfer Plate' (TP) sobre las que descasan los RPs, como hemos comentado. Sobre cada una de estas estructuras hay 2 sensores ASPDs (R=2770, Z=6667.5) para recibir los rayos que vienen radialmente a través del RP, relacionando directamente esta zona con el Tracker, un sensor de proximidad Radial (R≈2824, Z=6677.5) que hace contacto sobre el montaje mecánico de los ASPDs que se encuentran sobre las CSCs de la ME1/2, continuando así con la medida radial que venía del LD y un sensor de inclinación 2D (Figura 3.24, derecha). Para relacionar mecánicamente la medida en esta zona con la las CSCs de la ME1/1, la TP dispone de un sensor de proximidad Z (R=2687, Z=6280) y otro Rφ (R=2666, Z=6357.5) que monitorizan de forma continua las posiciones de las 6 CSCs de la ME1/1 sobre las que el sistema LINK realiza mediciones directas. En cada una de estas CSCs, en su parte superior, se encuentra un montaje mecánico (Figura 3.24) que dispone de un sensor de proximidad R (R=2690.5, Z=6307), que realiza la medida hacia la TP, además dispone de dos pantallas sobre las que se realiza la medida de los dos sensores de proximidad de la TP, mencionados para la medición en Z y Rφ. Todos los componentes que integran estos montajes mecánicos han sido relacionados entre sí mediante sus correspondientes calibraciones.

5. En la región **ME1/2** (Figura 3.25), se realiza la monitorización directa con el sistema de alineación LINK a 6 CSCs. Sobre cada una de las CSCs hay posicionados 2 ASPDs, uno en la zona inferior (R≈2837, Z=6667.5) (Figura 3.23) y otro en la superior (R≈4573, Z=6660) por los que atraviesa el rayo secundario que viene del LD. Además se continúa la medida R que venía de la TP al ASPD inferior, mediante el sensor de proximidad R, tomando la CSC cómo un elemento rígido de medida contante calibrada R, en la que por el extremo superior continúa la medida hacia los MABs del BARREL mediante un sensor de proximidad óptico situado sobre estos últimos.

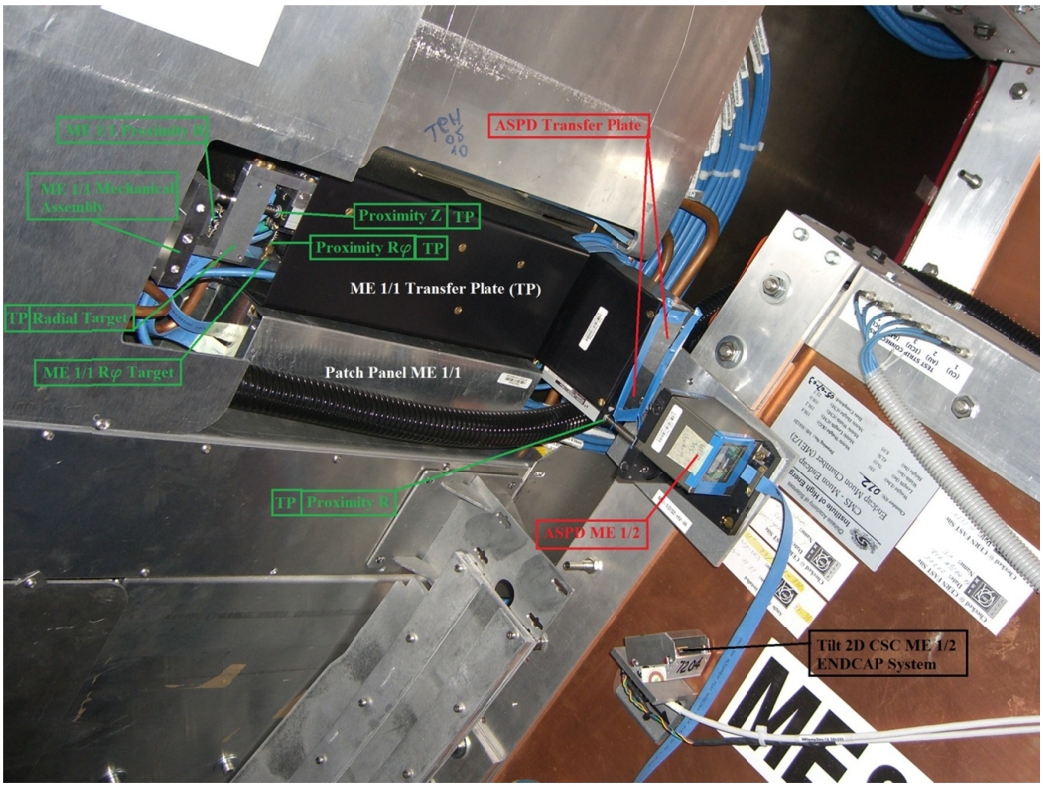


Figura 3.23: *Región ME 1/1 y zona inferior de la ME 1/2 (lado negativo).*

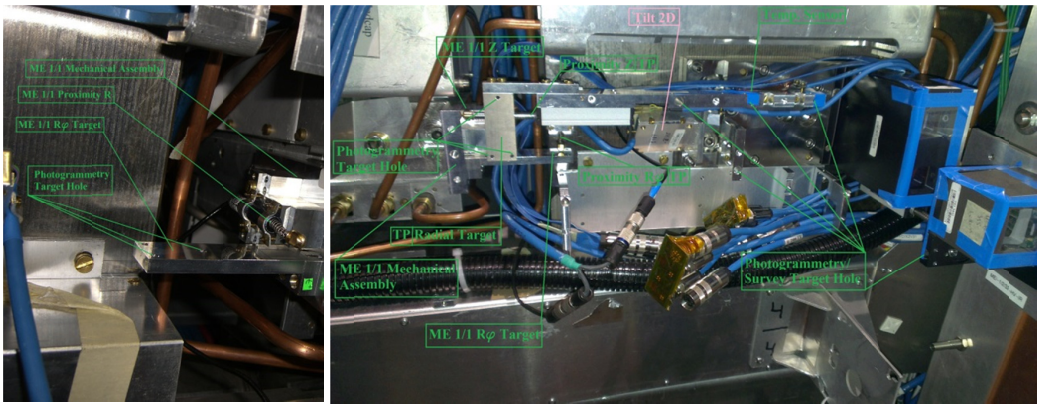


Figura 3.24: *Izquierda, dispositivo mecánico montado sobre CSC de la ME 1/1 (lado positivo). Derecha, ME 1/1 Transfer Plate abierta (lado negativo).*

6. Finalmente en la parte más externa de CMS se encuentra la región que llamamos **MAB** (Figura 3.7 y 3.26), en esta se encuentran 6 estructuras de fibra de carbono, fijadas isostáticamente sobre el hierro de retorno de la YB2, en las que se hace la transferencia de la medida entre el sistema LINK y el BARREL (y también se relacionan algunos parámetros del ENDCAP). Insertados en los

MABs se encuentran los elementos de monitorización del sistema BARREL y ENDCAP descritos anteriormente, además de los del sistema LINK. El LINK dispone en cada MAB de 2 ASPDs (Inferior (R=4423.5, Z=6660) y Superior (R=6961.5, Z=6660)) por los que atraviesa el rayo primario que viene del LD, el que viene del AR y otro rayo descendente que parte del elemento mecánico denominado Nivel Laser (LL) (R=7093, Z=6660), que atraviesa ambos ASPDs del MABs y termina en un ASPD de la TP. El LL dispone además de un sensor de inclinación 1D, que monitoriza la coordenada φ (sensor de temperatura y campo magnético), relacionando de forma directa el rayo descendente respecto a la gravedad mediante el sensor de inclinación. En la parte baja de cada MABs se encuentra un sensor de distancia óptico (R≈4762, Z=6690), que relaciona de forma directa la coordenada R de la CSC situada en la ME1/2 (motorizando la pantalla óptica situada en la mecánica del ASPD que se monta sobre la parte superior de la CSC) con el MAB, es un sensor óptico (no-contacto) para permitir las apertura y cierres de las ruedas del hierro en la dirección Z, sin que se produzca una interferencia. Los elementos que se encuentran sobre el MAB han sido relacionados entre sí mediante un banco de calibración preparado a tal fin (Figura 3.8). Todas las piezas de aluminio del sistema LINK, que se encuentran próximas a los rayos de los láseres de referencia, han sufrido un proceso de anodizado duro negro de unas 30±6 μm de espesor, para evitar en lo posible reflejos en su superficie.

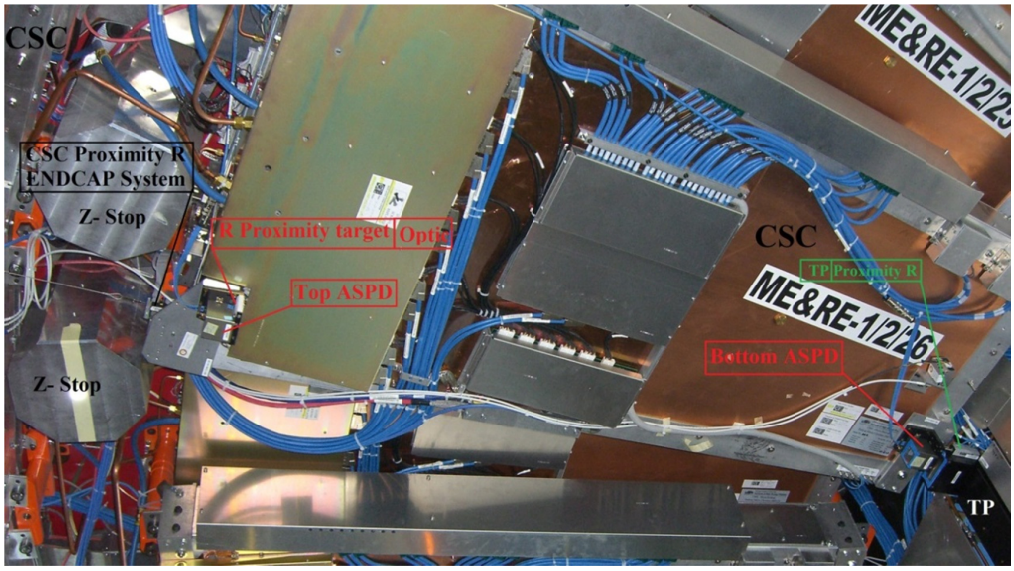


Figura 3.25: *Región ME 1/2 (lado negativo).*

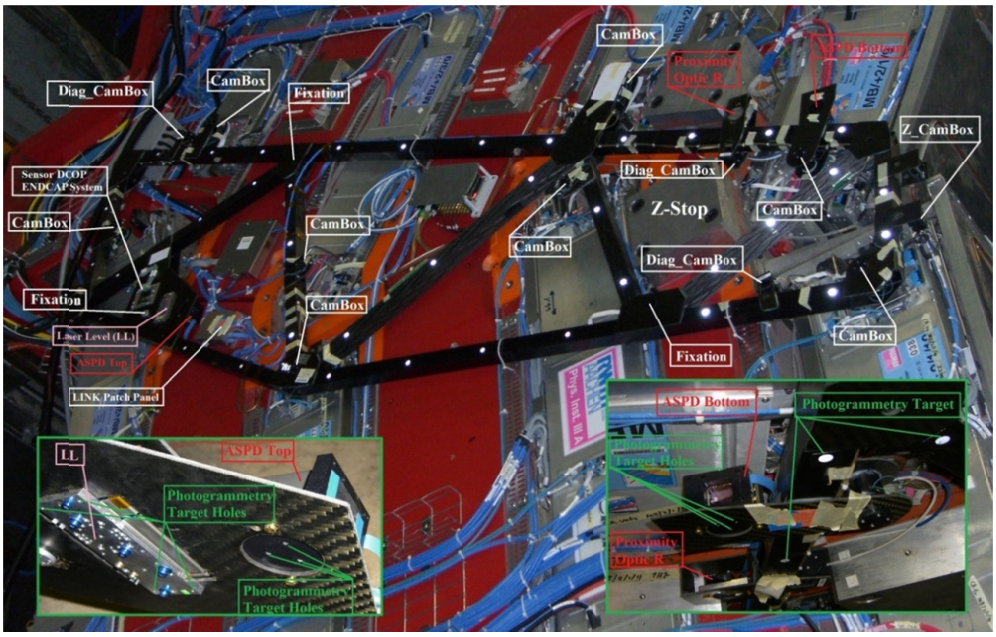


Figura 3.26: *Región del MAB (lado positivo).*

3.4.1. Principio de medida del sistema de alineación LINK de CMS.

Se basa en dos puntos principales: el primero, relacionar el sistema TRACKER con los sistemas de alineación de muones del ENDCAP y BARREL. Y segundo, monitorizar la posición de las CSCs en las posiciones ME1/1 y ME1/2, situadas en el primer disco del ENDCAP, YE1.

La transferencia entre el TRACKER y el sistema del ENDCAP y BARREL, se realiza mediante 3 diferentes caminos de luz láser, que circulan por los mismos pasajes y que se esquematizan en la figura 3.27:

-El primero de ellos (LD láser) muestra el camino seguido por los rayos paralelos en Rφ, con una separación de 50 mm, que inician su camino desde cada LB del LD, situado en la región η=3. Los haces de luz salen de un colimador e inciden sobre un prisma romboidal modificado, que produce los dos rayos paralelos a R, el Primario ha de pasar a través de un prisma separador de haz (donde se reflejará radialmente el haz que viene del AR con un ángulo de 5.7º) continuando radialmente, el Secundario continúa a su salida del romboidal paralelamente al Primario. Ambos llegarán hasta los 2 ASPDs situados sobre las TPs, fijando cada uno un punto (Rφ, Z) sobre el sensor. Continuando el Primario hasta llegar a los 2 ASPDs situados sobre cada MAB donde fijaría otros dos puntos (Rφ, Z), mientras que el rayo Secundario continúa hasta los 2 ASPDs fijados sobre las CSCs de la ME1/2, donde fija otros dos puntos (Rφ, Z).

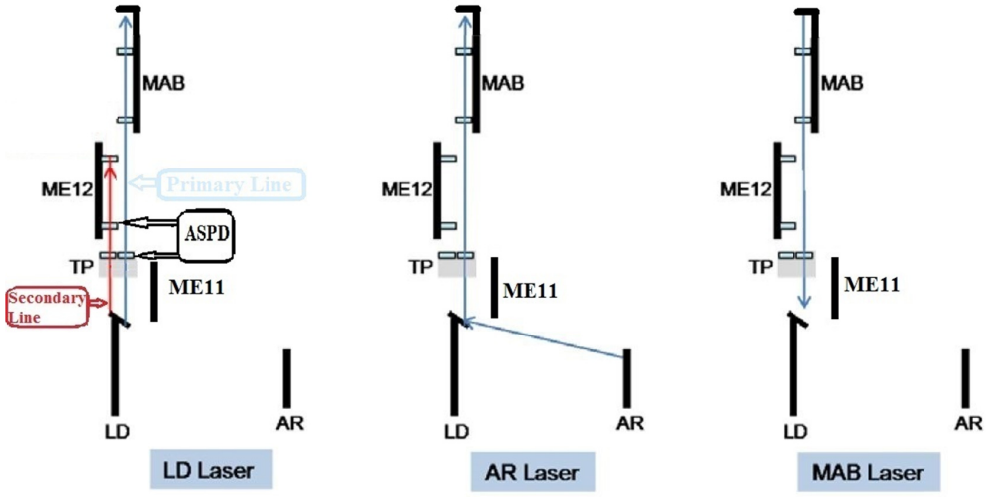


Figura 3.27: *Esquema de los caminos de luz que siguen los 3 tipos de rayos láser disponibles en el sistema LINK sobre un cuadrante RZ de CMS.*

-El segundo camino (AR láser) se inicia en los colimadores situados sobre el AR, en los extremos del TRACKER. El rayo incide sobre el prisma separador de haces situado sobre cada LB del LD continuando su camino radialmente por el mismo trazado que el rayo primario del LB, hasta el ASPD primario de cada TP, generando un punto (Rφ, Z). Luego continúa hasta llegar a los 2 ASPDs situados sobre cada MABs, donde fijará otros dos puntos (Rφ, Z).

-El camino MAB láser parte del Laser Level de cada MABs, situado en la parte más exterior radialmente del LINK, discurre radialmente con el mismo trazado que el rayo primario del LD y el que viene del AR pero en sentido descendente, pasa a través de los dos ASPDs situados en cada MABs fijando dos puntos (Rφ, Z) y continua hasta llegar al ASPD primario de la TP donde fija otro punto (Rφ, Z).

-Para terminar de fijar cada objeto con 6 grados de libertad (3 rotaciones y 3 translaciones) y poder ser considerado como un sólido rígido en los programas de reconstrucción de medida, los parámetros faltantes se consiguen a través del resto de detectores mencionados en los puntos anteriores: distanciómetros, inclinómetros y sondas de temperatura y campo magnético situados en las diferentes regiones del sistema LINK como se muestra en la figura 3.16.

Los ARs y LDs (al igual que se mencionó para los MABs) han sido calibrados sobre un banco de calibración en el 'I4 Hall de los ISR' del CERN [84 y 85] (Figura 3.28), con una precisión del sistema de puntos creados de unas 70 μm. Así se consigue tener una medida relativa entre los rayos de los ARs y LDs respecto al vector gravedad y entre ellos, introduciendo una relación directa entre los distintos rayos que se generan y los componentes montados sobre estas estructuras. Estos parámetros fijados durante la calibración serán introducidos en los programas de reconstrucción de objetos utilizados por el sistema.

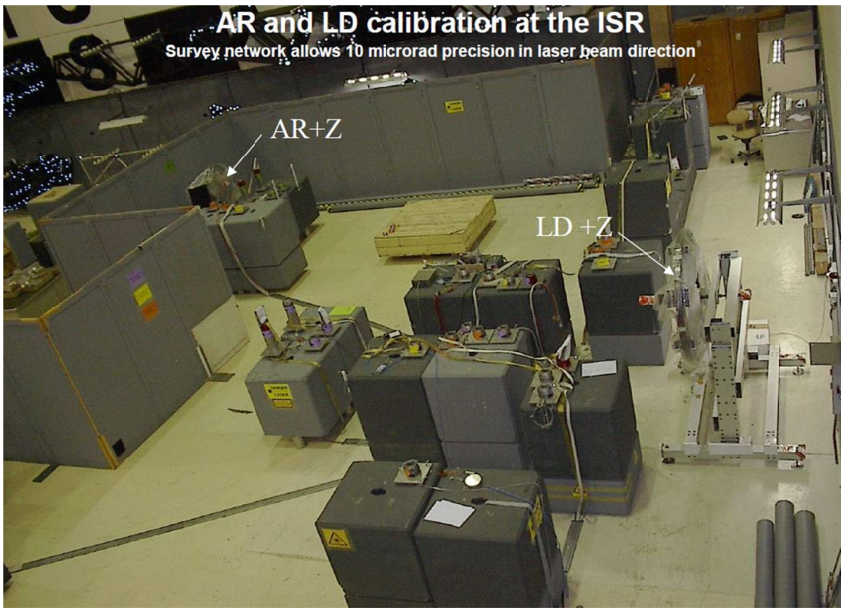


Figura 3.28: *Banco de calibración de las estructuras del sistema de alineación LINK, en la zona de los ISR del CERN.*

La monitorización que realiza el LINK del sistema BARREL se realiza a través de los MAB, que a su vez también monitoriza parte del sistema ENDCAP, respecto al sistema del TRACKER. Para realizar esta monitorización se hace una transferencia de parámetros de medida concatenados desde el TRACKER hasta el sistema de alineamiento de muones de la siguiente forma:

Comenzando en el disco número 10 del Tracker (BD), que está conectado mecánicamente al AR, se permite la referenciación entre el TRACKER y sistema LINK. La transferencia se realiza en dos pasos. En primer lugar el disco 10 se encuentra unido rígidamente al disco 9 del TEC, sobre el que se encuentra el último sector de silicio del mismo, de forma que el sistema queda referenciado al volumen interno del tracker con la ayuda del sistema de alineación interna de este. Segundo, se realiza una trasferencia mecánica entre el BD y AR, a través de los tres pilares de fibra de carbono, cuya estabilidad está por debajo de los 100 µm. Para ello se realizó una calibración de las posiciones de referencia del BD y los pilares, con el AR instalado en una MMC, con precisiones mejores a 80 µm, aquí los inclinómetros del BD y AR estaban midiendo la inclinación respecto a la gravedad. Estas medidas se complementaron con medidas con estación total y fotogrametría digital para la parte positiva [77, 78 y 79] y negativa [80, 81 y 82] del TEC del Tracker, con una precisión de la medida de unas 50 µm. Una vez instado en CMS se utiliza una referenciación, mediante un Sistema Laser Tracker (LTD), para obtener las posiciones de instalación de inicio, con una precisión mejor a las 500 µm [83]. De esta forma pasamos la monitorización del sistema TRACKER al AR. El AR tiene los 6 rayos relacionados entre sí y respecto a la gravedad mediante los inclinómetros que tiene situados en dos posiciones del mismo, además dispone de 3 sensores de medida Z que monitorizan el plano del AR directamente respecto al LD, a través de los LPs de aluminio, con 3665 mm de longitud,

situados en la región de η=3, calibrados con unas 30 μm de precisión mediante fotogrametría digital [111 y 112].

Continuando con las calibraciones necesarias para realizar la transferencia de la medida, se realizó la referenciación interna del LD+ y el AR+ en los ISR [86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93 y 94]. Seguidamente fueron instalados en CMS, en el área de instalación en superficie SX5, para su utilización durante las pruebas del imán del verano de 2006 y referenciados respecto a las ruedas del detector [95, 96 y 97], a continuación se desmontaron, volviendo a ser recalibrados internamente en el banco de calibración de los ISR [98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108 y 128], con precisiones de 100 a 300 μm. Finalmente se instaló y referenció el LD+ en la posición definitiva de CMS una vez bajadas las ruedas del detector a la UXC55 [109 y 110], y el AR+ [131, 132] siendo esta la referencia de inicio del sistema de alineación LINK respecto a las ruedas de CMS con unas 500 μm de precisión, en el sistema de referencia global de CMS.

Posteriormente se realizó la referenciación interna de los LD- y AR- en los ISR [116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126 y 129], con precisiones de 100 a 300 μm. Se instalaron y referenciaron en su posición definitiva de CMS el LD- [127] y el AR- [130, 133 y 134], siendo esta la referencia de inicio del sistema de alineación LINK respecto a las ruedas de CMS con unas 500 μm de precisión, en el sistema de referencia global de CMS.

Los LDs están relacionados a la región ME1/1 y ME1/2 a través de los RPs y las TPs. Estas han sido referenciadas internamente en los ISR [113 y 114] con 30 μm. Sobre estas van fijados los RPs de aluminio de 1982 mm de longitud, también referenciados internamente [115] con unas 100 μm de precisión, y terminan en sensores de proximidad R monitorizando el LD. Los RP de las posiciones de 75º, 195 y 315º sirven además de fijación para el LD. Los sensores radiales situados sobre las TP continúan la medida hasta las CSCs de la ME1/2 y los longitudinales Z y Rφ llevan la medida sobre las ME1/1. Desde el dispositivo LINK situado en la posición superior de las CSCs de ME1/2 se transfiere la medida hasta los MABs mediante otros distanciómetros ópticos R situado en la parte inferior de los MABs. Los ASPDs montados y referenciados sobre las TPs, CSCs de la ME1/2 y MABs nos dan las coordenadas (Rφ, Z) de estos dispositivos respecto a los 3 tipos de rayos laser de referencia del sistema LINK.

Los dispositivos del sistema LINK instalados, y referenciados respecto al sistema global de CMS, en las ME1/1, ME1/2 [135, 136 y 137] y MABs [138, 139, 140 y 141], con una precisión de 300-500 μm, han sido previamente referenciados internamente a través de máquinas de medición por coordenadas ópticas y de contacto en el laboratorio de calibración del Instituto de Física de Cantabria (IFCA) en Santander, con una precisión de unas 10 μm (el resto de dispositivos mecánicos que van sobre las regiones TRACKER, η=3 e YN1 también se han referenciado internamente sobre las mismas máquinas del IFCA, con igual precisión).

A través de estos procesos de referenciación se transfiere la medida desde al AR hasta el MAB y las ME1/1 y ME1/2, obteniendo la posición de partida de

todos los elementos del sistema, antes de encender el imán de CMS. Y por consiguiente se relaciona la medida desde el TRACKER hasta el sistema de muones ENDCAP y BARREL.

Al poner en funcionamiento el Imán, el sistema de alineación se encargará de monitorizar los movimientos que se vayan produciendo entre los diferentes elementos del sistema y transferirá esta información al sistema de reconstrucción geométrica de CMS para compensar los movimientos producidos y poder medir el momento de las partículas con las precisiones requeridas.

3.4.2. Dispositivos leídos y controlados por el sistema LINK.

Los componentes básicos integrados en el sistema de alineación global LINK, que son leídos y controlados por éste, son 7 y han sido escogidos tras un largo y complejo sistema de selección y caracterización:

-**Fuentes de Luz láser**, el sistema LINK utiliza 36 diodos laser modelo 58FCM de la firma Schäfter & Kirchhoff GMBH [143], con una longitud de onda nominal de 681 nm y una potencia de salida máxima de 30 mW (Clasificados como clase IIIb). Permiten ser modulados analógicamente en un rango de voltaje de 0 a 2.5 V, controlando linealmente la potencia de salida, desde un mínimo del 1% de la máxima. Los láseres se encuentran ubicados en el 'Alignment Laser Room' de la caverna de servicios USC55 de CMS. Cada láser se acopla a una fibra óptica mono-modo S630 de la firma Nufern [144] que lleva la luz hasta su correspondiente posición de CMS en la caverna experimental UXC55 a través de unos 150 m de canaletas y pasando por un panel de conexiones a pie de la rueda de CMS en la que esté instalado YBO, YB±2 e YE±1 y por otro situado en el lugar donde está el dispositivo AR, MAB y LD (Figura 3.29). A la salida de la fibra está una óptica colimadora modelo FC5-TiFS-NIR de la firma Micro Laser [145] que proporcionará un haz gaussiano sin distorsión ni efectos de difracción en todos las posiciones de medida del LINK, situándose: 6 en cada uno de los dos ARs, 6 en cada uno de los dos LD y 1 en cada uno de los 12 MAB de las YB±2. Para evitar perturbaciones y desviaciones de los haces por turbulencias y variaciones del índice de refracción del aire por gradientes térmicos, el camino del haz irá protegido en las regiones en que esto sea posible.

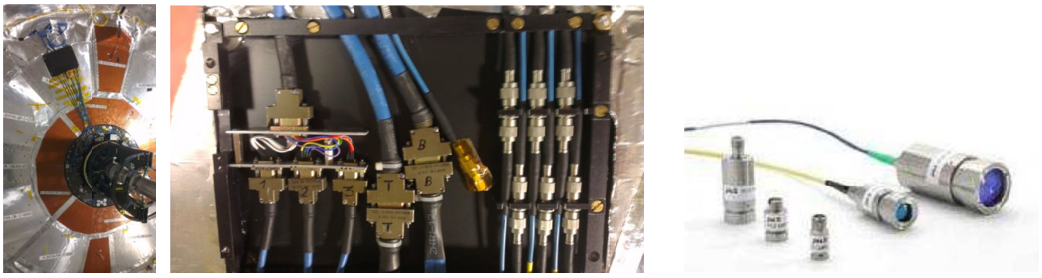


Figura 3.29: *AR (negativo) y su panel de conexiones (PP) en la región del Tracker, detalle PP del AR y colimador FC5-TiFS-NIR de la firma Micro Laser.*

-**ASPDs** (Amorphous Silicon Position Detector), son el elemento fundamental del sistema LINK [146] que dispone de 72 de estos foto-detectores situados sobre las regiones ME1/1 (24), ME1/2 (24) y MAB (24), distribuyéndose en cada cuadrante ZR de la siguiente manera: 2 en cada TP, 2 sobre cada CSC de la ME1/2 y 2 en cada MAB. Al incidir el haz laser perpendicularmente sobre la zona activa de los foto-sensores, se proporcionan dos distribuciones gaussianas de la carga, sobre cada uno de los planos paralelos de detección de los mismos, suministrando las coordenadas Rφ y Z de la posición donde está incidiendo el haz.

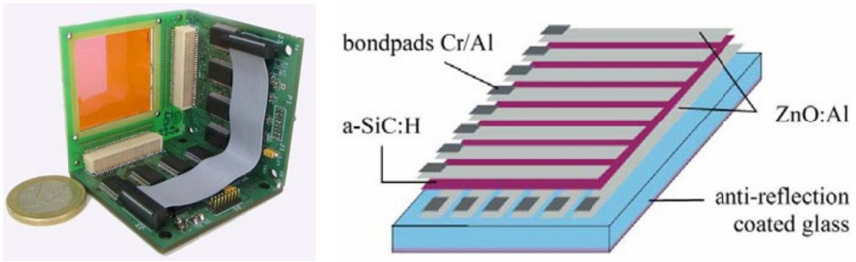


Figura 3.30: *ASPD del sistema LINK. Y estructura interna del foto-detector.*

Los ASPDs son sensores semitransparentes 2D, con ~30× 30 mm^2 de área activa, basados en carburo de silicio amorfo hidrogenado (a-SiC:H), que han sido desarrollados por M. Schubert y su grupo de trabajo del Departamento de Silicio del Institut für Physikalische Electronik en la Universidad de Stuttgart [148]. Este nueva generación de sensores ASPDs incorpora ~10 % de carbono en su composición, provocando un aumento de la señal y permitiendo mayor transparencia en el espectro visible (>80 % en visible y NIR (Near Infrared)) y gran sensibilidad (>15 mA/W), pudiendo reconstruir la posición de la mancha del láser sobre el sensor incluso si la irradiación de luz está por debajo de 0.1 mW/cm^2 [170 y 171].

Poseen una estructura multicapa [147] (Figura 3.30), construida sobre una lámina base de sustrato cristalino de 1 mm de espesor (recubierto por ambos lados con un tratamiento anti-reflejante para minimizar interferencias y reducir los ángulos de deflexión), sobre el que se depositan 3 capas: una capa de 200 µm de a-SiC:H, como material fotoactivo que está formando un sándwich, entre otras dos capas de electrodos de dióxido de Zinc dopado con Aluminio (ZnO:Al) de unas 100 µm. Cada capa de electrodos está formada por 64 tiras de 430 µm de paso y espacios separadores de 22 µm entre ellas. Ambas capas de electrodos están segmentadas perpendicularmente definiendo una matriz 2D de 64 + 64 electrodos. Las capas del sensor han sido depositadas utilizando técnicas CVD (Chemical Vapour Deposition), mientras que los electrodos se han segmentado utilizando técnicas fotolitográficas. Estos sensores ASPDs han sido diseñados para integrar una sencilla electrónica 'front-end' en el mismo encapsulado del área activa del foto-detector (Figura 3.30). La corriente inducida al incidir la luz del láser visible en los electrodos es multiplexada a través de esta electrónica 'front-end' y enviada a una tarjeta LEB (Local Electronic Board) que ya puede ir situada a cierta distancia del ASPD y que contiene una tarjeta de procesado de señal, una tarjeta interface y otra micro-

controladora, donde se convierte la señal y se calcula la posición del haz de luz láser que incide sobre el área activa del foto-detector. La resolución espacial de este tipo de sensores es de unas 5 μm.

-**Inclinómetros** electrolíticos, son sensores que miden variaciones de inclinación (φ, θ) del elemento donde van fijados respecto al vector gravedad con buena repetitividad, fiabilidad, estabilidad y precisión [149]. El sistema de alineación LINK de CMS utiliza 3 modelos distintos de inclinómetros (Figura 3.31 y Tabla 3.2): el 1D M756–1172, 2D M756–1150 y el 900-H biaxial (de la desaparecida firma comercial Applied Geomechanics Inc) [150]. Distribuyéndose de la siguiente manera (Figura 3.16):

- 12 inclinómetros modelo 1D M756–1172, ubicados 1 en cada uno de los 12 MABs de las YB±2, dentro del montaje LINK denominado Nivel Laser. Estos miden solamente la coordenada φ.
- 10 inclinómetros modelo 2D M756–1150. Sobre cada uno de los dos BD del Tracker van incrustados 2, otros 2 instalados sobre cada uno de los dos ARs y 1 en cada uno de los dos LDs de la región η=3.
- 12 inclinómetros modelo H–900 biaxial, instalados sobre cada una de las 12 TPs situadas en la región ME1/1 de las YE±1.

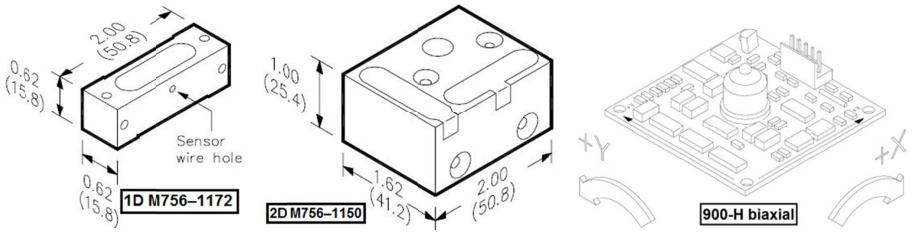


Figura 3.31: *Inclinómetros utilizados en el sistema de alineación LINK.*

Están basados en el principio de que una burbuja de gas (Figura 3.32), suspendida en un líquido, siempre se va a orientar perpendicular al vector gravedad. Consisten en una cápsula cristalina, parcialmente llena de un líquido conductor (yoduro de potasio en etanol), dotado de 3 contactos, generalmente de platino, que forman el electrodo 'pick-up' y dos electrodos de excitación. Cuando la burbuja está perpendicular a la gravedad, la resistencia entre los electrodos de excitación y el central (pick-up) es la misma, pero cuando se inclina, la superficie que cubre la burbuja sobre el electrodo de excitación de cada lado varía, produciéndose un cambio lineal de la resistencia. El principio es igual que el de un potenciómetro: al aplicar un voltaje AC entre los electrodos de excitación, el voltaje AC medido en el electrodo central dependerá del ángulo girado por el inclinómetro respecto a la gravedad.

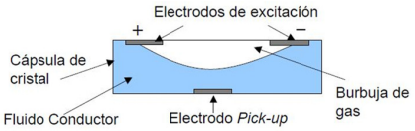


Figura 3.32: *Esquema del interior de un inclinómetro electrolítico.*

Los inclinómetros M756 vienen acompañados de una Unidad Acondicionadora de Señal (SCU) que proporciona un voltaje de excitación AC estable al sensor, filtra y amplifica la señal de salida y la convierte al formato necesario para ser leído y registrado por el sistema. En los 900-H la electrónica de acondicionamiento de señal se integra en el encapsulado del inclinómetro. Una vez acondicionada esta señal se envía a la tarjeta de lectura ELMB (Embedded Local Monitor Board) que pueden estar situadas a grandes distancias, unos 50 m, sin degradación apreciable de la señal.

Model	Range *(Degr.)*	Resolut. *(μrad)*	Repeatability *(μrad)*	Tª.Coef. *(%/ºC)*	Work. Tª *(ºC)*	Humidity *(%)*	Linearity Full rang. *(%)*
M756	±10	1	2	+0.05	-25 to +80	0 to 100	2
900-H	±10	87.3	174.5	+0.03	-40 tp +85	0 to 90	1

Tabla 3.2: *Características de los modelos de inclinómetros usados por el sistema de alineación LINK.*

-**Sensores de proximidad ópticos**, este tipo de distanciómetros funcionan basándose en el principio de la triangulación óptica (Figura 3.33). El sensor dispone de un láser semiconductor infrarrojo a 780 nm y 3 mW de potencia máxima (clasificado como clase IIIb) que proyecta una mancha luminosa de 1 × 2 mm^2, focalizada a cierta distancia por una lente colimadora transmisora no esférica, sobre la superficie de la pantalla cerámica de referencia difusa que está sobre el objeto monitorizado (mecánica del ASPD superior de la CSC de la ME1/2), produciendo una mancha luminosa. Parte de esa luz difundida pasa a través de una lente receptora que proyecta una imagen sobre una posición del sensor de imagen. Cuando la pantalla cerámica referenciada se mueve respecto al sensor, la posición de la mancha luminosa también se mueve sobre la superficie del sensor de imagen, pudiendo ser cuantificado este movimiento por simple triangulación.

El sistema de alineación LINK utiliza 12 OMRON Z4M‑W100 (Tabla 3.3) de la firma OMRON Corporation [151], situados 1 en la parte baja de cada uno de los MABs de las ruedas YB±2, monitorizando la coordenada R. Este sensor tiene un rango dinámico de ±40 mm a una distancia focal de 100 mm, con una resolución calibrada de unas 22 μm. En esta región es necesario un sensor de no contacto puesto que durante las aperturas de las ruedas de CMS las YB±2, y por consiguiente los MABs donde van instalados estos distanciómetros se alejan de su superficie de referencia, situada sobre las CSCs de la ME1/2 en las ruedas YE±1, muchos metros en Z. Si fuera un sensor de contacto en las aperturas se saldría de la zona de contacto estirándose a su posición de máxima apertura y durante el cierre se produciría una colisión que inutilizaría el distanciómetro.

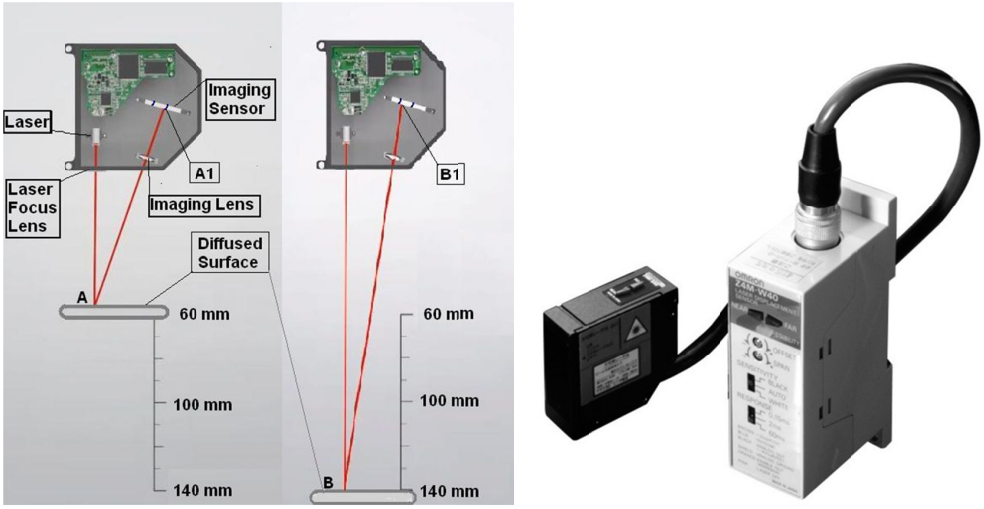


Figura 3.33: *Principio de funcionamiento por triangulación láser del distanciómetro y OMRON Z4M-W100 con su electrónica amplificadora de señal.*

Este tipo de distanciómetro lleva su electrónica amplificadora de la señal situada sobre cada MAB, desde donde ya puede ser enviada su señal a largas distancias hasta llegar a la tarjeta ELMB.

Model	OMRON Z4M-W100
Range	± 40 mm from focal distance
Focal distance	100 mm
Resolution (Ceramic Alum.)	8 μm (500 ms), 30 μm (20 ms), 150 μm (0.7 ms)
Linearity (Ceramic Alum.)	1.5 % FS (Full Scale)
Time of response	0.7, 20 o 500 ms selectionable
Temperature dependence	Sensor: 0.02 % FS/ºC Amplifier: 0.03 % FS/ºC
Temperature work range	0 to 50 ºC
Environment illumination	3.0 lx max.

Tabla 3.3: *Principales características del distanciómetro OMRON Z4M-W100.*

Como pantalla cerámica difusa sobre la que realiza la medida se utiliza el tipo Accuflect G6 de la firma Accuratus Ceramic Corporation [152], con un diámetro de 30 mm, que es de un material difuso altamente reflectivo en el rango de longitud de onda del láser del distanciómetro. Se ha eliminado de su superficie el tratamiento superficial anti-humedad con el que se suministran para mejorar sus propiedades difusas y su respuesta al ángulo incidente.

-**Sensores de proximidad potenciométricos** (Figura 3.34), son un tipo de distanciómetros de contacto, que basan su funcionamiento en la medición de la variación de la resistencia de un elemento activo fijado sobre el cuerpo del dispositivo, al producirse el desplazamiento de un vástago móvil, que hace contacto sobre la resistencia, respecto al cuerpo donde va montado. De esta

forma la variación del valor de resistencia en el terminal de señal, genera una señal analógica de voltaje (que va directamente a la tarjeta ELMB), proporcional a la distancia recorrida por el vástago, monitorizando la posición del elemento sobre el que hace contacto en su extremo.

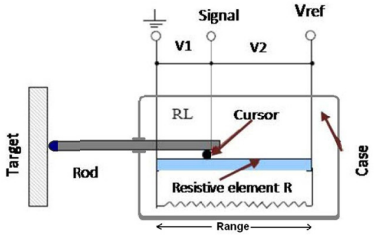


Figura 3.34: *Principio de funcionamiento de un sensor potenciométrico.*

El sistema de alineación LINK utiliza dos tipos distintos (Figura 3.35), distribuidos por el interior de CMS:

- 42 distanciómetros modelo 18FLPA50 de la firma Sakae [153]. Que se distribuyen: 3 monitorizando la coordenada Z, sobre cada uno de los dos ARs del Tracker , 6 monitorizando la R de cada uno de los dos LD, desde la parte baja de los RP de la zona YN1, 1 monitorizando la Z hacia la CSC de la ME1/1, sobre cada una de las 12 TPs, en la zona ME1/1 y otro monitorizando la R sobre la CSC de la ME1/2, en cada una de las 12 TPs.
- 24 distanciómetros modelo SLS095-10 de la firma Penny & Giles [154]. Distribuidos 1 sobre cada una de las 12 TPs monitorizando la Rφ hacia la CSC de la ME1/1 y otro situado sobre cada uno de los 12 dispositivos mecánicos de las CSCs de la ME1/1 monitorizando la R hacia las TPs.

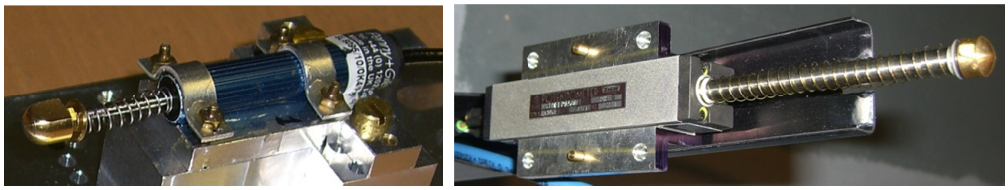


Figura 3.35. *Distanciómetros SLS095-10 y 18FLPA50, utilizados por el sistema de alineación LINK.*

Model	SAKAE *S18FLP50R*	Penny & Giles *SLS095-10*
Working Range	50 mm	10 mm
Linearity	0.4 %	0.5%
Resistance	10 KΩ	0.4 KΩ
Working Temp.	-30 to 105 ºC	-30 to 100 ºC
Active Element	Hybrid	Hybrid
Temperature Coef.	20 p.p.m./ºC	20 p.p.m./ºC
Life Time	20×10^6 cycles	10^7 cycles

Tabla 3.4: *Características fundamentales de los potenciómetros SLS095-10 y 18FLPA50.*

Estos distanciómetros han sido calibrados, de forma absoluta, respecto a los pasadores cilíndricos de su mecánica de referencia, con una precisión de 30-40 μm, la resolución con la electrónica del sistema está por debajo de las 10 μm.

-**Sensores de temperatura**, la monitorización de la temperatura en las diferentes regiones del sistema LINK, se realiza mediante la colocación estratégica de sensores sobre las superficies de los componentes que el sistema necesita tener controlados, en la figura 3.16 se muestra su posición esquemática dentro de CMS:

- Se dispone de una sonda de temperatura montada sobre cada una de las Unidades Acondicionadoras de Señal, que se integra en el encapsulado de cada uno de los 22 inclinómetros modelo M756, cuyas posiciones han sido descritas.
- Además se dispone de 36 sondas de temperatura independientes colocadas: 6 distribuidas uniformemente sobre cada uno de los dos LDs de la zona η=3; 1 dentro de cada uno de los 12 RPs situados en la región YN1; y por ultimo 1 sonda situada sobre cada una de las 12 TPs en la región de la ME1/1.

Para el LINK se han escogido sensores de temperatura tipo RTP (Resistance Temperature Detectors) de Platino de 100Ω a 0ºC de la firma MINCO [155], este tipo de sondas son de clase B, es decir con tolerancias de ± 0.12% a 0ºC (100 ± 0.12 Ω), en el rango de 0º a 100 ºC (según especificaciones IEC 751). Se han ajustado los valores de voltaje para obtener una precisión de ±0.1ºC, con una resolución de medida de 0.01ºC.

El principio de funcionamiento de los sensores tipo RTP se basa en el hecho de la variación de resistencia eléctrica que experimentan los metales cuando varía su temperatura. Para el caso de las sondas de platino este valor es de 0.385Ω/ºC.

La medida puede ser realizada con 2, 3 o 4 hilos. En nuestro caso se utiliza este último caso que es la forma de medir óptima (Figura 3.36). En esta un par de hilos son utilizados para transmitir la corriente de excitación (hilos 1 y 4 de la figura) a la RTD y el otro par (hilos 2 y 3) se usan para realizar la medida del voltaje entre los extremos de la RTD, a través de un voltímetro de alta impedancia, para que por ellos no circule corriente y por tanto no sufra caída de potencial. Con una corriente constante el voltaje es únicamente función de la resistencia. De esta forma se permiten eliminar errores en la medida de la resistencia que puedan ser introducidos por los hilos conductores, proporcionando la máxima precisión en las medidas realizadas con cables largos, como es nuestro caso, donde estas serán controladas directamente desde las tarjetas ELMBs situadas en el exterior de CMS.

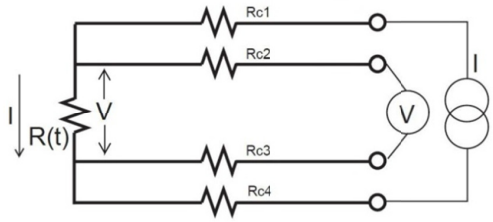


Figura 3.36: *Esquema del funcionamiento de una RTD midiendo con la configuración de 4 hilos.*

En una RTD la resistencia (R) expresada en Ω, es directamente proporcional a la longitud del hilo metálico (l) e inversamente a su sección (A),

$$R = \rho \times \frac{l}{A} \qquad (3.1)$$

siendo ρ la resistividad del material. En un rango limitado de temperatura, la resistividad crece linealmente con la temperatura,

$$\rho_t = \rho_0 [1+\alpha (t-t_0)] \qquad (3.2)$$

donde ρ_t es la resistividad a la temperatura t, ρ_0 es la de referencia a t_0 y α una constante de temperatura expresada en ºC^{-1}. Combinando ambas ecuaciones para t_0=0 ºC la resistencia frente a temperatura es una expresión lineal con una pendiente,

$$\frac{R}{R_0} = \alpha \times t + 1$$

R es la relación V/I, R_0=100Ω, y I=V_0/100, quedando la expresión que nos da la temperatura en ºC a que se encuentra la sonda:

$$T = \frac{100 \times \frac{V}{V_0} - 100}{0.385} \qquad (3.3)$$

Teóricamente cualquier metal se podría utilizar para medir temperatura, aunque él debe tener un alto punto de fusión y resistencia a la corrosión. Los más utilizados son níquel, cobre y platino. Este último, tiene un rango de utilización de -200 a 800 ºC, excelente repetitividad, estabilidad y resistencia a la corrosión.

-**Sondas de campo magnético**, se dispone de 2 sondas de este tipo, en formato chip, montadas sobre los extremos de cada una de las 22 Unidades Acondicionadoras de Señal, integrada en el encapsulado de cada uno de los 22 inclinómetros modelo M756, cuyas posiciones dentro de CMS han sido descritas, monitorizando el valor del campo en estas posiciones y enviando su valor a las tarjetas ELMBs del sistema.

Se han utilizado sondas de efecto Hall (Figura 3.37) bidimensionales, que miden el valor del campo en la dirección de la componente R y Z, modelo 2D-VH-11SO de la firma Sentron AG [156], de dimensiones 0.8 × 2.5 mm^2 y 0.4 mm de espesor, con una precisión de ±15 mT y una sensibilidad de respuesta de 1V/2.0770T. Estas han sido estudiadas frente al campo magnético de CMS [269].

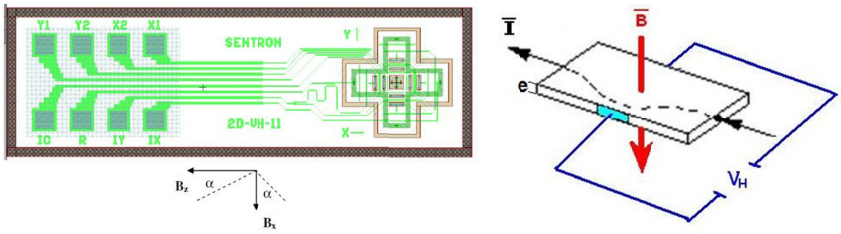


Figura 3.37: *Esquema de una sonda SENTRON AG 2H-VH-11 con su sistema de coordenadas CMS (Izq.). Efecto Hall (Der.).*

Este efecto consiste en que si una corriente de intensidad I atraviesa una placa de material de espesor e (en nuestro caso el volumen sensible al campo es de 0.25×0.25×0.25 mm^3) y se la introduce en el seno de un campo magnético B, aparece una diferencia de voltaje, denominado voltaje Hall (V_H), en la dirección perpendicular al campo. La relación entre el voltaje medido por el sensor y la intensidad de campo magnético de la componente perpendicular viene dada por la siguiente ecuación, donde R_H es la contante Hall:

$$V_H = \frac{R_H \times B \times I}{e} \qquad (3.4)$$

La causa del efecto Hall es la desviación que experimentan los electrones que se mueven por el conductor, dentro del campo magnético, bajo la acción de la fuerza de Lorentz.

3.4.3. Sistemas de lectura, control y software de reconstrucción.

El sistema de adquisición de datos y control del sistema LINK de alineación se diseñó teniendo en cuenta las directrices del Detector Control System (DCS) [142] de CMS.

Estas incluían, entre otras, comunicación via CAN bus y la utilización del protocolo CANopen, posibilidad de ser ampliable, soportar ciertos niveles de radiación y campo magnético, y comunicarse con el mundo exterior mediante Ethernet. Además la alimentación de cada nodo debía ser controlable para dotar al sistema de mayor grado de seguridad.

Teniendo en cuenta estas condiciones, se diseñó un sistema (Figura 3.37) capaz de leer y almacenar datos de los sensores y controlar láseres, que permita introducir parámetros, realizar análisis de datos e informar acerca del estatus del sistema, incluyendo alarmas y errores y que esté organizado de forma independiente dentro del DCS.

El sistema está estructurado en 3 niveles que incluyen hardware y software:

- Electrónica Front-End I/O (FEIO), incluye los circuitos electrónicos y el software necesario para leer, adaptar y digitalizar las señales de los sensores. También permite el control de los láseres.
- El segundo nivel, lo forman el hardware y software necesario para comunicar las electrónicas FEIO a través de 5 buses serie (CAN bus), almacenar y analizar los datos de los sensores. Consta de 1 PC industrial con tarjetas controladoras CAN bus.
- El tercer nivel aporta el hardware y software necesario para comunicar los diferentes ordenadores de los sub-sistemas de alineación de CMS (TRACKER, ENDCAP, BARREL y LINK) con el DCS. La comunicación entre ordenadores a este nivel se realiza mediante Ethernet. El software empleado (PVSVII) es un sistema tipo SCADA (Supervisory Control And Data Adquisition), especialmente desarrollado para la visualización y el control de procesos.

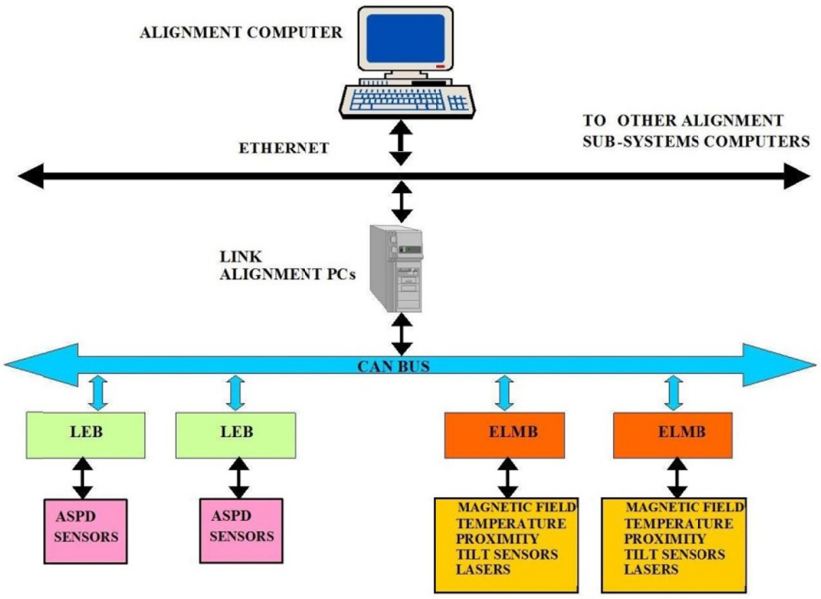


Figura 3.38: *Esquema de la estructura del sistema de lectura y control del sistema de alineación LINK.*

La electrónica Front-End (FEIO), la forman dos tarjetas electrónicas de acondicionamiento y digitalización: LEB (Local Electronic Board) y ELMB (Embedded Local Monitor Board); y dos tarjetas acondicionadoras: TILT (tarjeta acondicionadora de la señal de los inclinómetros) y OMRON (tarjeta acondicionadora de la señal de los sensores ópticos de proximidad) (Figura 3.39).

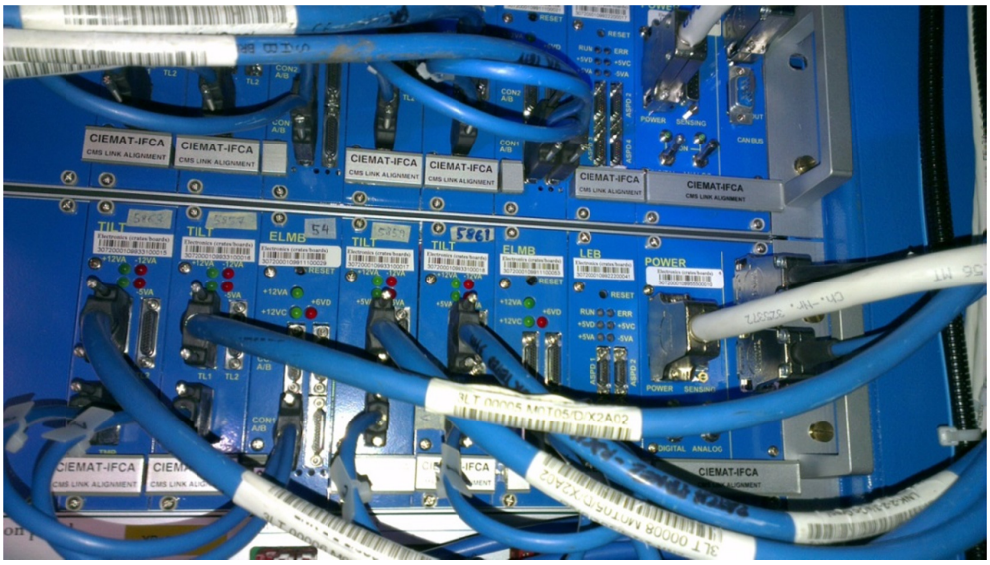


Figura 3.39: *Crates del Sistema de Alineación LINK situados en los racks de los 'Balconies' de CMS, donde se encuentran las tarjetas ELMBs y LEBs.*

Las ELMBs [157] son tarjetas de propósito general para adquisición de datos y control, desarrolladas para el experimento ATLAS. Se utilizan para digitalizar las señales de todos los sensores (excepto los ASPDs), controlar los láseres (a través de una tarjeta DAC (Digital to Analog Converter)) y enviar los datos (vía CAN bus) para su tratamiento y almacenamiento.

Para leer los ASPDs se utilizan unas tarjetas más complejas llamadas LEB [142], desarrolladas por la División de Electrónica del CIEMAT [158. Esta tarjeta es inteligente y puede leer hasta 4 ASPDs. Genera las señales de lectura de los ASPDs, acondiciona y digitaliza sus señales y comunica (vía CAM bus) con el siguiente nivel.

Las tarjetas TILT y OMRON no son inteligentes y simplemente acondicionan las señales de los inclinómetros y de los sensores ópticos de proximidad para que puedan ser leídos por la ELMB.

Las electrónicas Front-End están ubicadas en 'crates' y están conectadas mediante un bus local (back panel). Estos 'crates' están situados en los denominados 'balconies' del detector, a una distancia de entre 15 y 40 m del dispositivo que controlan o leen. El ruido electromagnético producido por los componentes del LINK es despreciable, no obstante las señales se deben proteger del ruido que se pueda inducir en los cables en su camino hacia los rack de los balconies (Figura 3.40), por ello todos los cables que se utilizan para conectar los diferentes sensores con las FEIO llevan sus hilos trenzados y apantallados.

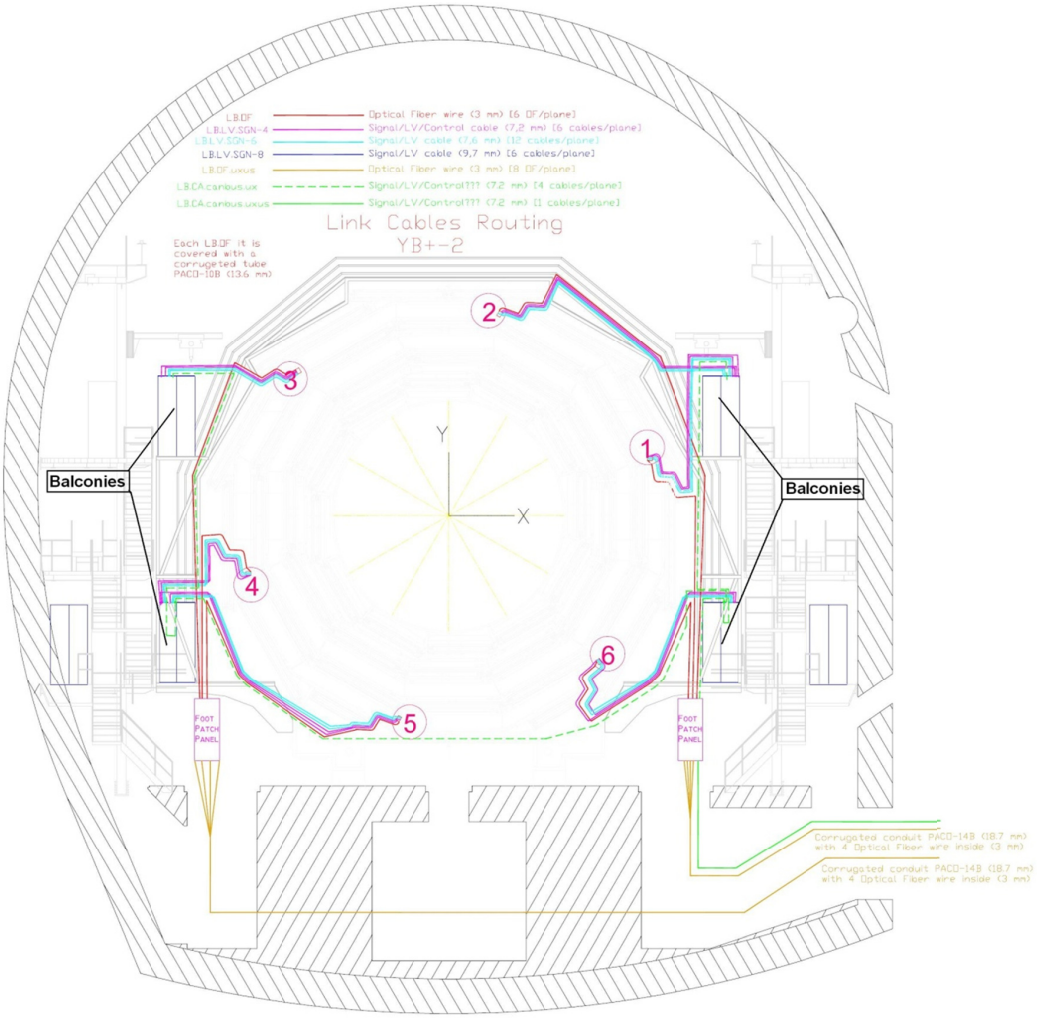


Figura 3.40: *Sección trasversal de la caverna experimental UXC55 donde está situado CMS, que muestra esquemáticamente la salida de cables y fibras del sistema LINK sobre las ruedas YB±2, desde el PP situado en la región de los MAB hasta los racks en los 'Balconies' (cables) o PP a pie de rueda (fibras) y su salida hacia la caverna de servicios USC55.*

En el segundo nivel, cada tarjeta LEB y ELMB se comunica vía 'bus CAN' con un PC. Para establecer esta comunicación se utiliza una tarjeta controladora del bus CAN, instalada en el bus PCI de un PC. La tarjeta utilizada es el modelo PCI-CAN2 de la firma National Instrument [159], capaz de controlar 2 bus CAN con 64 nodos cada uno. El experimento CMS está dividido en 5 ruedas que han de ser independientes en su funcionamiento. Por ello el sistema LINK consta de 5 líneas serie (bus CAN) situadas alrededor de las ruedas YB+2, YB-2, YB0, YE+1 e YE-1, de las que cuelgan todas las tarjetas, cada una de ellas es un nodo del bus (Figura 3.41). Un PC realiza la lectura y control de todos los sensores del sistema. Este PC se comunica vía Ethernet con los demás sistemas de alineación de CMS y con el DCS. El PC y láseres se encuentran ubicados en la caverna de servicio USC55, a salvo de radiación y campos magnéticos.

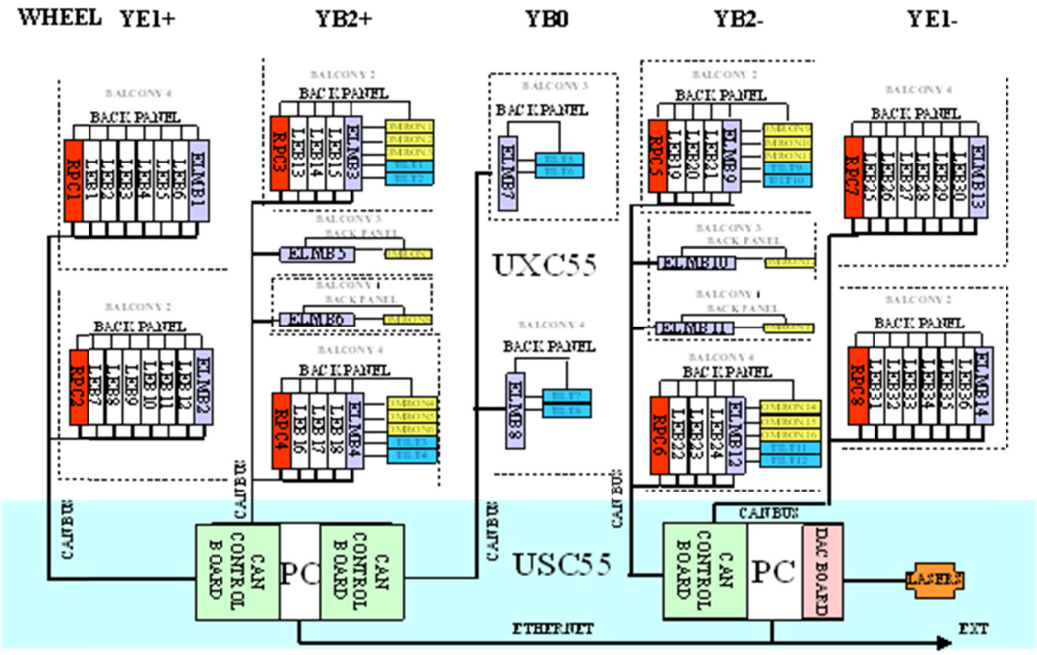


Figura 3.41: *Arquitectura del sistema de adquisición de datos utilizado por el sistema de alineación LINK.*

Para alimentar la electrónica Front-End, el bus CAN y el sistema de láseres se utilizan fuentes de voltaje (módulos) con varios canales de salida flotantes para evitar problemas de ruidos. Las fuentes son de la firma CAEN [160] y han sido especialmente desarrolladas para poder operar en ambientes de campo magnético y radiación a los que se verán sometidas. Se ubican en los 'crates' CAEN Easy3000 situados en los racks de los balconies, los cuales pueden ser controlados remotamente y cuya alimentación, de 48 V DC, proviene de los convertidores CAEN AC/DC modelo A3486S. Para alimentar los láseres se utilizan unas fuentes desarrolladas expresamente para ellos, ya que los láseres no se encuentran en esta zona sino que están situados en la 'laser room' del sistema de alineación en la caverna de servicios USC55.

Todas las tarjetas ubicadas en los 'balconies' han sido diseñadas para soportar los niveles de radiación y campo magnético de esta zona de la caverna experimental UXC55. Y han sido sometidas a sus correspondientes ensayos de validación.

En el tercer nivel, la información obtenida de los datos de los sub-sistemas de alineación de CMS se une para realizar la reconstrucción, lo que requiere una estricta sincronización en la toma de datos. El Sistema de Toma de Datos (DAQ) y control es modular e independiente para cada sub-sistema. En cada caso se ha diseñado un sistema que se ajusta a los requisitos del DCS (Sistema de Control del Detector) basado en el software PVSSII [161] (Figura 3.42). El objetivo es construir un único nodo de alineación en el DCS.

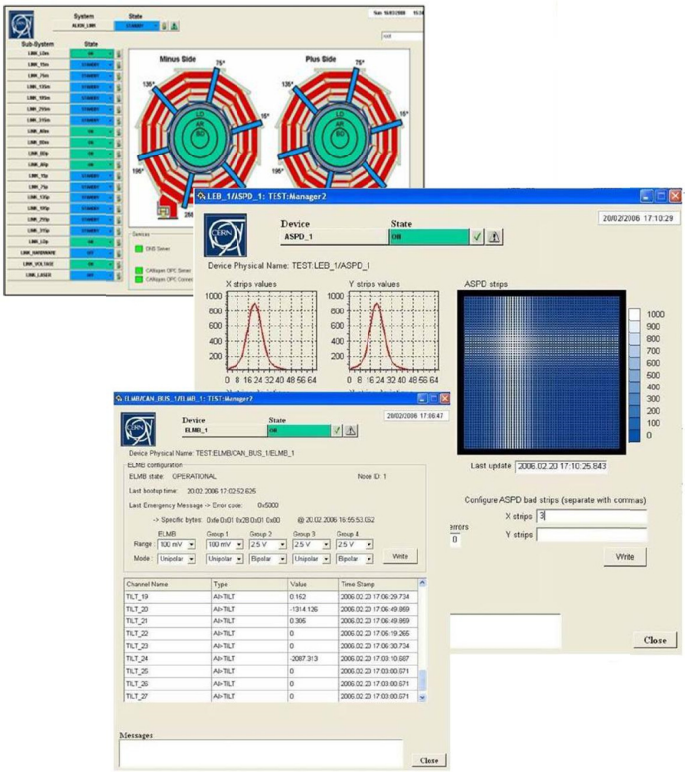


Figura 3.42: *Diferentes figuras de los paneles que aparecen en el software PVSS para la monitorización del sistema de alineación LINK. Panel principal con las 12 líneas de cuadrantes ZR del LINK, panel donde aparece la medida sobre un ASPD y panel de lectura donde se están leyendo los valores de inclinómetros.*

Inmediatamente después de cada toma de datos completa será necesario, para realizar la reconstrucción geométrica, introducir los datos en el **software de reconstrucción** para obtener un rápido diagnóstico de la calidad de los datos recogidos.

Estos datos son recogidos en una base de datos ORACLE on-line, mediante el uso del administrador RDB (Relational Database) suministrado por PVSS. Estos datos son convertidos en secuencias ordenadas de datos de elementos monitorizados en el sistema orientado a objetos ROOT [162], mediante especializados programas de ROOT que realizan una serie de preguntas a estos datos obtenidos, aplican calibraciones para convertir los datos obtenidos en bruto en valores más útiles y realizan una completa lectura para cada sub-sistema. Dos ficheros ROOT son recogidos por cada sub-sistema: uno contiene todos los datos de la toma de datos, de forma exhaustiva, (todos los datos de los puntos, valores en bruto, valores de calibración y resultados ajustados) y otro que solamente contiene la información necesaria para la reconstrucción global a través del software de alineación COCOA (CMS Object Oriented Code for Optical Alignment) [163 y 164].

Cada vez que el sistema realiza una lectura completa de todos sus elementos, la información se guarda en un fichero distinto, en la base de datos. Estos

ficheros que contienen todas las lecturas, son independientes para cada sub-sistema. El análisis detallado de estos ficheros se realiza a través de programas adicionales de ROOT desarrollados para cada sub-sistema. Los ficheros ROOT de COCOA tienen un formato fijo acordado entre los sub-sistemas de alineación y los desarrolladores de COCOA, para leer esos ficheros directamente. Esos ficheros ROOT son transferidos desde el dominio privado de los subsistemas al almacenamiento global TIER-0 [165] y el CAF (CERN Analysis Facility), off-line, a través del 'CMS Storage Manager', siguiendo esencialmente el mismo camino que los datos de los eventos de física de CMS, para ser utilizados cómo entrada por COCOA para la reconstrucción geométrica off-line.

Capítulo 4: Estudios realizados a los dispositivos del sistema de alineación LINK.

En este capítulo y el siguiente se presentan los estudios realizados a los diferentes elementos que componen el sistema de alineación LINK, con vistas a asegurar su caracterización y correcto funcionamiento en las especiales condiciones requeridas por el detector CMS.

En primer lugar se realizó una preselección de componentes de las diversas tecnologías posibles para cada tipo de dispositivo leído y controlado por el sistema (láseres, foto-detectores, inclinómetros, distanciómetros, sensores de temperatura, de campo y la electrónica asociada) basándonos en primera instancia en las características indicadas por el fabricante, escogiendo las que cumpliendo las precisiones requeridas por el sistema, podían funcionar en ambientes radiactivos y sometidos a campos magnéticos y gradientes de campo (basándonos en los valores mostrados en el Capítulo 2, para las diferentes regiones del sistema), con el menor mantenimiento y coste posible. En algunos casos no pudo encontrarse componentes que pudieran satisfacer todos los requerimientos, principalmente por no disponer de datos el fabricante, aunque en estos casos también se pudo preseleccionar en función del tipo de materiales utilizados o principio de medida del dispositivo, basándonos en la bibliografía de resistencia frente a irradiación existente, utilizando para ello la información de las bases de datos desarrolladas en las últimas décadas en el CERN. Posteriormente se realizaron los ensayos necesarios para su completa validación, en la mayoría de los casos, incluso los validados por el fabricante.

Una vez preseleccionados los componentes se realizaron las pruebas de caracterización y calibración necesarias y se sometieron a los ensayos ambientales necesarios para simular las condiciones de funcionamiento dentro de CMS.

Estos dispositivos seleccionados, descritos en el Capítulo 3, van montados sobre sus correspondientes montajes opto-mecánicos, mecánicos o estructuras, las cuales también han pasado una serie de procesos de simulación, caracterización y calibración que serán descritos. A la hora de realizar los diseños de estos montajes y estructuras se ha tenido en cuenta, sobre todo, las condiciones de radiación, campo magnético, temperatura y humedad ambiental, a que se verán sometidos durante su funcionamiento.

Se han seleccionado componentes cuyos materiales sean no magnéticos, que aguanten la dosis de radiación a que van a ser sometidos en función de su ubicación y que tengan la menor densidad posible, sobre todo en la región del TRACKER y η=3 donde es mandatorio. Básicamente se han utilizado componentes y mecánica de fibra de carbono, aluminio, acero inoxidable austenítico (con la menor cantidad de carbono posible), titanio, pequeños elemento de fijación de latón, sílice fundido sintético (SiO_2) en la óptica y fibras

ópticas y cobre en los hilos de los cables que dan servicio a los dispositivos del LINK:

> En la región del TRACKER y η=3, todos los elementos del LINK se componen de fibra de carbono, titanio en algunos conectores y aluminio para las piezas mecánicas e insertos pegados a la fibra de carbono (del AR y LD), la tornillería es de aluminio (a excepción de los tornillos de fijación del AR que son de acero inoxidable A4), la carcasa de los inclinómetros y de los potenciómetros es de aluminio, aunque los vástagos de estos son de acero inoxidable austenítico, la carcasa de los colimadores de titanio y las cubiertas de protección de los colimadores e inclinómetros son de aluminio. En estas regiones también se encuentra sílice fundido sintético (SiO_2) en las fibras y su óptica colimadora, en el AR y LD, así como para el prisma romboidal modificado en el 'Laser Box' del LD.
>
> En la región YN1 y ME1/1 se utiliza en general aluminio para las piezas mecánicas de los dispositivos, menos en las piezas base de la 'ME1/1 Transfer Plate', que la fijan sobre el hierro de la YN1 y las que fijan el perfil radial a esta, que son de acero inoxidable austenítico AISI 304 LN, así como su tornillería que es inoxidable A4, el resto de tornillería es de latón. Los potenciómetros, inclinómetros y ASPDs disponen de carcasas de aluminio, pero los vástagos de los potenciómetros son de inoxidable. Las cubiertas de protección de los distintos elementos son de aluminio.
>
> Por ultimo en la región ME1/2 y MAB la mecánica es de aluminio, los distanciómetros de no contacto, inclinómetros y ASPDs disponen de carcasas de aluminio, la tornillería de aluminio y latón y carcasa de colimador de titanio. En los 'Laser Levels' de los MABs encontramos sílice fundido sintético (SiO_2) en las fibras y su óptica colimadora.
>
> El aluminio utilizado para los insertos y piezas mecánicas es del tipo EN AW7075 por sus excelentes propiedades de resistencia mecánica. Para los perfiles radiales y longitudinales EN AW6063, puesto que son extruidos. Y las cubiertas de protección son del tipo EN AW5754 por ser fácilmente soldable, buena resistencia mecánica y capacidad para ser plegado. Además todas las piezas de aluminio del sistema LINK, que se encuentran próximas a los rayos de los láseres de referencia, han sufrido un proceso de anodizado duro negro de unas 30±6 μm de espesor, para evitar en lo posible reflejos en su superficie; además de tener la función de protección contra el desgaste, por su elevada dureza superficial, en las piezas que puedan sufrir algún tipo de fricción, cómo es el caso de las rótulas del LD y LP.

Una característica muy importante que deben cumplir todos los componentes del sistema de alineación es su estabilidad a largo plazo en su ambiente de trabajo. Esta ha sido tenida en cuenta a la hora de desarrollar los componentes y estudiarlos. Se ha tenido sumo cuidado, a la hora de realizar los montajes mecánicos, en minimizar dilataciones por temperatura y sobre todo no mezclar elementos que con su dilatación diferencial puedan producirnos variaciones angulares de los dispositivos que van sobre ellos. Además se ha intentado

minimizar las deformaciones que puedan inducir las uniones pegadas sobre los componentes que se fijan a ellas, sobre todo en el caso de los insertos que van pegados a la fibra de carbono. Esto es muy importante en los componentes opto-mecánicos, donde un pequeño giro del colimador o de la óptica, inducido por la temperatura, o por la deformación del sustrato adhesivo en las uniones pegadas, debido a la degradación del pegamento durante la irradiación, va a producir un giro del rayo láser que utiliza el sistema de alineación cómo referencia, introduciendo un error importante en la medida. Este es uno de los puntos fundamentales de esta tesis y su estudio ha sido tratado en profundidad en algunos puntos de este capítulo y sobre todo en el capítulo 5.

Por ello se han realizado estudios específicos para ver la influencia que la radiación recibida por una unión óptica pegada, cómo es el caso de nuestro prisma romboidal modificado (un prisma romboide de vidrio (SiO_2), al que se le pega un prisma triangular del mismo material), puede tener sobre el funcionamiento de este. Consecuentemente también se han realizado estudios similares sobre las uniones pegadas de los insertos de aluminio, con el tipo de resina epoxi utilizado, Araldit 2011, de la firma Huntsman Corporation [166], sobre los que se fijan los diferentes componentes opto-mecánicos y de detección de todo el sistema, así como sus protecciones. Siendo, por tanto, fundamental para el sistema el estudio de la estabilidad de la unión, para así poder cuantificar el error que este tipo de unión puede introducir sobre las medidas. Debido a la ubicación de los componentes opto-mecánicos y de detección del sistema, sobre diferentes regiones de CMS, en lugares con difícil protección, donde a lo largo de los años de instalación y mantenimiento del sistema, este ha sido objeto de fuertes impactos, sobre algunos de sus componentes. Esto ha motivado la necesidad de estudiar la degradación que puede sufrir una unión adhesiva, con la dosis de radiación recibida. Los resultados de estos estudios, fundamentales para el sistema de alineación LINK, serán mostrados en el Capítulo 5.

Por último, en el Capítulo 6, se muestran los resultados extraídos de la operación del Sistema Link y en concreto de los estudios de estabilidad temporal del sistema y de las estructuras que componen el detector CMS a partir de las mediciones realizadas por el sistema durante estos últimos años de funcionamiento.

4.1. Sistema Láser.

El sistema laser del LINK, está compuesto por tres partes principales: los 36 **diodos láser** (localizados en la 'laser room' de alineamiento, en la caverna de servicios USC55, las 36 **ópticas colimadoras** (localizadas en el detector en las posiciones descritas en el capítulo anterior, que lanzan los rayos de referencia del sistema LINK) y las **fibras ópticas** encargada de la conexión entre ambos elementos, a lo largo de unos 5 kilómetros de fibras ópticas.

El sistema LINK emplea diodos láser (frente a otras opciones comerciales como láseres de He-Ne) como fuentes de los haces de referencia, porque son pequeños, robustos, portátiles y pueden ser modulados fácilmente con alta repetitividad. Los diodos láser están acoplados a fibras monomodo y ópticas

colimadoras para garantizar haces con perfiles gaussianos y difracción limitada en las diferentes posiciones de medida que hay en los 3 diferentes caminos de luz mostrados en la figura 3.27.

Los láseres al estar situados fuera de la caverna experimental no necesitan ser resistentes a radiación, ni funcionar bajo campos magnéticos apreciables, además debido a su ubicación son accesibles en cualquier momento para realizar reparaciones o sustituciones. Sin embargo, tanto las fibras como los colimadores, sí que han de ser resistentes a la radiación y al campo magnético.

La salida directa de un diodo láser es altamente convergente. Para corregir esto y conseguir un haz gaussiano, se ha acoplado a la salida una fibra óptica monomodo dado que este tipo de fibra actúa como un filtro de los modos superiores, dejando solamente la propagación del modo fundamental. El sistema de alineación utiliza, como ya explicamos en el anterior capítulo, los diodos laser modelo 58FCM de la firma Schäfter & Kirchhoff GMBH [143], de 681 nm, que vienen con un trozo de fibra de unos 500 mm acoplando directamente a la salida del diodo, y ahí llevan un conector de fibra, donde se acopla la fibra monomodo Nufern, de ~100 m que lleva el haz hasta el pie de la rueda de CMS donde se sitúa un panel de conexiones, de ahí con otro conector continúa una nueva fibra, de las mismas especificaciones, de hasta ~50 m hasta el siguiente panel de conexiones que ya estará situado en cada MABs, LD o AR, desde donde continúa el haz a través de otro conector y nueva fibra, hasta llegar al colimador situado en estos elementos. De aquí partirá el haz recorriendo los 'caminos de luz' del sistema LINK (figuras 3.16 y 3.27), atravesando los ASPD situados sobre los elementos a monitorizar por el sistema de alineación. El haz, debe llegar a cada uno de estos ASPD, con la intensidad suficiente y la colimación necesaria, para obtener una medición correcta del punto donde incide.

Dada la complejidad del sistema LINK, la elección de la longitud de onda final y la potencia de los diodos láseres depende principalmente de la curva de absorción de los ASPDs y de la atenuación a lo largo de su propagación a través de la fibra óptica, en las condiciones de utilización. A pesar de la atenuación que se pueda producir en la señal se debe prever que algún punto del sistema (ASPDs) llegue a saturar por recibir demasiada luz a la potencia nominal, o, por el contrario, puede que el envejecimiento por iluminación haga que el fotodetector se degrade con el tiempo y necesite más luz para producir la misma señal. Ambas cosas hacen necesaria una modulación de potencia de salida.

Esto ha llevado a realizar dos tipos de pruebas importantes: medida de la pérdida en la transmisión de luz por el interior de la fibra y estudio del comportamiento del haz láser al pasar a través de varios ASPDs, simulando las condiciones de operación en CMS.

4.1.1. Transmisión de la luz por el interior de una fibra.

La propagación de la luz a lo largo de una fibra óptica se basa en el principio de 'reflexión interna total' (fenómeno que se produce cuando un rayo de luz que está en un medio con índice de refracción n1 intenta pasar al medio con índice de refracción n2<n1, reflejándose completamente, sin conseguir pasar). Las principales partes que componen lo que se denomina 'fibra óptica desnuda' son: un núcleo central (core) rodeado por una capa concéntrica (cladding) con un índice de refracción ligeramente inferior, seguida de una primera capa protectora (primary coating) generalmente de acrilato, para la protección frente a roturas por pequeñas grietas o irregularidades de la superficie. Sin embargo para poder utilizar de forma práctica una fibra, necesita estar protegida frente a esfuerzos mecánicos, humedad y otros factores, formando lo que conocemos cómo 'cable de fibra óptica'. Para ello se coloca sobre la fibra desnuda una especie de tubo (buffer) que suele ser de plástico, silicona o acrilato. Envolviendo a este, se encuentra otra capa de fibras para dar resistencia y finalmente una última capa, de poliuretano, polietileno o PVC, que es la responsable de proteger el interior del ambiente exterior (jacket).

El material más utilizado en la fabricación de fibras ópticas es el sílice fundido sintético por su gran calidad óptica y buena resistencia frente a radiación y es el empleado para el núcleo y cladding de las fibras ópticas utilizadas por el sistema LINK. Los radios típicos de los núcleos de las fibras están entre 5 a 10 μm.

Los parámetros básicos que definen la fibra óptica son: la 'apertura numérica' (AN), el 'Mode Field Diameter' (MFD) y la 'longitud de onda de corte' (cut-off). Donde AN es el ángulo máximo de entrada para el que la luz es aceptada y conducida en el interior de la fibra, suele tomarse como un indicador de la eficiencia del acoplamiento luz-fibra. MFD define el tamaño de la distribución de intensidad óptica de luz a la salida de la fibra óptica monomodo (diámetro en que la intensidad máxima del haz cae $1/e^2$), que es importante a la hora de evaluar pérdidas por la conexión fibra-fibra. La 'longitud de onda de corte' es el valor mínimo de longitud de onda para el cual una fibra deja de ser monomodo y pasa a transmitir en más de un modo: por debajo de ese valor la fibra se comportará como multimodo.

Existen diversos efectos por los que pueden producirse pérdidas de potencia en una fibra óptica: por la conexión fibra-fibra, por curvatura y por la radiación. En nuestro caso la radiación es el efecto más importante en la atenuación de la luz, dados los altos niveles a que se encuentran sometidas las fibras del sistema LINK dentro de CMS. Se han realizado [167 y 168] una serie de estudios para valorar este efecto.

La atenuación (A) de una fibra se define (unidades en decibel por unidad de longitud) como:

$$A = -\frac{1}{L} 10 log_{10} \frac{P_S}{P_E} \qquad (4.1)$$

Siendo P_E la potencia óptica inyectada en el núcleo de la fibra, P_S la potencia óptica a la salida de la misma y L la longitud de la fibra.

4.1.1.1. Efecto de la radiación en las fibras ópticas.

Existe bastante documentación disponible sobre resistencia a la radiación de las fibras ópticas, así como estudios de absorción en fibras monomodo y multimodo, trabajando en las longitudes de onda utilizadas en comunicación (800 a 1500 nm), pero no para las fibras monomodo en el rango del espectro visible y NIR. Las fibras ópticas se utilizan en muchas aplicaciones con ambientes radiactivos, centrales nucleares, en el futuro ITER, misiones espaciales o experimentos de física de altas energías. Cualquier componente óptico que se utiliza en estas aplicaciones puede sufrir daño por radiación (gammas, partículas cargadas, neutrones) y por tanto es necesario investigar su fiabilidad.

En el caso de los experimentos de Física de Altas Energías los daños en las fibras están causados principalmente por la interacción de rayos gamma (daños por ionización) y neutrones (daños por desplazamiento), en el caso de CMS también hay que tener en cuenta el efecto de los electrones en determinadas regiones [169].

Las fibras ópticas de sílice fundido sintético sometidas a radiación presentan un incremento de la atenuación de luz transmitida. La absorción de luz que provoca la radiación (RIA) en la fibra se debe a la formación de defectos generados por mecanismos de ionización y desplazamiento, o por la activación óptica de defectos ya existentes en el material.

En general el daño depende de un gran número de factores: tipo de radiación incidente (gammas, neutrones, partículas cargadas), tipo de fibra óptica, composición química del material de la fibra, presencia de dopantes para el control del índice de refracción de la fibra, presencia de impurezas en el material (Cl, OH, H_2O), tipo de cladding (grosor, material), proceso de fabricación, longitud de onda y potencia óptica de luz transmitida, tensión mecánica inducida durante la irradiación, dosis ionizante total recibida (fluencia en caso de neutrones), velocidad de irradiación (flujo en caso de neutrones) y temperatura. Este gran número de parámetros hace que sea muy difícil establecer un modelo de comportamiento universal, de las fibras frente a irradiación, por ello es necesario realizar los ensayos sobre las fibras utilizadas en el sistema LINK, en las condiciones más realistas posibles y ver si la atenuación no llega al máximo tolerado para el sistema.

Se diferencian tres regiones, desde el punto de vista de los niveles de radiación (ver Capítulo 2.2.7) a los que se encuentran sometidos las fibras en el detector:

-En la región interna de CMS, Tracker: Con un recorrido de fibra de unos 3 m y dosis total absorbida de 100 KGy, y posibilidad de alcanzar 1 MGy en algún punto (Flujos (cm^{-2} s^{-1}): 10^8 fotones, 10^6 hadrones cargados+ muones, 10^8 neutrones).

-En las regiones exteriores de CMS: Con un recorrido de fibra de unos 14 m y dosis total absorbida de 1 a 10 KGy (Flujos (cm^{-2} s^{-1}): 10^4 fotones, 10^2 hadrones cargados+ muones, 10^4 neutrones).

-En la región fuera de CMS hasta la 'Láser Room': Con un recorrido de fibra máximo de unos 180 m y dosis total absorbida de 1 Gy (Flujos (cm^{-2} s^{-1}): 10^3 fotones, 1 hadrones cargados+ muones, 10^3 neutrones).

Estos son los valores estimados para 10 años de funcionamiento de CMS. Según las recomendaciones de CMS se debe utilizar un factor de seguridad 3 sobre esos valores.

Debido a los requisitos de intensidad impuestos por los ASPDs, (necesitamos atravesar hasta 3 sensores con el mismo haz láser, siendo la transparencia de estos >80%, implica una perdida por absorción cercana al 50%), y la potencia óptica utilizada para los diodos láser (30 mW máximo), da lugar a que la pérdida máxima permisible en cada camino óptico sea del 50% a su salida. Y cómo las pérdidas por radiación serán dominantes en los últimos 3 m de fibra que se encuentran en la región del Tracker, será necesario una fibra con un nivel de atenuación (A) máximo (aplicando la fórmula 4.1) de 1 dB/m para los niveles de dosis total y fluencia recibidos en dicha región.

$$A = -\frac{1}{3} 10 log_{10} \frac{15}{30} = 1{,}0034 \qquad (4.1.1)$$

4.1.1.2. Efecto de la radiación γ sobre la absorción de luz en fibras monomodo.

Tras un exhaustivo estudio de mercado se realizó un estudio de la atenuación que produce la radiación γ sobre las 5 fibras ópticas monomodo pre-seleccionadas: FS-SN-3224 y FS-SC-5624 de la firma 3M [174]; CF04247-02 de la firma OFS [175]; S630 de la firma Nufern [144] y HI 1060 de la firma Corming [176]. Se las sometió, en la medida de lo posible, a condiciones lo más próximas posible, a las de utilización en CMS. No va a ser posible utilizar el parámetro de tasa de dosis real, ya que en tal caso el estudio habría requerido varios años de irradiación, por ello se ha utilizado una tasa mucho más alta. En una gran mayoría de casos, la velocidad de irradiación se considera con un factor que acelera la atenuación inducida por la radiación [167 y168], lo que permite considerar los resultados mostrados aquí como un valor máximo.

Las irradiaciones gamma han sido realizadas en la instalación NAYADE del Ciemat. Consiste en una piscina de agua en cuyo interior se encuentran una serie de fuentes de ^{60}Co que emiten rayos gammas de 1.17 a 1.33 MeV de energía. Las fibras ópticas utilizadas en el estudio tienen longitudes comprendidas entre 1 y 10 m. Para ser irradiadas se han introducido dentro de un recipiente hermético que se sumerge en la piscina, colocándolo junto a las fuentes en una posición tal que recibe una irradiación uniforme. (En el Capítulo 5 se hará una descripción más detallada de la instalación).

Una vez irradiadas, se realizó la medida de la atenuación resultante, comparándose con la atenuación inicial. Este proceso está desarrollado

ampliamente en el artículo publicado [167], que pasamos a describir brevemente:

En la tabla 4.1 están las características de las fibras que fueron utilizadas en el experimento, en la primera columna está la denominación que se utilizará para referirse a ellas. La atenuación óptica para estas fibras es $<10^{-2}$ dB/m.

Fibre	Reference	Diameter (µm)	MFD (µm)	Cut-off wavelength (nm)
3M-I	FS-SN-3224	125/250	4	620
OFS	CF04247-02	125/245	4,3	620
Nufern	S630	125/245	4,2	570
3M-II	FS-SC-5624	125/250	6,6	950
Corning	HI 1060	125/245	6,2	920

Tabla 4.1: *Principales características de las fibras monomodo seleccionadas para el sistema LINK.*

La configuración experimental utilizada para realizar las mediciones, representada de forma esquemática en la figura 4.1, consiste en un diodo láser, un cable de fibra de referencia, un adaptador de fibra, la fibra a medir y un medidor de potencia.

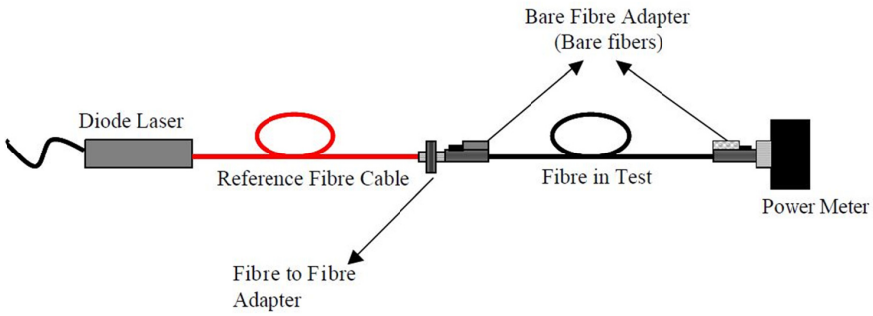


Figura 4.1: *Configuración experimental para realizar el estudio de atenuación en fibras ópticas irradiadas.*

La secuencia de medida consistía en: El diodo láser se conecta a una fibra de referencia y se mide la potencia de salida de la misma. A continuación, se añade al sistema la fibra que queremos medir, mediante un adaptador fibra a fibra, midiendo su potencia a la salida y calculando la atenuación.

Las pruebas fueron realizadas para distintas longitudes de onda, mediante 3 módulos láseres semiconductores, térmicamente estabilizados, dos de la firma Monocrom [177] de longitudes de onda 630 nm y 670 nm y el tercero de Schäftter & Kirchhoff [143] de 785 nm. Usando para medir la potencia un sensor PD300-UV de la firma Ophir Optronics Inc. [178], con una estabilidad por debajo del 1%.

Se han irradiado las fibras 3M-I, 3M-II, Corning y OFS con una tasa de dosis de 9±0.5 Gy/min, hasta una dosis acumulada de 18 kGy en 3 escalones de unos 6

KGy. En la Figura 4.2, izquierda, se muestran los resultados de atenuación para una longitud de onda de 630 nm. Las barras de error son muy grandes debido a las incertidumbres que se producen al conectar las fibras medidas a las de referencia, y fueron estimados por la repetición de la secuencia de medida varias veces. A partir de estos resultados se observa que estas 4 fibras no sean válidas para el sistema, puesto que en el primer escalón de 6 KGy ya se habían alcanzado varios dB/m de atenuación.

Con las mismas condiciones de irradiación se expusieron las fibras 3M-II, OFS y Nufern a una dosis total de 75 kGy en un solo escalón. Mostrándose en la tabla 4.2 los resultados de atenuación para las tres longitudes de onda distintas medidas, siendo la fibra Nufern la única que es válida para todas las longitudes de onda medidas.

Finalmente con una tasa de dosis de 140±14 Gy/min, se irradió la fibra de Nufern hasta un total de 300 KGy. Los resultados se muestran en la figura 4.2, derecha, que muestran que para la longitud de onda de 670 nm no se llega al valor límite de atenuación de 1 dB.

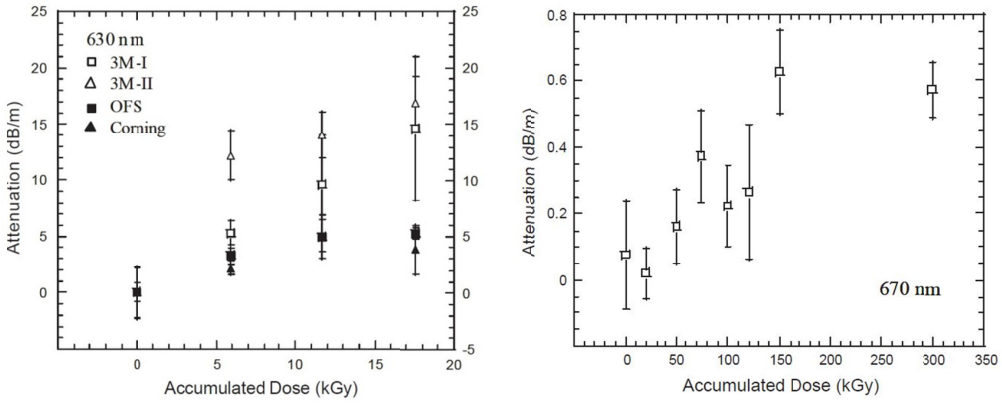


Figura 4.2: *En la figura de la izquierda, aparece la atenuación inducida a las fibras 3M-I, 3M-II, OFS y Corning, para la longitud de onda de 630 nm. A la derecha se muestra la atenuación para la fibra de Nufern a 670 nm. Ambas expresadas en función a la dosis total acumulada.*

Fibre	Attenuation (dB/m)		
	630 nm	670 nm	785 nm
3M-II	5.56±0.03	5.08±0.03	3.02±0.03
OFS	5.04±0.03	3.65±0.03	0.76±0.03
Nufern	0.36±0.26	0.37±0.14	0.27±0.20

Tabla 4.2: *Atenuación inducida sobre las fibras 3M-II, OFS y Nufern con una dosis total de 75 kGy, para diferentes longitudes de onda.*

La conclusión es que la fibra S630 de Nufern presenta una aceptable atenuación inducida por la radiación gamma.

4.1.1.3. Efecto de la radiación γ y neutrones sobre la absorción de luz en la fibra Nufern S630.

Para complementar el estudio anterior se realizó el que se describe a continuación, detallado en la publicación de la referencia [168]. Aquí se ha medido la absorción óptica inducida por una dosis acumulada de fotones de 0.9 MGy, en la fibra Nufern. Adicionalmente, estas fibras fueron irradiadas con una fluencia total de neutrones de 2×10^{14} cm^{-2}, y se evaluó la absorción óptica para las longitudes de onda de 630, 670, 681 y 785 nm. Incluyendo mediciones activas, donde se analiza la variación de atenuación en tiempo real.

El cable de fibra óptica monomodo S630 de Nufern consiste en un 'core' de sílice fundido sintético (SiO_2), obtenido de $SiCl_4$, un 'cladding' de sílice fundido y un 'coating' de acrilato, envuelto en un 'buffer' de Hytrel de 900 µm de espesor, una capa, para dar resistencia al cable, de fibras de Kevlar y un jacket de poliolefina de diámetro externo 3 mm de LSZH (low-smoke zero halogen).

Durante las medidas activas con gammas en la instalación NAYADE, se realizó una configuración experimental para que las fibras estuvieran conduciendo luz mientras eran irradiadas con γ, pero únicamente con la longitud de onda de 681 nm. Para la medida de la atenuación con neutrones no se hizo la medición activa de la absorción de luz de la fibra, sino que las mediciones se hicieron primero antes de irradiarlas y luego se volvió a medir, una vez irradiada las fibras, obteniendo la absorción producida por la irradiación.

En las figuras 4.3 y 4.4, se describe esquemáticamente la configuración de medida utiliza para la medición activa.

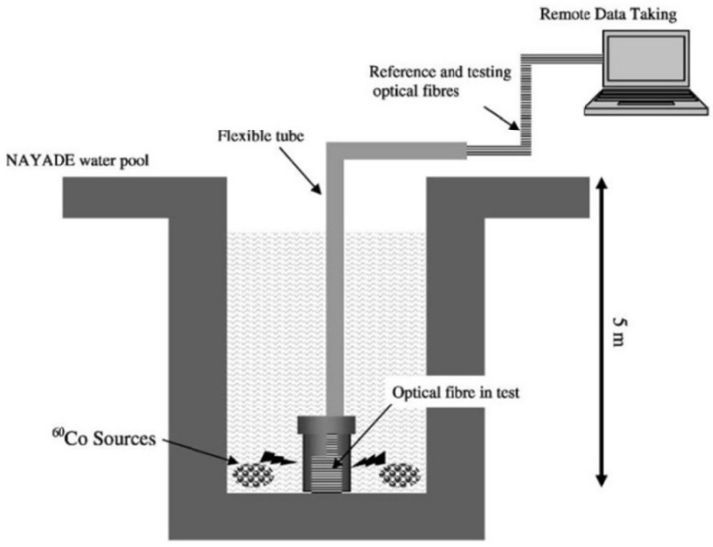


Figura 4.3: *Esquema de la configuración experimental utilizada para la medida activa, de la atenuación de la fibra, en la instalación NAYADE.*

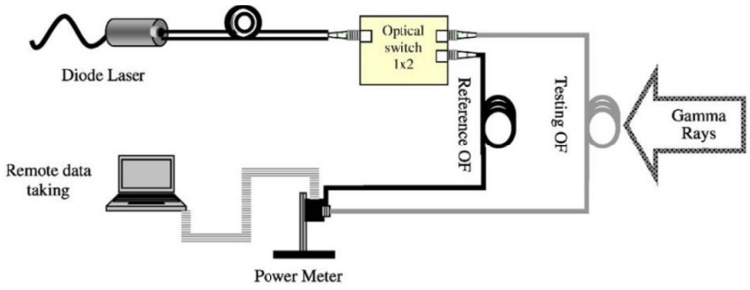


Figura 4.4: *Esquema de la distribución de componentes utilizada en la medida activa de la atenuación de la fibra.*

La luz del diodo láser se separó en dos mediante un conmutador de fibra óptica 1×2. Uno de los rayos laser se acopló al cable de fibra óptica que se midió y el otro a un cable de fibra óptica de referencia. Ambos cables eran idénticos y de 50 m de longitud cada uno.

El cable de fibra óptica bajo estudio, salía de la piscina de la instalación a través de un tubo flexible, desde el contenedor cerrado donde estaba irradiándose, dentro de este había unos 10 m de cable de fibra enrollada sobre un carrete de 10 cm de altura y 14 cm de diámetro. La fibra de referencia acompañaba en todo momento a la que estaba bajo estudio, incluso a través del tubo flexible, hasta llegar a la entrada al contenedor cerrado, volviendo a salir sin ser expuesta a la irradiación directa de las fuentes.

A la salida ambas fibras se acoplaban a un medidor de potencia. Los datos recogidos incluían potencia de salida y dosis total de ionización (TID) en el momento de la medida de la potencia.

La fibra de referencia es la que se encargó de ver las eventuales inestabilidades de potencia del diodo láser y el efecto que el nivel de irradiación bajo induce sobre esta fibra. Mientras que la fibra en estudio vio además las pérdidas inducidas por la irradiación sobre los 10 m que se encontraban dentro del contenedor cerrado.

Esta fibra Nufern fue irradiada durante 130 horas, llegando a una TID de 0.9 MGy (Si), con una tasa de 115±4 Gy(Si)/min, a una temperatura media del agua de la piscina de 16 ºC. El diodo laser de 681 nm estuvo encendido todo el tiempo, con una potencia óptica de 2.5 mW. La evaluación de la atenuación óptica debido a la irradiación se evaluó comparando las medidas de ambas fibras, obteniendo los resultados de la figura 4.5, izquierda. Resultando que la atenuación se iba incrementando hasta 0.05 dB/m a una TID de 0.5 MGy, manteniéndose constante hasta llegar a la TID de 0.9 MGy. Llegándose a una especie de punto de equilibrio entre la degradación y recuperación de la misma.

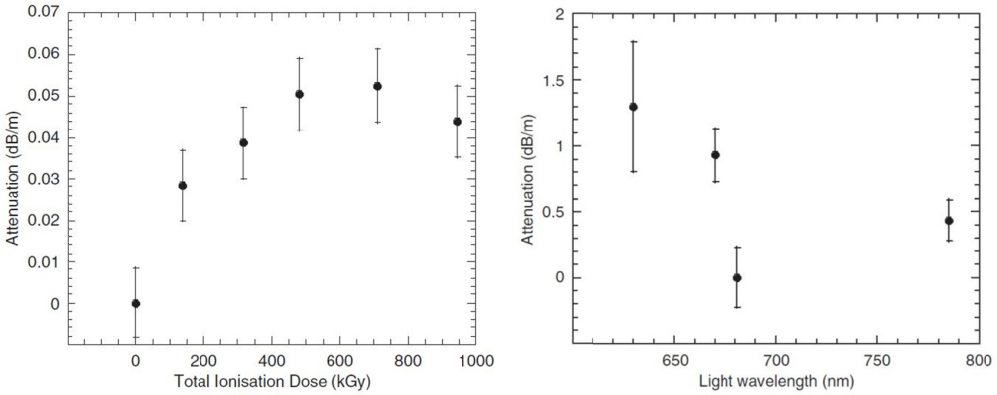


Figura 4.5: *La grafica de la izquierda representa la atenuación óptica que sufre la fibra en función de la dosis de gammas recibida para 681 nm. A la derecha se muestra la atenuación óptica que experimenta la fibra para una fluencia total de 2×10^{14} cm^{-2} neutrones, para las longitudes de onda de 630, 670, 681 y 785 nm.*

La irradiación de neutrones se realizó con neutrones rápidos generados en un ciclotrón MGC-20 (Figura 4.6), en el instituto ATOMKI (Institute of Nuclear Research of the Hungarian Academy of Sciences) [179], en Debrecen (Hungría). Este ciclotrón acelera protones hasta un valor de 17.3 MeV, los cuales se hacen chocar sobre una lámina de Berilio, produciéndose neutrones de un amplio espectro de energía, hasta los 16 MeV, con una media de energía por neutrón generado de 3.5 MeV y detrás se coloca una fibra Nufern de 5 m, que es irradiada con los neutrones producidos. Esta se irradió a una fluencia total de neutrones de $2\times10^{14}\pm25\%$ cm^{-2}, con un flujo en torno a 8×10^{8} cm^{-2} s^{-1} y una dosis de gammas producidas, estimada en 890±25% Gy.



Figura 4.6: *Ciclotrón MGC-20E de ATOMKI, utilizado para realizar las pruebas de resistencia frente a neutrones de los componentes del sistema LINK.*

El método para determinar la atenuación consistió en medir la potencia transmitida antes y después del proceso de irradiación, realizándose varias medidas en cada punto de longitud de onda para estimar las dispersiones. Los

resultados se muestran en la figura 4.5, derecha. Estando el valor máximo en torno a 1.5 dB/m para 630 nm y siendo compatible con cero para 681 nm.

De estos estudios se concluye que: la fibra Nufern S630 cumple con las especificaciones pedidas para CMS y la longitud de onda que conviene utilizar en los diodos láser del sistema LINK es 681 nm. Ya que con neutrones la atenuación inducida a la fibra es compatible con cero y con gammas, para las dosis esperadas, con coeficiente de seguridad, 0.04 dB/m (0.6 dB/m realizando la medida pasiva con 670 nm) por tanto < 1 dB/m, que son los valores máximos de atenuación permitidos. La diferencia entre el valor de atenuación en las medidas activas y pasivas, de un orden de magnitud, puede interpretarse por un posible efecto de recocido, de los defectos que se iban creando en la fibra durante la irradiación, por el paso continuo de la luz durante toda la medida, siendo por tanto una situación más cercana a la real de operación en CMS.

4.2. Sensores

En esta subsección se describen las pruebas realizadas a los detectores del sistema de alineación LINK de CMS, para garantizar su funcionamiento en las condiciones de operación.

4.2.1. Fotodetectores matriciales semi-transparentes de silicio amorfo (ASPD).

Se comenzó utilizando sensores con un área activa de unos 20x20 mm^2, que fueron estudiados, definidos [180 y 187], y caracterizados en profundidad [146 y 181 y 188] y sometidos a pruebas de irradiación con gammas y neutrones [182, 183 y 184]. Con el transcurso del tiempo, se llegó a la conclusión por las simulaciones realizadas, que el área activa de estos sensores era muy ajustada, teniendo en cuenta los movimientos esperados entre ASPDs que iban a ser medidos a través del mismo rayo de luz. Por lo que se procedió a desarrollar una nueva generación de ASPDs de mayor área activa, unos 30x30 mm^2.

Los 'Amorphous Silicon Position Detectors' (ASPDs) utilizados en CMS, han sido desarrollados por una colaboración entre el 'Steinbeis–Transferzentrum für Angewandte Photovoltaik und Dünnschichettechnik' con apoyo tecnológico de la 'Universität Stuttgart' (Institut für Physikalische Electronik, IPE), y los centros de investigación españoles CIEMAT e IFCA [185]. Estos fotodetectores, con un área activa próxima a los 30 × 30 mm^2, son el elemento principal del sistema LINK y por ende el elemento al que más pruebas se ha sometido para su validación, incluyendo: caracterización de cada unidad, funcionamiento de varios de ellos en línea simulando los caminos de luz, resistencia frente a ciertos niveles de irradiación y envejecimiento por iluminación.

4.2.1.1. Caracterización de los ASPDs.

Se caracterizaron un total de 122 ASPDs [186] en el IFCA y CIEMAT, de los cuales 72 fueron instalados en CMS, formando parte del sistema de alineación LINK.

Los sensores fueron caracterizados siguiendo un proceso en el que se estudiaron:

-Estabilidad de la respuesta del sensor: error en la reconstrucción de la mancha del haz en condiciones de estabilidad total.

-Sensibilidad: la corriente de respuesta a la iluminación del láser de la longitud de onda utilizada y potencia de salida.

-Resolución de la reconstrucción espacial: error asociado a la reconstrucción de las coordenadas de la mancha del haz láser sobre el sensor. Define el desplazamiento mínimo de la mancha del haz que el sensor es capaz de detectar.

-Ángulo de deflexión del haz láser: medida del cambio de dirección que el haz láser experimenta al atravesar el ASPD.

-Transmitancia o potencia del haz incidente transmitida: porcentaje de la intensidad de luz del haz láser incidente que se transmite a la salida del mismo.

Para ello se creó un banco de calibración en el IFCA (Figura 4.7), consistente en un diodo láser de 681 nm de longitud de onda con una potencia del haz de ~1mW a la salida del colimador, que va al final de la fibra, la cual viene del diodo láser. Unos 500 mm más adelante se encontraba el sensor objeto del estudio, montado sobre dos plataformas micrométricas motorizadas, en la dirección de los ejes X e Y del sensor, y automatizadas para barrer 20 x 20 mm^2 de su área activa, haciendo incidir la luz del haz laser sobre esa superficie (Figura 4.8), con una precisión de movimiento de 2 µm. Y unos 5 metros más adelante estaba situado el sensor de referencia para la medición de la deflexión y la transmitancia del sensor bajo estudio. Todo esto fue montado sobre un banco óptico de granito, muy estable, que estaba apoyado sobre soportes que lo aíslan de la vibración inducida por el suelo.

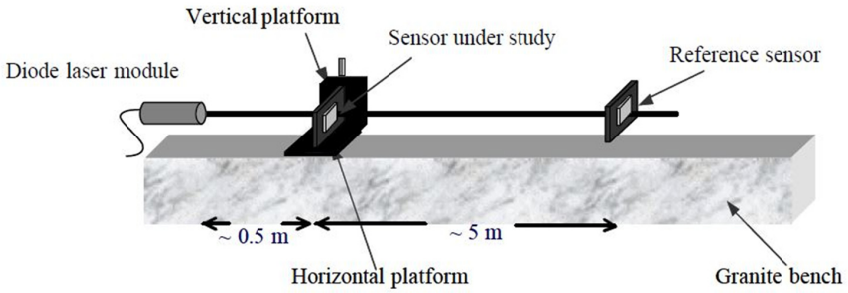


Figura 4.7: *Esquema del Banco de calibración para los ASPDs.*

La forma de operación consistía en realizar un escaneado de un área de 20 × 20 mm2, con un paso de 1 mm, obteniendo una matriz de 21x21=441 puntos medidos. La información del haz incidente fue obtenida a través de dos perfiles de intensidades ortogonales, provenientes de la señal de las 64×64 tiras de electrodos ortogonales (Figura 3.30), estos perfiles se ajustaron a

distribuciones gaussianas (Figura 4.9), de cuyos valores medios se determinaron las posiciones de los centros de la mancha del haz laser sobre el ASPD. En cada punto de ese escaneado se tomaban datos y se reconstruía el centro de la mancha del haz sobre el sensor guardando su valor.

La **estabilidad** de la respuesta se evaluó tomando datos durante largos períodos de tiempo, en los que el láser estaba apuntando al mismo punto del área activa del sensor. Obteniendo un valor medio de 1.5 ±1 μm en ambas direcciones. Lo que nos da una resolución intrínseca del mismo orden que la incertidumbre esperada por la respuesta del sensor y la inestabilidad mecánica del montaje.

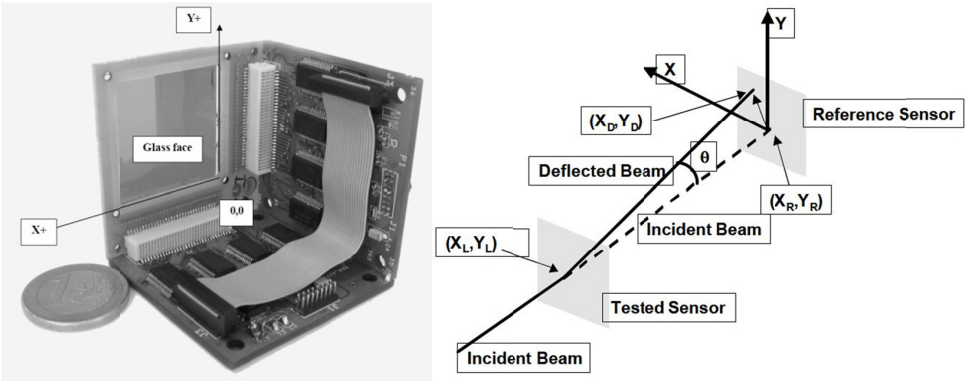


Figura 4.8: *Ejes del ASPD (izquierda) y esquema de la deflexión producida al atravesar un ASPD (derecha).*

La **sensibilidad** del sensor, es el cociente entre la corriente integrada inducida por el haz láser en el ASPD y la potencia de salida del láser. La señal recolectada en cada una de esos 441 puntos, medidos sobre el área activa del sensor, se dividen entre la potencia de salida del láser y la media de la distribución de esos valores, es la sensibilidad de la respuesta del sensor a la longitud de onda del láser utilizado. El valor medio para todas las unidades medidas salió 16.3±7.6 mA/W. También se midió la corriente que se induce cuando los sensores están en total oscuridad, siendo en todos los casos menor de 0.2 nA y por tanto despreciable.

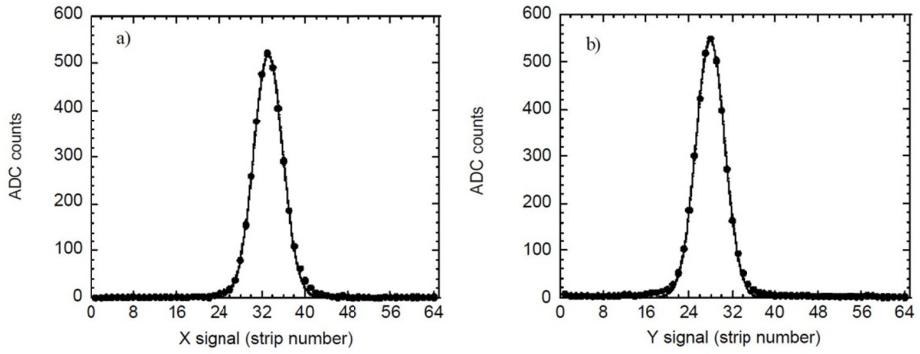


Figura 4.9: *Ejemplo de la reconstrucción de la señal de una mancha del haz láser sobre la coordenada X (izquierda) e Y (derecha) del ASPD.*

La **resolución** de la reconstrucción espacial de las coordenadas de la mancha del haz, nos indica, el mínimo desplazamiento de la mancha sobre la superficie del sensor que puede detectar. Siendo el valor medio obtenido para todos los sensores en ambas coordenadas σ(X)=5.2±2.6 μm y σ(Y)=5.1±2.4 μm. Estos valores son las incertidumbres medias que tienen que asignarse en la reconstrucción de la mancha del haz laser sobre la superficie del ASPD.

La propagación de la luz a través de un medio, que sufre una interacción con otro distinto, va a producir cambios en la velocidad y dirección de propagación. Además cuando la luz atraviesa varias capas de material, parte de la luz incidente se va a reflejar en la interfase de los medios y pueden dar lugar a interferencias, debido a la diferencia de fase entre la luz de incidente y la reflejada. Por otro lado si el sustrato de vidrio no es perfectamente plano, esta curvatura va a producir un giro en la dirección de la luz, por un efecto lente. Y ocurrirá lo mismo cuando las caras del vidrio no son plano-paralelas. La combinación de estos efectos es el origen de la deflexión del haz laser al atravesar el ASPD. Para minimizar los efectos de interferencia, el sustrato de vidrio que tienen los sensores está tratado con un recubrimiento anti-reflejante. Este sustrato de 1 mm de espesor, tiene sus caras plano paralelas con una tolerancia <5 μm y la 'planitud' de las caras <4 μm.

La medida de los **ángulos de deflexión** (θ_x y θ_y) se obtiene estudiando la señal reconstruida sobre el segundo sensor mientras se escanea el sensor bajo estudio. Para ello primeramente se ha tomado la posición del haz incidiendo sobre el sensor de referencia, sin que esté colocado el primer sensor (sensor bajo estudio), siendo utilizado este valor como referencia. Y al poner de nuevo el sensor, producirá una deflexión que será detectada y medida en el sensor de referencia, comparando la posición deflectada con la de referencia tomada. La distribución de los ángulos de deflexión medidos, para todas las muestras, da unos valores medios de θ_x=-1.1±5.1 μrad y θ_y=0.8±3.8 μrad.

La **transmitancia** es la fracción de luz que es transmitida a través del sensor. Este valor se obtiene a partir de los datos tomados para la medida de la deflexión. La relación de la integral de señal recolectada en el segundo sensor, con el sensor bajo estudio delante interfiriendo en el haz y sin él, da la transmitancia de una posición del sensor analizado, para la longitud de onda del láser utilizado. Siendo el valor medio T= 84.8±2.9%.

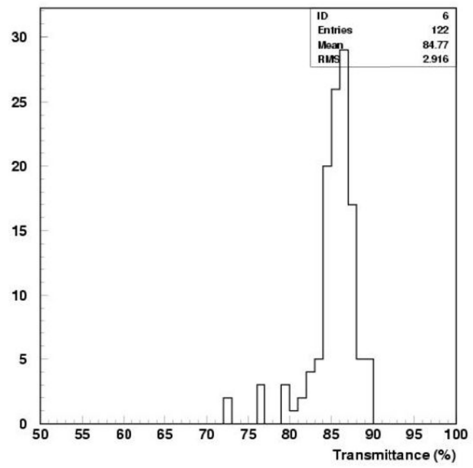


Figura 4.10: *Distribución de la transmitancia medida sobre el conjunto de todos los ASPDs del sistema LINK.*

En el documento [186] aparecen las calibraciones realizadas para los 122 ASPDs, además se incluye información de las tiras de electrodos, que por diferentes motivos, están inutilizadas. Toda esta información es utilizada por el sistema de alineación LINK de CMS, para realizar correctamente la reconstrucción de medida.

4.2.1.2. Monitorizado de las prestaciones del sistema de alineación multipunto.

Se procedió a evaluar el funcionamiento de varios ASPDs atravesados por el mismo haz, realizando ensayos con varias configuraciones [170, 171 y 185]:

En una disposición multipunto, la resolución en la detección del desplazamiento o desalineación de un sensor se determina por tres factores: La precisión de la reconstrucción espacial del sensor, la magnitud e incertidumbre de los ángulos de deflexión del haz láser cuando atraviesa el sensor precedente en la línea de haz y la distancia de sensor a sensor en el camino del haz.

El haz atraviesa el primer sensor y alcanza el segundo con un ángulo incidente (en la dirección X e Y) que sigue una distribución Gaussiana, con un valor central y una anchura de distribución, cómo la que se obtuvo durante la caracterización del sensor, siguiendo el método explicado en el punto anterior. La incertidumbre en la reconstrucción en el segundo sensor, σ_2(rec), está por consiguiente afectada por un término adicional, relacionado a la incertidumbre en los ángulos de deflexión, $\sigma_2^{def}=\sigma_1(def)\times d_{12}$ (d_{12} es la distancia entre ambos sensores), que se añade cuadráticamente a la resolución de la reconstrucción espacial del segundo sensor.

El haz láser es por consiguiente deflectado en cada uno de los sensores que se encuentran a continuación en el camino del haz, siempre de acuerdo con sus valores de ángulos de deflexión calibrados. En general, la distribución angular resultante del haz incidente, sobre las superficies de los sensores, es la circunvolución de las deflexiones sucesivas, sobre los sensores que se han

encontrado previamente a lo largo del camino del haz, teniendo cada uno su propia distribución Gaussiana. El promedio de la deflexión en el sensor 'j', debido a la presencia de varios sensores precedentes 'i' (i=1, j-1), pueden ser expresada cómo

$$\Delta_j = \sum_{i=1,j-1} (\theta_i \times d_{ij}) \tag{4.2}$$

donde θ_i es el ángulo de deflexión del sensor 'i'. El error inducido en el proceso de reconstrucción en el sensor 'j' se puede expresar cómo

$$\sigma_j = \sqrt{\sigma_j^2(rec) + \sum_{i=1,j-1} [\sigma_i(def) \times d_{ij}]^2} \tag{4.3}$$

Esta expresión se aplica a las coordenadas X e Y del sensor. El valor de σ_j es la resolución en la detección del desplazamiento del sensor 'j' en el camino del haz: la cantidad que va a permitir determinar si el sensor 'j' se ha movido o no de su posición inicial respecto al haz laser.

-Ensayo con 5 ASPDs en Línea [170], se dispuso una configuración de 5 ASPDs formando una línea de 5.5 m sobre un banco óptico de granito, sobre los que se hacía incidir un haz láser, cuya disposición aparece en la figura 4.11, izquierda.

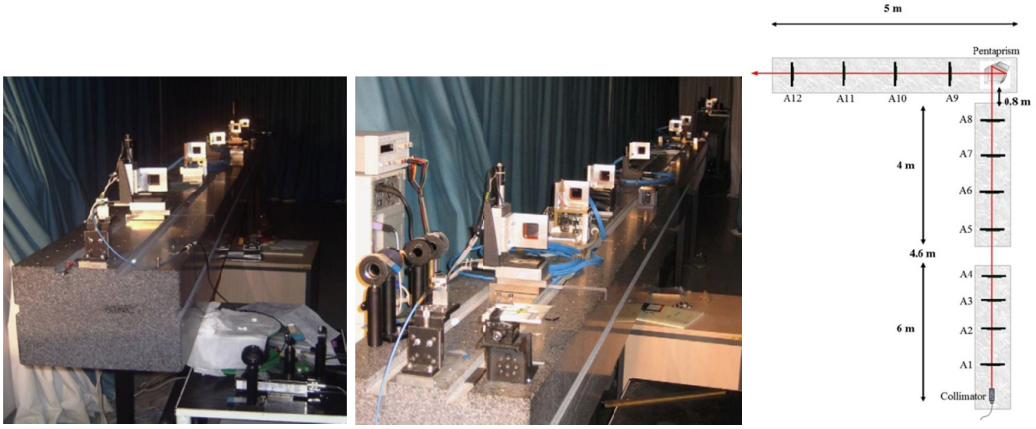


Figura 4.11: *Disposición experimental para la prueba del sistema de alineación multipunto, utilizando hasta 12 ASPDs atravesados por el mismo haz. Izquierda, disposición de 5 ASPDs formando una línea de 5.5 m. Centro, disposición con 12 ASPDs formando una línea de 13 m. Derecha, disposición de 12 ASPDs formando una L de 20 m, mediante un penta-prisma que gira el haz 90º.*

El procedimiento de operación comienza definiendo el punto de referencia de cada sensor, donde debería incidir el haz laser si no hubiera ASPDs situados delante, que induzcan deflexiones en el haz. Se comienza tomando datos en el sensor más alejado (A5) del comienzo del haz láser, sin colocar ASPDs delante, y se toman 100 puntos para calcular el punto de referencia. A continuación se instala el siguiente sensor (A4), y se calcula su punto de referencia. Este proceso se repite para el A3 y A2. A continuación se instala el

sensor más cercano al inicio del haz, sobre las plataformas motorizadas y se realiza un escaneo de la superficie de 20x20 mm^2, con paso de 1 mm. Y se guardan los datos de todos los sensores alineados, reconstruyéndose sobre cada uno de ellos la posición de la mancha donde incide el haz. De esta forma se consigue una matriz de 21x21 puntos reconstruidos sobre cada sensor.

Con el escaneado del A1, el láser incidirá sobre el sensor A2 con diferentes ángulos deflectados, reproduciendo una distribución Gaussiana sobre este, con un valor central y una anchura de la distribución que fue obtenida previamente, para cada sensor, siguiendo el método explicado en el punto anterior. El haz continúa su camino, siendo deflectado, de igual forma en el resto de sensores que va encontrando en su camino. La posición reconstruida X_l^{meas} e Y_l^{meas}('l' se refiere al orden del sensor: 2º a 5º) se puede corregir de acuerdo con la ecuación (4.2), utilizando los valores de los ángulos de deflexión obtenidos (θ_x y θ_y) en la calibración de los sensores utilizados en esta configuración y la distancia entre sensores. Los valores corregidos (X_l^{corr} e Y_l^{corr}) se comparan con los valores de referencia. Permitiéndose definir $DX_l=X_l^{corr}-X_l^{ref}$ ($DY_l=Y_l^{corr}-Y_l^{ref}$), como la desviación entre la posición corregida de la mancha del haz incidente sobre el sensor 'l', con todos sus sensores previos en la línea del haz láser, y el valor de referencia sin sensores previos X_l^{ref} (Y_l^{ref}). Los valores medios de las distribuciones DX_l e DY_l, afectados por sus correspondientes resoluciones calculadas con la ecuación (4.3), van a indicar si los valores calculados corresponden a un desplazamiento real o no.

De este estudio se ha obtenido, que la capacidad de medición utilizando ASPDs, para sistemas de monitorizado multipunto, muestra que estos dispositivos pueden detectar cualquier desplazamiento o desalineación con una resolución mejor de 25 µm, en las direcciones X e Y, sobre el sensor más alejado de los 5, en el camino del haz de 5.5 m de longitud.

-Ensayo con 12 ASPDs en Línea [185], formando una línea de unos 13 m de longitud sobre bancos ópticos de granito, el haz láser se produce en un diodo láser de 681 nm, que viaja a través de una fibra NUFERN de más de 100 m hasta llegar al colimador, de donde sale el haz hacia los 12 sensores alineados. Los sensores para el ensayo se escogieron de forma aleatoria del total disponible. Y se instalaron sobre dos bancos de granito de 6 m y 4 m, separados por un espacio de 4.6 m, como aparece en la figura 4.11, centro. Estos sensores fueron caracterizados siguiendo el proceso descrito en el punto anterior de este capítulo. Los 8 primeros ASPDs se instalaron en el banco de 6 m y los otros 4 en el segundo de 4 m. La distancia entre el colimador y el último sensor era de 13.035 m. El procedimiento de medida fue similar al ensayo descrito con 5 ASPDs. Resultando que la resolución de la reconstrucción calculada de un sensor en una posición determinada del camino del haz, está por debajo de 10 µm, para caminos del haz <3 m y <4 ASPDs precediendo al sensor en línea, y entre 50 y 100 µm para distancias mayores a 10 m y >8 ASPDs por delante del sensor en cuestión, en la misma línea del haz.

-Ensayo con 12 ASPDs formando un camino de 20 m [171], en forma de L, según aparece en la figura 4.11, derecha. El haz laser se produce en un diodo 58FCM de 681 nm, de la firma Schafter & Kirchhoff, con una potencia de salida de 1.63 mW y 1% de estabilidad. Este se acopla a una fibra S630 de Nufern,

que termina en un colimador FC5-TiFS-NIR de la firma Micro Laser, y continúa en línea recta por un camino de unos 15 m, atravesando 8 ASPDs, hasta llegar a un penta-prisma modificado que lo gira 90º, donde continúa otros 5 m, atravesando los 4 ASPDs restantes. Recorriendo una longitud desde el colimador al último sensor de 20.162 m. Esta disposición asegura un haz Gaussiano sin distorsiones en todo el camino del haz, con una divergencia de ~0.1 mrad. El procedimiento de medida fue similar a los ensayos anteriores. Con esta disposición geométrica va a ser posible detectar desplazamientos, del sensor más alejado respecto al haz laser, que estén por encima de 100 µm. Mediante este ensayo se demuestra, que el alineamiento o des-alineamiento de los elementos a los que están unidos los ASPDs, se puede detectar y medir con alta resolución. De los resultados, es interesante hacer notar que la reconstrucción de la mancha sobre el sensor, es posible incluso con irradiancias de 0.1 mW/cm^2. Pudiendo concluir que esta nueva generación de ASPDs es muy apropiada para un sistema de alineación multipunto, en geometrías más complejas que un simple haz láser recto. Pudiendo ser utilizado este sistema multipunto, para la alineación de futuros detectores, con caminos de luz más complejos.

En nuestro caso, la incertidumbre total asignada a la posición de la mancha, está limitada a unas 10 µm, puesto que en el caso más desfavorable vamos a alinear solamente 3 sensores, con el mismo haz, separados entre sí unos 4 m.

4.2.1.3. Resistencia frente a irradiación con γ y neutrones y envejecimiento por iluminación intensa.

Se estudió el efecto que las partículas gammas y neutrones pueden inducir sobre las características de los ASPDs [182, 183 y 184]. Se utilizaron las instalaciones NAYADE del Ciemat, para irradiar con γ, y el ciclotrón de ATOMKI para los neutrones. Además se estudió el efecto que la luz intensa y prolongada provoca al sensor.

Los efectos que la **radiación** produce sobre el silicio cristalino (c-Si), así como el desarrollo de técnicas de fabricación que permitan aumentar la resistencia de este, han sido estudiados por la colaboración ROSE [189], que fue creada con vistas a cubrir las diferentes necesidades de utilización de este material en el LHC. De estos estudios [190] se puede concluir que el silicio amorfo hidrogenado (a-Si:H) presenta una mayor resistencia que el silicio cristalino (c-Si). Se ha establecido que el proceso de irradiación sobre el silicio amorfo hidrogenado, crea defectos en el material debidos principalmente a un proceso de ionización, mientras que el daño por desplazamiento es menos importante debido a la flexibilidad de la estructura amorfa del material. Puesto que la radiación incidente provoca una excitación de los electrones del material, se puede pensar que el mecanismo que produce el deterioro inducido por la radiación sea similar al que produce la luz, mediante el efecto Staebler-Wronski [191], que produce una variación significativa sobre la fotoconductividad y la corriente oscura ('dark current', es la pequeña cantidad de corriente que circula por un fotodetector, cuando este no está recibiendo luz) del silicio amorfo hidrogenado, bajo la acción de una intensa irradiación de fotones. Además de este efecto sobre las propiedades foto-electrónicas del material se deben

considerar las posibles modificaciones de las propiedades ópticas del vidrio, mediante una reducción de la transmisión de luz; es el llamado efecto 'browning', por el que la radiación provoca la formación de 'centros de color' en la red de la estructura cristalina. Los defectos absorben parte de la luz incidente. La coloración inducida depende en gran medida del tipo de cristal o vidrio utilizado y de la dosis y tasa de irradiación empleada. Estos efectos pueden reducirse con el tiempo y la temperatura.

Se han realizado ensayos de caracterización de ASPDs sometidos a irradiaciones con gammas y neutrones, para unas dosis $>10^3$ mayores que las esperadas sobre los ASPDs más afectados, los de la región ME1/1. Esto es debido a que en un primer momento estaba previsto utilizar este tipo de sensores en la región del Tracker, donde las dosis son máximas. En la tabla 2.5 se encuentran los distintos niveles de dosis esperadas, para las distintas regiones de CMS. Se irradiaron 100 KGy de gammas, con una tasa de 3 KGy/h y 10^{15} ± 35% de neutrones/cm^2. La caracterización se realizó de forma similar a los ensayos explicados previamente. Resultando que:

-No se apreciaron variaciones en los ángulos de deflexión.

-Se observó una pequeña degradación (5-10 %) en la transmitancia, que es compatible con la incertidumbre de medida.

-La iluminación sobre el ASPD, utilizando una luz blanca uniforme, muestra una degradación del 40% de la respuesta medida en las tiras de electrodos, pero son consistentes con los errores de medida, ya que estas pruebas se realizaron con unas primeras versiones de los ASPDs, en las que no estaba optimizado su proceso de fabricación y eran muy in-homogéneos.

Y teniendo en cuenta que las dosis reales que absorberán serán más de 3 órdenes de magnitud menor, no se espera que la radiación produzca efectos apreciables sobre los ASPDs.

El efecto Staebler-Wronski, se ha estudiado mediante ensayos en los que el efecto que el **envejecimiento** provoca sobre los ASPDs, se analiza con una iluminación intensa de diodos láser de 633 nm durante 581 horas y 681 nm durante 390 horas [192]. Concluyendo que en el primer caso no se aprecia variaciones de la foto-sensibilidad y en el segundo resultó por debajo del 3%. Se puede concluir que no vamos a sufrir una apreciable variación en las prestaciones del sensor. Se considera que la utilización de los láseres durante los 10 años de operación de CMS será inferior a 500 h, pero como se ha explicado, el detector no estará operando durante los 10 años de forma continua, sino que sufrirá una serie de paradas técnicas de mantenimiento y reparación a lo largo de ese tiempo, y cada vez que esto ocurra habrá que mover las ruedas entre sí para permitir su acceso. Cuando vuelvan a cerrarse las posiciones relativas de los componentes habrán variado ligeramente. Consecuentemente la posición de impacto de las manchas sobre la superficie activa de los ASPDs variará cada vez que esto ocurra y por tanto será virtualmente imposible que esté apuntando algún laser sobre la misma posición del ASPDs, excepto en los 2 ASPDs que se encuentran sobre los MABs,

iluminados con el Laser Level, en los que el ASPD cercano al láser está situado a unos 100 mm y el otro ASPD a unos 2.5 m, pero el pequeño error en la indefinición de la posición de la mancha, que este efecto pueda producir sobre estos sensores, va a ser despreciable para esta medida.

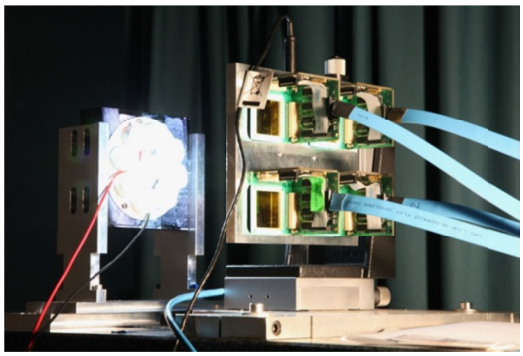


Figura 4.12: *Disposición experimental para la iluminación prolongada con 9 LEDs sobre 4 ASPDs.*

Finalmente se han realizado ensayos sobre 4 ASPDs (Figura 4.12), para cuantificar el envejecimiento que puede provocar una luz blanca intensa, mediante una matriz de 9 LEDs modelo LumiSport9 de 1 W, de la casa 'Dialight Lumidrives' [194], durante un tiempo de hasta 2800 h [193], concluyendo que se aprecia una degradación de la señal en las primeras cientos de horas, llegando la señal de salida hasta el ~80-85% de la inicial. Recuperándose a partir de ese punto, hasta el ~88-97% del valor inicial (efecto Staebler-Wronski inverso).

4.2.2. Inclinómetros electrolíticos.

Se han utilizado, como se explicó en el capítulo anterior, 3 tipos diferentes de sensores de inclinación electrolíticos, el uniaxial M756–1172, el biaxial M756–1150 y el biaxial 900-H de la firma Applied Geomechanics Inc [150], siendo los 2 primeros fundamentales para el sistema de alineación. Éstos han sido sometidos a un proceso de selección y caracterización [195, 196, 149, 211 y 197] y ensayos de funcionamiento en ambientes que simulen sus condiciones de utilización real en CMS [198, 199 y 200].

4.2.2.1. Caracterización de los inclinómetros.

Se desarrolló una configuración experimental para la caracterización de los inclinómetros, definiendo los parámetros que iban a ser medidos [149]. El esquema aparece en la figura 4.13. Consiste en un trípode, de 450 mm entre puntos de apoyo longitudinalmente, con tornillos micrométricos en las tres posiciones, que pueden ser regulados con una resolución de ~0.5 μm (equivalente a ~1 μrad).

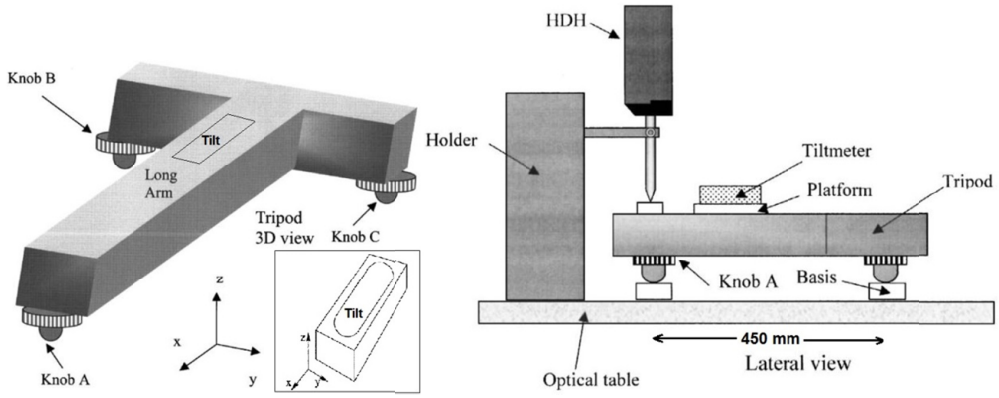


Figura 4.13: *Configuración experimental para la caracterización de los inclinómetros utilizados por el sistema de alineación LINK.*

El sensor se coloca sobre el trípode, montado a lo largo del brazo mayor (eje X), siendo medidas las variaciones de inclinación sobre este eje (rotaciones en torno al ejeY). El trípode descansa sobre una mesa óptica muy estable. Para medir el ángulo transverso sobre el sensor, este debe colocarse perpendicularmente. De esta forma únicamente se manipula el tornillo micrométrico 'A', cuantificándose el movimiento vertical relativo de este punto mediante el distanciómetro 'DDH', fijado a la mesa óptica. Es un distanciómetro 'METRO Digital Length Gauge Systems MT 60M' acoplado a una unidad electrónica 'Single-Axis Displays for Length and Angle ND 200 Series' de la casa HEIDENHAIN [201], con una resolución de medida de 0.5 µm. De esta forma, cómo la distancia longitudinal de los apoyos es fija y conocida, podemos calcular la variación angular que se produce sobre el trípode y compararla con la señal que está registrando el inclinómetro, obteniendo así sus parámetros de calibración.

Primeramente se evaluó la influencia que el desalineación del inclinómetro M756 a lo largo del eje X, y la inclinación en torno al eje X, tienen sobre la calibración, en función de los valores esperados en la instalación sobre CMS. Se concluyó que una desalineación del inclinómetro respecto a los ejes sobre los que deberá estar orientado en CMS de unas 50 mrad (~3º arc) puede inducir un error de medida de hasta 8 µrad, por lo que el error que puede inducir el ángulo transverso, para los movimientos esperados en CMS, va a ser despreciable [149].

Para pequeños ángulos, como los esperados en CMS, de algunos mrad, la dependencia calibrada entre la inclinación del sensor y la salida de voltaje es esencialmente lineal, siendo parametrizada como [197]:

$$\alpha\ (\mu rad) = S\ (\mu rad/mV) \times V\ (mV) + c\ (\mu rad) \qquad (4.4)$$

donde α es el ángulo del sensor, S es una constante de calibración de cada sensor, V la salida del voltaje del sensor y c es el valor de ángulo que tiene el sensor cuando el voltaje de salida está a cero. Este último es indicativo de las precisiones obtenidas en la fabricación mecánica del sensor.

Los sensores M756 han sido calibrados por el fabricante, para el rango completo y a diferentes valores de temperatura, resultando una diferencia entre los valores angulares medidos y observados por los sensores de unos 36 µrad de media, estando comprendidos todos los valores entre 21 µrad y 46 µrad.

Para validar y mejorar en lo posible esta calibración se repitió en nuestros laboratorios, reduciendo el rango de calibración a ±35 mrad, ya que engloba los posibles errores de instalación en CMS, movimientos previstos durante los desplazamientos de las ruedas en los períodos de mantenimiento o los movimientos angulares inducidos por el campo magnético sobre las ruedas. En el documento [197] se encuentran los resultados de las calibraciones realizadas a cada sensor de los utilizados en CMS. Esta información es la que se utiliza en las bases de datos de reconstrucción que utiliza el sistema de alineación LINK. Estando comprendidos los valores de precisión de la linealidad para los sensores M756-1172 entre 10.6 µrad y 45.5 µrad, para los M756-1150 entre 12.2 µrad y 41.5 µrad y para los 900-H entre 15 µrad y 91 µrad. Los dos primeros tipos fueron calibrados con sus electrónicas asociadas.

La señal de salida absoluta respecto a la gravedad de cada sensor, va a estar determinada por la precisión de la mecánica sobre la que descansa el mismo, de las tolerancias de instalación de este sobre los diferentes montajes mecánicos o estructuras del sistema de alineación y de las tolerancias de montaje de estos sobre CMS. Por ello se han realizado calibraciones respecto a la gravedad en la zona 'I4 Hall de los ISR' del CERN, como se comentó en el capítulo anterior, con precisiones de la red de medida utilizada para la calibración en torno a las 50 µm. La precisión angular depende de la dimensión y geometría propia de la estructura en cuestión. Por otro lado se han realizado calibraciones de estas estructuras cuando están instaladas en CMS, realizando calibraciones en las que se monitorizaba la posición de las 'target' de referencia de estas estructuras respecto al sistema de referencia global de CMS, relacionando estos valores con los leídos por los inclinómetros, en esta segunda configuración, la precisión de las medidas realizadas por los geómetras estaban entre las 300 y 500 µm, según la medida realizada, cómo se mencionó en el anterior capítulo.

A continuación se describen los efectos que, las condiciones ambientales de operación, pueden inducir sobre la precisión de la medida.

4.2.2.2. Efectos inducidos por la Temperatura.

El voltaje de salida puede cambiar con la temperatura, por la variación de volumen del líquido y la burbuja de gas, que se encuentra dentro de la ampolla del sensor donde están los electrodos, que da lugar a la modificación del área que el líquido cubre sobre cada electrodo de excitación del sensor. Y también puede cambiar, por el cambio que experimente la conductividad del líquido con la temperatura.

El ángulo que forma la burbuja de gas, que está sobre el líquido, respecto a la gravedad, se puede calcular mediante la siguiente expresión, que incluye la dependencia del voltaje de salida con la temperatura [197]:

$$\alpha\ (\mu rad) = P(V) \times [1 + K_S(T - T_{cal})] - B(T) \qquad (4.5)$$

Siendo, V el voltaje de salida del sensor en mV, T la temperatura en ºC cuando se está leyendo el voltaje, T_{cal} la temperatura de calibración en ºC.

Siendo P(V)= S×V y B(T)= K_Z×T+ B_0, donde el primer factor del primer término de la ecuación (4.5), P(V), corresponde a la ecuación lineal (4.4). El segundo factor del primer término P(V)× K_S(T-T_{cal}), tiene en cuenta el cambio del factor de escala con la temperatura. Para obtener la K_S, el fabricante calibró el sensor a cuatro temperaturas alrededor del valor T_{cal}, utilizando una expresión lineal para el ángulo girado en función del voltaje de salida. A cada valor de temperatura T, le corresponde un valor de S calculado y se lleva a cabo un ajuste lineal de S en función de la T. El cambio del factor de escala con la temperatura se define como:

$$K_S = \frac{\left[\frac{S(T_{max}) - S(T_{min})}{S(T_{min})}\right]}{T_{max} - T_{min}} \qquad (4.5.1)$$

El Segundo término de la ecuación (4.5), B (T) = K_Z×T+ B_0, representa el ángulo que forma el sensor con la horizontal, cuando el voltaje de la señal de este es cero. Y está relacionado con el coeficiente (K_Z) de cambio del cero con la temperatura.

El hecho de que un sensor tenga un voltaje de salida cero no quiere decir que la base del inclinómetro esté perpendicular a la gravedad. Si un sensor se sitúa sobre una superficie totalmente horizontal, debe dar un voltaje de salida V1. Rotando el sensor 180º sobre esa superficie da un voltaje V2. De modo que el sensor está totalmente horizontal respecto a su base cuando el voltaje de salida es V = (V1+V2)/2.

El K_Z se calcula leyendo las salidas B_i (voltaje transformado a ángulo) sobre una superficie de referencia de granito para cuatro temperaturas T_i distintas alrededor de la T_{cal}, rotando el sensor 180º sobre la superficie de granito, y repitiendo el proceso varias veces. De esta forma se obtienen unos valores medios $\langle B_i \rangle = (B_i + B_i^{rot})/2$ a diferentes temperaturas. Con estos cuatro pares de valores ($\langle B_i \rangle$, T_i) se realiza un ajuste lineal del tipo B(T) = K_Z×T+ B_0, para calcular K_z y B_0.

Las diferentes constantes de calibración, para todos los inclinómetros utilizados sobre el detector, se encuentran en el documento [197]. Se han obtenido para las temperaturas de operación esperadas en CMS. De este estudio se concluye que el error que va a inducir la temperatura en la precisión de medida de los inclinómetros será despreciable para las condiciones de operación en CMS.

4.2.2.3. Resistencia frente a la irradiación γ y con neutrones.

Aunque estos sensores son resistentes a una dosis de radiación ionizante (TID) de hasta 9.76 Mrad, según datos del fabricante, se estudió su comportamiento frente a dosis de hasta 15 Mrad y posibles daños por desplazamiento bajo una fluencia de neutrones 1.5× 10^{14} cm^{-2} [198 y 199], utilizando las instalaciones

NAYADE del Ciemat (Madrid) y el ciclotrón de protones del instituto ATOMKI en Debrecen (Hungría).

El procedimiento de calibración consistía en realizar un proceso similar al explicado en los puntos precedentes, utilizando la formula (4.4), para obtener la relación entre el voltaje de salida y el ángulo girado por el sensor. Realizando un mínimo de cinco calibraciones, sobre cada sensor, antes y después de cada paso de irradiación realizada a los inclinómetros ensayados. Obteniéndose las constantes de calibración y precisiones medias de esa serie de medidas realizadas. Y por consiguiente, pudiéndose evaluar la variación de esas dos cantidades con la irradiación recibida por el inclinómetro.

La conclusión es que no se observó modificación apreciable en los inclinómetros M756, para las dosis previstas, en las posiciones donde irían instalados en el detector.

4.2.2.4. Efectos que induce el Campo Magnético.

En este apartado se resumen las observaciones realizadas de los inclinómetros M756 dentro de campos magnéticos [200], introduciendo expresiones fenomenológicas que ajustan la variación del voltaje de salida en función de valor del campo magnético y de los gradientes del campo a los que el sensor está sometido.

Se consideraron dos tipos de configuraciones experimentales, en los que se observó de forma cualitativa que el cambio de voltaje que sufren los inclinómetros, con el campo magnético, está de acuerdo con el movimiento esperado que se produce de las cargas dentro de un campo, por la acción de las fuerzas de Lorentz.

-En la primera de ellas, se utilizó un electroimán clásico, que alcanzaba hasta 2T, en un pequeño volumen de diámetro 100 mm y 40 mm de anchura (Figura 4.14). El inclinómetro se colocaba entre los dos polos del electroimán, sobre una barra de latón, la cual podía ser ajustable angularmente, en uno de sus extremos, sobre el que además se controlaba el desplazamiento vertical en ese extremo, mediante la utilización del mismo distanciómetro HEIDENHEAN usado durante la caracterización de estos sensores, en los apartados anteriores. En esta configuración se estudió, en primer lugar, el cambio del voltaje de salida del sensor manteniendo este sin movimiento y variando únicamente el valor del campo magnético, a través de la variación de la corriente que circula por las bobinas del imán y en segundo lugar, se variaba la inclinación. En esta disposición el campo magnético se encontraba perpendicular al eje longitudinal del inclinómetro, estando el campo según la dirección Y de la figura 4.13.

De esta forma se recogían datos del valor del voltaje de salida del inclinómetro, del campo magnético en los dos extremos del inclinómetro donde se encuentran los electrodos de excitación, según la figura 3.32, y del centro de los polos del imán; para diferentes posiciones del imán sobre la barra de latón a lo largo del eje transversal del imán y con diferentes inclinaciones del sensor.

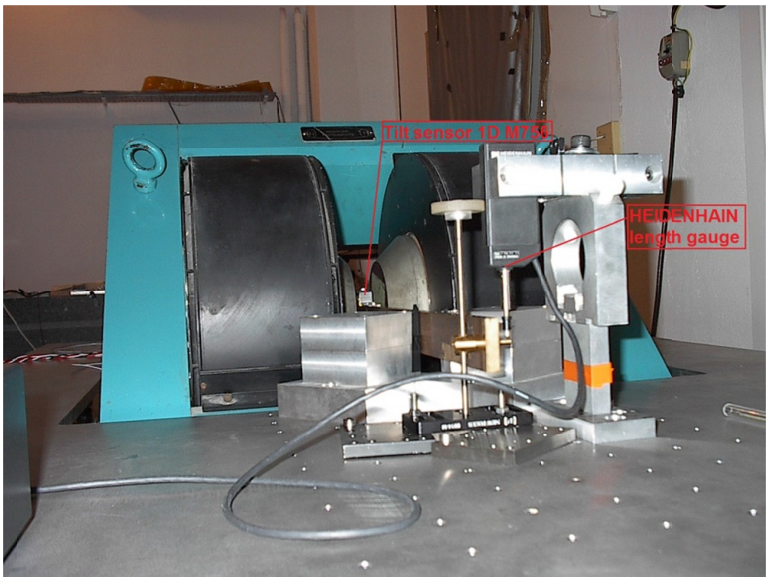


Figura 4.14: *Configuración experimental para el inclinómetro 1D M756, sobre el electroimán clásico disponible en el Laboratorio de Metrología del IFCA.*

Se define el gradiente de campo, cómo la diferencia entre el campo medido en los dos extremos del inclinómetro, G= B(-) – B(+).

Observando que para valores de G<2mT, el voltaje de salida permanece constante, para cualquier valor del campo medido. Para valores de G mayores, se encontró un ajuste con la variación del voltaje de salida según la siguiente función:

$$\Delta V = a \times B \times e^{(b \times G)} \qquad (4.6)$$

donde los parámetros *a* (mV/mT) y *b* (1/mT) no son universales y deben ser calculados para cada ensayo.

-En la segundo disposición experimental, se utilizó un electroimán del CERN, el 'CERN M1', que es un imán de 150 cm de diámetro en los polos y con 82 cm de espacio entre polos, en cuyo volumen se sitúa el material a ensayar (Figura 4.15, izquierda). Se situaron según la disposición que aparece en el detalle de la figura 4.15 izquierda y figura 4.15 derecha, sobre una placa de acero inoxidable, 6 inclinómetros 1D M756, otro 2D M756 y dos sondas Hall, modelo 2D-VH-11SO de la firma Sentron AG [156], que permiten la medida de dos componentes del campo magnético. Esta placa fue montada sobre una mesa amagnética, dispuesta en el centro del volumen del imán. El test consistía en realizar varios ciclos de subida de 0 T hasta 3 T, en los que se comprobó que el gradiente de campo se mantenía siempre por debajo de los 2 mT, en el centro del volumen del electroimán, por consiguiente no se apreciaron variaciones en el voltaje de salida de los inclinómetros que se encontraban perpendiculares al campo magnético.

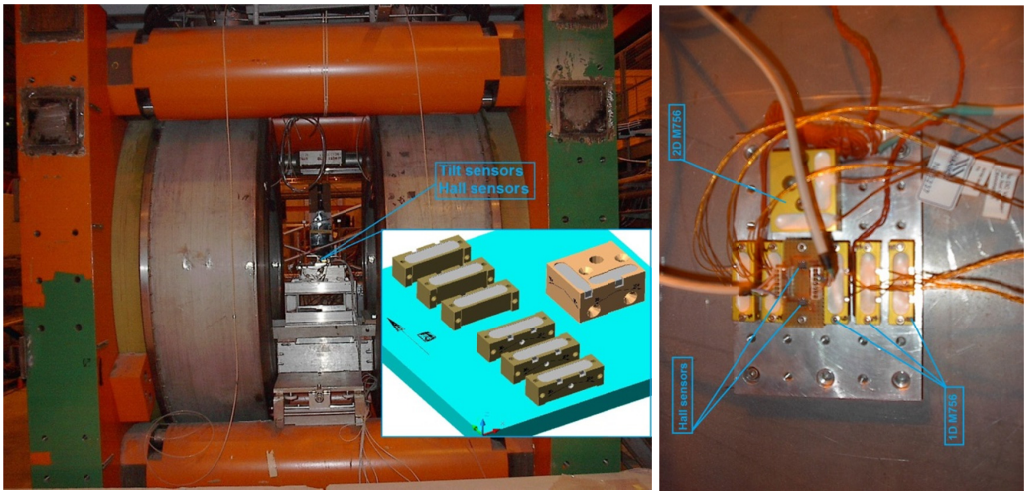


Figura 4.15: *Configuración experimental para los inclinómetros 1D M756 y 2D M756 en el electroimán CERN M1.*

Pero cuando el campo magnético atravesaba el sensor longitudinalmente, se producía una variación de voltaje que se podía ajustar a la siguiente función:

$$\Delta V = a \times B^2 + b \times B^4 \qquad (4.7)$$

donde los parámetros a (mV/mT^2) y b (mV/mT^4), tampoco son universales y deben ser calculados para cada experimento en concreto.

Durante la operación de CMS con el campo nominal de 3.8 T, en la región del TRACKER se ha comprobado que la variación del campo, en las posiciones en las que están situados los inclinómetros 2D M756, no es apreciable entre los extremos de sus electrodos, al igual que ocurre sobre los 1D M756 que se sitúan en la región de los MABs, donde la intensidad del campo es ~400 mT, con un gradiente de campo compatible con cero, por consiguiente los valores de voltaje que se obtienen de los electrodos no necesitan ser compensados en la dirección perpendicular al campo, o sea en la medida de φ. Pero dada la influencia que tiene el campo paralelo al eje del inclinómetro, sobre el valor del voltaje de salida del sensor, únicamente se podrá tener una medida precisa del ángulo θ cuando el campo esté a 0T.

4.2.3. Distanciómetros.

En el sistema de alineación LINK han sido utilizados tres tipos diferentes de medidores de distancia, cómo se describió en el capítulo anterior, los distanciómetros ópticos OMRON Z4M–W100 de la firma 'OMRON Corporation' [151] y los potenciómetricos 18FLPA50 de la firma Sakae [153] y los SLS095-10 de la firma Penny & Giles [154].

4.2.3.1. Caracterización del OMRON Z4M–W100.

La calibración consistía en relacionar el voltaje de salida del sensor con la distancia entre el sensor y la pantalla, mediante la siguiente expresión:

$$L\ (mm) = A\ (mm) + B\ (mm/mV) \times V\ (mV) \qquad (4.8)$$

Donde *L* es la distancia entre el sensor y la pantalla donde incide el láser del distanciómetro, *A* es la distancia absoluta de calibración del 'cero' del sensor, en la que la señal es ~0V y que se corresponde con un valor de unos 100 mm, siendo el punto medio del rango del sensor (ver Figura 3.33), *B* es la constante de calibración relativa entre la distancia y voltaje de salida y *V* es el voltaje de la señal de salida del sensor.

El proceso de calibración se desarrolla en dos fases, en la primera se realiza una calibración relativa del sensor con el desplazamiento y en la segunda una calibración absoluta, en la que se fija el 'cero' de calibración del sensor. En la figura 4.16 podemos ver las configuraciones experimentales utilizas para realizar la caracterización del distanciómetro óptico.

-Para la **relativa** se utilizó la configuración que aparece a la izquierda de la figura 4.16, en la cual era utilizada una plataforma motorizada de rango de movimiento 100 mm, con una precisión de unas 2 µm, sobre la que iba situada la pantalla donde incidía el sensor. Estando el sensor fijado a una base, donde también estaba fijada la plataforma. De esta forma mediante el movimiento de la plataforma se obtenía un voltaje de salida en el sensor y se obtenía la constante *B*, con una incertidumbre de ~0.1%. Como en los casos anteriores también se ha estudiado la estabilidad y reproducibilidad de las medidas, limitándose a unas 3 µm. Se observó que la principal fuente de incertidumbre viene de la orientación de la pantalla respecto al rayo incidente, encontrándose que para variación angulares de ±10º, se podían llegar a una desviación de 200 µm, aunque en nuestro caso se espera que estas estén entorno a los 2º como máximo.

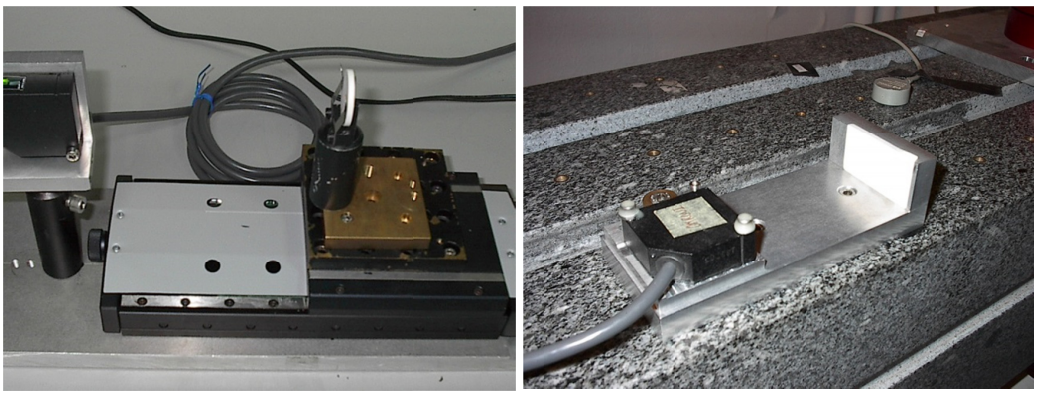


Figura 4.16: *Configuraciones experimentales para la caracterización de los distanciómetros ópticos, en el laboratorio de Metrología del IFCA. Izquierda, caracterización relativa. Derecha, caracterización absoluta.*

-En la calibración **absoluta** se utilizó la configuración que aparece en la figura 4.16, derecha, en esta el sensor se fija mediante tornillos sobre una base de aluminio 7075 y se sellan mediante araldit 2011. Esta base lleva unos agujeros cilíndricos con ajuste H7, que sirven para realizar la referenciación absoluta del sensor. Mediante pasadores cilíndricos de precisión colocados en los agujeros

de referencia, se posiciona esta sobre una pieza de aluminio en forma de L, fijándola a esta mediante tonillos, de esta forma se mide el valor del voltaje 'cero' cuando el láser incide sobre la superficie de la pantalla, considerándose este valor el de referencia absoluta del sensor. La distancia entre los agujeros de referencia y la superficie de la pantalla se ha medido con una Máquina de Medición por Coordenadas (MMC), modelo CRYSTA-PLUS 574 de la firma Mitutoyo [202], con el software de medición MCOSMOS, con una precisión por debajo de las 10 μm.

Los resultados de estas calibraciones nos indican que estos distanciómetros ópticos tienen una precisión final de medida de entre 30 μm y 40 μm.

4.2.3.1.1. Comportamiento frente a la radiación.

Este tipo de sensores dispone de muchos componentes susceptibles de ser sensibles a la radiación (diodo láser, fotodetector, lentes de focalización y recepción y su electrónica amplificadora) por lo tanto se ha necesitado realizar una caracterización de este distanciómetro frente a las dosis de radiación que se estima que recibirá en CMS en la posición donde irá sobre los MABs. Basándonos en los datos expuestos en el capítulo 2, se estimó que podría recibir una dosis del orden de 1 Gy de gammas y 1×10^{11} cm^{-2} neutrones térmicos.

Los sensores fueron sometidos a una irradiación de hasta 4 Gy con gammas en la instalación NAYADE y 10^{11} neutrones/cm^2 en la instalación de ATOMKY.

Tras las irradiaciones se realizaban una serie de calibraciones, como las descritas anteriormente, para observar si se producían cambios sobre los parámetros calibrados. Resultando que para los posibles daños por ionización con gammas no se observan cambio apreciable en los valores de salida y en los posibles daños por desplazamientos con neutrones se observa un cambio entre el 0.3% y el 0.9% en las constantes de calibración. Pero esto no implica un cambio apreciable en la linealidad del distanciómetro y las distribuciones de los residuos son similares a la situación previa a la irradiación.

4.2.3.1.2. Comportamiento frente al campo magnético.

Para los estudios en campo magnético se utilizó el imán del laboratorio de Metrología del IFCA, mostrado anteriormente. Los valores del campo expuestos en el capítulo 2, fueron considerados la base para realizar el experimento. Se consideró una intensidad de 0.6 T como el límite al que se verán sometidos en CMS.

Se realizó un primer ensayo situando el distanciómetro dentro de un campo magnético uniforme de 0.75 T (superior al valor nominal), y se colocó la pantalla en 9 posiciones separadas entre los 60 mm y 140 mm del sensor, observando que la diferencia de voltaje se incrementa a medida que la pantalla se acerca al sensor, aunque este efecto fue cuantitativamente despreciable.

A continuación se comprobó que si el sensor está situado dentro de un campo magnético con gradiente débil (< 0.024 T/cm), el comportamiento de la respuesta del sensor era igual que con campo uniforme.

También se comprobó que si situamos la electrónica acondicionadora dentro de este campo magnético, la señal de salida del sensor se verá influenciada por este, limitándose el error de la respuesta del distanciómetro a un valor máximo en torno a las 40 µm.

4.2.3.2. Caracterización de los potenciométricos.

La configuración experimental es similar a la de los distanciómetros ópticos, como podemos ver en la figura 4.17. En este caso se pretende obtener la relación entre la señal de respuesta del sensor y la longitud que está extendido el vástago del potenciómetro, según aparece en la figura 3.34. Utilizando una función lineal de la forma:

$$L\ (mm) = A\ (mm) + C\ (mm) \times \left(\frac{V1(mV)}{Vref(mV)}\right) \tag{4.9}$$

donde L es la distancia entre el potenciómetro y la superficie donde está haciendo contacto, A es la posición de calibración 'cero' absoluta, C es la constante de calibración relativa, que permite relacionar la distancia recorrida por el vástago del potenciómetro con la relación entre los voltajes leídos V1 y el de alimentación V_{ref}.

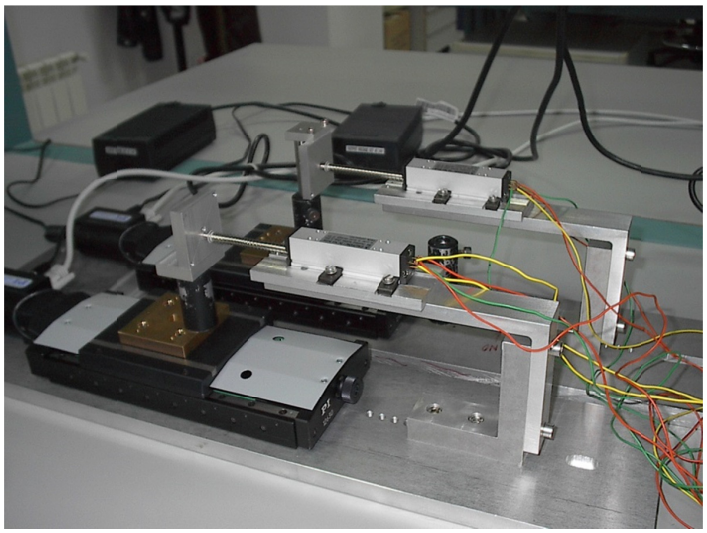


Figura 4.17: *Configuración experimental para la caracterización de los potenciómetros, en el laboratorio de Metrología del IFCA.*

Cómo resultado se obtuvo que la incertidumbre en las constantes de calibración A y C están siempre por debajo del 0.1%. Consiguiendo una precisión final de estos distanciómetros, incluyendo la calibración absoluta entre las 30 µm y 40 µm, con resoluciones por debajo de 10 µm.

4.2.3.2.1. Efectos medioambientales.

Los efectos que pueden tener influencia sobre los resultados de la calibración son magnéticos, térmicos y de radiación.

Se realizaron una serie de ensayos de irradiación sobre diferentes potenciómetros, siguiendo un proceso similar al indicado en los componentes previos, resultando que no se aprecian variaciones de la respuesta del sensor una vez irradiado respecto a las condiciones previas.

También se realizaron test con campos magnéticos, concluyendo que estos potenciómetros son insensibles a los campos magnéticos y gradientes de campo probados.

La influencia que tiene la variación de la temperatura, sobre el cambio de resistencia del potenciómetro y por tanto del voltaje de salida, se anula utilizando la relación entre el voltaje de salida (V1) y el de entrada (Vref).

4.3. Componentes opto-mecánicos.

Este tipo de componentes son los formados por una combinación de dispositivos mecánicos, ópticos y de detección, ya mencionados, dentro del mismo elemento. A los que denominamos 'Laser Box', Detector Box, 'Laser Level', 'Alignment Ring' y la estructura de alineación LINK. A continuación se describirán estos, así como el proceso utilizado para su caracterización.

4.3.1. 'Laser Box' o Caja de luz láser.

Las 'Laser Box' (LB), son uno de los elementos principales del sistema, que cómo ya se mencionó, van fijadas sobre los dos LINK Disc (LD) que el sistema de alineación LINK tiene situados en el interior del detector. El encapsulado de una LB está compuesto por una óptica colimadora modelo FC5-TiFS-NIR de la firma Micro Laser [145], que incide sobre un Prisma Romboide modificado (PR), del que salen 2 rayos paralelos (50 mm de separación), el primario continua hasta un divisor de haz (Beam Splitter (BS)), atravesándolo, produciéndose una pequeña difracción, y continuando radialmente hasta el ASPD situado sobre la Plataforma de Transferencia ME1/1 (TP), continuando hasta el ASPD de la parte inferior del MAB, llegando hasta el ASPD de la parte superior. El secundario se desplaza paralelamente al primario llegando hasta el otro ASPD de la TP, continuando hasta el ASPD de la parte inferior de la CSC de la ME1/2, llegando hasta el ASPD de la parte superior. Sobre el BS incide un rayo con una inclinación de 5.7º, proveniente del AR situado en el TRACKER, que se refleja radialmente, coincidiendo con el rayo primario. En la figura 4.18 podemos ver los componentes que se encuentran en el interior de una LB.

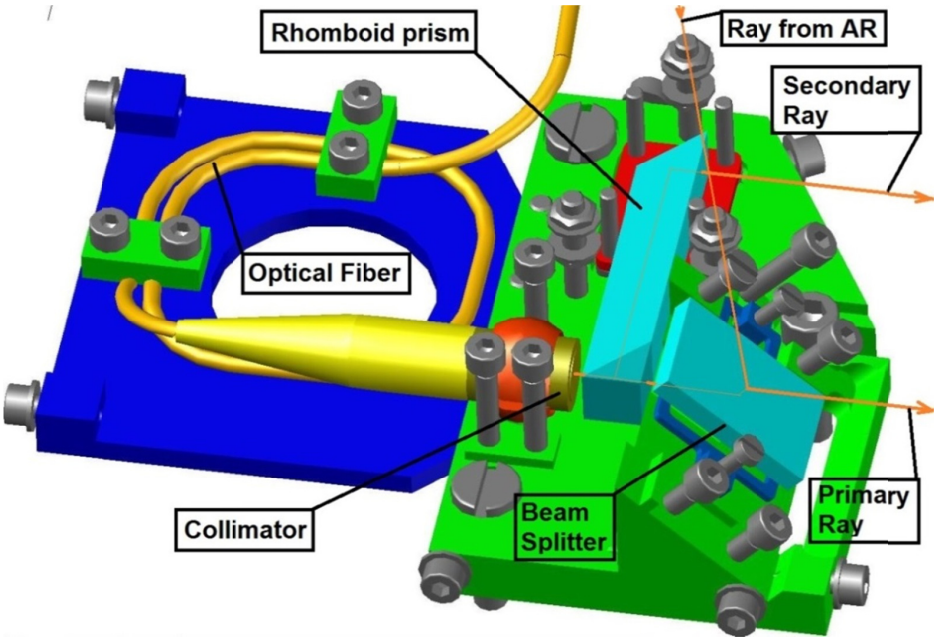


Figura 4.18: *Elementos que componen una Laser Box.*

Todos los componentes metálicos que forman este dispositivo son de aluminio EN AW7075, para evitar dilataciones diferenciales entre elementos de diferentes materiales que puedan provocar distorsiones angulares sobre los elementos ópticos situados sobre éstos. Además se les ha sometido a un proceso de anodizado negro duro, de unas 35 µm de espesor, para evitar en lo posible reflexiones secundarias de la luz.

Los BS fueron fabricados en los 'Optic Laboratories of Pakistan' [203], el material utilizado fue silicio fundido amorfo, que resiste bastante bien la radiación sin sufrir cambios, como ya se ha explicado. Sobre la superficie se ha deposita un tratamiento anti-reflejante para minimizar las pérdidas de intensidad del rayo transmitido y reflejado. Este prisma tiene unas dimensiones de 30 mm × 20 mm y 4 de espesor, con una excelente calidad superficial y un paralelismo entre caras de ±2 segundos de arco.

El PR es también de silicio fundido amorfo, con tratamientos anti-reflejantes en sus superficies. El prisma de base está modificado con otro triangular, para permitir que el rayo del colimador al incidir sobre la superficie del PR, donde está pegado el prisma triangular, refleje un porcentaje de la luz y el resto la deje pasar sin desviación, generando 2 rayos paralelos a 50±0.2 mm y con un paralelismo entre rayos de ~10 µrad. El prisma romboidal tiene unas dimensiones exteriores de 60 × 10 × 10 mm^3 y fue producido en el 'Laboratorio de Optica' del 'Laboratorio de Ensayos', en el antiguo 'Centro de Investigación y Desarrollo de la Armada' (CIDA), en Madrid.

El LB se sometió a un primer pre-ajuste de sus elementos, a sus posiciones nominales, en el laboratorio de Metrología del IFCA, utilizando para ello un banco de calibración preparado a tal efecto. Ajuntando el colimador, PR y BS mediante la manipulación de unos tornillos preparados a tal efecto: El

colimador está montado sobre una rótula, que le permite tener una capacidad de ajuste del rayo en todas las direcciones, alrededor del punto sobre el que pivota; el prisma romboidal va fijado a una estructura flotante, que descansa sobre tres tornillos de regulación, los cuales le permiten tener un pequeño ajusta angular en torno a R y Rφ y un pequeño desplazamiento en la dirección del eje Z de CMS; el BS también tiene una pequeña capacidad de ajuste angular en torno a R y Rφ, mediante unos tornillos de nivelación (Figura 4.19).

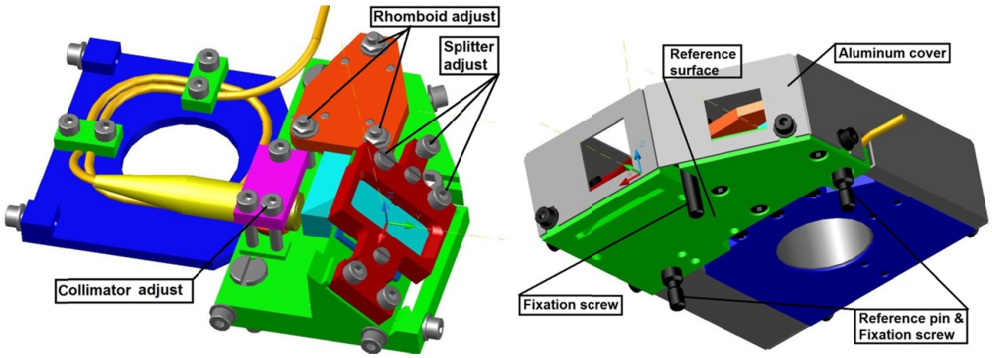


Figura 4.19: *Elementos de ajuste para la calibración y fijación del LB.*

Este dispositivo opto-mecánico terminó de ajustarse una vez instalado sobre la estructura de fibra de carbono LINK Disc, donde van situados en el interior de CMS. El ajuste y calibración final se realizó en el banco de calibración, creado a tal efecto, que se encontraba situado en el 'I4 Hall' de los ISR, en el CERN, ya mencionado en el capítulo anterior (Figura 3.28). El proceso de calibración será explicado más adelante, en este mismo capítulo. Una vez calibrado todos los tornillos fueron sellados con el adhesivo araldit 2011.

Se realizaron una serie de pruebas para medir la estabilidad mecánica del LB, en vistas a estudiar la estabilidad de los rayos, observando una buena estabilidad de estos, que estaba situada entre 10 μrad y 15 μrad. También se observó que la estabilidad frente a perturbaciones externas y vibraciones era buena.

4.3.1.1. Efectos de la irradiación sobre los prismas ópticos y sus uniones pegadas.

Los daños esperados en los vidrios son la creación de defectos en la estructura de su red, por desplazamiento de átomos o atrapamiento de carga por iones. Esto provoca la formación de centros de color, dando lugar a la reducción de la transmisión de luz, que es el llamado efecto Browning, mencionado anteriormente. En los adhesivos se espera que se produzcan roturas de los enlaces en la cadena polimérica (scission) y formación de enlaces adicionales a menudo entre las cadenas rotas (cross-linking), dando lugar a un cambio de sus propiedades mecánicas (cristalización, fragilización, reticulación, rigidez, etc.) y de las propiedades ópticas (pérdida de transmisión).

En vistas a estos posibles daños se desarrolló un estudio encaminado a comprobar la estabilidad de las uniones de vidrios pegados con adhesivos ópticos, así como de sus propiedades ópticas; para garantizar que los rayos

láser de referencia, que el sistema de alineación LINK de CMS proyecta dentro del detector, no se distorsionan, o degradan con el tiempo, por los efectos que la irradiación pueda provocar sobre los vidrios, recubrimientos anti-reflejantes o el adhesivo [204 y 205]. Como se observa en la figura 4.18, en una LB encontramos prismas ópticos, que llevan tratamientos anti-reflejantes en sus superficies y una unión pegada, en el prisma romboidal modificado, (tiene pegado un prisma triangular, para permitir transmitir una parte de la luz incidente y reflejar con un ángulo de 45º el resto).

El estudio ha evaluado el efecto de la irradiación sobre los vidrios ópticos más usuales, centrando los resultados en las posibles pérdidas de transmisión y los efectos sobre el tratamiento superficial. También se ha estudiado el posible efecto distorsionador, que una deformación sobre la unión pegada por efecto de la radiación, puede provocar sobre la dirección del rayo láser y su luz transmitida. Basándonos en los datos del capítulo 2, se han considerado que la óptica del LB, en la región η=3, estará sometida a unas dosis de unos 10 Mrad y 10^{14} neutrones/cm^2 durante los 10 años de vida operacional en CMS.

4.3.1.1.1. Efecto de la irradiación γ sobre los vidrios.

Se han irradiado con dosis de rayos gammas de hasta 10 MRad, en las instalaciones NAYADE del CIEMAT, muestras de 5 tipos de vidrio distintos [204 y 205], Zerodur, BK7, BK7-G18, Silicio Fundido y Silicio Fundido de grado óptico (Cuarzo Sintético). Resultando que el Zerodur y BK7 se volvieron totalmente negro y el Silicio Fundido cambió a gris, con lo cual ya no se realizaron más pruebas sobre estos dos vidrios. En cambio el BK7-G18 y el Silicio Fundido de grado óptico no sufren mucha degradación de sus propiedades ópticas, como se aprecia en la figura 4.20, donde se muestra la Transmitancia y Reflectancia en función de la longitud de onda de la luz incidente. Las mediciones fueron realizadas con un espectrómetro 'Perkin-Elmer Lambda 9' [206] en las antiguas instalaciones del CIDA (Madrid).

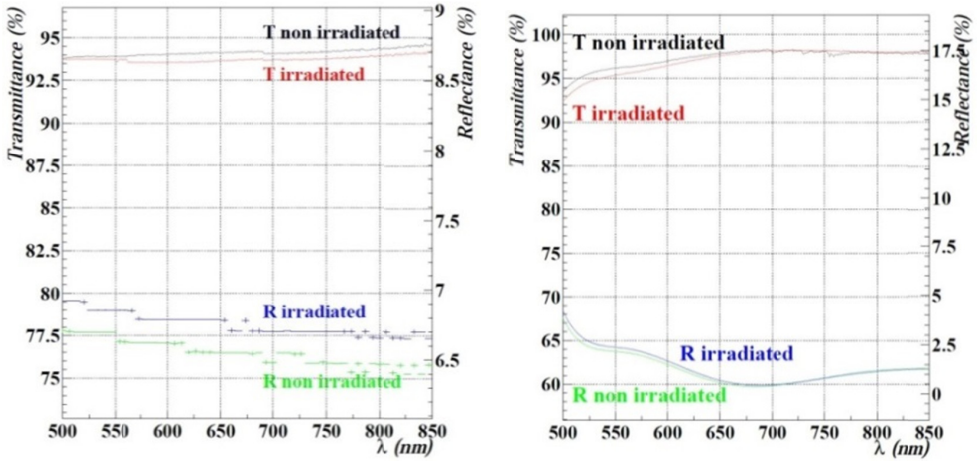


Figura 4.20: Variación de la *Reflectancia y Transmitancia del Silicio Fundido de grado óptico (Izquierda) y del BK7-G18, con triple tratamiento anti-reflejante estándar (Derecha), tras 10 MRad de irradiación.*

4.3.1.1.2. Efecto de la irradiación γ sobre los recubrimientos.

Los recubrimientos anti-reflejantes (Antireflection Coating (ARC)) se utilizan para incrementar la transmitancia de los vidrios. Por el contrario, cuando se quieren utilizar los vidrios cómo espejos se utilizan los recubrimientos reflejantes. Se han irradiado con dosis de hasta 10 MRads muestras de BK7-G18 [204], con un recubrimiento anti-reflejante triple estándar, que han sido medidas de forma similar a las del punto anterior, resultando que no se aprecia degradación en la Transmitancia y Reflectancia de este material con este recubrimiento (Figura 4.20, derecha). Por otro lado también se han irradiado, a los mismos niveles, muestras del mismo material, pero con dos tipos de recubrimientos reflejantes distintos (plata y aluminio), resultando que el recubrimiento de aluminio si se ve afectado por la irradiación, con una degradación máxima del ~6%, mientras que en el de plata no se aprecia degradación, como se puede observar en la figura 4.21, en los rangos de longitud de onda medidos.

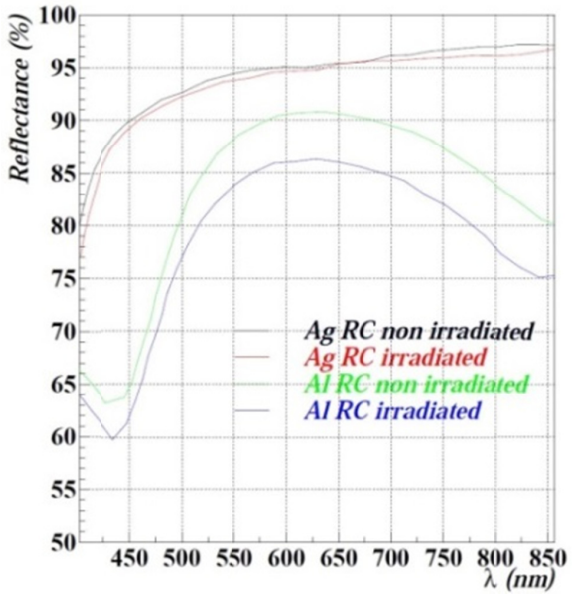


Figura 4.21: *Variación de la Reflectancia de los recubrimientos reflejantes depositados sobre vidrio BK7-G18, tras 10 MRad de irradiación.*

4.3.1.1.3. Efecto de la irradiación sobre los adhesivos ópticos.

Se realizaron dos tipos de comprobaciones, con los adhesivos utilizados en la unión de vidrios ópticos, sometidos a irradiación: la estabilidad de la unión y la pérdida de transmitancia de la luz incidente.

4.3.1.1.3.1. Estabilidad de la unión.

Para estudiar la estabilidad se realizaron dos tipos diferentes de ensayos:

-En primer lugar se realizaron mediciones mecánicas sobre una máquina de medición por coordenadas (MMC), por contacto, en el área de 'Ingeniería de

Procesos de Fabricación' de la Universidad de Cantabria, con una precisión de unas 5 µm, sobre un montaje de vidrios pegados, que formaban un retro-reflector. Este consistía en un prisma rectangular al que se le pegaron en sus extremos 2 prismas triangulares, formando unos 90º entre sus caras de medida (Figura 4.22). El material utilizado fue el BK7 en ambos retro-reflectores y el adhesivo que se utilizó fue el LOCTITE 350 para un retro-reflector y EPOTECNY NOA61 (Norland Optical Adhesive 61) [208] en el otro caso. Este ensayo comenzó realizando una calibración del ángulo que formaban entre sí los dos prismas pegados sobre el prisma rectangular, para ello se realizó una medida en la que se tocaba, con la bola del palpador sobre 9 puntos de cada uno de los dos planos inclinados que forman entre sí los 90º. Calculando la normal del plano. Este proceso se repitió 20 veces.

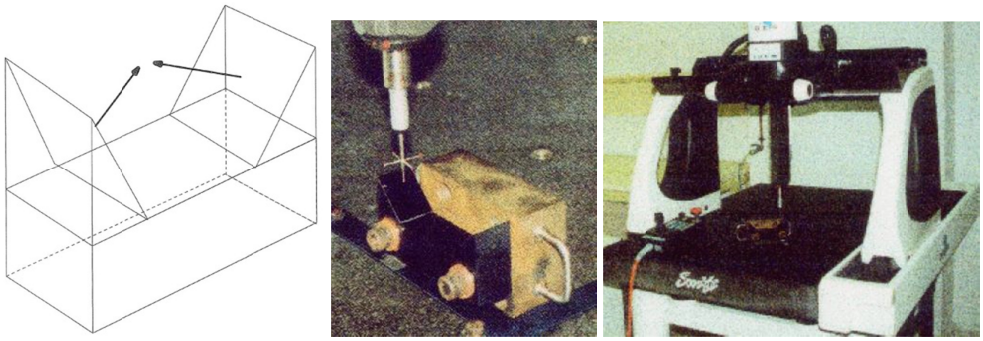


Figura 4.22: *Configuración experimental de la medición por contacto realizada sobre el retro-reflector de BK7. En la figura de la izquierda se encuentran los 3 prismas pegados entre sí que componen un retro-reflector. La figura central muestra la medición del retro-reflector irradiado con 10 MRad. Y la figura derecha muestra la MMC con el retro-reflector sobre su mesa durante una medición.*

En la tabla 4.3 aparecen los resultados de estas medidas. Se han realizado dos medidas idénticas antes de irradiar, con diferencia de varios meses entre ellas, para evitar la repetición de las condiciones ambientales. Tras la irradiación de una dosis de 10 MRad (100KGy) sobre las muestras se ha observado que el ángulo del retro-reflector pegado con LOCTITE varía unos 46 µrad, y el de EPOTECNY unos 56 µrad. Este cambio podría corresponder a una deformación de la unión adhesiva. Para comprobarlo se volvió a irradiar otros 10 MRad la muestra de EPOTECNY, volviendo a realizar de nuevo las medidas sobre ambas muestras, resultando que los valores de LOCTITE siguen iguales en el tiempo y el EPOTECNY ha cambiado 30 µrad con la irradiación adicional, en la misma dirección. Aunque los valores que estamos observando son del mismo orden que el error de la medida, parece evidente que se observa una variación entre los ángulos que forman los prismas pegados. Aunque debido a que los vidrios de BK7 utilizados se volvieron completamente negros, como se observa en la figura 4.22, centro, no podemos discernir si la diferencia de ángulo es debida a una distorsión en la unión adhesiva o a una deformación de la propia estructura del vidrio BK7.

LOCTITE 350			EPOTECNY NOA61		
Dose (kGy)	Angle (µrad)	r.m.s. (µrad)	Dose (kGy)	Angle (µrad)	r.m.s. (µrad)
0	1569554	34	0	1569669	21
0	1569556	31	0	1569678	27
100	1569601	28	100	1569730	44
100	1569600	39	200	1569760	25

Tabla 4.3: *Resultados de la deformación inducida por la irradiación sobre una unión pegada óptica.*

-Para mejorar la precisión de la medida y discernir el origen de la deformación que produce la irradiación se realizó una segunda tanda de ensayos. Que consistieron en medidas ópticas sobre 4 probetas, consistentes en pares de vidrios circulares de 13 mm de diámetro y 1.5 mm de espesor de BK7-G18 y otras 4 con Cuarzo Sintético, rectangulares de 15 mm de lado y 1.5 mm de espesor, que hemos demostrado que resiste la radiación. Estas estaban unidas mediantes 3 adhesivos diferentes (NOA61, LOCTITE 350 y MELTMOUNT) y además se utilizó para la cuarta una técnica de adhesión molecular en vacío. Estas medidas fueron realizadas en el CIDA utilizando un 'gonio-espectrómetro VIS', que consiste en un goniómetro para medidas de precisión de ángulos y un grupo de lámparas espectrales que permiten realizar las medidas en el rango visible (Figura 4.23).

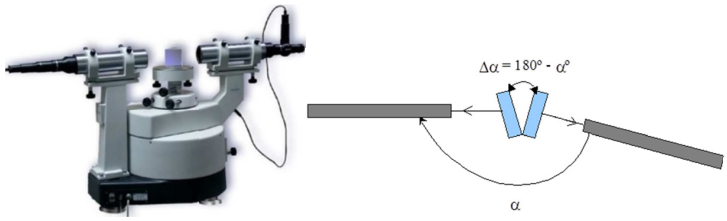


Figura 4.23: *Gonio-espectrómetro VIS y esquema de la medida realizada sobre las probetas circulares y rectangulares de BK7-G18 unidas con diferentes sistemas adhesivos.*

El proceso de medida se basa en el método de un auto-colimador, usando una cámara CCD. Es un método para medir pequeñas desviaciones angulares. Un pequeño cambio del ángulo entre el eje óptico del auto-colimador y la superficie de medida da lugar a un ensanchamiento medible de la imagen del auto-colimador. El telescopio del auto-colimador proyecta la imagen de una retícula en un haz paralelo (haz colimado), sobre la superficie a medir, que refleja el haz de vuelta hacia el auto-colimador. Esta es la imagen auto-colimada.

Si la superficie a medir es perpendicular al eje óptico, el haz se refleja de nuevo sobre el mismo, pero si tiene un pequeño ángulo de inclinación (Δα), el haz relejado desciende sobre la lente del auto-colimador con un ángulo α. Dependiendo de la inclinación del haz reflejado, la imagen auto-colimada se desplazará más o menos.

Mediante la rotación del auto-colimador sobre el eje del goniómetro, se suministra un valor angular del desplazamiento de la imagen auto-colimada. Permitiendo obtener el ángulo $\Delta\alpha = 180 - \alpha$.

Los resultados de las medidas aparecen en las tablas 4.4 y 4.5, en las que los errores de las medidas se calcularon según la ISO/IEC Guide 98-3:2008 (Guide to the expression of uncertainty in measurement).

En este caso se aplicaron dosis de hasta 15 MRad de gammas, en escalones de 5 MRad.

Dose (kGy)	NOA61	LOCTITE350	MELMOUNT	VACUUM
0	700.1 ± 2.4	784.5 ± 2.4	961.9 ± 3.4	2136.3 ± 2.4
50	700.6 ± 2.4	785.7 ± 2.4	996.8 ± 3.4	2139.3 ± 2.4
100	699.2 ± 2.4	785.2 ± 2.4	996.6 ± 3.4	2138.4 ± 2.4
150	701.6 ± 2.4	786.4 ± 2.4	996.8 ± 3.4	2138.9 ± 2.4

Tabla 4.4: *Resultados de las medidas ópticas de deformación (en µrad), producida por la irradiación sobre la unión adhesiva, en BK7-G18.*

Dose (kGy)	NOA61	LOCTITE350	MELMOUNT	VACUUM
0	1332.2 ± 6.3	2815.7 ± 6.9	431.0 ± 8.0	333.5 ± 7.6
50	1313.7 ± 6.0	2817.8 ± 6.9	421.3 ± 7.6	330.3 ± 7.6
100	1315.1 ± 6.0	2827.1 ± 7.4	420.6 ± 7.4	333.1 ± 6.9
150	1313.8 ± 6.0	2826.0 ± 7.6	420.8 ± 7.6	339.9 ± 6.9

Tabla 4.5: *Resultados de las medidas ópticas de deformación (en µrad), producida por la irradiación sobre la unión adhesiva, en Cuarzo Sintético.*

Para las probetas de Bk7-G18 (Tabla 4.4), podemos concluir que no se aprecia cambio por la radiación excepto en el caso de la unión adhesiva con MELMOUNT, que se produce un pequeño giro de unos 35 µrad, en el primer escalón de la irradiación, manteniéndose constante en los siguientes.

En el caso de las probetas de Cuarzo Sintético (Tabla 4.5), se aprecian pequeños cambios, pero que son compatibles con la incertidumbre de las medidas realizadas en las uniones con LOCTITE, MELTMOUNT y VACUUM. Para el NOA61, puede observarse un cambio de unos 19 µrad, tras el primer escalón de la irradiación, manteniéndose constante durante el resto de la dosis.

Es necesario precisar, sobre la adhesión molecular, que es un método difícil de utilizar para probetas de cierto tamaño, y reseñar que una de las probetas VACUUM se despegó durante su manipulación, con lo que este método se desechó.

4.3.1.1.3.2. Transmitancia del adhesivo bajo irradiación γ.

Sobre las muestras anteriores, utilizadas para la medida óptica de deformación, se realizaron medidas de la transmitancia de la luz, antes y después de la irradiación, utilizando el espectro-fotómetro Perkin Elmer del CIDA.

Los resultados se muestran en las figuras 4.24 y 4.25 para el rango de longitud de onda entre 400 nm y 900 nm.

En el caso de las probetas de BK7-G18, se observa un pequeño cambio en la absorción a baja longitud de onda, tras el primer escalón de irradiación, pero como este efecto también aparece en el caso de la probeta adherida mediante adhesión molecular, es de suponer que este efecto es debido a cambios en el vidrio y no en el adhesivo. En los otros dos escalones no se observa un apreciable cambio de transmitancia.

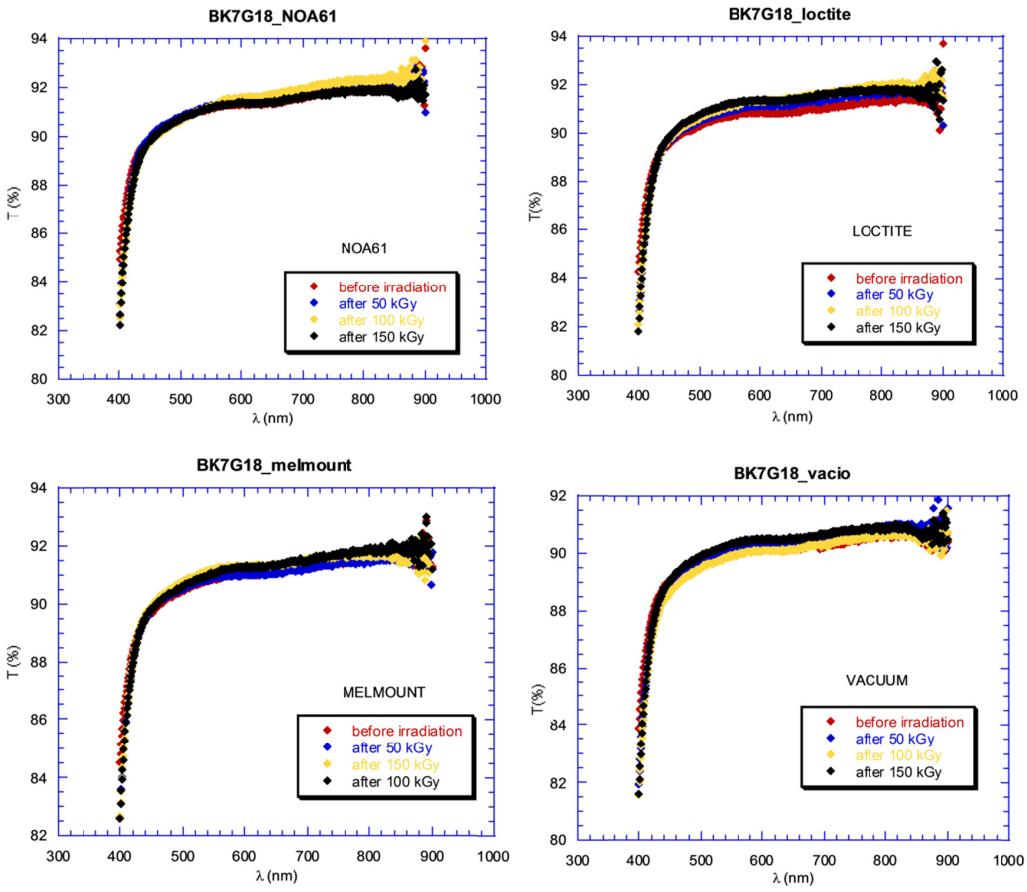


Figura 4.24: *Transmitancia (en %) de las probetas de BK7-G18 unidas mediante diferentes métodos adhesivos, en función de la longitud de onda, para varios niveles de irradiación.*

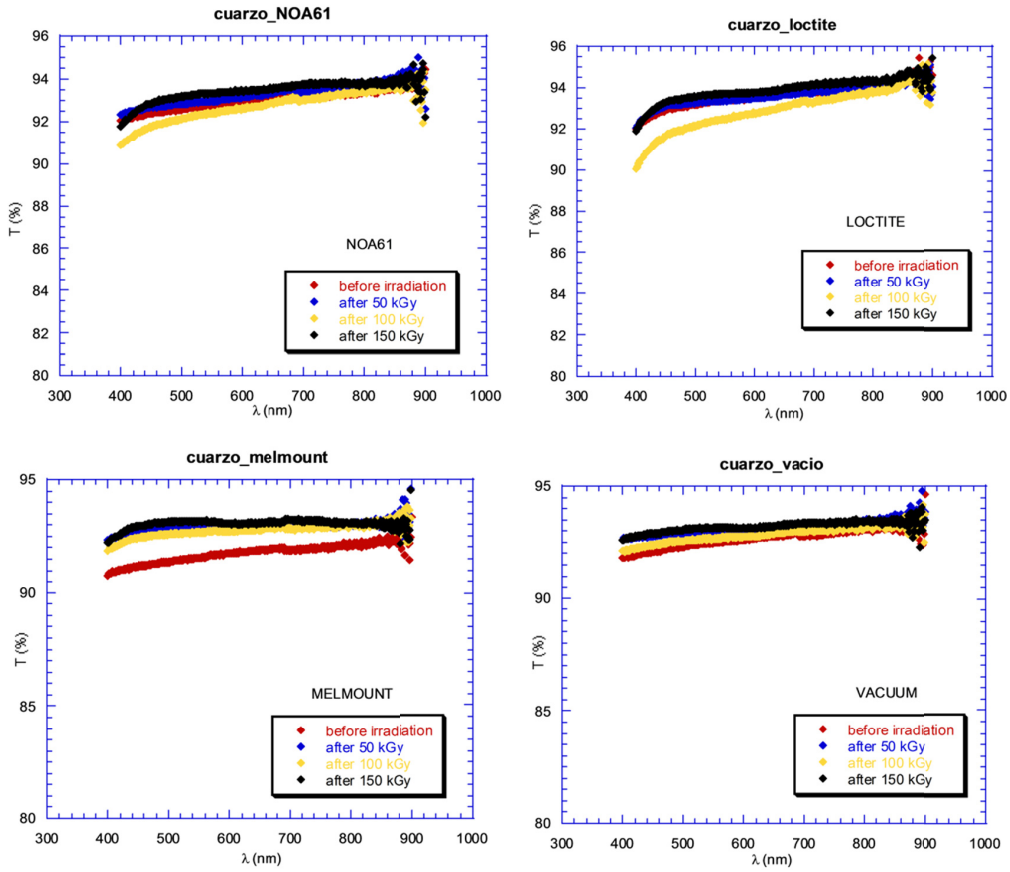


Figura 4.25: *Transmitancia (en %) de las probetas de Cuarzo Sintético unidas mediante diferentes métodos adhesivos, en función de la longitud de onda, para varios niveles de irradiación.*

En el caso de las probetas de Cuarzo Sintético, y para las que se ha utilizado un adhesivo, se observa un cambio a bajas longitudes de onda según se acumula irradiación, cuya tendencia indica una uniformidad de la medida de la transmisión hacia altas longitudes de onda. Y como en el caso de la adhesión molecular, no se aprecia cambio significativo en todo el rango, el cambio que se produce en las uniones mediante adhesivo, puede deberse muy probablemente a cambios en el adhesivo utilizado y no en el vidrio.

En todos los casos la transmitancia está por encima del 90 %, con variaciones del ~1% en sus propiedades. Lo que significa que ni los vidrios ni los pegamentos forman centros de color en su estructura debido a la irradiación, para las dosis ensayadas de 15 MRad.

4.3.1.1.3.3. Transmitancia del adhesivo frente a irradiación con rayos γ y neutrones.

Para complementar el estudio anterior se ha realizado otro [205], en el que utilizando los vidrios que no se ven afectados por la irradiación (Cuarzo Sintético y BK7-G18), se han pegados entre sí mediante el adhesivo NOA61, LOCTITE y MELTMOUNT. En este ensayo las probetas fueron irradiadas

primero con gammas y a continuación con neutrones. Las dosis de gammas fueron de hasta 15 MRad, en escalones de 5 Mrad y una fluencia total de neutrones de $5 \times 10^{14} \pm 37\%$ cm^{-2}, de una sola irradiación.

El resultado fue que para ambos tipos de vidrios de las probetas, la transmitancia varía menos del 2 %, después de toda la dosis recibida, respecto a las probetas sin irradiar, en todo el rango de longitud de onda medido entre 500 y 800 nm, manteniéndose la transmitancia siempre por encima del 90 % en todas las probetas ensayadas, para las dosis totales recibidas de γ y neutrones. En las figura 4.26 se muestran, como ejemplo, los resultados para dos tipos distintos de probetas pegadas con distintos adhesivos.

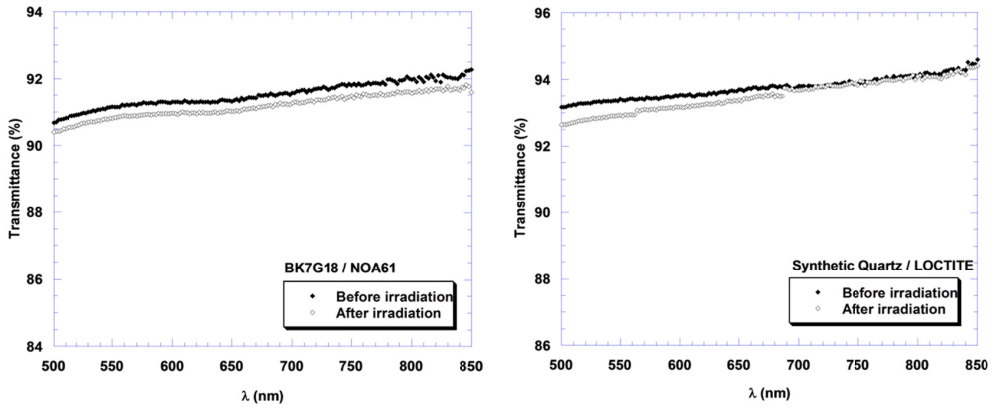


Figura 4.26: *Transmitancia (en %) de las probetas de BK7-G18 unidas mediante NOA61 (izquierda) y Cuarzo Sintético unidas mediante LOCTITE (derecha), en función de la longitud de onda, para 15 MRad y una fluencia total de neutrones de $5 \times 10^{14} \pm 37\%$ cm^{-2}.*

En vista de los resultados de todos estos estudios, y teniendo en cuenta que la longitud de onda que se utilizará en el sistema de alineación LINK de CMS son 681 nm, se decidió utilizar el Cuarzo Sintético y cómo pegamento óptico el NOA61 (Norland Optical Adhesive 61).

4.3.2. 'Detector Boxes' o Cajas de detección.

Denominamos como 'Detector Box' (DB) al encapsulado opto-mecánico de detección, compuesto por un ASPD referenciado a una estructura de aluminio EN AW 7075, con un tratamiento superficial de anodizado negro duro de unas 35 µm, que lleva una serie de marcas de referencia fiduciales, tanto para referenciar el ASPD a la mecánica, cómo para luego poder referenciar este conjunto respecto al sistema de referencia CMS. Protegiendo al ASPD se sitúa una cubierta de aluminio EN AW5754, recubierta con el mismo tratamiento.

La referenciación del ASPD respecto a la mecánica donde va fijado se realizó, en el Laboratorio de Metrología del IFCA, utilizando la combinación entre una máquina de medición por coordenadas por visión (QUICK SCOPE QS200Z) de la firma Mitutoyo [202], que daba la posición de las tiras de electrodos del ASPD, tomando el sistema de referencia local de la figura 4.27 [186], respecto a una referencia sobre la mecánica, que consiste en unos agujeros precisos de

ajuste H7 (Figura 4.27, derecha), realizados sobre una cara de la mecánica, paralela al sensor. Realizándose esta calibración con una precisión mejor de 5 µm, en el eje X e Y local y 10 µm en Z.

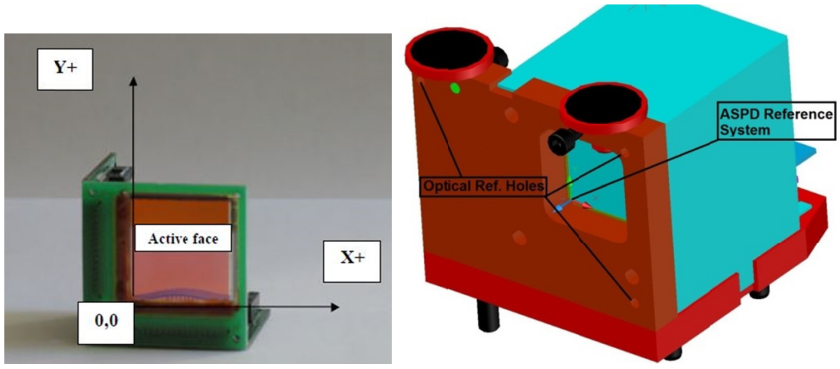


Figura 4.27: *Sistema de referencia local del ASPD (Izquierda). Encapsulado de un Detector Box, perteneciente a la posición ME1/2 top, lado Z+ (Derecha).*

Seguidamente se realizaba la referenciación, en el mismo laboratorio del IFCA, del resto de puntos de referencia de la mecánica, respecto a los tres agujeros del sistema de referencia óptico, mediante la Máquina de Medición por Coordenadas (MMC), modelo CRYSTA-PLUS 574 de la firma Mitutoyo [202], con una precisión de unas 5 µm. Estos puntos de referencia, son los agujeros de precisión utilizados para montar la mecánica con precisión sobre el elemento donde se fija sobre CMS y los agujeros para los 'target' de referencia, utilizados para realizar la trasposición del sistema local del DB hasta el sistema global de CMS (Figura 4.28).

Todos los DB han sido finalmente referenciados respecto al sistema global de CMS, por la Sección de Large Scale Metrology (EN/MEF-SU) del CERN [46]. Los procedimientos de referenciación y resultados se encuentran en los siguientes documentos [135, 136, 137, 138, 139 140 y 141], las precisiones están en torno a las 300 µm.

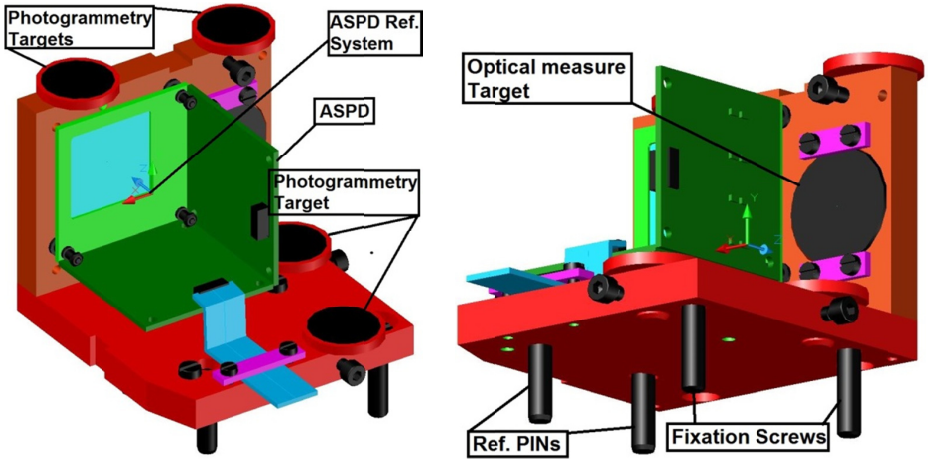


Figura 4.28: *Encapsulado de un Detector Box, perteneciente a la posición ME1/2 top, lado Z+, mostrando sus elementos y puntos de referencia.*

Estas cajas de detección van situadas en diferentes localizaciones de CMS como ya se ha descrito, siendo diferentes en cada una de las disposiciones:

-ME1/2: sobre estas se sitúa un DB sobre la posición inferior de la CSC y otro en la parte superior de esta, según aparecen en la figura 4.29, estos corresponden a al lado +Z del detector. Los del lado –Z son una imagen especular respecto a la base sobre la que se fijan a la CSC, esta es la superficie que se apoya sobre los espaciadores de la figura, menos el ASPD, que únicamente sufre un cambio de ejes, rotándose 90º según su eje local Z, puesto que todos los ASPDs de CMS son idénticos. El de la posición inferior lleva un espaciador de 4.6 mm, mientras que el de la posición superior lo lleva de 12.6 mm, estos sirven para compensar el movimiento relativo en Z que se produce, por efecto del campo magnético, en las posiciones de la YE1 donde van fijadas la CSC sobre las que se instalan los DBs. El DB de la posición superior lleva una lámina de vidrio de protección para el ASPD, de Cuarzo Sintético de 35 mm × 38 mm y espesor de 1 mm, pegado sobre una carcasa de aluminio EN AW 7075 mediante el adhesivo Araldit 2011.

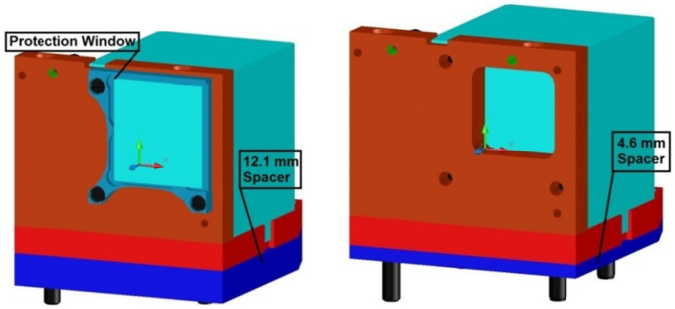


Figura 4.29: *Encapsulado de un Detector Box, perteneciente a la posición ME1/2 top, lado Z+ (Izquierda) y a la posición ME1/2 bottom, lado Z+ (Derecha).*

-MAB: sobre esta estructura se sitúa un DB en la posición inferior del MAB y otro en la parte superior de esta, siendo ambos idénticos, según aparece en la figura 4.30, que corresponden al lado +Z del detector. Los del lado –Z son una imagen especular respecto a la base, donde se fijan al MAB, menos el ASPD, que únicamente sufre un cambio de ejes, rotándose 90º según su eje local Z.

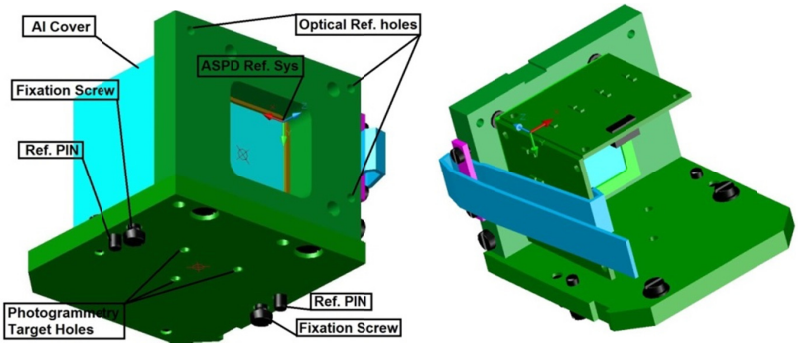


Figura 4.30: *Encapsulado de un Detector Box, perteneciente a la posición MAB, lado Z+.*

-ME1/1 Transfer Plate (TP): en cada una de las TPs se encuentran dos ASPDs, dispuestos según la figura 4.31, que se corresponde con las del lado +Z del detector. En el caso de la figura, el sensor de inclinación (2D 900H) está colocado para estar operando en la posición angular φ=75º. Este inclinómetro, que realiza la medida absoluta de su encapsulado respecto al vector de la gravedad, y que ha sido previamente calibrado en el laboratorio [197], va montado sobre una pieza en forma de L (representada en color verde en la figura) que lleva una serie de agujeros referenciados, para cada posición angular, en los que se insertan los pasadores cilíndricos de precisión que lleva el encapsulado del inclinómetro. Las TPs del lado –Z son una imagen especular respecto al plano XY de CMS (o ZX local del ASPD), menos los ASPDs, que únicamente sufre un cambio de ejes, rotándose 90º según su eje local Z.

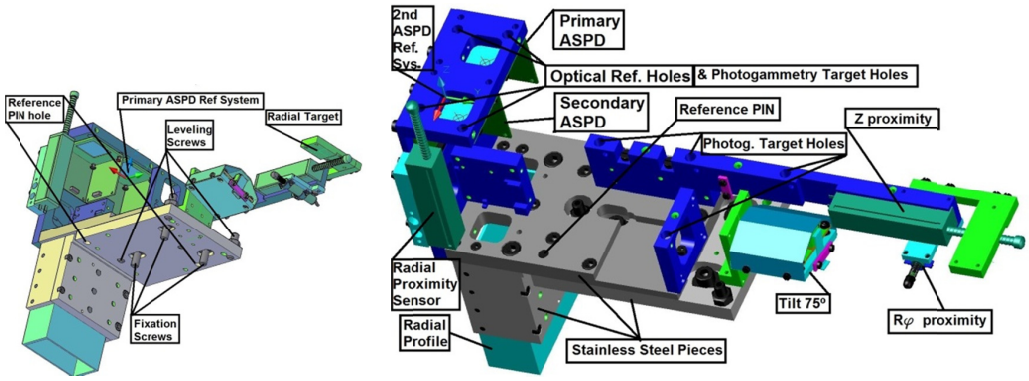


Figura 4.31: *Encapsulado de una TP, perteneciente a la posición 75º, lado Z+.*

4.3.3. 'Laser Level' o Nivel laser.

Denominamos 'Laser Level' (LL) a un montaje opto-mecánico que se instala sobre los MABs, compuesto de piezas de aluminio EN AW7075, unidas entre sí por tornillería de aluminio, para evitar deformaciones provocadas por las dilataciones diferenciales, sobre las que está montado un inclinómetro 1D M756-1172 (además de una sonda de temperatura y dos de campo magnético, montados sobre este) que realiza medidas respecto a φ y un colimador FC5-TiFS-NIR, todo ello protegido por una cubierta de aluminio EN AW 5754 (Figura 4.32). El inclinómetro va montado sobre una pieza de aluminio EN AW 7075, mediante dos pasadores de precisión que encajan en unos agujeros H7 realizados sobre esta pieza, en esta pieza se encuentran preparados agujeros para poder colocar el inclinómetro en la orientación necesaria, según la posición angular φ que ocupe en CMS. Cada inclinómetro, montado sobre los MAB, ha sido previamente calibrado en el laboratorio [197], respecto a su encapsulado mecánico.

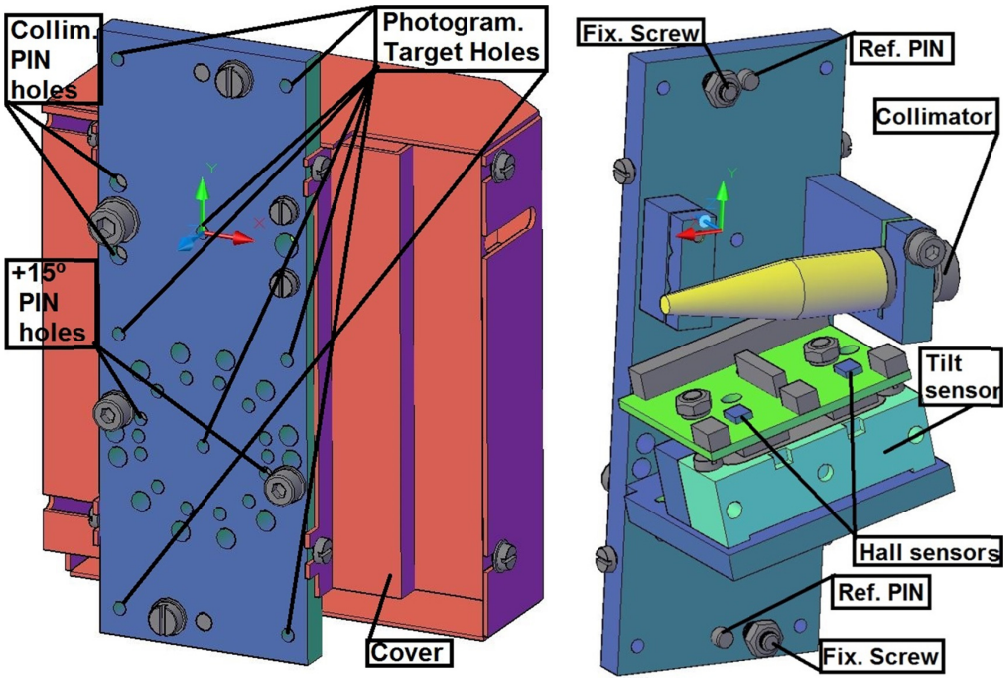


Figura 4.32: *Encapsulado de un LL, perteneciente a la posición 15º, lado Z+.*

Este sistema, una vez se ha sellado su tornillería con Araldit 2011, mantiene una relación entre el haz emitido por el colimador y el ángulo que mide el inclinómetro. El rayo va a incidir por la parte trasera sobre los dos ASPDs montados sobre el MAB (top y bottom) y continúa teóricamente sobre la misma posición del rayo primario hasta incidir sobre el ASPD primario situado en la TP. Con este sistema se pueden desacoplar deformaciones locales internas de los MAB entre la posición del LL y los ASPD, de movimientos de la estructura MAB completa.

Las LLs del lado –Z son una imagen especular respecto al plano XY de CMS, menos los inclinómetros, que únicamente sufre un cambio en el sentido del eje de medida, rotándose 180º según el eje vertical Y de CMS.

En el banco de calibración (Figura 3.8) del laboratorio de los ISR, ya comentado en el capítulo anterior [69], se ha realizado una referenciación de las marcas fiduciales del LL (Photogrammetry Targets) respecto al resto de dispositivos situados sobre el MAB, relacionando todas las marcas de referencia de los dispositivos montados sobre el MAB entre sí y con las referencias de las estructuras MAB. El resultado son las posiciones relativas de todos los dispositivos instalados sobre los MABs, respecto a un sistema de coordenadas local del MAB, con precisiones de ~100 µm, cuyos valores pueden encontrarse en Ref. [207]. En la figura 4.33 (izquierda), aparece un LL montado sobre un MAB durante una de estas medidas, en la que se aprecian los 'Photogrammetry Targets' utilizados para realizar esa medición.

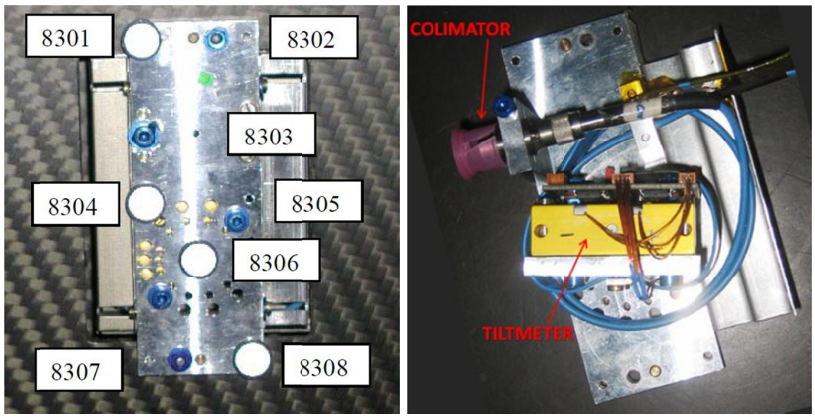


Figura 4.33: *LL de la posición 135º, lado +Z, instalado en su MAB, durante el proceso de referenciación mediante fotogrametría digital (izquierda). Encapsulado de un LL, perteneciente a la posición 15º, lado –Z (derecha).*

Todos los MABs han sido finalmente referenciados respecto al sistema global de CMS, por la Sección de Large Scale Metrology (EN/MEF-SU) del CERN [46], con unas 300 µm de precisión. Los procedimientos de referenciación y resultados se encuentran en los siguientes documentos [138, 139, 140 y 141].

4.3.4. Estructura de alineación del sistema LINK.

Denominamos 'estructura de alineación' del sistema LINK (Figura 4.34), al conjunto de sub-estructuras y componentes que el Sistema LINK tiene en la región del Tracker, η=3, YN1 y ME1/1, formando una especie de superestructura, interrelacionada, que abarca todas esas regiones. Básicamente se compone de: Alignment Ring (AR), LINK Disc (LD), perfiles longitudinales (LP), perfiles radiales (RP), y Plataforma de Transferencia ME1/1 (TP). En el capítulo 3 ya se han descrito los componentes que forman esta estructura y cómo realizan la transferencia de la medida desde la región del TRACKER hasta la región ME1/1. En esta sección se va a incidir en el desarrollo y descripción de la estructura y la calibración de los componentes.

La geometría del sistema está basada en 6 planos RZ diferentes (Figuras 3.1 y 3.16) fundamentados en los 3 tipos distintos de caminos de luz (Figura 3.27), todo ello ya explicado en el capítulo 3.

Para la región del TRACKER, se desarrolló una estructura rígida (AR) que cumpliera con la función de contener y mantener relacionados entre sí los 6 rayos producidos en el TRACKER (ray 4) (Figuras 3.2, 3.4 y 3.5), que parten de 6 colimadores (modelo FC5-TiFS-NIR) instalados en el AR, sobre unos dispositivos mecánicos de aluminio EN AW7075, con capacidad de regulación angular de los rayos. Estos rayos corresponderían al camino de luz definido cómo 'AR Laser'. El AR, es una estructura que está fijada rígidamente al BD del TRACKER a través de 3 'Pillars' y referenciada a este, que además contiene, cómo ya se ha explicado, 3 inclinómetros (modelo 2D M756–1150) y 3 distanciómetros (modelo 18FLPA50).

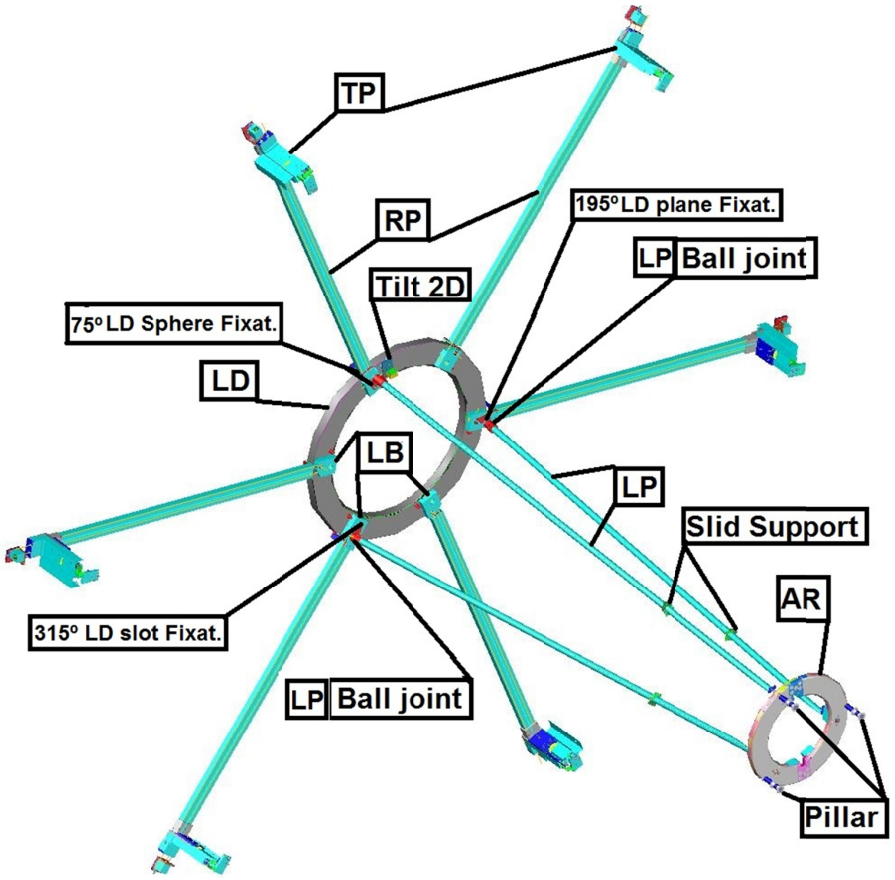


Figura 4.34: *Estructura de alineación del sistema de alineación LINK de CMS.*

Desde el AR, que funciona como un elemento desacoplado mecánicamente del resto de la estructura de alineación, se continúa la transferencia de medida a través de los LP, el LD, el RP y la TP, hasta llegar a la región de la ME1/1 y ME1/2. Estos últimos componentes sí están acoplados mecánicamente entre sí formando una estructura propia flotante, que está fijada al ENDCAP de CMS, a través de las TPs de las posiciones 75º, 195º y 315º. Las TP de las posiciones 15º, 135º y 255º, así como sus correspondientes RP, están desacoplados mecánicamente del resto de la estructura, pero sirven para transferir parte la medida.

La función principal de esta estructura flotante es la transferencia de la medida desde el Tracker a la zona de ME1/1, ME1/2 y la sustentación de forma isostática del LD, sobre el que se encuentran las 'Laser Box' (LB) donde se producen 6 sistemas de rayos laser, relacionados entre sí, definidos cómo camino de luz 'LD Laser'. El LD se encuentra sustentado sobre 3 fijaciones, que van sobre el extremo inferior de los RP, la principal con 3 grados de libertad de rotación en la posición de 75º (fijando 3 grados de libertad de desplazamiento), es una rótula de aluminio AW6082 con un recubrimiento de anodizado duro negro, para evitar desgaste por la fricción; en la posición de 195º se encuentra otra que permite 3 grados de libertad de rotación, y los desplazamientos libres dentro del plano del LD (fijando 1 grados de libertad de

desplazamiento, en la dirección perpendicular al plano del LD (la Z de CMS)); y por último se encuentra, en la posición de 315º, la que permite 3 grados de libertad de rotación, y un desplazamiento en una dirección (que forma 30º con el eje X de CMS) dentro del plano del LD (fijando 2 grados de libertad de desplazamiento (la Z y la perpendicular a la dirección de desplazamiento permitido en el plano del LD)). Los RP van fijados sólidamente a las TPs, y estas, están fijadas rígidamente sobre la zona superior del hierro de las YN1, mediante 3 tornillos de M8, además dispone de otros tres tornillos para nivelación sobre la superficie del YN1 (Figura 4.31), de forma que, mediante la actuación sobre estos tornillos en las TPs de las posiciones de 75º, 195º y 315º, se puede conseguir colocar el LD en su posición nominal de montaje en CMS, mediante un proceso de ajuste iterativo, apoyándose principalmente en la lectura que suministran los ASPDs situados sobre las TPs y las CSCs de la región ME1/2, al ser atravesados por los rayos láser que surgen en las LB del LD (camino de luz 'LD Laser'). De esta forma se intentará dejar el LD en la posición en la que los rayos estén incidiendo sobre los ASPDs lo más cerca posible a la posición nominal de instalación. Siendo estas posiciones teóricas: para los ASPDs de la TP, los haces deben estar incidiendo centrados en el área activa de estos; en los ASPDs de la posición inferior de la ME1/2, los haces han de estar centrados sobre el área activa del sensor; y en los ASPDs de la posición superior de la ME1/2, los haces deben incidir centrados en la coordenada Rφ y descentrada 7.5 mm hacia el exterior del detector en Z.

Para poder realizar el ajuste y calibración de los diferentes dispositivos y estructuras del sistema de alineación de CMS, así como la referenciación de unos componentes respecto a otros, se ha desarrollado un gran sistema de bancos de calibración en la zona del CERN denominada 'I4 ISR Hall', ya mencionada en el capítulo 3 (figura 3.28), formando una red geodésica de puntos, que ha sido caracterizada por el equipo de geómetras del CERN, pertenecientes a la unidad denominada 'Sección de Large Scale Metrology' (EN/MEF-SU) [47]. El lugar fue escogido por ser una zona con un suelo muy firme, térmicamente muy estable (el laboratorio se encuentra semienterrado), y que no tiene flujos de aire. Además es un área de acceso restringido, por la utilización en su interior de diversos diodos láser de categoría 3B. En la figura 4.34A, podemos ver la disposición de los bancos de calibración. Hay una zona reservada para el sistema de alineación BARREL y para la calibración interna de los diferentes MABs que componen el sistema (Figura 3.8). Además dispone de un área reservada para el sistema LINK (Figura 3.28), en el que se realizó la calibración y referenciación de los ARs, LDs, LPs y TPs, para lo que se creó el sistema calibración de referencia que aparece en la figura 4.34B. El sistema fue medido mediante un Dispositivo Láser Tracker (LTD), modelo LTD 500, que permitía obtener las coordenadas de los puntos espaciales con una precisión de 70 μm [84 y 85], siendo su estabilidad a lo largo de los dos años aproximados de utilización de unos 100 μm.

Dentro del área LINK, se encuentran dos zonas, la primera para realizar la calibración interna de cada AR, en la que se crearon 12 puntos, y una segunda donde podemos hacer la calibración interna del LD y su referenciación respecto a su AR, con 34 puntos.

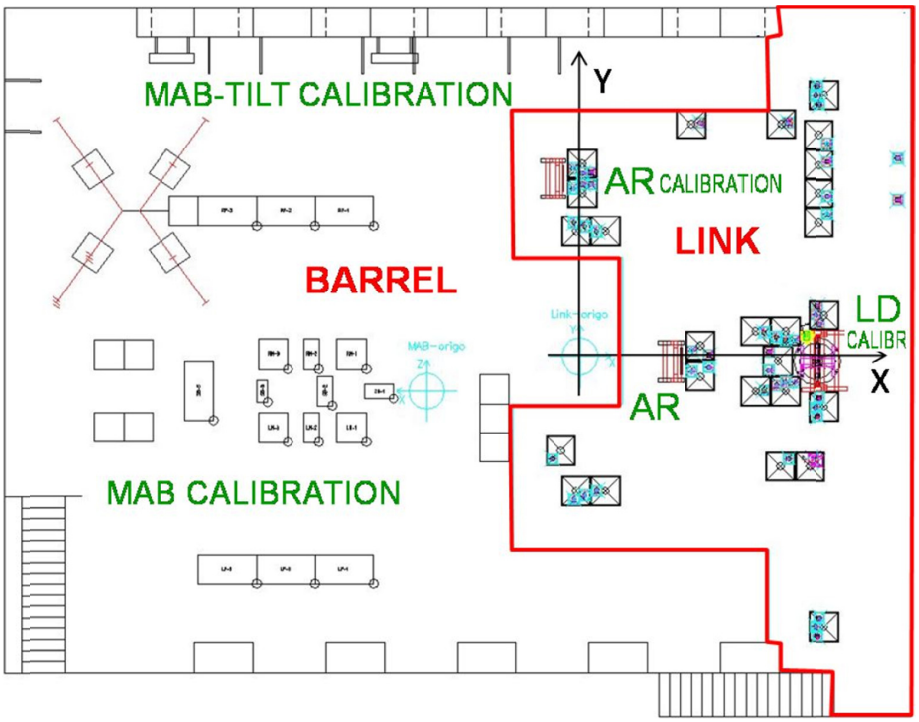


Figura 4.34A: *Distribución de los Bancos de Calibración situados en el área de los ISR, para el sistema de alineación BARREL y LINK.*

Los puntos creados se basan en un estándar CERN, que hacen referencia al centro de la esfera de Taylor-Hobson (Ø=88.90 mm); los diferentes dispositivos de medida utilizados para la medición de los puntos y luego para la calibración del AR y LD, pueden ser reposicionados sobre el centro de esa esfera con unas 10 µm de precisión.

Para crear esa red de puntos de referencia, se sitúan sobre unos bloques de hormigón una serie de dispositivos mecánicos, sobre los que se montan los denominados 'Socket standard CERN' que acaban en un asiento esférico (esfera de Taylor-Hobson) de 88.90 mm y un agujero central calibrado H7 de Ø30 mm (Figura 4.34C, Izq.). Sobre estos asientos encajan los dispositivos de medida y calibración, como son el 'Target' utilizado para la medición de la red geodésica con la ayuda del Laser Tracker (Figura 4.34C, Der.) y el fotodetector matricial semitransparente referenciado (Figura 4.34C, Cent.), que es utilizado para leer la posición de los rayos láser que parten del AR y LD respecto a los puntos de la red creada. Cada fotodetector utilizado en esta referenciación fue posicionado y referenciado respecto a su mecánica de la esfera de Taylor-Hodson con unas 30 µm de precisión (calibrados en el laboratorio de metrología del IFCA). De esta forma se puede reconstruir la posición relativa entre los diferentes rayos, proceder a su ajuste hacia las posiciones nominales y posteriormente realizar una calibración relativa entre los diferentes rayos del AR y LD, tras su sellado final con Araldit 2011.

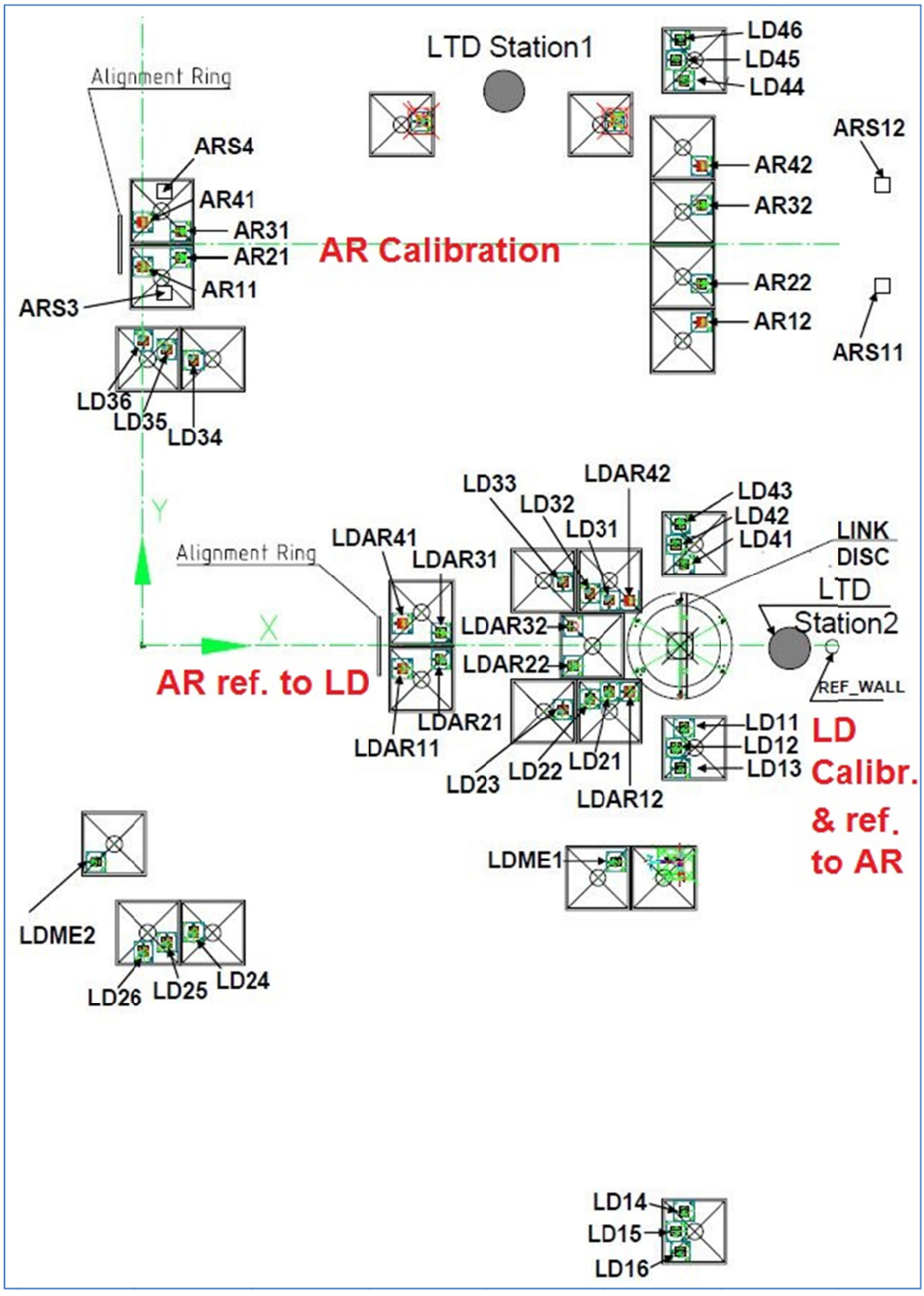


Figura 4.34B: *Banco de Calibración del sistema de alineación LINK en los ISR.*

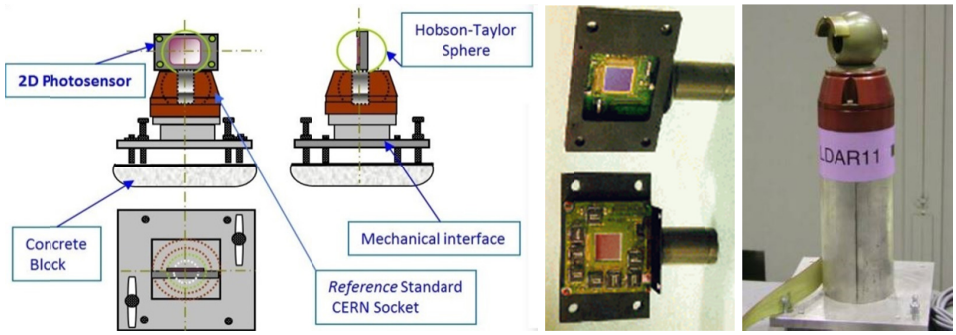


Figura 4.34C: *Estándar 'socket' del CERN, montado sobre una mecánica interface de regulación, que va fijado sobre hormigón (Izq.). Montaje de un fotodetector matricial 2D para ser utilizado en el posicionamiento de rayos láser respecto al centro de la esfera de Taylor-Hobson de los 'socket' CERN (Cent.). 'Target' utilizado para la medición de la red con el Laser Tracker (Der.).*

Los fotodetectores utilizados para la medición de la posición de los rayos láser, fueron de la primera generación, con un área activa de 20× 20 mm^2, tienen la misma resolución intrínseca que los ASPDs nuevos, unos 5 µm, pero se comportan peor en términos de deflexión, por lo que no se han utilizado varios en línea durante las calibraciones, solamente uno midiendo sobre cada haz, y cambiándolo a la posición cercana o lejana de la red geodésica de cada haz, para conseguir una recta en el espacio del haz detectado sobre los fotodetectores.

Los ARs y LDs se montaban sobre una estable estructura de aluminio, sobre la que descansaba sin introducir tensiones sobre estos. Con esta se podían rotar ambos. Además se disponía de un sistema de ajuste micrométrico en plano, para llevar las estructuras (AR o LD) a su posición nominal con la ayuda de una estación total, ante de cada paso del procedimiento de calibración, con una precisión de medida de unas 300 µm. Se utilizaban una sería de sensores de temperatura, distribuidos por el área de medida, para controlar los posibles efector térmicos.

Cada AR y LD, se equipó con sus colimadores y óptica asociada sobre su mecánica correspondiente. Además se utilizaron sus inclinómetros para ayudar en la tarea de ajuste y calibración, para ellos se creó una mecánica intermedia de adaptación, a las diferentes posiciones angulares que se iban a utilizar durante el proceso.

Durante el proceso de calibración, se complementaban las medidas con la ayuda de fotogrametría digital, que conseguían precisiones de unas 50 µm, para ello a parte de los agujeros de referencia que tienen estas estructuras, se añadieron una pegatinas codificadas, con un espesor de 0.1 mm, sobre la superficie de las estructuras.

En esta misma área de los ISR, anteriormente se habían realizado una serie de ensayos conducentes a validar el principio de medida del sistema de alineación de CMS, con los componentes que tenía el sistema en aquel momento, que difiere en algunas zonas respecto al sistema finalmente instalado en CMS.

Mediante estos ensayos se consiguió la validación del funcionamiento de un cuadrante ZR del sistema LINK [212] y se realizó el llamado 'Test Integrado del subsistema de Alineación', en el que se validó el funcionamiento del LINK con los subsistemas BARREL y ENDCAP, abarcando en este ensayo dos cuadrantes del mismo plano y lados opuestos [213, 214 y 215].

La realización de estos largos y complejos procesos de ajuste y calibración desarrollados en los ISR del CERN, que se describirán a continuación, me ha llevado a permanecer en el CERN, durante frecuentes períodos de semanas, a lo largo de varios años.

4.3.4.1. El Alignment Ring (AR) o Anillo de Alineación.

El AR es una estructura tipo sándwich de fibra de carbono, con forma de anillo de 470 mm de diámetro interno, 730 mm de diámetro externo y 40 mm de espesor, fabricado en dos mitades, con una serie de insertos de aluminio en la zona de unión a través de los que se mantienen unidas rígidamente entre sí mediante 8 tornillos de M4 y dos pasadores cilíndricos de precisión que se fijan a los insertos y que permiten su reposición con gran precisión (Figura 4.35), permitiendo mediante su apertura el acceso al interior del TRACKER, durante los períodos de mantenimiento. El anillo tiene montados 6 colimadores sobre una mecánica ajustable angularmente que generan 6 rayos con una inclinación de 5.7º en el plano ZR de CMS, separados entre sí 60º en el plano XY, comenzando por 15º respecto al eje X.

Los 3 distanciómetros modelo 18FLPA50, los 2 inclinómetros modelo M756–1150 y las 6 mecánicas de nivelación de los 6 colimadores modelo FC5-TiFS-NIR van fijados al AR mediante insertos de aluminio, que han sido pegados sobre la fibra de carbono del AR. Estos insertos llevan agujeros precisos para poder montar y desmontar los diferentes componentes sin perder su referenciación. Los distanciómetros e inclinómetros han sido previamente caracterizados, como ya se ha explicado, en los laboratorios del IFCA y del Ciemat.

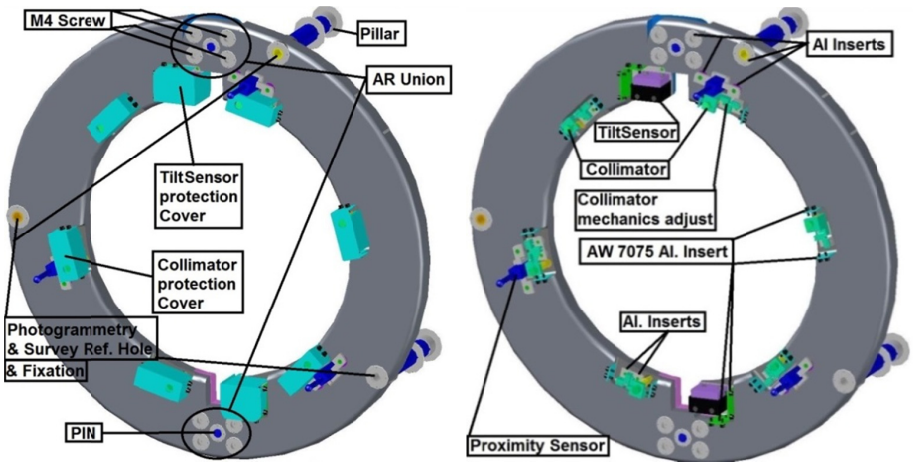


Figura 4.35: *Alignment Ring del lado positivo (AR+Z).*

El AR va montado sobre el BD del TRACKER mediante tres pilares de fibra de carbono, sobre los que van pegados unos insertos de aluminio, diferentes para las tres posiciones (Figura 4.36, Izq.) y que permiten una sustentación isostática durante la fijación del AR a los pilares sin introducir tensiones. Las fijaciones de los 3 pilares permiten la reposición del AR con gran precisión, cada vez que se monta y desmonta, para realizar tareas de mantenimiento en el TRACKER, ya que dispone de dos esferas de latón calibradas, una que descansa sobre un cono en el inserto del AR y del pilar, que es el caso representado en la figura 4.36, y la otra descansa por el lado del AR en un cono y por el otro en una ranura cónica, la tercera fijación consiste en un apoyo plano, entre los que se coloca un casquillo cilíndrico de aluminio calibrado longitudinalmente. El AR se puede regular angularmente jugando con los diámetros de las esferas colocadas entre los pilares y el AR. En la tabla 4.6 se muestran los valores teóricos actuales, que han sido ajustados según los valores aportados por los geómetras del CERN (para el AR- [133 y 134] y el AR+ [131 y 132]), los valores de los inclinómetros, en la posición de montaje sin campo magnético, y por la necesidad de desplazar 4 mm en Z los ARs para dejar más espacio, para cables y fibras, en la zona entre el AR y el BH.

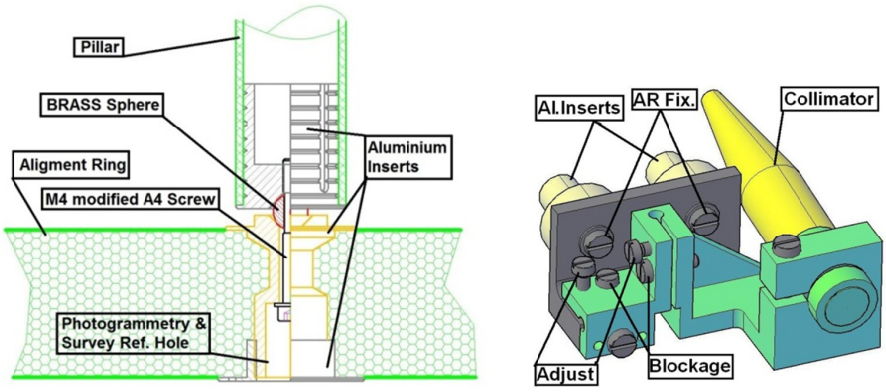


Figura 4.36: *Detalle de una de las 3 fijaciones del AR al Pilar del BD (Izq.). Mecánica de ajuste del Colimador del AR (Der.).*

AR +		AR-	
Fixat. Pos. 70º (slot)	Ø12.288 mm	Fixat. Pos. 0º (cone)	Ø12.638 mm
Fixat. Pos. 180º (cone)	Ø13.043 mm	Fixat. Pos. 125º (slot)	Ø13.303mm
Fixat. Pos. 325º (plane)	4 mm spacer	Fixat. Pos. 235º (plane)	4 mm spacer

Tabla 4.6: *Valores teóricos de compensación necesaria en las fijaciones sobre los pilares de los ARs, para las esferas y espaciadores, durante su instalación en Enero de 2015. Los valores permiten una tolerancia de ±0.01 mm.*

La posición actual de los ARs respecto al sistema global de CMS, ha sido obtenida en Enero de 2015 mediante fotogrametría digital [209 y 210], resultando como posiciones actuales las mostradas en la tabla 4.7, con una precisión de ±0.75 mm:

AR + Measurement 30.01.2015			
Name	X (m)	Y (m)	Z (m)
ARP-1	0.1164	0.3218	2.9598
ARP-2	-0.3468	-0.0024	2.9602
ARP-3	0.2809	-0.2005	2.9591
ARP_Center	-0.0017	-0.0025	2.9597

AR – Measurement 27.01.2015			
Name	X (m)	Y (m)	Z (m)
ARM-1	-0.1985	0.2821	-2.9603
ARM-2	-0.1994	-0.2831	-2.9604
ARM-3	0.3440	-0.0013	-2.9601
ARM_Center	-0.0010	-0.0008	-2.9603

Tabla 4.7: *Posición actual de los ARs respecto al sistema global de CMS.*

4.3.4.1.1. Banco de calibración para el AR.

Los ARs han sido ajustados y calibrados mediante el apoyo de la red geodésica de 12 puntos creada para ello (Figura 4.37), con la ayuda de un Laser Tracker. En la tabla 4.8, podemos ver los valores de estos puntos creados, con una precisión de 70 µm (con una RMS de 1 σ) [84 y 85]. En la figura 4. 34B aparece la distribución de puntos en plano, dentro del área de los ISR, respecto a un sistema de coordenadas X, Y, Z, el origen del sistema se basa en la posición real que tendrán el AR y LD en CMS, en la zona de calibración del LD.

Point Id	X (mm)	Y(mm)	Z(mm)
AR11	-0.27	4704.04	-9.19
AR12	6934.63	4011.75	-10.36
AR21	469.73	4818.69	-290.04
AR22	6935.24	4496.15	-848.09
AR31	469.63	5141.38	-289.99
AR32	6935.41	5463.40	-847.98
AR41	-0.43	5255.42	-9.57
AR42	6935.23	5947.69	-10.32
ARS3	240.12	4830.89	248.36
ARS4	240.49	5129.96	248.81
ARS11	8866.70	4399.58	996.66
ARS12	8868.52	5560.57	996.06

Tabla 4.8: *Coordenadas del Banco de Calibración para los ARs en el área de los ISR.*

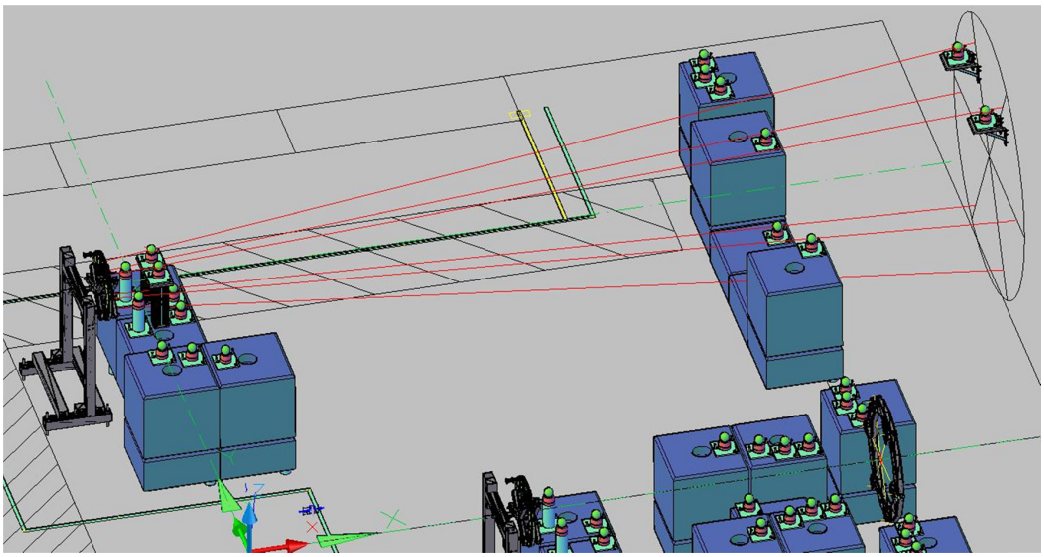


Figura 4.37: *Banco de Calibración para los ARs en el área de los ISR.*

El procedimiento de calibración del AR fue el siguiente:

Se colocaba el AR en una posición, y se realizaba una medida de fotogrametría de todos los puntos de referencia mecánicos y pegatinas codificadas que tiene este AR sobre la cara donde se montan los diferentes sensores y colimadores (Figura 4.38), seguidamente se realizaba otra en la que se unían las medidas de ambas caras del AR y se colocaba este, ya instrumentado con los sensores y colimadores, en una posición lo más cercana posible a su nominal, con la ayuda de una estación total.

Los datos de las coordenadas de fotogrametría del AR y de sus puntos de referencia (así como las medidas internas que fueron realizadas mediante MMC, tras la construcción de los ARs) y las coordenadas de la red geodésica, eran introducidos dentro del programa de reconstrucción de geometría COCOA [163], dando como resultado la posición teórica donde deberían incidir los rayos de los colimadores sobre los fotodetectores situados en los puntos de la red geodésica, que simulan líneas de dos puntos, coincidentes con los 6 haces que parten de los colimadores del AR.

Con esa información se procede, actuando sobre la mecánica de ajuste angular sobre la que se fijan los colimadores del AR (Figura 4.36, Der.), a llevar los rayos sobre la posición donde debería incidir sobre el fotodetector, según los resultados de COCOA [163], consiguiendo ajustar todos los rayos con una precisiones de <300 µm.

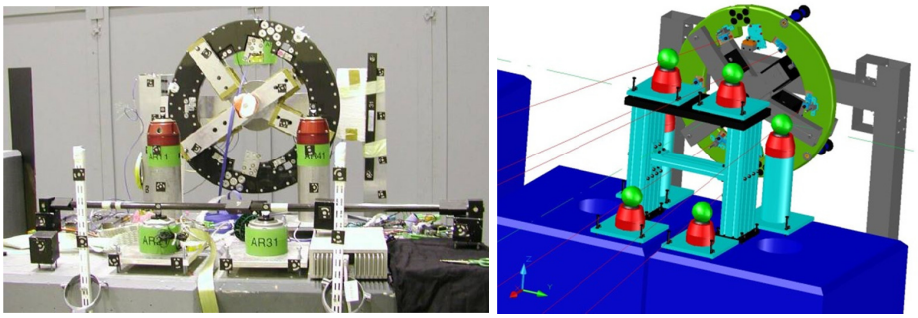


Figura 4.38: *AR+ durante la realización de la fotogrametría digital en el banco de calibración de los ISR (Izq). AR- con los 6 rayos de los colimadores pasando por los centros de las esferas de Taylor-Hobson, situadas en los puntos de la red geodésica cercanos (Der.).*

Seguidamente se medía la estabilidad de los rayos durante varios días, sobre los sensores más alejados, a la vez que eran leídos los inclinómetros y sensores de temperatura, para desacoplar la inestabilidad de los colimadores, de la propia de la estructura. Antes de proceder al sellado de la mecánica con araldit 2011, se comprobó que durante la estabilización, se medían variaciones por debajo de los 60 µrad (unos 400 µm en los puntos que están a unos 7 m). Tras la estabilización y sellado se procedió a verificar la estabilidad del conjunto obteniendo variación de unos 20 µrad/ºC, correlacionado con la temperatura, sin que se detectara inestabilidad de los rayos de forma independiente. Después se realizaron una serie de calibraciones consecutivas. Con estas calibraciones se obtenían el origen de los 6 rayos y sus orientaciones, consiguiendo obtener su dirección de propagación. Mediante la utilización de COCOA, utilizando los datos de calibración y la geometría del AR y sus componentes, se consiguió obtener la posición relativa y absoluta de los rayos y su diferencia respecto con los valores nominales. La precisión obtenida en las translaciones (origen del haz) está en ~112 µm (RMS ~12 µm) y en rotaciones (dirección de la propagación del haz) está en ~84 µm (RMS ~44 µm).

Las medidas realizadas con la estación total conseguían una precisión de ~300 µm; mientras que con la fotogrametría digital se consiguieron unas 50-100 µm, para todas las medidas realizadas en los ISR. Mientras que con el Láser Tracker se consiguieron ±30 µm de precisión en las calibraciones relativas y ±500 µm en las absolutas, para las medidas realizadas sobre CMS.

Las mediciones de apoyo, utilizando Estación Total, Fotogrametría y Láser Tracker, realizadas durante este proceso de referenciación de los ARs, y su montaje y referenciación a CMS, aparecen en los documentos [86, 90, 91, 96, 97, 98, 99, 100, 102, 104, 106, 128, 131 y 132] para el AR del lado positivo de CMS y en [119, 121, 126, 129, 130, 133 y 134] para el AR del lado negativo.

Durante los siguientes años, tras el sellado y calibración de los ARs, estos se instalaron y desinstalaron en el P5 en varias ocasiones, realizándose varias calibraciones de los mismos en el laboratorio de los ISR, obteniendo diferencias que llegaban a las ~500 μm y ~500 μrad, lo que está muy alejado de la incertidumbre de la calibración, lo cual no es aceptable, si queremos conseguir una precisa reconstrucción de la geometría. Por lo que hubo que proceder a desarrollar un procedimiento de calibración del AR in situ, una vez instalado en CMS, con el detector cerrado, y antes de encender el imán. En esta situación los rayos del AR inciden sobre los ASPDs distribuidos por todo el detector, los cuales son conocidos, respecto al sistema global de CMS (y por tanto se tomaron como referencia, creando un banco de calibración dentro de CMS), estos valores son obtenidos de los estudios de fotogrametría realizados en las diferentes ruedas de CMS, sobre los componentes del LINK [130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139 140 y 141], justo antes de proceder al cierre de las diferentes ruedas CMS. Mediante este procedimiento el error obtenido en la orientación de los rayos fue inferior a 20 μrad.

4.3.4.2. Plataforma de transferencia de medida ME1/1 (TP).

Como ya se ha indicado anteriormente, las TPs tienen la función principal de realizar la transferencia de la medida del sistema LINK hacia las CSCs de las ME1/1 y la sustentación del LD. Una TP está compuesta de una serie de piezas de acero inoxidable AISI 316 LN (Figura 4.31), situadas en la zona de fijación al hierro de la YN1 y fijación del perfil radial (RP), para dar más rigidez a la estructura; el resto de piezas estructurales son de aluminio EN AW7075, algunas de ellas con recubrimiento superficial de anodizado negro duro y las cubiertas de protección son de aluminio EN AW5754.

Para cumplir su cometido cada TP tiene instalados dos ASPDs, que detectan la posición del haz primario y secundario que los atraviesan, dos distanciómetros modelo 18FLPA50, uno para la monitorización de la CSC de la ME1/1 en Z y el otro para monitorizar radialmente la CSC de la ME1/2, dispone además de un distanciómetro SLS095-10 monitorizando la Rφ de la CSC de la ME1/1, además de un inclinómetro modelo H–900 biaxial que nos indica movimientos angulares respecto al vector gravedad y un sensor de temperatura (Figura 3.23 y 3.24). Todos estos elementos han sido previamente caracterizados respecto a sus mecánicas en los laboratorios del IFCA y Ciemat, mediante los procesos descritos anteriormente.

La TP es un conjunto de piezas unidas rígidamente mediante tornillería y pasadores cilíndricos de precisión, que nos permiten el montaje y desmontaje de unas sobre otras sin perder la referenciación y sobre las que se montan los diferentes dispositivos de detección mencionados. Sobre cada TP se monta un Perfil Radial (RP), en cuyo extremo se encuentra un distanciómetro modelo 18FLPA50 que monitoriza radialmente el LD. Además dispone de un sensor de temperatura a mitad del RP. Los RPs de las posiciones 75º, 195º y 315º disponen en su extremo inferior de una fijación para sujetar el LD isostáticamente. La TP con el RP instalado solidariamente sobre ella, se monta en la ranura disponible en YN1 de CMS (Figura 3.22, Der), quedando el RP insertado en dicha ranura. Seguidamente se procede a fijar la TP al hierro de la

YN1, mediante 3 tornillos de M8 de cabeza allen, de acero inoxidable A4 (Figura 3.22 y 4.32), que van insertados en unas ranuras holgadas situadas en la pieza base de acero inoxidable de la TP. Junto a estos 3 tornillos se encuentran otros 3 tornillos, prisioneros de M8 sin cabeza de inoxidable A4, roscados sobre la pieza base de la TP y que descansan sobre la superficie del YN1. Actuando sobre los tornillos de fijación y los prisioneros de nivelación, se consigue ajustar cada TP en su posición nominal. Tras posicionar las TPs se procede al montaje del LD, desde la región de η=3, fijándolo a sus 3 RPs. Una vez fijado el LD, se procede a su ajuste y posicionamiento definitivo, actuando sobre los tornillos de nivelación de las TPs de las posiciones 75º, 195º y 315º, para ello nos apoyamos principalmente en los haces que vienen de los LBs situados sobre el LD, los cuales han de entrar centrados en el área activa de los ASPDs situados sobre las TPs y en los ASPDs de la posición inferior de las CSCs de ME1/2, mientras que en la posición superior de las CSCs los haces deben incidir sobre los ASPDs centrados en la coordenada Rφ y descentrada 7.5 mm hacia el exterior del detector en Z.

4.3.4.2.1. Calibración de la TP.

Una vez ensamblados todos los componentes que forman las TPs se procedió a realizar una calibración mediante fotogrametría digital en el área de los ISR, con el fin de conseguir relacionar todos los componentes que integran una TP entre sí y referenciarlos a los agujeros exteriores de referencia, donde se insertan los 'target' que posteriormente se utilizarán, una vez instaladas en CMS, para posicionarlas respecto al sistema global de CMS mediante un proceso de calibración por fotogrametría sobre el conjunto de la YE1.

En la figura 4.39 se muestra una TP instrumentada con los 'targets' de fotogrametría durante el proceso de medida realizado en los ISR. Mediante esta técnica de calibración se consiguió una precisión de 30 μm, y cuya descripción y resultados aparecen en el documento [113] para las TP del lado positivo y [114] para las del lado negativo.

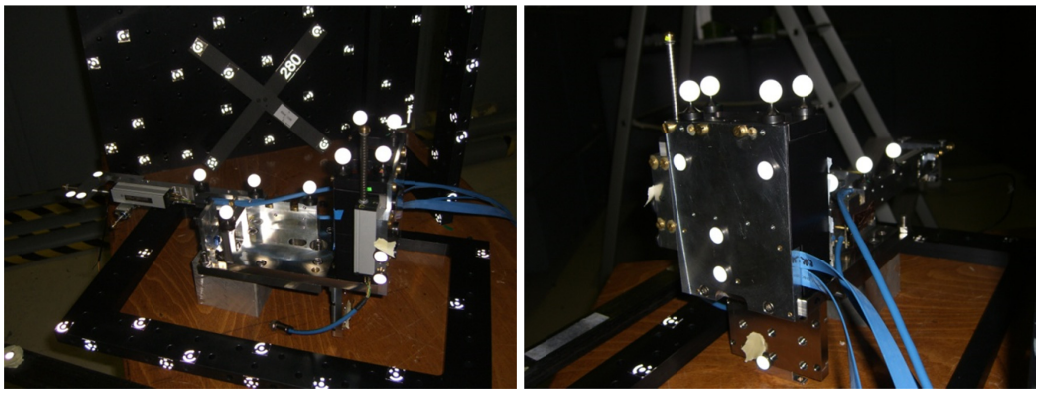


Figura 4.39: *TP del lado Z negativo instrumentada con los 'targets' de fotogrametría, durante su calibración en el área de los ISR.*

Una vez instaladas en sus correspondientes posiciones de las ruedas YE1 del ENDCAP de CMS, se realizaba una referenciación de las TPs respecto al

sistema de coordenadas global de CMS, mediante fotogrametría digital (Figura 4.40), con una precisión de ~300 µm [135, 136 y 137].

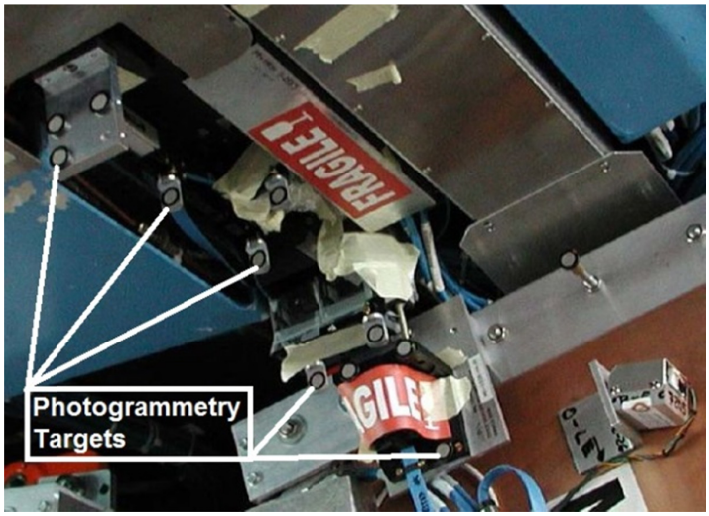


Figura 4.40: *TP y dispositivos circundantes, montado sobre la YE+1, con los 'targets' de fotogrametría colocados, durante una campaña de referenciación de estos elementos respecto al sistema global de CMS.*

4.3.4.3. Perfiles Radiales (RPs) y Longitudinales (LPs).

Los **Perfiles Radiales** (RPs), son tubos extruidos de aluminio EN AW6061 de sección rectangular (80mm (2 mm espesor en estas caras) x 38 mm (3 mm espesor en estas caras)) de 1977 mm de longitud, que llevan un recubrimiento de anodizado negro duro de unas 35 µm de espesor, principalmente para evitar reflejos de los haces láser que circulan por su interior. Estos van fijados rígidamente sobre las TPs, (pudiendo ser considerados vigas cantiléver, empotradas en las TP), mediante una serie de tornillos y que llevan 2 pasadores cilíndricos de precisión (Figura 4.41, Izq. y figura 3.22), que permiten su reposicionamiento con mucha precisión, sobre la TP. En la parte radialmente inferior, llevan un distanciómetro modelo 18FLPA50 que monitoriza radialmente el LD, como se he comentado anteriormente, este va unido solidariamente al RP mediante pasadores de precisión, además en esta zona inferior, en las posiciones de 75º, 195º y 315º, se encuentran situadas las fijaciones que sirven de soporte isostático al LD, cuyas piezas disponen de pasadores de precisión para poder reposicionarlas con gran precisión y en esta zona también se encuentra la rótula sobre la que descansa uno de los apoyos isostáticos del LP (Figura 4.41, Der., y figura 3.21). Por el interior del RP circulan los haces primario y secundario (Figura 3.20).

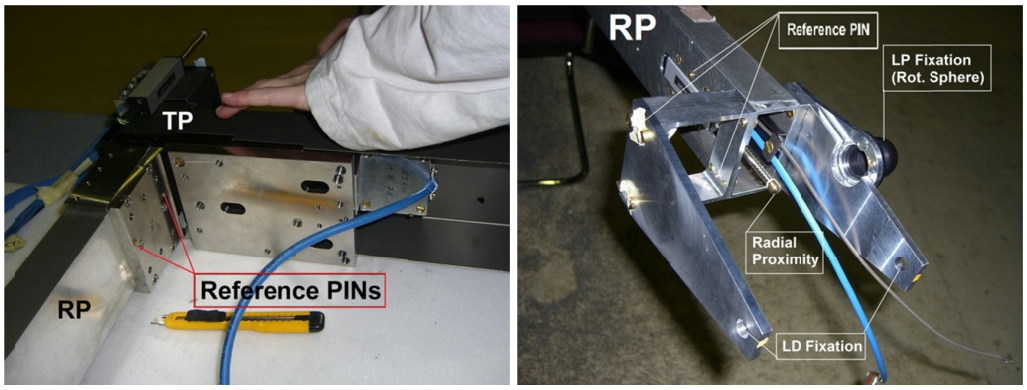


Figura 4.41: *Detalle del RP fijado sobre la TP (Izq.). Detalle de la Fijación del RP sobre el LD (Der.).*

Los **Perfiles Longitudinales** (LP), son tubos extruidos de aluminio EN AW6061 de sección circular ($Ø_{ext}$= 40 mm y 1.5 mm de espesor) y 3584 mm de longitud, que llevan un recubrimiento de anodizado negro duro de unas 35 µm de espesor, para evitar reflexiones del haz láser que circula por su interior. Este tiene un apoyo sobre la rótula que está fijada en la parte baja del RP (Figura 4.41, derecha, figura 3.21, derecha y figura 4.42), sobre esta rótula tiene posibilidad de girar en cualquier ángulo, aunque un pasador, que encaja en una ranura longitudinal de la esfera, impide el giro en torno a su eje. Los diferentes elementos tienen pasadores de precisión, que permiten reposicionar las diferentes piezas, además de trasladar la medida entre ellas.

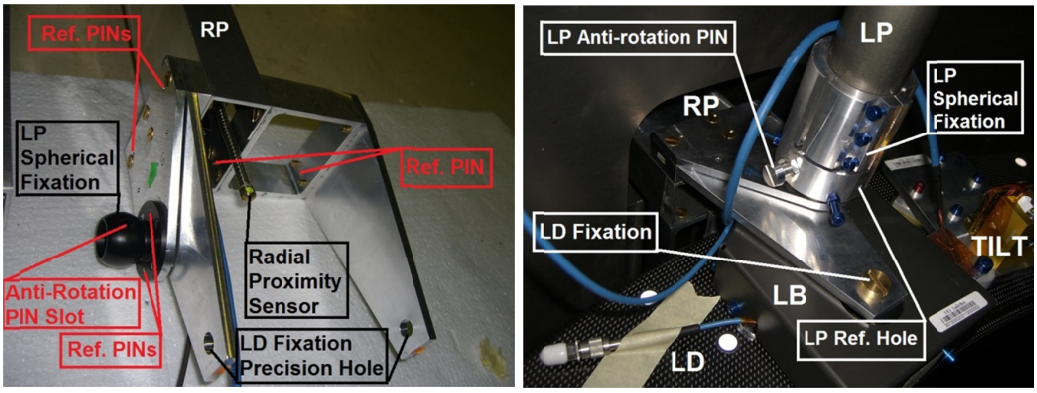


Figura 4.42: *Apoyo rótula del LP en la parte baja del RP (Izq.). Detalle del apoyo rótula del LP montado en CMS (Der.).*

El LP está sustentado en un segundo punto, mediante un apoyo deslizante, compuesto por una serie de rodillos, sobre los que descansa el perfil y que le permiten deslizarse libremente sobre está fijación sin introducir fricción apreciable sobre este. Esta segunda fijación está situada sobre el calorímetro hadrónico (Figura 4.43, Izq.). Los tornillos, una vez ajustado el sistema, han sido sellados con araldit 2011, para evitar que se aflojen con el paso del tiempo.

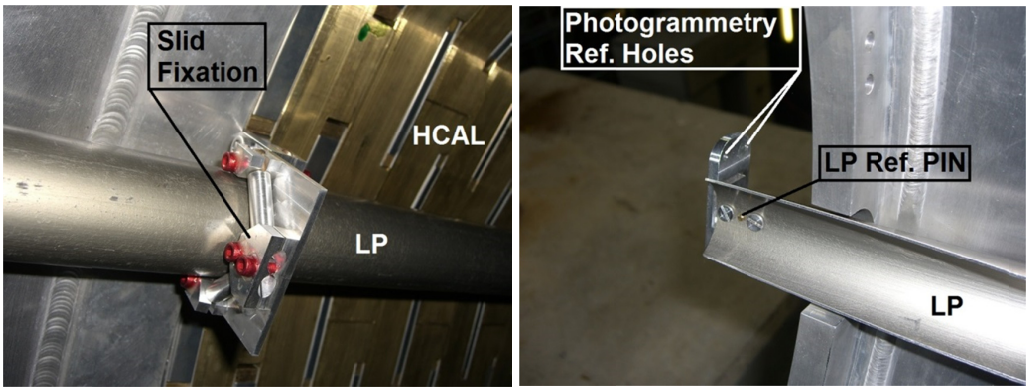


Figura 4.43: *Detalle del apoyo deslizante intermedio del LP, sobre el calorímetro hadrónico (Izq.). Detalle del extremo del LP que llega al AR (Der.).*

En el extremo opuesto al LD, el LP dispone de un 'target' donde hace contacto el distanciómetro modelo 18FLPA50 que se encuentra sobre el AR (Figura 4.43, Der.). Este dispone de un pasador de referencia, para transferir la medida que el distanciómetro toma desde el AR al 'target', hasta el LP.

Todos los elementos, en los RP, LP, fijaciones, 'target' y piezas auxiliares disponen de agujeros de precisión, que pueden ser utilizados para realizar la transferencia de medida entre elementos y además sirven para realizar su referenciación interna, mediante máquinas MMC o fotogrametría digital.

4.3.4.3.1. Calibración de los RPs y LPs.

Los perfiles radiales y longitudinales han sido calibrados mediante fotogrametría digital, para ello se han colocado una serie de 'targets' de fotogrametría sobre los agujeros de precisión dispuestos a tal efecto en estos perfiles y sus piezas mecánicas auxiliares. Realizando la medición de estos puntos se consigue una calibración interna relativa de estos elementos para posteriormente contribuir a realizar la transferencia de medida del TRACKER a la región de la ME1/1 y ME1/2.

Las medidas realizadas sobre los RP (Figura 4.44), fueron realizadas en el edificio 926 del CERN y están descritas en el documento [115], donde aparecen los resultados de estas con ~100 μm de precisión.

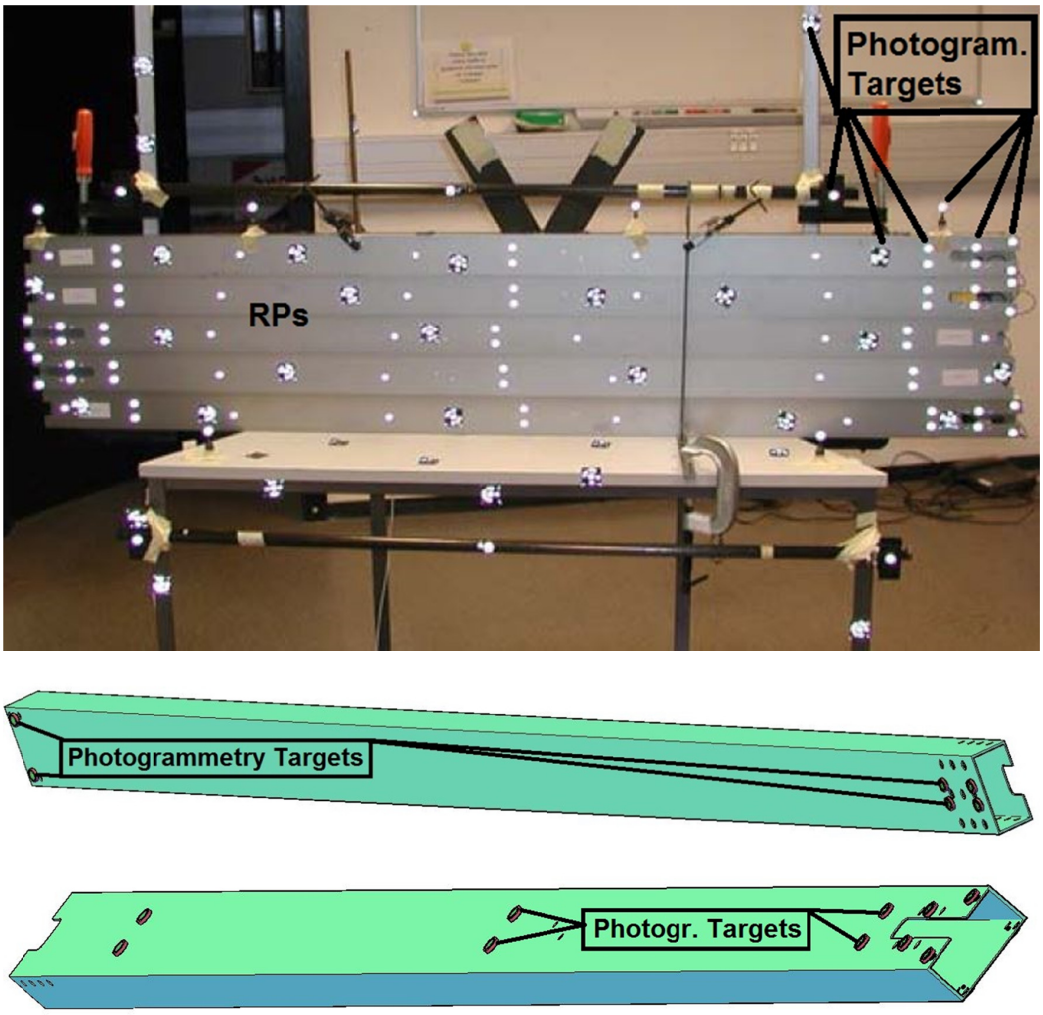


Figura 4.44: *Banco de calibración de los perfiles radiales (Superior). 'Targets' de fotogrametría colocados sobre los agujeros de referencia del RP (Inferior).*

Los perfiles longitudinales fueron caracterizados sobre un banco de calibración en el área de los ISR, utilizando para ello una pared del banco de calibración de los MABs (Figura 4.45). La metodología y resultados de este estudio realizado para los LP del lado positivo de CMS están en el documento [111] y en el documento [112] se encuentran los del lado negativo. En ambos casos se ha conseguido una precisión de ~30 μm.

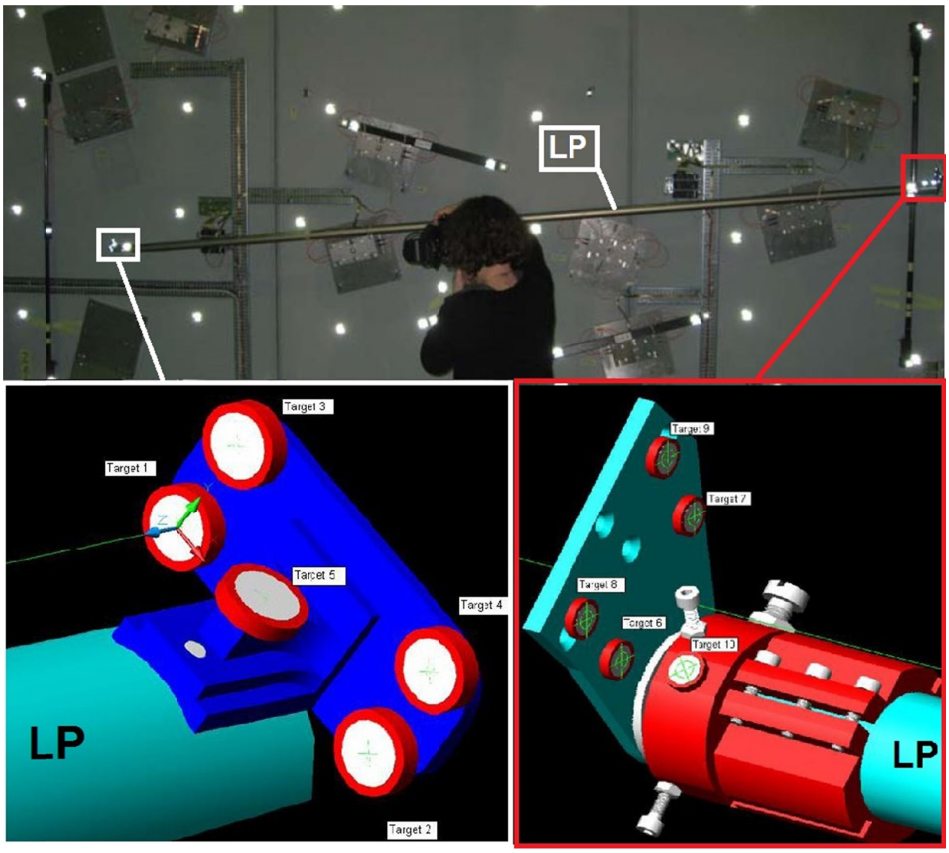


Figura 4.45: *Banco de calibración de los perfiles longitudinales, donde se ven los detalles de los target de fotogrametría utilizados sobre los extremos del perfil.*

4.3.4.4. Link Disc (LD).

Es una estructura de sándwich de fibra de carbono de unos 9.4 kg, con forma de anillo de diámetro interior 1000 mm, 1300 mm de exterior y 61 mm de espesor. Tiene una serie de insertos de aluminio pegados a la estructura (~1.5 kg), sobre los que se fijan los 6 LBs, el inclinómetro modelo M756–1150, las 6 sondas de temperatura, las 3 fijaciones isostáticas que lo fijan a los RPs y los 6 'targets' sobre los que se realiza la medida radial desde el distanciómetro situado en la parte inferior del RP. Además dispone de 12 insertos (6 sobre cada cara del LD) con agujeros calibrados que sirven para la referenciación del LD (Figura 3.18 y figura 3.19).

La estructura de sándwich de fibra de carbono se ha realizado por la técnica de moldeo en caliente. Para ello se crearon unos moldes sobre el que se producen las pieles externas de cerramiento, estas se van colocando en el interior, una vez situadas en sus posiciones se cierran los moldes y mediante calor y presión se produce el curado de la resina epoxi, produciéndose el 'fraguado' de estas. El sándwich está compuesto, desde el interior al exterior (Figura 4.46), por una capa de unos 52 mm de espesor de panel de abeja tipo NOMEX ECA 4.8-64, sobre sus laterales, recubriendo lateralmente el NOMEX se encuentra

una serie de capas de ~3.6 mm de fibra de carbono unidireccional en diferentes orientaciones, y que consta de 3 capas de laminado de 1.2 mm, cada una de estas capas se compone de capas de fibra UNIDIRECCIONAL, cuya orientación está dispuesta formando una distribución de propiedades 'quasi-isotrópica', cuyo material es T300/EP. Recubriendo todo esto, como cerramiento, se encuentra la capa externa de ~0.8 mm de laminado tipo FABRIC con distribución 'quasi-isotrópica' de capas (-45/0/45) de T300/EP.

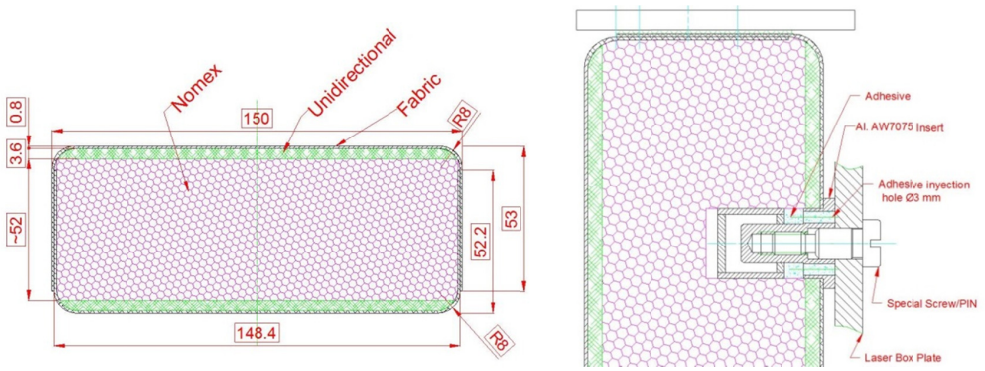


Figura 4.46: *Detalle de la sección del LD, donde se muestra la distribución interna de capas de fibra de carbono que forman la estructura (Izq). Detalle del inserto inferior de la LB, con 'PIN' para reposicionado (Der.).*

Una vez producida la estructura de fibra de carbono, se mecanizaron una serie de agujeros, para realizar el pegado e inserción de los insertos necesarios para fijar sobre ella los diferentes elementos que instrumentan el LD. Estos insertos disponen de una serie de agujeros de 3 mm, para poder inyectar el adhesivo al interior del LD, y así conseguir la adhesión del inserto en la región interna. El inserto del LB, que lleva un tratamiento de ataque con ácido crómico para facilitar su adhesión, ha sido diseñado para que la dilatación del adhesivo introduzca la menor distorsión posible sobre el LB (Figura 4.46, Der.). Una vez pegados, se realiza el mecanizado final de los insertos, consiguiendo una tolerancia del plano sobre el que se asientan los LBs de <50 µm y un posicionamiento de los agujeros de precisión sobre los que se montan los LBs <20 µm (Figura 4.47, Izq.).

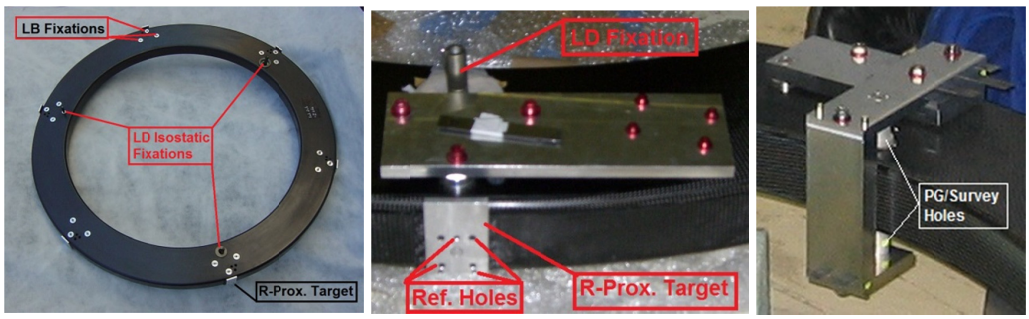


Figura 4.47: *LD del lado negativo de CMS, con los insertos que traía de fábrica (Izq.). Operación de pegado del inserto para el inclinómetro, posicionado respecto a insertos del LB, sobre el LD del lado positivo (Cent.). Operación de pegado de los insertos de fotogrametría (PG)/'Survey' sobre el LD+ (Der.).*

Adicionalmente, se pegaron sobre su superficie 12 insertos con Araldit 2011, que disponen de agujeros de precisión, para colocar 'targets' que ayuden a la referenciación del LD. También se pegó con Araldit 2011 un inserto para colocar el inclinómetro modelo M756–1150. Para realizar el pegado de estos insertos con la precisión necesaria (<100 µm) se utilizó una mecánica auxiliar, que se fijaba sobre las fijaciones precisas de las LBs (Figura 4.47, Cent., Der.). Y sobre los insertos colocados en el borde del LD, para los distanciómetros radiales, se colocó una pantalla de 3 mm de espesor, para ampliar el rango de la superficie de contacto del sensor radial (Figura 4.48).

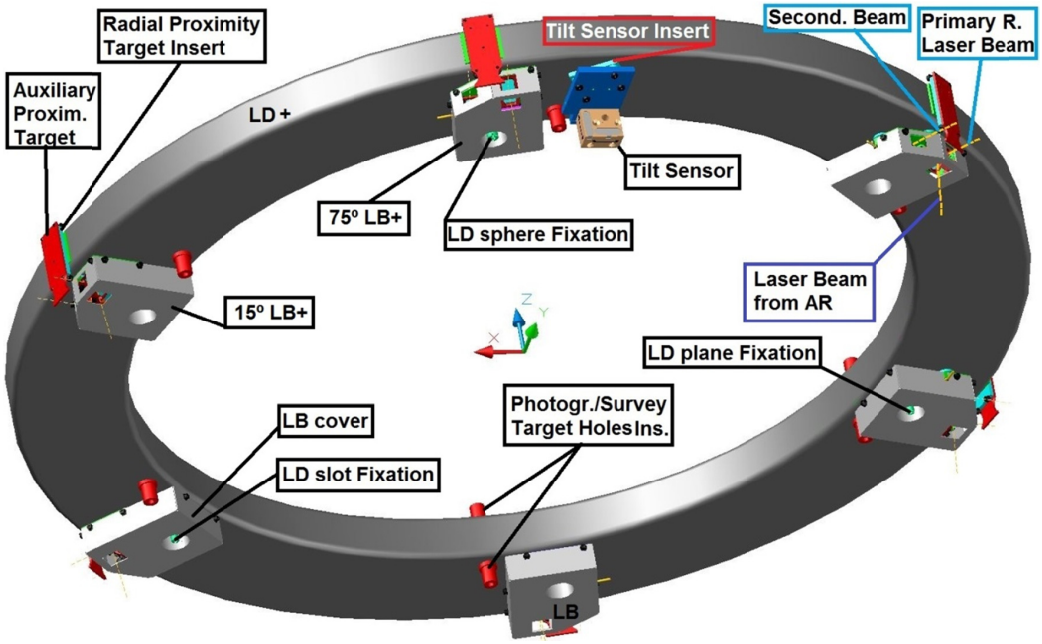


Figura 4.48: *LD del lado positivo de CMS totalmente instrumentado.*

Cada uno de los 6 LBs, generan 2 rayos, el primario coincide con la R (sobre este coincide el rayo reflejado sobre el 'splitter' que procede del AR) y el secundario discurre paralelo a 50 mm sobre un plano paralelo a XY. Los LB están separados entre sí 60º en el plano XY, comenzando por 15º respecto al eje X (Figura 4.48). Estos LBs están fijado sobre el LD mediante 3 fijaciones, 2 de las cuales disponen de agujero calibrado que permite el reposicionado de los LBs sin perder la calibración del conjunto (Figura 4.19 y figura 4.46, Der.).

Como se indicó anteriormente, el LD va sustentado de los RPs de las posiciones de 75º, 196º y 315º, sobre 3 fijaciones isostáticas. Estas pueden ajustar su posición dentro del detector, actuando sobre los tornillos de nivelación de las TPs de estas posiciones, ya que el perfil radial donde van estas fijaciones del LD está solidariamente fijado a las TPs (Figura 4.31, figura 4.34 y figura 4.41). En la parte baja de estos tres RP, se encuentran 3 rótulas para apoyar un extremo de los 3 LPs que realizan la medida en Z entre el AR y el LD (Figura 4.34, figura 4.41 y figura 4.42).

Los componentes montados sobre la estructura LD y esta misma, para el lado positivo de CMS, son una imagen especular de la del lado negativo, respecto al

plano XY de CMS, excepto el inclinómetro que está rotado 180º, respecto al eje Y.

4.3.4.4.1. Banco de calibración para el LD.

El objetivo principal de este banco de calibración es ajustar y calibrar la posición relativa de los dos haces láser que parten de cada LB y del reflejado sobre el 'splitter' proveniente del colimador del AR, para los 6 LBs y relacionar la orientación absoluta respecto al vector de la gravedad, del inclinómetro, con respecto a los diferentes haces láseres. Adicionalmente se relacionan estos elementos, con los puntos de referencia situados sobre los LDs y las pegatinas de fotogrametría.

Todas las piezas mecánicas individuales han sido calibradas en el laboratorio de metrología del IFCA sobre una MMC con <10 µm de precisión. Los elementos que componen los LBs también han sido pre-ajustados sobre un banco de calibración preparado a tal efecto en el mismo laboratorio, respecto a su base y agujeros de referencia; de esta forma las LBs pueden ser instaladas sobre su correspondiente posición del LD, asegurándose una orientación de los haces láser cercana al nominal.

Para realizar el ajuste y calibración de los componentes del LD se creó una red geodésica de 34 puntos (Figura 3.28, figura 4.49A y figura 4.49B), con la ayuda de un Laser Tracker. En la tabla 4.9, podemos ver los valores de estos puntos creados, con una precisión de 70 µm (con una RMS de 1 σ) [84 y 85]. En la figura 4.34B aparece la distribución de puntos en plano, dentro del área de los ISR, respecto a un sistema de coordenadas X, Y, Z, donde el origen del sistema en la zona de calibración del LD, se basa en la posición real que tendrán el AR y LD en CMS.

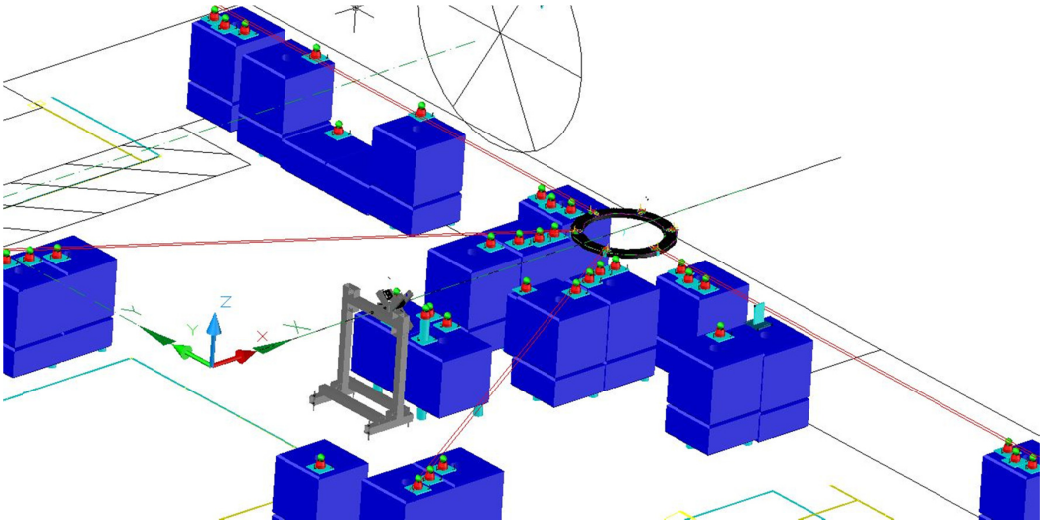


Figura 4.49A: *Banco de calibración del LD, en posición horizontal, en el área de los ISR.*

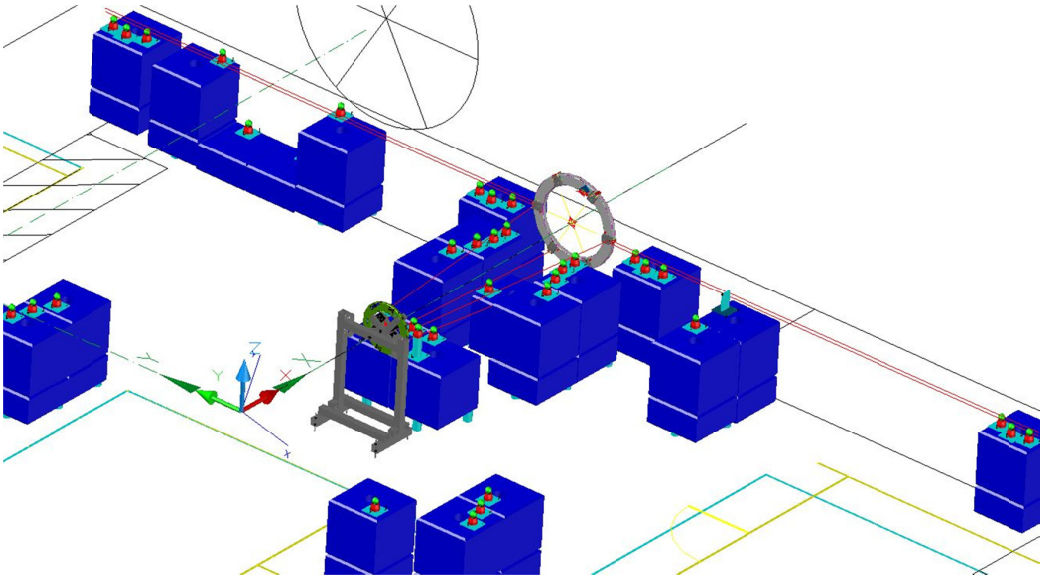


Figura 4.49B: *Banco de calibración del LD, en posición vertical respecto a su AR, en el área de calibración de los ISR.*

Point Id	X (mm)	Y(mm)	Z(mm)
LD11	6716.61	-1010.31	-49.98
LD12	6617.52	-1260.20	-50.06
LD13	6667.78	-1509.29	-50.33
LD14	6717.11	-7010.33	-49.87
LD15	6617.17	-7260.91	-49.55
LD16	6667.01	-7509.97	-50.19
LD21	5795.72	-561.36	-0.21
LD22	5545.70	-647.69	-0.13
LD23	5209.76	-784.32	0.45
LD24	628.82	-3544.49	0.34
LD25	303.89	-3674.16	0.12
LD26	13.96	-3784.35	0.08
LD31	5795.08	561.24	-0.04
LD32	5545.45	648.16	-0.16
LD33	5209.87	784.07	-0.16
LD34	629.17	3544.29	0.15
LD35	304.32	3674.36	0.60

Point Id	X (mm)	Y(mm)	Z(mm)
LD36	13.62	3784.34	-0.01
LD41	6717.76	1010.21	-50.18
LD42	6617.65	1260.16	-50.22
LD43	6667.56	1510.40	-50.24
LD44	6717.31	7010.22	-50.45
LD45	6617.02	7260.07	-50.62
LD46	6667.17	7510.21	-50.48
LDAR11	3227.11	-276.06	0.33
LDAR12	6045.64	-556.96	-0.14
LDAR21	3696.43	-160.94	-279.82
LDAR22	5337.16	-243.16	-421.38
LDAR31	3697.38	161.54	-279.61
LDAR32	5337.48	243.31	-421.20
LDAR41	3227.18	276.04	0.38
LDAR42	6045.47	557.04	0.36
LDME1	5876.91	-2673.77	0.11
LDME2	-581.92	-2673.94	0.13

Tabla 4.9: *Coordenadas del Banco de Calibración de los LDs, en el área de los ISR.*

La secuencia de calibración seguida fue la siguiente:

En primer lugar se realizaba una referenciación interna de todos los puntos de referencia del LD y de sus insertos, mediante fotogrametría digital con unas precisiones de 50 µm.

Seguidamente se instalaban las LBs sobre sus correspondientes posiciones del LD y el inclinómetro, con la mecánica adaptadora, para los diferentes ángulos que tendrá el LD durante el proceso de ajuste y calibración.

Colocando el LD lo más cerca posible de su posición nominal horizontal (Figura 4.49A y figura 4.50, Izq.), con el apoyo de los geómetras del CERN, se procedía a realizar el ajuste de los rayos radiales (Primario y Secundario) de 4 LBs, actuando sobre los tornillos de regulación del colimador y el prisma romboidal (Figura 4.19). En primer lugar se hacía el ajuste del rayo primario, para lo que era necesario tener quitados el prisma romboidal y el separador de haz, tras ajustar este, se sellaba el ajuste con Araldit 2011, tras estabilizarse el haz. Seguidamente se colocaba el prisma romboidal, ajustando el rayo secundario, y se procedía a su sellado. Seguidamente se procedía a realizar una rotación de 60º, y se ajustaban los rayos del siguiente LB, y otro giro de -120º, para ajustar el último LB, de esta forma siempre se tenían como referencia los rayos de 3 LBs de, la primera medida, para así poder relacionar la primera medida (4 LBs) de las dos restantes. Cada rayo se medía sobre los puntos de la red geodésica, con unos 7 m de brazo de calibración. Durante este ajuste también se hacía uso del inclinómetro con la mecánica modificada. Una vez sellados los ajustes de estos dos rayos, tras su estabilización, se procedía a realizar su calibración. Para tener redundancia de las medidas realizadas se realizaban varios giros al LD.

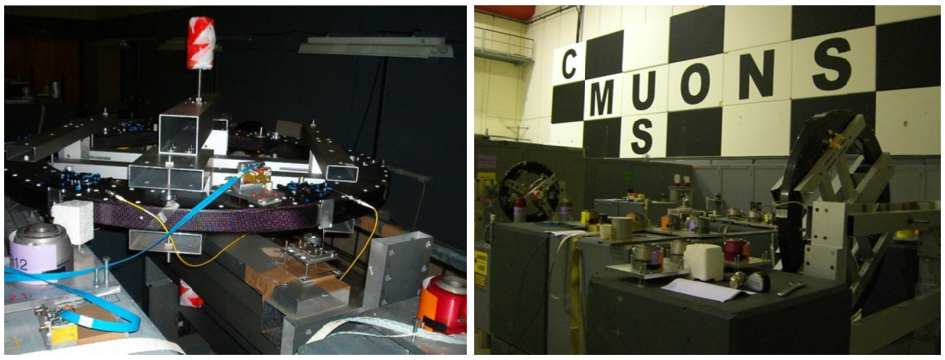


Figura 4.50: *Detalle de la calibración del LD en posición horizontal (Izq.). Detalle de la calibración del LD en posición vertical (Der.).*

Una vez que se había terminado con el ajuste y calibración de su correspondiente AR, se situaba este frente al LD en su posición del Banco de Calibración del LD en vertical (Figura 4.49B y figura 4.50, Der.), colocándolos próximos a sus correspondientes posiciones nominales que simulan su situación en CMS, con la ayuda de los geómetras del CERN. En esta disposición, utilizando los rayos incidentes del AR, que antes de llegar al LD pasaban por dos puntos intermedios de la red geodésica, se realizaba el ajuste de los correspondientes divisores de haz (splitter) actuando sobre los tornillos de regulación de estos (Figura 4.19). Este ajuste solamente era posible sobre 2 LBs al mismo tiempo y situadas diametralmente opuestas en el LD. El rayo proveniente del AR se reflejaba sobre el divisor de haz, siguiendo la dirección radial del LD sobre los puntos de la red geodésica y que bebía coincidir con la posición del haz primario del LB. Para ayudar en el posicionamiento del LD se hacía uso de las líneas primaria

y secundaria, que previamente se habían calibrado en la disposición horizontal, de las 2 LBs opuestas sobre las que se estaba realizando el ajuste de sus divisores de haz, apoyándose en los correspondientes puntos de la red geodésica; en la medida de estos haces se hacía uso de prolongadores de 50 mm y 100 mm, que iban situados en los 'socket estándar CERN' desplazando verticalmente la posición el centro de Taylor-Hodson esos valores. Cada rayo radial reflejado en el separador de haz, se medía sobre los puntos de la red geodésica, con unos 7 m de brazo de calibración. También se hacía uso del inclinómetro con su mecánica adaptadora durante esta medida. Tras finalizar el ajuste de los rayos se procedía al sellado de la tornillería mediante Araldit 2011. Para completar el ajuste de los separadores de haz se debían hacer dos giros de 60º, de forma que se realizara el ajuste en las otras 4 LBs. Una vez finalizado el ajuste y sellado de componentes se procedía a realizar una calibración de todos los rayos en esta disposición.

De forma similar a cómo se ha explicado en el ajuste del AR, para ayudar en el ajuste de las posiciones correctas del LD, a las que se deben llevar los rayos, se hacía uso del software de reconstrucción COCOA [163]. Para ello se introducían en el los datos de las coordenadas de fotogrametría del LD y de sus puntos de referencia (así como las medidas internas que fueron realizadas mediante MMC, tras la construcción de los LDs) y las coordenadas de la red geodésica, dando como resultado la posición teórica donde deberían incidir los rayos de los LBs sobre los fotodetectores situados en los puntos de la red geodésica. La precisión media en la determinación de los parámetros por COCOA fue de ~115 μm para los rayos primario y secundario, mientras que la precisión en la determinación de los ángulos del haz reflejado en el divisor de haz es de 85 μrad con 43 μrad de RMS. La estabilidad que mostró el LD, tras ser instalado en CMS y vuelto a calibrar en los ISR, fue mucho más alta que la mostrada en el caso de la estructura AR, siendo satisfactoria para su utilización en el sistema LINK.

Las medidas realizadas con la estación total se realizaron con una precisión de ~300 μm de precisión; con la fotogrametría digital se consiguieron unas 50-100 μm, para todas las medidas realizadas en los ISR. Mientras que sobre CMS las precisiones conseguidas estaban entre las 300-500 μm.

Las mediciones de apoyo, utilizando Estación Total y Fotogrametría Digital, realizadas durante este proceso de referenciación de los LDs y su montaje y referenciación a CMS, aparecen en los documentos [87, 88, 89, 92, 93, 94, 95, 101, 103, 105, 107, 108, 109 y 110] para el LD del lado positivo de CMS y en [116, 117, 118, 120, 122, 123, 125 y 127] para el LD del lado negativo.

4.3.4.5. Simulaciones MEF a la estructura de alineación LINK.

La estructura descansa colgando de las TPs porque según las simulaciones de deformación de las YE1, mostradas en el capítulo 2, en esta zona la deformación y rotación relativa, inducida por el campo magnético, sobre el

hierro de la YE1, es mínima entre las 6 posiciones, limitándose principalmente a una traslación en Z, hacia el IP, de podría llegar a ser de hasta 15 mm. Con lo que el LD se limitará a realizar este desplazamiento en Z inducido por sus apoyos.

Extrayendo los valores de deformación, de los nudos más próximos a las TPs, del modelo de elementos finitos, que se creó para obtener los resultados mostrados en el capítulo 2, se obtienen los valores de tabla 4.10, donde aparecen los movimientos relativos entre los 6 puntos, en las coordenadas Z e Y de CMS, siendo despreciables para la coordenada X:

Position	15º	**75º**	135º	**195º**	255º	**315º**
Disp. **Z** (mm)	-1.5	0	-0.5	-1	-2	-1
Disp. **Y** (mm)	0.1	0.1	0.1	0	0	0

Tabla 4.10: *Desplazamientos relativos que sufren las posiciones donde se asientan las TP, durante el encendido del imán de CMS. Los desplazamientos correspondientes a la coordenada X son despreciables.*

El LD ($Ø_e$= 1300 mm) iría fijado en las posiciones de 75º, 195º y 315º, sobre un diámetro de ~5200 mm en el exterior del disco de acero al carbono YN1. Al ir fijado sobre esas tres posiciones, únicamente se produciría un desplazamiento relativo de la posición de 75º respecto a las otras 2 de ~1 mm, este desplazamiento relativo viene inducido por el pequeño giro de ~250 μrad que se producirá sobre este disco de casi 40 t cuando se encienda el imán de CMS.

El material del disco YN1 es un acero al carbono estándar cuyas propiedades mecánicas son las indicadas en la tabla 4.11 [47].

Yield Strength	230 MPa (min.)
Ultimate Strength	350 MPa (min.)
Elongation	25 % (min.)
Resilience	40 J (min.) at 20ºC

Tabla 4.11: *Propiedades mecánicas del acero al carbono del disco YN1 de CMS.*

En la caverna de CMS se tenía previsto mantener las condiciones ambientales dentro de unos límites estables (18 ºC ± 1 ºC y ~56 %HR ± 4 %HR) [47], pero finalmente no fue posible adquirir el sistema de climatización necesario. En la región η=3 de CMS sobre la que estará el LD, las condiciones ambientales se consideran similares a las de la caverna. Para los cálculos de deformaciones se han considerado posibles gradientes de temperatura de ±3º C durante la operación de CMS. La humedad no se ha tenido en cuenta ya que se ha considerado que durante la fabricación y calibración de la estructura iban a ser del mismo orden; además, al realizar la calibración, en diferentes momentos y durante largos períodos de tiempo, se suponía que esta influencia iba a estar incluida dentro de las incertidumbres de las calibraciones realizadas, sobre los haces de las LB, que van sobre el LD.

CMS y por tanto esta estructura, está inclinada un 1.234% respecto al vector de la gravedad (Figura 2.8). A efectos de cálculo será considerada una estructura

estática, donde no existen fuentes externas que puedan producir vibraciones. También se considera que la temperatura es constante en toda la estructura de alineación e igual a la temperatura del YN1. El objetivo es alcanzar deformaciones del LD <50 µm.

Antes de llegar a la estructura descrita anteriormente, esta siguió un proceso de desarrollo:

En los **primeros supuestos** se comenzó con una estructura hiperestática donde el LD estaba fijado rígidamente sobre los RP de las TP, siendo el LD un sándwich de fibra de carbono de 20 mm de espesor. En primer lugar se quería comprobar el supuesto que utilizando acero inoxidable sobre los RP (1950 mm de longitud de cálculo) con un CTE (coeficiente de expansión térmica (Coefficiente of Thermal Expansion)) de 17 µm/mºC , y con el disco de fibra de carbono (diámetro exterior 1300 mm) con CTE de pocas unidades en función de la orientación de fibras y disposición de capas, se podría compensar en parte la deformación térmica de los apoyos sobre el hierro de la YN1 con CTE de 12 µm/mºC, (diámetro de la circunferencia donde se encuentran los apoyos sobrdee YN1 de 5200 mm), minimizando la influencia que estas deformaciones relativas, por variaciones de temperatura en los apoyos de las TPs, inducen sobre el LD. Intentando hacer cumplir la ecuación (4.10), buscando el CTE adecuado del LD, pero intentando que se cumpla sobre un plano, que es donde se encuentra este.

$$\Delta L_{YN1}=\Delta L_{RP}+\Delta L_{LD} \qquad (4.10)$$

Siendo

$$\Delta L_i=CTE_i\times L_i\times \Delta T \qquad (4.11)$$

donde L_i es la longitud, en m, del material 'i' sobre la que se aplica la carga térmica, ΔT es la variación de temperatura en ºC que se aplica, CTE_i es el coeficiente de expansión térmica del material 'i' en µm/mºC.

Pero debido a que el LD es un sándwich de fibra de carbono, y por consiguiente con una distribución de propiedades no isotrópica, en primer lugar se debe buscar una distribución del laminado, que nos dé una disposición de CTE 'quasi-isotrópica', basándonos en bibliografía [216 y 217] y realizando una serie de simulaciones actuando sobre parámetros de material de fibra, orientación de estas y distribución de capas, se llegó a un resultado donde, se consigue una distribución quasi-isotrópica de $CTE_{LD}\approx 4.1$ µm/mºC (sacado de los resultados numéricos (figura 4.51) y aplicando la fórmula (4.11)) sobre la rueda completa, independiente de la dirección del plano de esta y con baja expansión térmica.

En la figura 4.51 se representan gráficamente estos resultados, donde para calcular el CTE, resultante del sándwich que es la estructura del Link Disc, se simula una lámina plana de Ø=2 m, fija en su punto central y se le aplica una carga térmica sobre ella de 1 ºC. Utilizando para esta simulación Ansys con un elemento SHELL99. Esta lámina tiene una distribución de 33 capas, distribuyéndose 16 capas de 0.125 mm en cada una de las pieles del sándwich

y 16 mm en el centro de 'panel de abeja' (honeycomb), formando en total un sándwich de 20 mm de espesor. Los valores de los materiales, que se utilizaron, aparecen en la tabla 4.12. Siendo la distribución de la orientación del laminado: piel 1 $(0_3/90_3/\pm45)_{SE}$, panel de abeja (0), piel 2 $(0_3/90_3/\pm45)_{SE}$. La orientación del panel de abeja se ha colocado en 0º, ya que se ha visto mediante simulación que este parámetro no es significativo para los resultados finales de la rueda.

T300/3501-5	E_x=133 Gpa E_y=15.25 Gpa E_z=15.25 Gpa	G_{xy}=5.4 GPa	ν_{xy}=0.28	ρ=1530 Kg/m^3	α_x= 0.05389E-06/°C α_y= 29.9E-06/°C α_z= 29.9E-06/°C
Nomex	E_x=0.001 Gpa E_y=0.001 Gpa E_z=1.276 Gpa	G_{xy}=0.00037 GPa G_{yz}=0.063 Gpa G_{xz}=0.063 GPa	ν_{xy}=0.35	ρ=64 Kg/m^3	α_x= 23E-06/°C α_y= 23E-06/°C α_z= 23E-06/°C
Stainless Steel 304LN	E=200 Gpa		ν=0.3	ρ=7900 Kg/m^3	α_x= 17E-06/°C
Aluminum EN AW 6063	E=70 Gpa		ν=0.33	ρ=2690 Kg/m^3	α_x= 23.4E-06/°C

Tabla 4.12: *Valores de los materiales utilizados para la simulación de la estructura de alineación LINK.*

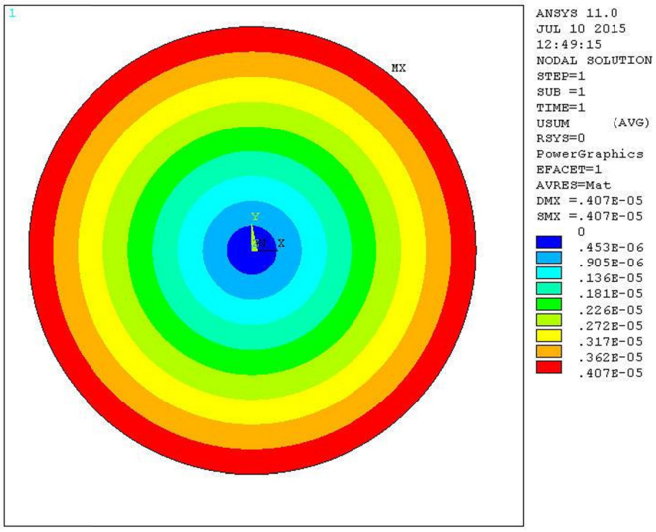


Figura 4.51: *Deformación experimentada por la membrana tipo sándwich de 20 mm espesor y Ø=2 m, a ser sometida a un gradiente de 1 ºC.*

Con este valor CTE_{LD} aplicado a la formula (4.10), y suponiendo el CTE_{YN1}= 12 µm/mºC, tenemos que se produce dilatación diferencial de aproximadamente 9.3 µm/ºC por cada grado, entre la base de los apoyos en la YN1 y la estructura LINK, lo que inducirá deformaciones sobre el LD, lo cual es mucho más pequeño que las producidas por el propio desplazamiento diferencial que sufren las TPs por el encendido del imán, que se mostraron en la tabla 4.10.

Para estimar estas deformaciones inducidas sobre el LD, se realizaron una serie de **simulaciones de alambres** (figuras 4.52), con diferentes tipos de fijaciones del RP al LD [76, 218 y 219], donde se aplicaban una serie de

pequeñas cargas sobre el LD (0.8 kg/LB), simulando los elementos con los que va instrumentado. Suponiendo que los RPs son tubos rectangulares de acero inoxidable (80 mm en Rφ, 40 mm en Z, espesor de 1.5) de 1.95 m de longitud y los LPs son tubos redondos de aluminio ($Ø_e$= 40 mm y 2 mm de espesor) y 3.6 m longitud. En este supuesto los RP tenían un descentramiento paralelo a R, en el plano Rφ de unos 25 mm, ya que no van radialmente situados respecto a CMS, e igualmente en Z están descentrados 10 mm respecto al eje del LD y la fijación del LP era una rótula sobre el LD y un soporte deslizante en el segundo apoyo a Z≈ 4000 mm. Aquí se aplicó un gradiente de temperatura de ±5 ºC.

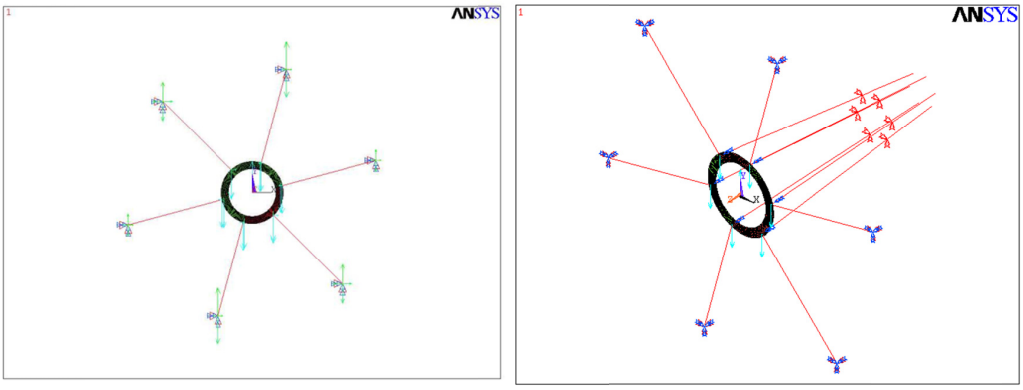


Figura 4.52: *Modelos planos de alambres simulando la estructura de alineación LINK.*

Obteniendo que para el lado positivo de CMS, aplicando los desplazamientos en apoyos de la tabla 4.10, se obtienen los resultados de la tabla 4.13 y la tabla 4.14 se obtuvo sin desplazamientos en apoyos:

Gravity	**X-Displac.**	**Y-Displac.**	**Z-Displac.**	**Total Displacement**
	411 µm	454 µm	-444 µm	1578 µm
	-411 µm	-365 µm	-1333 µm	733 µm
Gravity and	**X-Displac.**	**Y-Displac.**	**Z-Displac.**	**Total Displacement**
Temperature (+5 º C)	719 µm	762 µm	-222 µm	1578 µm
	-719 µm	-672 µm	-1333 µm	733 µm
Gravity and	**X-Displac.**	**Y-Displac.**	**Z-Displac.**	**Total Displacement**
Temperature (-5 ºC)	103 µm	148 µm	-444 µm	1577 µm
	-103 µm	-60.2 µm	-1333 µm	733 µm

Gravity	**X-Rotation.**	**Y- Rotation.**	**Z- Rotation.**	**Total Rotation**
	716 µrad	468 µrad	-206 µrad	883 µrad
	-101 µrad	-184 µrad	-371 µrad	392 µrad
Gravity and	**X-Rotation.**	**Y- Rotation.**	**Z- Rotation.**	**Total Rotation**
Temperature (+5 º C)	868 µrad	546 µrad	-397 µrad	1131 µrad
	-31.7 µrad	-138 µrad	-596 µrad	754 µrad
Gravity and	**X-Rotation.**	**Y- Rotation.**	**Z- Rotation.**	**Total Rotation**
Temperature (-5 º C)	651 µrad	394 µrad	15.4 µrad	664 µrad
	-72.9 µrad	-197 µrad	-127 µrad	221 µrad

Tabla 4.13: *Desplazamientos y rotaciones que sufre el LD con el encendido del imán, por cargas de gravedad y con gradientes de temperatura.*

Gravity	**X-Displac.**	**Y-Displac.**	**Z-Displac.**	**Total Displacement**
	-21.4 µm 11 µm	-41.1 µm 0 µm	--111 µm 45.7	111 µm
Gravity and	**X-Displac.**	**Y-Displac.**	**Z-Displac.**	**Total Displacement**
Temperature (+5 º C)	-307 µm 305 µm	-311 µm 301µm	154 µm -130 µm	344 µm
Gravity and Temperature (-5 ºC)	**X-Displac.**	**Y-Displac.**	**Z-Displac.**	**Total Displacement**
	-311 µm 309 µm	-314 µm 303 µm	-189 µm 0 µm	359 µm

Gravity	**X-Rotation.**	**Y- Rotation.**	**Z- Rotation.**	**Total Rotation**
	135 µrad -72.4 µrad	-61.7 µrad 56.5 µrad	71.7 µrad -68.9	145 µrad
Gravity and	**X-Rotation.**	**Y- Rotation.**	**Z- Rotation.**	**Total Rotation**
Temperature (+5 º C)	296 µrad -124 µrad	178 µrad -117µrad	-293 µrad 0 µrad	410 µrad
Gravity and Temperature (-5 º C)	**X-Rotation.**	**Y- Rotation.**	**Z- Rotation.**	**Total Rotation**
	139 µrad -122 µrad	-232 µrad 153 µrad	296 µrad 0 µrad	348 µrad

Tabla 4.14: *Desplazamientos y rotaciones que sufre la estructura LINK con el imán apagado (posición de instalación), por cargas de gravedad y con gradientes de temperatura.*

Estos valores claramente no eran aceptables, según las premisas impuestas al principio del estudio. Para ver más detalladamente los tipos de distorsiones inducidas sobre la rueda se realizó un **modelo sólido**, con gradientes de temperatura de ± 3 ºC, donde se utilizaron RPs de aluminio, se modelizaron un tipo de fijaciones 'flexibles', para que no introdujeran mucha tensión al LD y se traspasaron las reacciones de los LPs cómo cargas sobre el LD (Figura 4.53), en este caso se utilizaron elementos SHELL99 para las pieles del sándwich y SHELL63 para el perfil radial y las fijaciones flexibles, SOLID73 para la TP y algunos insertos y SOLID95 para el HoneyComb del sándwich. Y cuyos resultados se resumen en la tabla 4.15.

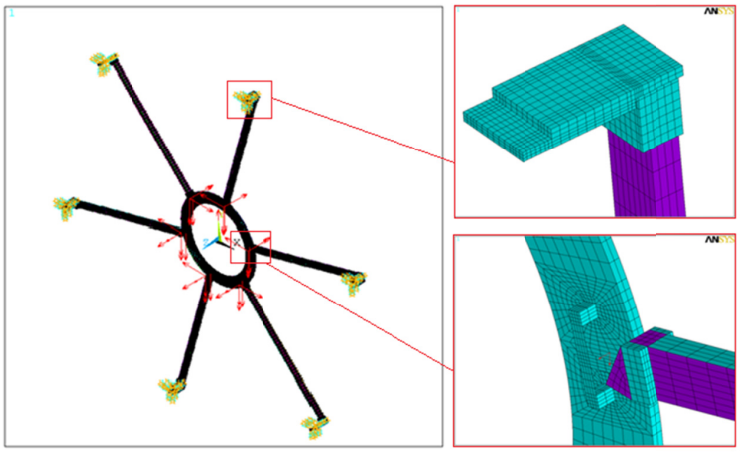


Figura 4.53: *Modelo sólido simulando la estructura de alineación LINK.*

	Gravity		Grav_+3ºC		Grav_-3ºC	
	On the Structure	On the disc	On the Structure	On the disc	On the Structure	On the disc
Ux (μm)	(-226 to +228)	(-226 to +228)	(-630 to +633)	(-630 to +633)	(-1083 to +1085)	(-1083 to +1085)
Uy	(-198 to +269)	(-198 to +269)	(-603 to +672)	(-603 to +672)	(-1058 to +1129)	(-1058 to +1129)
Uz	(-2 to +2000)	(888 to +1555)	(-256 to +2004)	(-256 to +1000)	(-44 to +2516)	(1396 to +2516)
Usum	(81 to +2000)	(934 to +1574)	2004	(308 to +1156)	(49 to +2716)	(1827 to +2716)
Rotx (μrad)	(-1909 to +723)	(-1324 to -155)	(-2121 to +1229)	(-1376 to +112)	(-2571 to +1019)	(-1773 to +620)
Roty	(-878 to +604)	(-548 to +440)	(-1372 to +1031)	(-838 to +764)	(-1153 to +1101)	(-902 to +1101)
Rotz	(-766 to +408)	(-114 to -168)	(-662 to +1788)	(-117 to +155)	(-2957 to +1041)	(-292 to -153)
Rotsum	1967	(219 to +874)	2241	(0 to +996)	3510	(1560 to +3510)

Tabla 4.15: *Desplazamientos y rotaciones que sufre la estructura LINK y el LD con el encendido del imán, por cargas de gravedad y con gradientes de temperatura.*

Observando las figuras 4.54A y figuras 4.54B, podemos deducir que los grandes valores de desplazamientos y rotaciones que sufre el LD son inducidos por los apoyos del RP, que le provocan un giro en torno a su eje y grandes desplazamientos, seguramente inducidos en parte por los descentramientos de apoyos. Aunque lo más importante es que le inducen deformaciones locales importantes, con lo que se perderían las calibraciones realizadas al LD durante su operación.

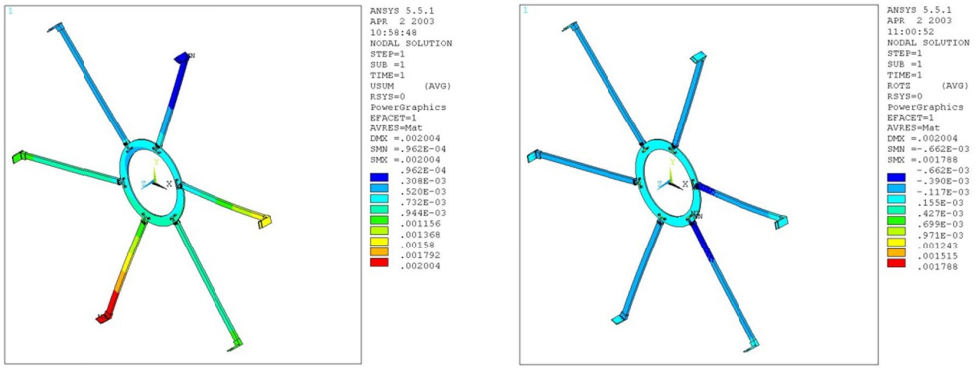


Figura 4.54A: *Resultados de desplazamientos (Izq.) y rotaciones (Der) que sufre la estructura LINK, con carga térmica de +3 ºC, al encender el imán (valores en m y en rad).*

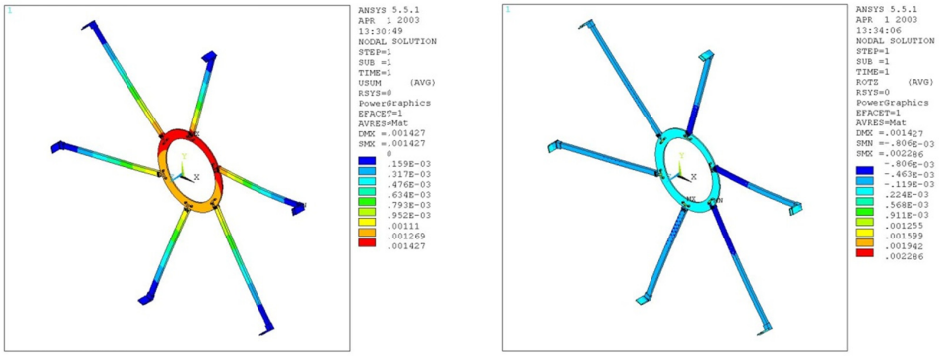


Figura 4.54B: *Resultados de desplazamientos (Izq.) y rotaciones (Der) que sufre la estructura LINK, con carga de gravedad y térmica de +3 ºC, en la situación de montaje, con el imán apagado (valores en m y en rad).*

Concluyendo que era necesario utilizar apoyos isostáticos para evitar inducir distorsiones del LD a través de los apoyos.

De esta forma se llegó a la **actual estructura de alineación**, que ha sido descrita a lo largo del actual capítulo, utilizando un modelo isostático de LD (figura 4.55), apoyado en la región η=3 sobre el extremo inferior de 3 RP solamente, los de 75º, 195º y 315º, donde los valores de desplazamientos relativos entre las TPs son menores (4.10). Con una distribución de capas y espesores cómo aparece en la figura 4.46. Esta LD tiene un espesor mucho mayor de HoneyComb, para mejorar en rigidez en el plano donde se asientan las LBs y además están cerrados los bordes laterales para contribuir a mejorar aún más su rigidez estructural. Los resultados de este estudio están resumidos en la tabla 4.16.

	Gravity		Grav_+3ºC		Grav_-3ºC	
	On the disc	around to LB	On the disc	around to LB	On the disc	around to LB
Ux (μm)	(-36 to +4)	(-36 to +4)	(-37 to +4)	(-37 to +4)	(-36 to +4)	(-35 to +4)
Uy	(-30 to +5)	(-30 to +5)	(-31 to +5)	(-31 to +5)	(-30 to +5)	(-29 to +5)
Uz	(-3 to +3)	(-3 to +3)	(-5 to +5)	(-5 to +5)	(-6 to +5)	(-6 to +6)
Usum	43	43	44	44	44	44
Rotx(μrad)	(-85 to +56)	(-23 to +9)	(-161 to +149)	(-58 to +46)	(-161 to +148)	(-58 to +45)
Roty	(-46 to +59)	(-11 to +12)	(-161 to +165)	(-52 to +56)	(-155 to +160)	(-50 to +55)
Rotz	(-92 to +47)	(-61 to 0)	(-219 to +182)	(-85 to +49)	(-213 to +145)	(-54 to +25)
Rotsum	(1 to +96)	(1 to +64)	(1 to +219)	(1 to +98)	(1 to +215)	(1 to +96)

Tabla 4.16: *Desplazamientos y rotaciones que sufre el LD, apoyado isostáticamente sobre 3 fijaciones, por cargas de gravedad y gradientes de temperatura.*

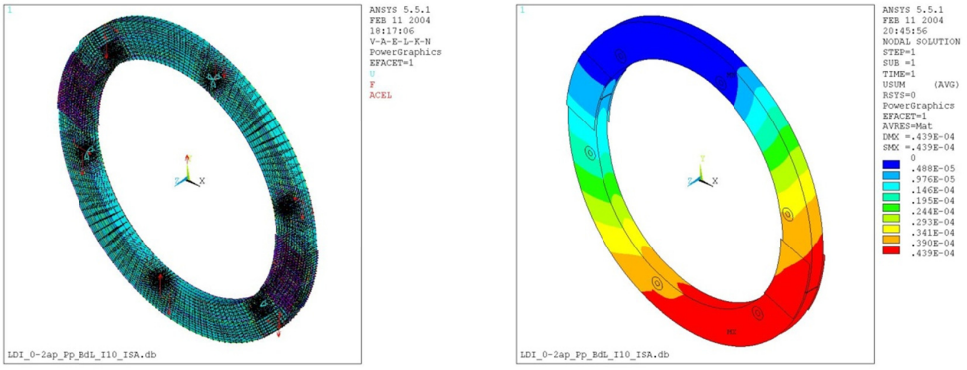


Figura 4.55: *Modelo sólido del LD sobre apoyos isostáticos (Izq.). Desplazamientos totales que sufre el LD con cargas de gravedad y térmicas de +3 ºC (Der.).*

En estos resultados, se simuló un modelo partido, con unas fijaciones entre ambas mitades, al estilo del AR, debido a que se pensaba en ese momento en la posibilidad de tener que desmontar el LD durante las tareas de mantenimiento de CMS, pero finalmente no fue necesario realizarlo. Los cálculos se supone que son válidos para el LD actual sin partir, por ser este último caso una opción más conservativa que la estructura partida. Pudiendo concluirse que estos resultados están dentro de las necesidades de estabilidad (<50 µm) impuestas al LD.

Capítulo 5: Estudio de la estabilidad dimensional y de la resistencia a impacto, de los insertos pegados, frente a irradiación.

Este fundamental capítulo de la tesis, se divide en dos partes claramente diferenciadas: hasta el punto 5.3 se muestra un profundo estudio del estado del arte de las uniones adhesivas, y del adhesivo seleccionado; y a continuación se expone el desarrollo experimental seguido para la consecución de los objetivos propuestos en el capítulo 1, y que se describe resumidamente en el punto 5.4.

Los principales objetivos buscados en este capítulo de la tesis son el estudio de la estabilidad dimensional de las uniones adhesivas utilizadas por el sistema de alineación LINK en CMS; y su resistencia frente a posibles impactos fortuitos, que puedan tener lugar durante los períodos de mantenimiento del detector.

5.1. Estado del arte y necesidad.

Todos los componentes opto-mecánicos y de detección del sistema de alineación LINK van a estar soportados por algún tipo de inserto o pieza metálica, la cual en el caso de ir sobre una estructura de fibra de carbono, o sobre un componente metálico ya instrumentado, irá pegada a la misma por una resina epoxi tipo Araldite 2011. Por otro lado todos los componentes montados y fijados mediante tornillería y posicionados mediante pasadores cilíndricos de precisión sobre una estructura de aluminio 7075, 6061 o de inoxidable 304LN, y que puedan ser susceptibles a aflojarse por estar afectadas por algún tipo de carga dinámica, efectos de temperatura diferencial, etc, utilizarán este mismo adhesivo para realizar un sellado que garantice su estabilidad.

Se escogió Araldit 2011, ya que es un epoxi que puede ser utilizado en un amplio abanico de materiales y con unas prestaciones mecánicas muy altas. Al ser un epoxi su comportamiento frente a irradiación es bastante bueno, según estudios previos realizados en el CERN, donde además se ha visto que, usualmente, la interfase adhesivo-adherente no es sensible a la radiación [40], Por otra parte se ha evaluado su comportamiento mecánico mediante ensayos de tracción, que demuestren que no sufre degradación apreciable para los niveles a que se verá sometido el sistema de alineación LINK.

El principal tipo de enlace químico de un polímero es el covalente, que es muy sensible a las radiaciones ionizantes, cómo es el caso de la radiación γ [40]. Los principales cambios químicos esperados en los adhesivos, por la acción de la irradiación [40, 223], son las roturas de enlaces de la cadena polimérica (Scission) y la formación de enlaces adicionales, a menudo entre las cadenas rotas (Cross-Linking), dando lugar a un cambio de las propiedades mecánicas (cristalización, fragilización, reticulación de las cadenas del polímero, rigidez, mayor resistencia, etc., obteniendo un adhesivo más rígido y resistente al

aumentar el grado de entrecruzamiento del adhesivo) y ópticas (perdida de transparencia) del adhesivo en cuestión.

A lo largo de las últimas décadas se han llevado a cabo una serie de estudios para ver la influencia de la radiación sobre algunas propiedades de materiales orgánicos e inorgánicos utilizados en aceleradores de partículas [35, 36, 38, 221, 223, 224 y 225], recubrimientos de cables o fibras [33, 37, 226] y de algunas uniones adhesivas [34, 39, 40, 41, 220 y 222]. Este material ha sido utilizado de base de partida para la selección y diseño de los componentes utilizados en CMS y el LHC.

Durante los períodos de instalación, sus paradas de mantenimiento y operación, se ha constatado que el sistema de alineación, por estar en todos los sub-detectores, se ha visto sometido a condiciones que en su día no parecía que iban a ser tan adversas. Pero la realidad ha sido que a pesar de los estrictos protocolos de actuación, en el detector CMS, durante las fases de instalación, mantenimiento y operación, la manipulación de componentes cercanos al sistema LINK o del propio sistema, ha dado lugar, en muchos casos por la dificultad de acceso a los mismos (mediante andamios, plataformas elevadoras, utilizando arneses para el acceso, etc,) a una serie de impactos directos o indirectos sobre componentes del sistema en algunos casos bastante fuertes, llegando a deformar las cubiertas de seguridad que llevan los elementos del sistema LINK como protección. Por ello se ha considerado la necesidad de conocer si en el futuro próximo, cuando el acelerador funcione a su intensidad nominal, este sistema va a seguir siendo funcional con las dosis de irradiación recibida, ya que un efecto que podría tener sobre el adhesivo es la fragilidad, y por tanto la reducción de energía que puede absorber la unión adhesiva, lo que daría lugar a replantearse en el futuro unos protocolos de actuación mucho más estrictos que los actuales, para evitar en lo posible impactos sobre el sistema LINK, que podrían significar la rotura de partes del sistema.

Paralelamente, se ha desarrollado un estudio para evaluar la estabilidad estructural de la unión adhesiva, frente a la irradiación. La degradación de la unión adhesiva puede implicar deformaciones en el adhesivo y por tanto movimientos de los componentes opto-mecánicos y de detección que soporta. Esto distorsionaría los resultados de las medidas que realiza el sistema de alineación de CMS, sobre los diferentes sub-detectores, induciendo a error, a la hora de hacer la reconstrucción de las trayectorias de las partículas y por tanto, en su correcta identificación y medición.

Durante las fases de estudio previo sobre este adhesivo, se ha buscado información sobre la resistencia a impacto del Araldit 2011, pero no se ha encontrado bibliografía al respecto, ni el fabricante disponía de este tipo de datos en sus bases de datos internas. Al igual que no se han encontrado datos, de la estabilidad dimensional de este tipo de unión adhesiva, frente a irradiación. Esto ha llevado a la necesidad de realizar estos dos estudios con los medios disponibles, para así poder evaluar la estabilidad dimensional de las uniones adhesivas unidas mediante Araldit 2011 y su resistencia energética a impactos, frente a la irradiación recibida.

5.2. Unión adhesiva: antecedentes.

Los adhesivos son conocidos y han sido utilizados desde la prehistoria hasta la actualidad. Desde la prehistoria donde se han encontrado evidencias de la utilización de adhesivos en utensilios de piedra de hace 70000 años en la cueva Sibudu, en Sudáfrica [227], donde utilizaban un adhesivo a base de resina de plantas, pasando por la edad antigua donde aparecen numerosas referencias a la utilización de morteros para la construcción o la utilización de brea para calafatear embarcaciones, hasta el comienzo de su utilización más extendida a finales del XIX, por la mejora de sus propiedades y la industrialización de los procesos de fabricación. Los desarrollos más importantes se produjeron en torno a la década de los años cuarenta, del siglo XX, con la aparición de los epoxis, poliuretanos y posteriormente los cianoacrilatos. Hoy en día el sector del adhesivo se encuentra en pleno crecimiento, dado que se está ofreciendo rendimientos de uniones muy competitivas frente a otras soluciones constructivas como pueden ser las soldaduras, uniones por fricción, uniones mecánicas o uniones híbridas.

5.2.1. Definiciones.

Un **adhesivo**, es aquella sustancia, que aplicada entre dos superficies a unir, permite crear una unión resistente a su separación (**Unión Adhesiva**).

Se denominan **sustratos** o **adherentes** a los materiales que se pretender unir mediante el adhesivo (Figura 5.1). Al conjunto de interacciones físico-químicas que tienen lugar en la **intercara** adhesivo-adherente se denomina **adhesión**, siendo la acción de las fuerzas que oponen resistencia a la separación de las moléculas pertenecientes a diferentes materiales. Por otro lado se denominará **cohesión** a la acción de las fuerzas que se oponen a la separación de las moléculas de un mismo material.

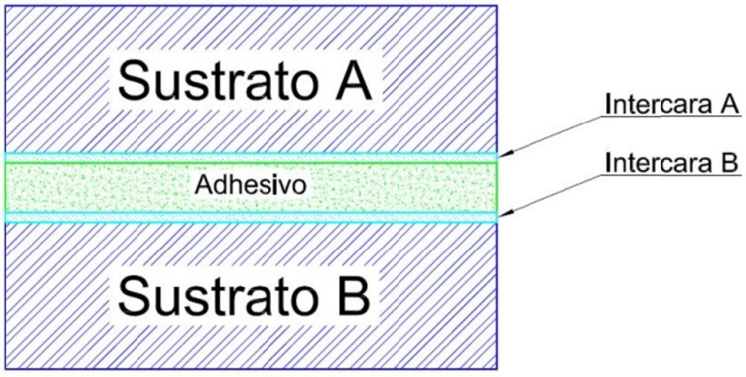


Figura 5.1: *Esquema de una Unión Adhesiva.*

5.2.2. Mecanismos de adhesión y modos de fallo.

Para lograr una buena unión adhesiva debe lograrse una distribución del adhesivo que consiga un buen contacto interfacial entre ambos sustratos y ser curado en las condiciones idóneas, según el tipo de adhesivo. El **mecanismo de adhesión**, de forma esquemática, puede ser explicado en las siguientes pasos: contacto molecular o mojado del adhesivo sobre el sustrato, desarrollo de fuerzas adhesivas, ganancia de cohesión e incremento de la viscosidad y desarrollo de una unión efectiva en la que, para separar los sustratos, sea necesaria la aplicación de una fuerza superior a la intrínseca de la adhesión, cómo las de van der Waals.

La resistencia de una unión adhesiva siempre será la del componente más débil de la misma. El fallo de cualquiera de los elementos de la figura 5.1 dará lugar a diferentes modos de fallo. Según la ISO 472, se denomina **fallo de adhesión** a la 'rotura de una junta adhesiva en la cual la separación aparece claramente visible en la interfase adhesivo/sustrato', mientras que **fallo de cohesión** se llama a la 'rotura de una junta adhesiva en la cual la separación aparece claramente visible en el adhesivo o en el sustrato'.

5.2.2.1. Mecanismos de adhesión.

No existe un modelo unificado que explique el fenómeno en su conjunto sino que se presentan diferentes modelos que sirven para dar explicación a casos particulares, siendo necesaria la utilización de más de una de estas teorías para conseguir explicar una gran cantidad de casos, a continuación se describirán brevemente los modelos más utilizados. Pueden distinguirse dos tipo de fenómenos en la interfase sustrato/adhesivo, los físicos (modelo de adhesión mecánica, teoría de interdifusión y teoría electrostática) y los químicos (teoría de la adsorción termodinámica) [229, 230 y 231].

5.2.2.1.1. Teoría de la adhesión mecánica.

La unión mecánica entre el adhesivo y el sustrato se basa en el anclaje del adhesivo en los poros y rugosidades de la superficie del sustrato. La penetración del adhesivo adaptándose a la superficie del sustrato da lugar a una superficie de contacto real centenares de veces mayor que la aparente.

La tabla 5.1 muestra el resultado de un estudio realizado por D.J. Arrowsmith [233], en el que se estudió la resistencia de una unión adhesiva con epoxi sobre una junta de Cu y Ni electro-formado, en el que se argumenta la importancia de la adhesión mecánica, cómo mecanismo de adhesión en este caso.

Con esta teoría los factores de rugosidad y porosidad son favorables al mecanismo de adhesión, pero es preciso asegurar una buena 'mojabilidad' del sustrato por el adhesivo utilizado, pudiendo ser considerados puntos de iniciación de la rotura de la unión adhesiva las oquedades no alcanzadas por el adhesivo. En general, los poros generan una adhesión superior a las hendiduras, generando un aumento de la superficie de contacto con el adhesivo.

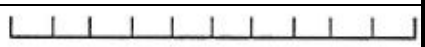
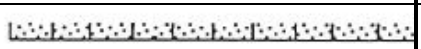
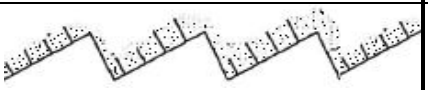
Estado superficial de la lámina		E. de Pelado (KJ/m^2)
Descripc. de la Superficie	Esquematiz. de la Superficie	
Lisa		0,66
Lisa + dendritas de 3 μm.		0,67
Lisa + dendritas de 3 μm + oxidación.		0,77
Hendiduras piramidales agudas de 3 μm.		1
Hend. piram. obtusas de 2 μm + dendritas de 0,3 μm.		1,03
Hend. piram. obtusas de 2 μm + dendritas de 0,3 μm. + oxidación.		1,5
Estructura nodular porosa.		2,3
Hend. Piram. aguda de 3 μm +dendritas de 0,3 μm. + oxidación.		2,4

Tabla 5.1: *Resistencia al pelado de juntas de Cu y Ni con epoxi (Fuente ref. [233]).*

5.2.2.1.2. Teoría de la adhesión por interdifusión.

Esta teoría esta basada en la interdifusión de moléculas entre las fases del sustrato y el adhesivo y explica la adhesión de los polímeros entre sí. Está basada en la existencia de una mutua interpenetración de las cadenas poliméricas, facilitada por la existencia de movimientos brownianos moleculares de estas. Este fenómeno puede comprobarse en la desaparición de unos límites perfectamente definidos entre adhesivo/adherente, apareciendo una transición gradual entre estos, creándose una interfase (intercara) con cierto espesor. La interdifusión entre las moléculas poliméricas que componen el adhesivo y el sustrato depende de factores cómo la presión aplicada entre las superficies, la temperatura y el tiempo. Y ha de cumplirse que las macromoléculas o cadenas de los polímeros dispongan de la movilidad suficiente, sean solubles entre sí y tengan una solubilidad similar. Hildebrand propuso una relación entre la solubilidad y la energía de vaporización, que está relacionada con la energía de cohesión de las moléculas, consiguiendo de esta forma una valoración cuantitativa del grado de interacción entre materiales.

$$\delta = \sqrt{\frac{\Delta E}{V}} = \sqrt{\frac{\Delta H - R \times T}{M/\rho}} \qquad (5.1)$$

Siendo δ el parámetro de solubilidad (Hildebrands), V el volumen molar, ΔH el calor latente de vaporización, R la constante universal de los gases ideales, T la temperatura en ˚K, M la masa molecular y ρ la densidad.

5.2.2.1.3. Teoría de la adhesión electrostática

Esta se basa en que cuando el adhesivo y sustrato tienen diferente estructura de bandas electrónicas es probable que pueda ser transferido algún electrón, variando los niveles de equilibrio de Fermi, y resultando la formación de una doble capa de cargas eléctricas en la intercara, con una estructura similar a un condensador. Este modelo sólo puede aplicarse a casos particulares y no se puede considerar como universal, la contribución de las fuerzas de adhesión electrostática es, en algunos casos, comparable a las de Van der Waals], según un estudio realizado por H. Graf Von Harrach y B.N. Chapman [228] en el que se realizó un estudio sobre la adhesión de unas láminas metálicas electro-depositadas en vacío, a través la medida del trabajo realizado para despegar éstas de sus sustratos aislantes, en vacío.

5.2.2.1.4. Teoría de la Adsorción.

Esta teoría también llamada del 'mojado superficial' explica el comportamiento de muchas uniones adhesivas. Se basa en la suposición de que el adhesivo 'moja' la superficie del adherente. Cuando se logra un contacto molecular lo suficientemente íntimo, la adhesión entre el adherente y adhesivo puede ser llevado a cabo mediante las fuerzas interatómicas e intermoleculares que se establecen entre los átomos y moléculas de la intercara de contacto. Donde están involucradas diferentes tipos de fuerzas, para poder explicar este fenómeno, las fuerzas secundarias (de van der Waals y los enlaces por Puente de Hidrógeno) y las primarias (enlace Iónico y Covalente), en la tabla 5.2, se encuentra una estimación de estos valores.

Type			**Bond Energy** (KJ/mol)
Primary bonds	Ionic		600-1000
	Covalent		60-700
	Metallic		110-350
Donor-acceptor bonds	Bronsted acid-base interactions (i.e. up to a primary ionic bond)		Up to 1000
	Lewis acid-base interactions		Up to 80
Secondary bonds	Hydrogen bonds	Hydrogen bonds involving fluorine	Up to 40
		Hydrogen bonds excluding fluorine	10-25
	Van der Waals bonds	Permanent dipole-dipole interactions	4-20
		Dipole-induced dipole interactions	Less than 2
		Dispersion (London) forces	0.08-40

Tabla 5.2: *Tipos de uniones atómicas y moleculares y sus energías típicas (Fuente ref. [236]).*

Para que estas fuerzas lleguen a funcionar correctamente, las distancias entre adhesivo y adherente deben aproximarse a los órdenes moleculares y atómicos, lo que requerirá que el adhesivo logre un buen contacto (mojado) sobre la superficie del adherente. A pesar de la debilidad relativa de los enlaces secundarios, en la práctica pueden generar fuertes uniones puesto que la superficie total en contacto puede llegar a ser muy grande. Los primarios suelen ser necesarios para la adhesión de materiales cerámicos.

El fenómeno de mojado está ligado a la energía libre de las superficies y a la viscosidad y tensión superficial del adhesivo. La viscosidad se determina utilizando la norma UNE-EN 12092, en la que se especifican seis métodos adecuados para determinar la viscosidad en una gran variedad de adhesivos, donde se determina el método más adecuado en función de la viscosidad y comportamiento del líquido (si es o no Newtoniano). Una forma de medir la energía libre superficial de un elemento sólido es a través de la medición del ángulo que forma una gota de líquido de tensión superficial conocida sobre la superficie en cuestión, mediante la aplicación de la norma UNE-EN 828, por la que se determina la tensión crítica de la superficie, que es aquella en la que el ángulo de avance θ es igual a 0, siendo en este caso el trabajo de adhesión máximo, obteniéndose una mojabilidad completa.

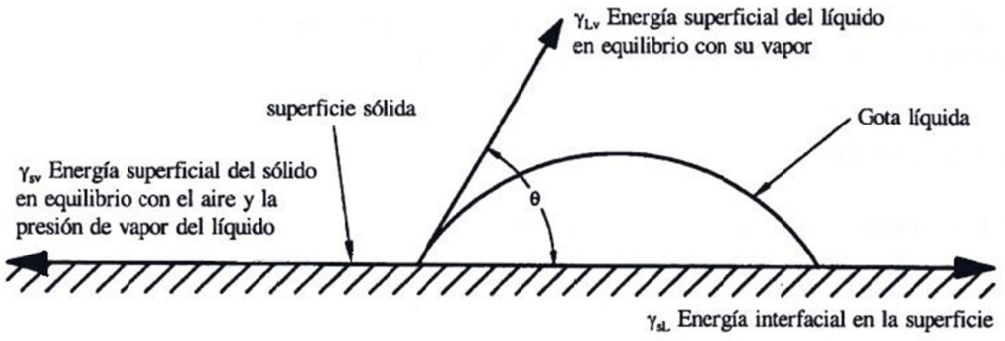


Figura 5.2: *Equilibrio de tensiones de una gota líquida sobre una superficie sólida.*

En condiciones de equilibrio, las tensiones que aparecen sobre una gota líquida depositada sobre una superficie sólida (figura 5.2), están relacionadas mediante la ecuación de Young:

$$\gamma_{LV} \cos\theta = \gamma_{SV} - \gamma_{SL} \qquad (5.2)$$

Los valores pequeños del ángulo de avance están ligados a altas energías superficiales del sustrato sólido y bajas tensiones superficiales del líquido. Adhesivos de baja energía superficial pueden mojar espontáneamente y, consecuentemente, unir sustratos de alta energía, pero no al contrario, en este caso se requeriría la aplicación de una presión externa u otro tipo de acción que fuerce al adhesivo a esparcirse sobre la superficie sólida.

5.2.2.2. Modos de fallo de una junta adhesiva.

Al diseñar una junta adhesiva, se pretende que el fallo de la misma se produzca siempre de forma cohesiva y nunca en la interface entre el adhesivo y adherente. Los modos de rotura adhesiva como se ha explicado no son fáciles de predecir y dependen de muchos factores, en cambio sí pueden obtenerse las características mecánicas del adhesivo, pudiendo predecirse las cargas de rotura en modo cohesivo. Con el objetivo de poder clasificar los tipos de rotura y poder comprender mejor los resultados cuantitativos de cualquier ensayo mecánico realizado sobre una junta adhesiva, se ha realizado una clasificación de los modos de rotura. En la Tabla 5.3, se muestra esquematizada la designación propuesta, por la norma ISO 10365, para los diferentes modelos de rotura.

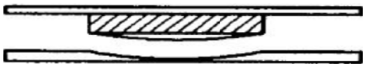
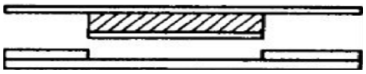
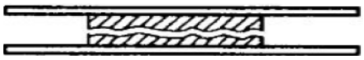
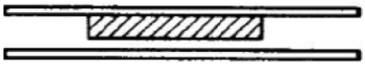
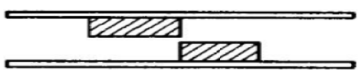
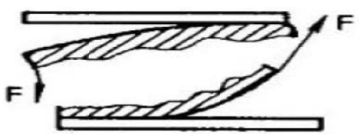
Posic. Rotura	**Modelos de Rotura**		Desig.
Adherente		Rotura de uno o ambos sustratos (Rot. de sustrato)	SF
		Rotura en un sustrato (Rot. Cohesiva de sustrato)	CSF
		Rotura por deslaminación	DF
Adhesivo		Rotura cohesiva	CF
		Rotura cohesiva especial	SCF
		Rotura cohesiva especial	SCF
		Rotura adhesiva	AF
		Rotura adhesiva	AF
		Rotura adhesiva y cohesiva con pelado	ACFP

Tabla 5.3: *Designación de los modelos de rotura de las uniones adhesivas.*

Según esta norma, cuando se produzca más de un tipo de rotura se debe especificar el porcentaje aproximado para cada uno de los modelos. Cuando se produce por deslaminación debe indicarse la naturaleza del recubrimiento. Y cuando se produzca una rotura oscilante, entre dos modelos, debe añadirse la indicación 'OSC' tras la designación de los modelos de rotura. Se puede ver el

siguiente ejemplo de designación (5.3), para un modelo de rotura oscilante entre dos modelos:

AF (50%)+ CF (50%), OSC (5.3)

5.2.3. Ventajas e inconvenientes de una junta adhesiva.

Una unión adhesiva presenta una serie de ventajas e inconvenientes respecto a otros métodos de unión de materiales [229, 230 y 231]. Como ventajas se pueden destacar que:

Tiene la propiedad de distribuir los esfuerzos uniformemente sobre toda la superficie de contacto, lo cual le confiere una importante propiedad a la hora de evitar concentración de tensiones, que pueden ocurrir en los procesos de soldadura, soldadura por puntos, remaches, etc (Figura 5.3).

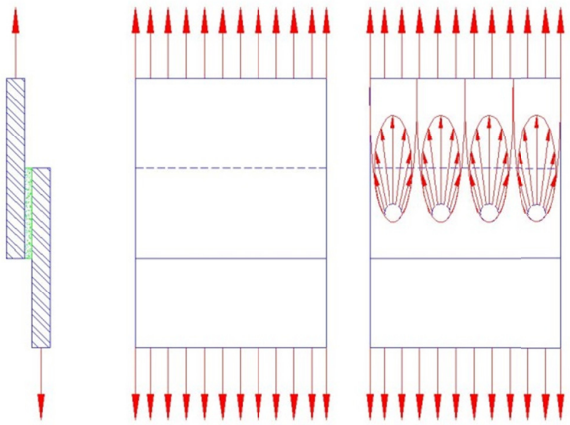


Figura 5.3: *Distribución de tensiones en una unión adhesiva y otra soldada por puntos.*

No se produce distorsión de los sustratos unidos, cómo si puede ocurrir mediante esfuerzos mecánicos o en el caso de la unión por soldadura que además puede producir cambios estructurales del material. Permitiéndose la unión de sustratos de diferentes características y propiedades. Siendo relativamente económica. Estos son los principales motivos de utilización del adhesivo por nuestro sistema.

Puede tener la función de elemento sellante, pudiendo ser utilizada en combinación con otro tipo de uniones mecánicas, que además mejoran las propiedades de la unión resultante.

Tiene cierta función aislante, permitiendo la unión de metales con propiedades electroquímicas diferentes, evitando la corrosión galvánica

bimetálica. Al igual que evita la entrada de elementos corrosivos, por efecto ocupacional. Y si el adhesivo tiene cierta elasticidad, se pueden anular las tensiones inducidas por la dilatación térmica diferencial entre elementos heterogéneos unidos mediante adhesivo, sirviendo además cómo elemento amortiguador de vibraciones e impactos mecánicos.

Reducen el número de elementos de la unión y consecuentemente sus costes de manipulación. Resultando uniones estéticamente más vistosas. Pudiendo ser unidos entre sí sustratos muy delgados o de morfologías complicadas.

Y cómo inconveniente principales, se pueden destacar:

Para conseguir obtener unos resultados fiables y repetitivos es necesario realizar un cuidadoso proceso de preparación superficial, previa al pegado de superficies. Y han de ser mezclados los componentes en la proporción correcta, en caso de ser necesario y aplicados de forma correcta durante su breve vida útil de manipulación. Necesitando posteriormente un tiempo para su curado, en ciertas condiciones ambientales, en el que la unión no debe ser manipulada, si se quieren conseguir buenos resultados de la unión. Siendo difícil su desmontaje una vez fraguado el adhesivo. En este proceso pueden ser requeridos equipos específicos para realizar la unión y curado del adhesivo (prensas, autoclaves, sistemas de vacío, lámparas UV, etc)

Tiene una limitada resistencia mecánica combinada al pelado y a la temperatura. Necesitando ensayos mecánicos destructivos para garantizar la resistencia de la unión realizada.

5.2.4. Clasificación de los adhesivos.

Hay muchas formas de clasificar los adhesivos, puesto que existe una gran variedad de estos, que son de naturaleza y orígenes muy diferente. Así, pueden ser clasificados, por ejemplo, por la **naturaleza** del material en el que están fabricados (adhesivos termoplásticos, adhesivos elastómeros, adhesivo termoestables), por su **origen** (colas animales, adhesivos vegetales, adhesivos orgánicos sintéticos), etc.

Debido a que nuestra utilización del adhesivo es estructural, se va a utilizar una clasificación, reducida, basada en el **mecanismo de formación de la junta** adhesiva. En esta se distinguen dos grandes grupos: los *adhesivos pre-polimerizados* y los *reactivos* [40, 229, 230 y 231], siendo estos últimos los únicos con los que se pueden obtener unas resultados fiables de uniones adhesivas estructurales.

5.2.4.1. Adhesivos pre-polimerizados.

Son aquellos adhesivos cuyo polímero ya existía antes de utilizarlo sobre la junta. Estos a su vez se subdividen en función de la fase en que se encuentra el adhesivo (fase líquida y sólida).

Dentro de la clasificación en **fase líquida** se encuentran: Las *soluciones acuosas* de *origen natural* (animal, vegetal y mineral), cómo pueden ser las colas de origen animal, el almidón, cementos y yesos. Las *soluciones acuosas* de *origen sintético* basados fundamentalmente en polímeros de PAV (Polialcohol vinílico), PEG (polietilenglicol) y PVP (polivinilpirrolidona). Las *Soluciones orgánicas*, en las que los polímeros utilizados adquieren propiedades tras el proceso de vulcanización, cómo el caucho natural. Y *las emulsiones*, en estos el polímero se encuentra emulsionado en un elemento inorgánico u orgánico.

En **fase sólida** se encuentran: Los adhesivos *sensibles a la presión o piezosensibles,* que son aquellos que necesitan una ligera presión para poder llevar a cabo la función adhesiva para la que fueron creados, cómo es el caso de la cinta autoadhesiva de celofán. Y los adhesivos *termofusibles o hot-melt,* son termoplásticos que al convertirse en líquido, mediante la aplicación de calor, humectan las superficies de los materiales del sustrato a unir, creando una unión resistente al enfriarse el adhesivo, cómo pueden ser las poliamidas (PA) y los polietilenos (PE).

5.2.4.2. Adhesivos Reactivos.

Se les denomina así a los adhesivos que están compuestos por monómeros, o cadenas de estos, que polimerizan y/o se entrelazan durante el proceso de curado, una vez aplicado el adhesivo en la junta a unir.

Estos pueden ser clasificados según su *mecanismo de polimerización* en:

-Adhesivos que curan mediante **poli-adición** o polimerización en cadenas, en los que el curado se produce por adición, al abrirse un doble enlace C=C de un monómero, produciéndose una reacción de adición en cadena. Dentro de este grupo se encuentran los adhesivos *acrílicos, anaeróbicos, cianoacrilatos, poliésteres, poli-sulfuros y siliconas de poliadición*.

-Adhesivos que curan mediante **poli-condensación** o polimerización en etapas, este mecanismo está basado en la capacidad de reaccionar mutuamente dos monómeros di-funcionales o poli-funcionales. En este grupo se encuentran los adhesivos *epoxis, fenólicos, poliuretanos y siliconas de policondensación*.



Figura 5.4: *Representación esquemática de las etapas de polimerización por poliadición y policondensación.*

Un adhesivo sintético generalmente está compuesto de los siguientes constituyentes [230 y 234]:

-Una (o varias) resina sintética base, que es la que da lugar a la mayor parte de sus propiedades, siendo el componente más importante y que puede ser un homopolímero, copolímero o mezcla de varios polímeros.

-Una o varias resinas secundarias o aditivos destinados a proporcionar mejoras en la manipulación, aplicación y en general en las propiedades físico-químicas del adhesivo resultante. Cómo pueden ser Iniciadores de la reacción de polimerización, agentes de reticulación, diluyentes para mejorar la mojabilidad, endurecedores para el curado, plastificantes para modificar la temperatura de transición vítrea, bactericidas y fungicidas, colorantes, antioxidantes, etc.

-Cargas o espesantes para cambiar la reología del adhesivo.

-Un elemento contenedor de la mezcla de todas estas sustancias. Que puede ser agua, un disolvente orgánico, o en muchos casos puede ser las propias resinas componentes la que aporten la fluidez necesaria para contener la mezcla y posibilitar la acción adhesiva.

A continuación se describen brevemente algunos de los considerados más importantes adhesivos reactivos, utilizados cómo adhesivos estructurales:

5.2.4.2.1. Adhesivos acrílicos tenaces.

Son una familia de adhesivos reactivos, que han sido modificados partiendo del acrílico estándar para conseguir propiedades tenaces. Es un adhesivo muy versátil y empleado en la industria, desde hace varias décadas, entre otras cosas por ser un adhesivo que permite realizar una buena adhesión sin realizar una limpieza muy exhaustiva de la superficie adherente ni necesitar aportar calor a la unión, consiguiendo una junta de buenas prestaciones mecánicas, sobre una gran variedad de superficies adherentes. Se compone de un monómero mono-funcional, reforzadores en base a caucho y reactivo para el curado con dos componentes uno que contiene el iniciador y otra que contiene el reductor. Una vez mezclado el activador dentro de la mezcla adhesiva, aunque no sea de forma homogénea, la formación de radicales libre inicia una rápida propagación del proceso de polimerización.

Ventajas:

Muy buena resistencia a la cortadura, tracción, compresión.
Buena resistencia a la fatiga y moderada al pelado, así como buena tenacidad con gran elongación previa a la rotura.
Curado a temperatura ambiente.
Resisten bien las condiciones ambientales.
Buena resistencia química.
Algunas formulaciones puedes resistir más de 150ºC.
Buen comportamiento frente a posibles contaminantes superficiales del sustrato, necesitando poca preparación superficial.
Se adhiere a una gran cantidad de sustratos distintos.

Tiempos de curado cortos.

Inconvenientes:

Pueden inducir grietas en materiales termoplásticos.
Bajos puntos de inflamación.
Bajo nivel de adhesión sobre adherentes elastómeros.
Históricamente tenían tendencia a auto-polimerizar, endureciendo el adhesivo antes de su uso, aunque ya son mucho más estables.
Presentan un fuerte olor característico, que aunque no representa problema de salud, si les hace ser rechazados para uso.
Una vez abiertos han de aplicarse rápidamente.

Aplicaciones:

En construcción, como el pegado de los cristales a ventanas de aluminio.
En la industria, realizando el pegado de zapatas de freno, ferritas de motores eléctricos a sus carcasas, componentes de automoción o barcos.
Equipamiento deportivo, utilizándose por ejemplo para raquetas de tenis.
Adhesivo utilizado para la fijación de elementos médicos desechables.
Fabricación de muebles.
Paneles solares.

5.2.4.2.2. Adhesivos anaeróbicos tenaces.

Son un tipo de adhesivos reactivos que han sido modificados partiendo del adhesivo anaeróbico estándar para conseguir propiedades tenaces. Es un tipo de adhesivo monómero mono-componentes que cura mediantes polimerización de radicales libres una vez se ha eliminado el oxígeno ambiente con el que están en contacto, el cual sirve para mantener en equilibrio sus monómeros, evitando que se produzca la reacción. Son idóneos para ser utilizadas sobre superficies activas que contengan iones metálicos (latón, bronce, hierro, etc.), cuando son superficies metálicas pasivas (aceros inoxidables, aluminio, cromados, etc.) o no metálicas (plásticos, cerámica, etc.) pueden utilizarse con la ayuda de un activador para el curado.

Ventajas:

Buena resistencia frente a cortadura, tracción, compresión y fatiga.
Moderada resistencia al pelado.
Muy buen comportamiento frente a la humedad y los disolventes.
Resistencia a temperatura cercana a los 200ºC en algunas formulaciones.
Tiempos de curado cortos.

Inconvenientes:

Los mejores resultados adhesivos se logran sobre adherentes metálicos, necesitando activador para adherirse a sustratos pasivos y no metálicos.

Baja adhesión utilizando adherentes poliméricos.
Presentan una tenacidad limitada, con elongaciones de rotura bajas.
Limitada profundidad de penetración del curado y por tanto del espesor para relleno de holguras (< 1 mm).

Aplicaciones:

Fijación de elementos mecánicos cómo rodamientos, casquillos, zapatas de freno, ferritas de motores, altavoces, ejes.
Adhesivo utilizado para la fijación de elementos médicos desechables.

5.2.4.2.3. Cianoacrilatos tenaces.

Son un grupo de adhesivos reactivos que han sido modificados partiendo del cianoacrilato estándar para conseguir propiedades tenaces. Es un tipo de adhesivo mono-componentes basado en ésteres etílicos a los que se añade partículas de caucho en suspensión, entre otros aditivos, para mejorar su resistencia frente a solicitaciones dinámicas, esfuerzos de pelado y desgarro. El curado del adhesivo se produce al aplicarlo sobre las superficies del adherente y aplicar presión para juntar ambas superficies, iniciándose la reacción en los puntos donde el adhesivo encuentra humedad sobre el adherente. Siendo la humedad de la superficie o ambiental, el PH y el espesor de la junta los factures fundamentales que influyen sobre su curado.

Ventajas:

Buena resistencia frente a los esfuerzos de cortadura, tracción, compresión y fatiga.
Buena resistencia química, así como frente a las condiciones ambientales.
Se necesita poco espesor de adhesivo para conseguir una buena adhesión.
Pueden ser utilizados para adherir un amplio abanico de materiales de distinta naturaleza.
Son adhesivos de curado rápido.
Algunas formulaciones pueden soportar temperaturas cercanas a los 100ºC.

Inconvenientes:

Baja resistencia frente a los esfuerzos de pelado.
Moderada tenacidad con bajas elongaciones en rotura.
Problemas para adherirse sobre adherentes de siliconas, poliolefinas, algunos fluorelastómeros y materiales vítreos.
Limitada capacidad para rellenar holguras, pudiendo llegar a las pocas décimas de milímetro.

Aplicaciones:

Pegado de piezas metálicas y plásticas pequeñas en procesos automatizados de ensamblaje en la industria de la automoción, electrónica y electricidad.
Unión de metales sinterizados.
Colocación de etiquetas identificativas.
Adhesivo utilizado para la realización de suturas médicas.

5.2.4.2.4. Poliuretanos.

Se encuentran dentro de la familia de los adhesivos reactivos considerados flexibles. Son sistemas mono o bi-componentes, que se basan en la reacción química del isocianato, con la humedad ambiental para comenzar la polimerización del adhesivo en el caso del adhesivo mono-componente y con pioles o aminas distribuidos en toda la masa del adhesivo para realizar la polimerización de la junta en el caso de los adhesivos bi-componentes, pudiendo por tanto estos últimos utilizarse para rellenar holguras mayores y conseguir curados más rápidos. Son necesarias imprimaciones sobre la superficie del adherente para conseguir una buena adhesión estructural, mejorando la adhesión e incrementando su vida útil.

Ventajas:

Se adhieren a la mayoría de superficies.
Sirven para sellar y rellenar holguras en una gran variedad de sustratos.
Buena resistencia a cortadura a bajas temperaturas.
Son muy flexibles y resistentes a la abrasión.
Buena resistencia química.
Pueden utilizarse para amortiguar ruidos o vibraciones.

Inconvenientes:

Sensibles a la humedad y a la radiación UV.
Baja resistencia a cortadura a temperatura ambiente.
Toxicidad del isocianato.
Necesidad de imprimaciones sobre el sustrato para conseguir uniones estructurales.

Aplicaciones:

Construcción y reparación de remolques y contenedores.
Ingeniería mecánica y electromecánica.
Electrodomésticos y sistemas de ventilación.

5.2.4.2.5. Epoxis rígidos.

Son quizá el adhesivo estructural más ampliamente utilizado, con él se consiguen uniones que soportan grandes cargas, pudiendo ser utilizado en sustitución de otros métodos mecánicos de fijación. Es un tipo de adhesivo epoxi que ha sido modificado para conseguir propiedades rígidas. Este tiene

una gran capacidad de relleno de holguras entre las superficies a unir, pero para obtener una unión adhesiva estructural óptima este espesor debe estar en torno a 0,1 mm. Estos adhesivos se presentan en sistemas bi-componentes con curado a temperatura ambiente y otros que necesitan cierta temperatura para poder producir la reacción de curado, así como adhesivos epoxi mono-componentes que necesitan calor para realizar su curado.

Este tipo de adhesivo termoestables endurece formando estructuras reticulares tridimensionales. La reacción de polimerización se inicia una vez se ha producido la mezcla de la resina epoxi, que suele ser en base al bisfenol-A y la epicloridrina, con el endurecedor, que suele ser una amina o poliamina.

Ventajas:

Buenas prestaciones frente a esfuerzos estáticos de tracción, compresión y cortadura.
Pueden ser utilizados para adherir un amplio abanico diferentes sustratos.
Suelen tener unos precios razonables.
Gran capacidad de relleno de las holguras existentes entre los sustratos a unir.
Algunas formulaciones pueden resistir por encima de los 200ºC.
Pueden ser mecanizados.
Buena resistencia frente a agentes químicos y ambientales.
Es dieléctrico y aislante térmico, pudiendo ser modificado su composición para ser un material conductor.
Pueden añadirse cargas a su composición para mejorar sus propiedades mecánicas, cómo puede ser el caso de las fibras.

Inconvenientes:

Para conseguir altas prestaciones han de ser sistemas bi-componentes, curados a cierta temperatura para así alcanzar un alto grado de reticulación del adhesivo.
Tiempos de curado altos y limitada vida de la mezcla.
Tienen una limitada resistencia al pelado, y baja flexibilidad, resultando quebradizo.
Limitadas prestaciones frente a esfuerzos de pelado e impacto, aunque pueden mejorarse estas propiedades, modificando su composición, obteniendose los adhesivos epoxis flexibles.
Problemas de absorción y difusión de la humedad en el adhesivo.

Aplicaciones:

Producción de materiales compuestos.
Aditivos en hormigones y otros elementos utilizados en la construcción de edificios y obra civil.
Uniones estructurales en la industria aeroespacial, aeronáutica, defensa, automovilística y naval.
Recubrimientos superficiales protectores.

5.2.4.2.5.1. Comparativa frente a otros adhesivos.

En la tabla 5.4 se encuentra una comparativa de algunas propiedades de los 5 tipos de adhesivos reactivos que se consideran más importantes.

Property	Epoxy	Polyurethane	Modified acrylic	Cyanoacrylate	Anaerobic
Substrates bonded ...	Most	Most smooth, nonporous	Most smooth, nonporous	Most nonporous metals or plastics	Metals, glass, thermosets
Service temperature range, °C (°F)	−55 to 121 (−67 to 250)	−157 to 79 (−250 to 175)	−73 to 121 (−100 to 250)	−55 to 79 (−67 to 175)	−55 to 149 (−67 to 300)
Impact resistance	Poor	Excellent	Good	Poor	Fair
Tensile shear strength, MPa (ksi).	15.4 (2.20)	15.4 (2.20)	25.9 (3.70)	18.9 (2.70)	17.5 (2.50)
T-peel strength, N/m (lbf/in.).....	<525 (3)	14 000 (80)	5250 (30)	<525 (3)	1750 (10)
Heat cure or mixing required.....	Yes	Yes	No	No	No
Solvent resistance ...	Excellent	Good	Good	Good	Excellent
Moisture resistance ..	Excellent	Fair	Good	Poor	Good
Gap limitation, mm (in.).....	None	None	0.762 (0.030)	0.254 (0.010)	0.635 (0.025)
Odor.....	Mild	Mild	Strong	Moderate	Mild
Toxicity.....	Moderate	Moderate	Moderate	Low	Low
Flammability.....	Low	Low	High	Low	Low

Tabla 5.4: *Propiedades generales de los adhesivos reactivos más utilizados (Fuente ref. [229]).*

Los adhesivos acrílicos, anaeróbicos y cianoacrilatos son de curado más rápido que los epoxis, e incluso tienen una buena resistencia mecánica como estos, pero son más caros, y no tienen su misma capacidad para relleno de holguras de la junta adhesiva.

Los poliuretanos no ofrecen la misma estabilidad frente a la temperatura que puede obtenerse con los epoxis, aunque poseen mayor flexibilidad que estos. La presencia de humedad puede empeorar el curado de los poliuretanos, mientras que en los epoxis se puede mejorar con esta.

Los adhesivos fenólicos presentan mejores propiedades térmicas que los epoxis, aunque necesitan también unas altas temperaturas para realizar su curado, soltando elementos volátiles durante el proceso.

Las siliconas también pueden tener buenas prestaciones térmicas frente a los epoxis, aunque poseen limitada resistencia mecánica, siendo su principal uso cómo sellantes.

En general los adhesivos rígidos presentan un alto rendimiento frente a solicitaciones de esfuerzos estáticos a cortadura, compresión y tracción, pero son sensibles a esfuerzos de pelado y cargas dinámicas. En estos últimos supuestos, los adhesivos tenaces presentan un mejor comportamiento frente a ese tipo de solicitaciones que los adhesivos rígidos, aunque pueden ser válidos frente a cargas dinámicas cuando el número de ciclos a que se verá sometido es bajo [230].

5.2.5. Pre-tratamientos superficiales aplicados a una junta adhesiva.

Como se ha descrito a lo largo de este capítulo, la resistencia de la unión adhesiva va a estar muy influenciada de la capacidad del adhesivo de mojar completamente la superficie del adherente, rellenando todos los poros que posea la superficie, y siendo por tanto fundamental que sus superficies no contengan contaminantes que impidan al adhesivo realizar su función. Puesto que una simple capa de contaminante, del orden molecular, puede evitar que se produzca una correcta adhesión, así como una débil interface de sustrato adhesivo puede debilitar la junta.

Los objetivos de los tratamientos aplicados a una junta antes de la aplicación del adhesivo son:

Conseguir un contacto molecular lo más íntimo posible del adhesivo con el adherente.

En superficies de baja energía superficial como en materiales plásticos y cauchos, se necesita un tratamiento que incremente la energía libre superficial del adherente, mediante modificaciones químicas. Cuando el adherente es de alta energía superficial, como el caso de los metálicos, las propiedades de resistencia a tracción, tienen cierta influencia con la rugosidad superficial y su tipo, optimizándose cuando es una rugosidad fina que facilita la formación de enlaces de Van der Waals [235].

En el caso de los adherentes de alta energía es importante conseguir la durabilidad de la unión frente a factores atmosféricos, lo cual suele mejorarse mediante el uso de imprimaciones que dan lugar a una junta más estable.

Generar una topografía superficial que permita cierto grado de adhesión mecánica.

Facilitar el curado del adhesivo mediante imprimaciones, en algunos tipos de adhesivos.

Preparar la superficie para el pegado, mediante su limpieza, eliminando contaminantes superficiales, óxidos, etc. Que dan lugar a in-homogeneidades en la superficie, que pueden crear puntos de iniciación de fisuras en la junta.

Proteger las superficies del adherente que han sido tratadas, hasta la aplicación del adhesivo, previniendo la formación de capas débiles sobre esta.

En la figura 5.5, obtenida del estudio realizado por A.J. Kinloch [236], se aprecia la variación de la resistencia de la junta adhesiva epoxi en agua a 50ºC, en función del tipo de tratamiento que posee la superficie del sustrato.

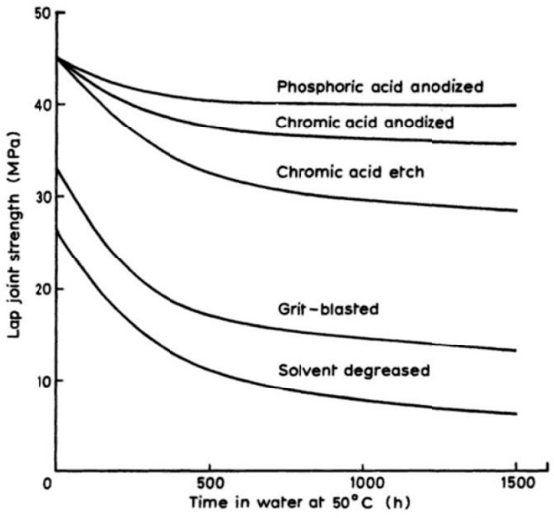


Figura 5.5: *Efecto que el tratamiento superficial, de una unión de aleación de aluminio con epoxi sumergido en agua a 50ºC, tiene sobre la durabilidad de la junta adhesiva (Fuente ref. [236]).*

De esta gráfica se puede deducir que los tratamientos electro-químicos (anodizados crómico y fosfórico) y químico (ataque con ácido crómico) aplicados a una aleación de aluminio, consiguen una resistencia de la junta similares, en condiciones ambientales normales, siendo más resistentes los anodizados frente a las condiciones ambientales muy agresivas. Estas propiedades mecánicas obtenidas son sensiblemente superiores a las que resultan de la aplicación de un simple desengrasado con disolvente o chorreado con arena.

Teniendo en cuenta que las juntas adhesivas que se han colocado en el detector CMS van a estar trabajando en condiciones ambientales normales, se ha escogido el anodizado crómico, cómo el tratamiento previo aplicado a los insertos o componentes de aluminio del sistema de alineación LINK de CMS, que únicamente requieren prestaciones de resistencia de la unión y el anodizado sulfúrico (anodizado duro teñido de negro), para los insertos que además de resistencia necesitan tener propiedades frente a la fricción y evitar reflexiones de la luz láser sobre su superficie, siendo estos dos últimos elementos los que han primado, por encima de la resistencia.

En el Apéndice A, se encuentran una serie de tablas obtenidas de la referencia [237], en las que se resumen una serie de tratamientos comunes que pueden ser aplicados en función del sustrato que vaya a ser utilizado en la junta adhesiva.

Seguidamente se van a describir brevemente algunos de los tratamientos más utilizados, que se aplican a las superficies de los sustratos para mejorar las prestaciones mecánicas de las juntas adhesivas [229, 230, 231 y 232], centrándose la atención en los utilizados para los tipos de juntas utilizadas en este estudio:

5.2.5.1. Desengrasado.

Mediante este tratamiento se consigue eliminar de la superficie del adherente los contaminantes orgánicos, los cuales dan lugar a una degradación de la resistencia de la junta adhesiva. Suele ser utilizado cómo tratamiento previo a otros tratamientos superficiales mecánicos, químicos o electroquímicos y como tratamiento posterior a los tratamientos que puedan dejar contaminantes sobre la superficie del sustrato, por ejemplo, los mecánicos.

Este tratamiento va a ser diferente en función del tipo de material que compone el sustrato [231, 232 y 237]:

En general, para los **metales** a nivel industrial, se va a utilizar el desengrasado en fase vapor con un desengrasante, cómo el 1,1,1-Tricloroetano, según la norma ASTM D2651. El método consiste en suspender la pieza que se quiere desengrasar fría, sobre un baño caliente del tipo de desengrasante utilizado. Los vapores del desengrasante se condensan sobre la pieza arrastrando al contaminante hacia el baño, por lo que es importante controlar la contaminación del baño durante el proceso. A nivel industrial un desengrasante ha de elegirse en función de su toxicidad, inflamabilidad, eficiencia para el desengrasado y costo.

Este método requiere tener cierta infraestructura para su aplicación, pueden utilizarse otros métodos alternativos más fáciles de aplicar a nivel no industrial, como puede ser la aplicación directa del disolvente sobre la superficie con espray, mediante trapos de algodón limpios, o el utilizado en nuestro caso, para las piezas de aluminio de pequeño tamaño, que consistió en introducir las piezas dentro del disolvente en un pequeño recipiente que se colocaba dentro de la cubeta de una máquina de ultrasonidos cuyo baño se encontraba a cierta temperatura.

Para los **plásticos y materiales compuestos**, suele aplicarse un desengrasado con acetona, metanol, alcohol isopropílico, metil etil cetona, etc., en función del tipo.

Otros materiales cómo **cerámicos, vidrios**, etc., suelen utilizar para el desengrasado acetona, metil etil cetona o baños de ultrasonidos con un detergente desengrasante.

Como norma se puede considerar que el grado de limpieza se incrementará con el tiempo a que está sometido el sustrato al desengrasante. La limpieza mediante baño en ultrasonidos también incrementa de forma significativa la limpieza y la velocidad [231].

5.2.5.2. Pre-tratamientos mecánicos.

Son los que provocan un cambio físico sobre la superficie del sustrato como:

La Abrasión: Con este método se pretende, por un lado ofrecer ciertas propiedades de anclaje mecánico al modificar la rugosidad superficial del sustrato y por otro eliminar restos de óxidos, pinturas, ceras, adhesivos y contaminantes en general. Para ello se utilizan diferentes sistemas cómo el

cepillado con cepillo metálico, lijado con papel de lija o piedra de esmeril, chorreado con arena o granallado, etc. Normalmente ha de aplicarse un desengrasado antes y después de la abrasión.

Laser Shock Processing o Laser Shock Peening (LSP): Es un reciente tratamiento superficial aplicado a metales, que consiste en generar unas ondas de choque mediante un láser pulsado de alta frecuencia y gran intensidad que focaliza sobre la superficie del adherente, provocando que se genere plasma que al expandirse genera la onda de choque, creando tensiones de comprensión sobre la superficie del sustrato. Para crear tensiones de compresión lo suficientemente elevadas como para dar lugar a deformaciones superficiales plásticas, se coloca delante del metal un medio, cómo un flujo laminar de agua, para evitar una rápida propagación del plasma, con lo que se consigue que este permanezca más tiempo en contacto con la superficie metálica, lo que eleva más la presión y permite llegar a producir las plastificaciones superficiales. Siendo propuesto como un proceso alternativo a otros de impacto cómo el chorreado por arena o granallado.

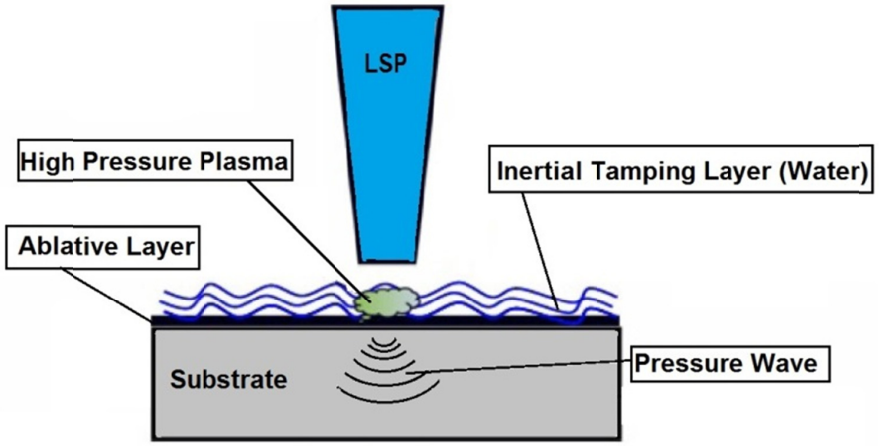


Figura 5.6: *Esquema de funcionamiento de un LSP.*

De esta forma se consigue mejorar las propiedades del material frente a posibles propagaciones de grietas por fatiga [238 y 239]. Esta técnica además produce cambios sobre la topografía de la superficie, de forma que se generan micro cavidades por los pulsos [240], que pueden dar lugar a una mejora de las propiedades de adhesión [231].

5.2.5.3. Pre-tratamientos químicos y electroquímicos.

Aunque los pre-tratamientos anteriores pueden llegar a ser suficientes para un amplio abanico de casos, cuando se requieren muy altas prestaciones mecánicas, frente a condiciones ambientales o buena tasa de reproducibilidad de resultados, es necesario aplicar otro tipo de tratamientos adicionales.

En la figura 5.5 se aprecia una estimación de la mejora de propiedades mecánicas de la junta en función del tratamiento superficial utilizado, antes de aplicar el adhesivo sobre la superficie del sustrato.

El Apéndice A resume algunos métodos de preparación superficial utilizados en función del material. A continuación se van a describir brevemente los más utilizados para aluminio, que es el material al que han sido aplicados en este estudio, los cuales están basados en la norma ASTM D2651, que hace referencia a la preparación superficial de los sustratos de alta energía:

5.2.5.3.1. Ataque con ácido crómico (CAE).

Una vez que se ha aplicado alguno de los tratamientos previos, descritos anteriormente, a la superficie del sustrato, se procede a realizar el ataque con ácido crómico (Chromic Acid Etches (CAE)), basado en la ASTM D2651-01, también conocido como '*procedimiento de ataque con ácido Forest Products Laboratory (FPL)*':

Para ello se sumergen las piezas [237] en una solución de dicromato sódico (o potásico), ácido sulfúrico concentrado y agua destilada o a ~70ºC durante unos 12 minutos, removiendo de vez en cuando. Seguidamente se lava con agua fría, desmineralizada o destilada y a continuación se sumerge en agua caliente a ~65ºC cómo máximo. Finalmente se secan las piezas a un máximo de unos 60ºC.

Mediante este proceso se elimina la capa de óxido superficial y se disuelve en la solución una fina capa de material (1 a 3 μm), creándose una nueva capa de óxido muy fina, cómo se puede apreciar en la figura 5.7A. Esta capa está compuesta por pequeños poros, de poca profundidad, y bordeando estos se han creado pequeñas columnas, de forma que se aumenta de forma muy significativa el anclaje mecánico de la superficie y adicionalmente se mejora la adhesión por mecanismo de absorción, al aumentar considerablemente la superficie total sobre la que puede adherirse el adhesivo.

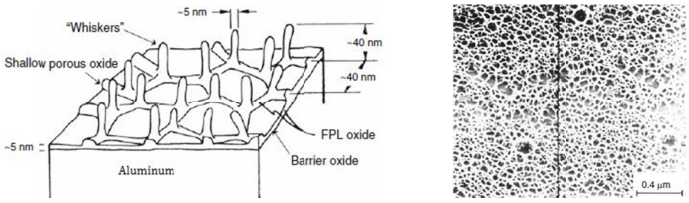


Figura 5.7A: *Representación de la superficie creada tras un ataque FPL (Izq.). Estéreo-micrografía electrónica de barrido de una superficie atacada con FPL (Der.). Fuente Ref. [231].*

Este proceso es que se ha utilizado en el Sistema de Alineación LINK de CMS, cómo pre-tratamiento superficial, para todas las piezas de aluminio que han de ser adheridas a otra superficie mediante adhesivo. Más adelante se describirá en detalle el proceso seguido.

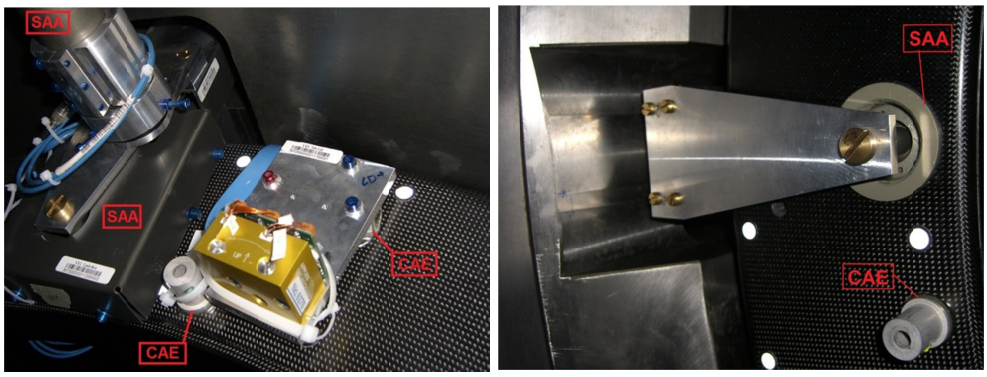


Figura 5.7B: *Componentes del sistema de alineación LINK, que van fijados sobre el Link Disk (LD) a los que se le aplicó un tratamiento CAE, para su pegado sobre la rueda y componentes con tratamiento SAA, para su pegado en la rueda, en el caso de la pieza de la figura derecha.*

En la figura 5.7B se pueden observar una serie de piezas que han sido adheridas, con un adhesivo epoxi (Araldit 2011), sobre la superficie del LD, a las que previamente se les había aplicado este tipo de tratamiento superficial (CAE), para mejorar su adhesión.

5.2.5.3.2. Anodizado con ácido sulfúrico (SAA).

Una vez que se ha aplicado alguno de los tratamientos previos, descritos anteriormente, a la superficie del sustrato, se procede a realizar el Anodizado con ácido sulfúrico (Sulfuric Acid Anodization) (SAA)):

En el sistema de alineación LINK de CMS se ha utilizado una variante, que va a conferir menor resistencia de la junta que el SAA estándar, pero en este caso prima la necesidad de que las piezas de aluminio que han de ser adheridas sobre otra superficie y que sean utilizadas en elementos que van a sufrir fricción, van a necesitar buena resistencia al desgaste o las que se encuentren situadas en los caminos de luz láser del sistema necesitan tratamientos anti-reflejantes. Por ello se ha seleccionado un tratamiento de **Anodizado Duro** Negro, realizado en la empresa ANESDUR [241], según la norma MIL- A-8625 F (Tipo III, clase 1 y 2), cómo recomienda la norma ASTM D2651 y UNE-EN 2536.

El anodizado es un proceso electroquímico de pasivación, en el que se genera una dura capa de óxido de aluminio (Al_2O_3) sobre la superficie del aluminio. Esta capa, al tratarse de una reacción química, forma parte del material base. La reacción se produce en un medio electrolítico de ácido sulfúrico, a temperaturas de 0ºC a 5ºC. Con ello se obtiene una fina capa de unos 25 µm a 150 µm de alúmina, que es muy dura, compacta y poco porosa (figura 5.8, izq). La capa de óxido producida en el anodizado duro crece un 50% hacia fuera del material y el resto penetra hacia su interior. Esto ha sido tenido en cuenta a la hora de fijar las tolerancias de ciertos componentes del sistema LINK, habiéndose escogido para ellos una capa de espesor 30±6 µm. Este método también se utiliza para recrecer material y ajustarlo a las tolerancias pedidas

El color de la capa anódica va a depender de la aleación de aluminio y del espesor de la capa creada. En las piezas utilizadas por el sistema de alineación se ha realizado un teñido posterior negro, en la mayoría de los casos, utilizando para ello un pigmento que penetra en los poros de la capa anódica previamente a realizar su sellado. Las capas sin sellar son duras, resistentes al desgaste y muy adherentes para utilizar adhesivos, pero no protegen de la corrosión. En este caso el sellado se ha realizado en frío, sumergiendo las piezas anodizadas en un baño de sales de flúor y níquel, quedando cerrados los poros creados durante el anodizado, sin que por ellos se hayan reducido sus propiedades. Resultando una capa de gran resistencia al desgaste, dureza, resistencia a la corrosión y elevado aislamiento térmico y eléctrico [241], con una rugosidad superficial Ra de 1,3 a 3,0.

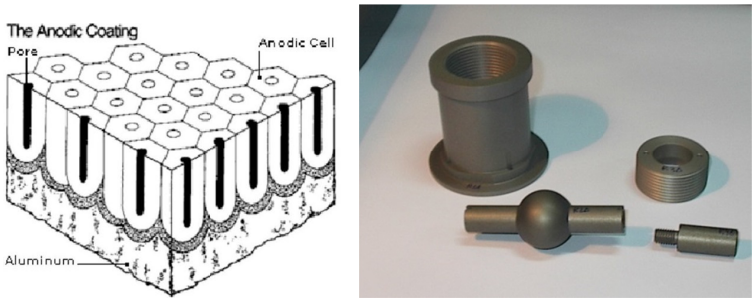


Figura 5.8: *En la figura de la izquierda (fuente Ref. [241]) se aprecia una representación de la capa de óxido creada tras el anodizado. En la de la derecha aparece un conjunto de piezas, pertenecientes al montaje de una rótula del LD que va pegada en su interior y cuyas piezas tienen el tratamiento SAA.*

5.2.5.3.3. Anodizado con ácido crómico (CAA).

Una vez que se ha aplicado alguno de los tratamientos previos, descritos anteriormente, a la superficie del sustrato, se procede a realizar el Anodizado con ácido crómico (Chromic Acid Anodization) (CAA)):

En este proceso [232] el sustrato se anodiza en una solución con ácido crómico a unos 40ºC, elevando el voltaje gradualmente hasta los 40 V durante un período de tiempo de 10 minutos, a continuación se mantiene ese voltaje durante 20 minutos, seguidamente se eleva de forma gradual la tensión hasta 50 V en 5 minutos, manteniendo ese voltaje durante otros 5 minutos más.

A continuación se desconecta la corriente, sacando rápidamente las piezas del baño, procediendo a realizar un enjuague en agua fría destilada o des-ionizada durante unos 15 minutos. Y se seca al aire a menos de 70ºC, en ambiente limpio. De esta forma se evita cerrar los poros, proceso que se realiza mediante agua caliente, con el fin de mantener la estructura porosa para mejorar la adhesión.

En la figura 5.9 se encuentra una representación de la capa de óxido formada con el proceso de anodizado con ácido crómico.

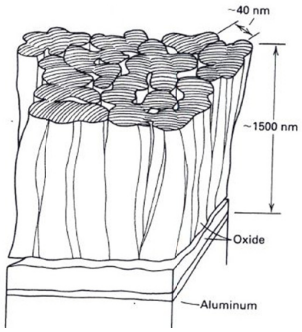


Figura 5.9: *Representación de la capa de óxido formada con el proceso CAA (Fuente Ref. [229]).*

5.2.5.3.4. Anodizado con ácido fosfórico (PAA).

Una vez que se ha aplicado alguno de los tratamientos previos, descritos anteriormente, a la superficie del sustrato, se procede a realizar el Anodizado con ácido fosfórico (Phosphoric Acid Anodization (PAA)), según la ASTM D3933.

En este proceso [237] el sustrato se anodiza en una solución con ácido fosfórico a temperatura ambiente (18ºC a 30ºC), elevando el voltaje gradualmente hasta los 10 V durante unos 25 minutos.

Seguidamente se desconecta la corriente y rápidamente se procede a realizar un enjuague de las piezas en agua des-ionizada o destilada durante unos 15 minutos. Secando posteriormente las piezas menos de 71ºC.

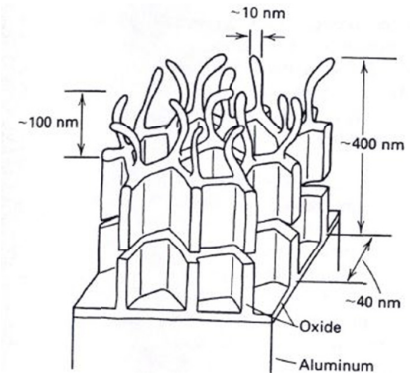


Figura 5.10: *Representación de la capa de óxido formada con el proceso PAA (Fuente Ref. [229]).*

Esta estructura de poros no sellados, proporciona una buena superficie de adhesión. En combinación con el sellado que proporciona el adhesivo, se obtiene una junta con buenas características de protección ambiental cómo se desprende de la figura 5.5.

Una vez terminado el proceso, es importante no tocar las superficies donde va a ser aplicado el adhesivo, protegiendo las superficies hasta su pegado y

siempre que sea posible se debe realizar el pegado lo antes posible, no excediendo las 16 horas. Estas recomendaciones son de aplicación también a los otros procesos descritos anteriormente.

5.2.6. Diseño de la junta adhesiva.

Los diseños de junta pretenden que la fuerza adhesiva sea superior a la cohesiva, para así poder realizar una mejor evaluación de la resistencia de la misma, a partir del conocimiento de las propiedades que tiene el adhesivo utilizado, y crear juntas que produzcan roturas cohesivas, cómo se ha descrito en el apartado 5.2.2.2. En la resistencia de una junta adhesiva, aparte de las propiedades del adhesivo, influyen de manera muy significativa el tipo de esfuerzo y el diseño de la misma. Siendo también importante en el comportamiento de una junta la temperatura y condiciones ambientales a las que se encuentre sometida esta.

Los adhesivos estructurales [230] suelen presentar tres tipos de comportamientos frente a esfuerzos externos, elástico frágil, elastoplástico y elástico (Figura 5.11):

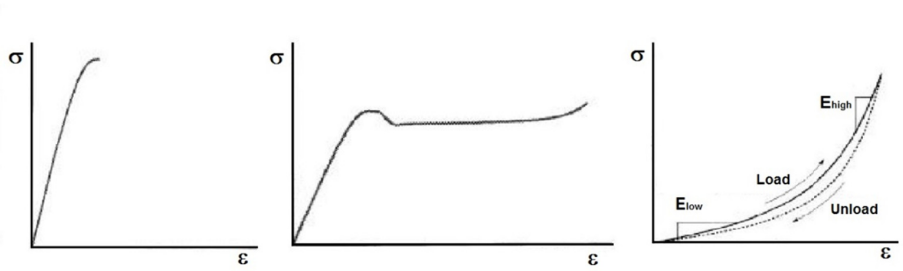


Figura 5.11: *Esquema de los diagramas tensión-deformación en materiales elástico frágil (Izquierda), elastoplástico (Centro) y elástico no lineal (Derecha).*

Los adhesivos que presentan un comportamiento elástico frágil, son los adhesivos termoestables y los termoplásticos amorfos. Suelen comportarse así frente a esfuerzos instantáneos cuando se encuentran por debajo de su temperatura de transición vítrea (T_g), que marca el paso de un comportamiento vítreo a visco-elástico. Los termoplásticos amorfos suelen tener una T_g alta empleándose estos por debajo de esta temperatura. En los termoestables la T_g suele estar próxima a la de descomposición del polímero.

Los adhesivos termoplásticos semi-cristalinos tienen un comportamiento elastoplástico, presentando una curva tensión deformación con una primera parte con deformación elástica, seguida de una amplia región en la que predomina el fenómeno de fluencia del material. Presentan una T_g baja, siendo utilizados normalmente por encima de esta.

El comportamiento elástico no lineal, es el típico de los elastómeros, en estos el módulo de elasticidad es más bajo a tensiones reducidas y se incrementa a tensiones elevadas. En estos la T_g suele presentarse a

temperaturas muy por debajo de la ambiente, siendo utilizados a temperaturas por encima de la T_g.

En el diseño de una junta se han de tener en cuenta una serie de principios, que son independientes del tipo de material del sustrato:

En general la resistencia y el módulo de elasticidad de los adhesivos van a tener valores inferiores a los de metales, materiales compuestos de fibra o cerámicos.

Los adhesivos que forman parte de la junta suelen tener unos espesores muy finos, en comparación con los del sustrato.

La capacidad de deformación del adhesivo y su tenacidad y resistencia son mayores cuando trabaja a comprensión o cizalla, que cuando están sometidos a esfuerzos de tracción, pelado o clivaje.

Es muy difícil evitar la presencia de defectos en la unión adhesiva y estos van a inducir concentración de tensiones en esos puntos. Este tipo de defectos pueden ser restos de suciedad, grasas, líquidos desengrasantes o de los pre-tratamientos superficiales, burbujas de aire atrapadas dentro del adhesivo o en la interfase adhesivo adherente, etc.

5.2.6.1. Tipos de uniones adhesivas y solicitaciones.

Para que un adhesivo funcione óptimamente la junta debe trabajar a cortadura o compresión y han de evitarse los esfuerzos de tracción, pelado o clivaje, así como los elementos que incrementan los efectos de las cargas sobre este tipo de esfuerzos, cómo pueden ser los que producen concentración de tensiones.

De la norma UNE-EN 923 se obtienen los tipos básico de uniones pegadas, y que son mostrados en la tabla 5.5:

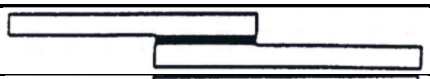
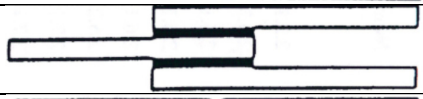
Unión solapada simple.	
Unión por doble solapamiento.	
Unión a tope.	
Unión en bisel.	

Tabla 5.5: *Tipos de uniones adhesivas.*

Unión solapada, es aquella obtenida al colocar una parte de un adherente sobre parte de otro adherente, uniendo mediante adhesivo las zonas superpuesta de ambos adherentes.

Unión solapada doble, es la obtenida al colocar una parte de un adherente a modo de sándwich entre una parte de otros dos adherentes, aplicando el adhesivo a las regiones superpuestas de la unión.

Unión a tope, es aquella en la que el plano pegado con adhesivo forma un ángulo recto respecto al eje mayor de los adherentes.

Unión biselada, es aquella obtenida al cortar segmentos angulares iguales, con ángulos menores a 45º respecto al eje mayor de dos adherentes. Juntando ambos adherentes por estos planos cortados en ángulo.

También en la norma UNE-EN 923 se encuentran los tipos básico de solicitaciones que sufre una unión adhesiva [230], estos se muestran en la tabla 5.6:

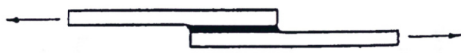
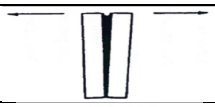
Cizallamiento por tracción (o compresión)	
Tracción (o compresión)	
Pelado.	
Separación, desgarro o clivaje.	
Cizallamiento por torsión.	

Tabla 5.6: *Modos de aplicación de las fuerzas sobre las uniones adhesivas.*

Esfuerzos de **cortadura o cizalla por tracción, compresión o torsión**, es aquella en la que la fuerza de separación de la unión adhesiva actúa en el plano de la junta, entre los dos sustratos. En estos las tensiones están distribuidas de forma uniforme sobre la superficie pegada. Es el tipo de junta más frecuente, por su sencillez.

Tracción o compresión, es en la que la fuerza de separación es perpendicular al plano de pegado que une los dos sustratos rígidos. Aquí toda la fuerza se distribuye de forma uniforme sobre el área de la unión adhesiva.

Pelado, es el modo de aplicación de una fuerza sobre la zona pegada de la unión de dos sustratos, en los que uno de ellos (o ambos) es flexible y en la que el esfuerzo está concentrado sobre la línea de separación de ambos. En este caso el área de la unión adhesiva que opone resistencia al pelado es mínima, por lo que debe evitarse este tipo de unión o buscarse una alternativa equivalente que haga trabajar al adhesivo de forma adecuada.

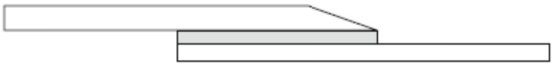
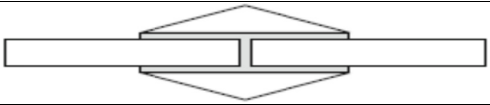
Separación, desgarro o clivaje, es el modo de aplicación de una fuerza, sobre una zona de la unión adhesiva que une dos sustratos rígidos, la cual no

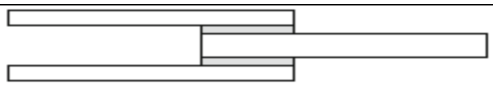
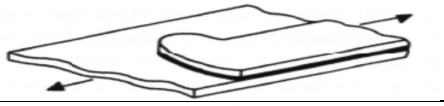
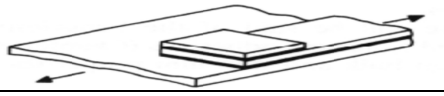
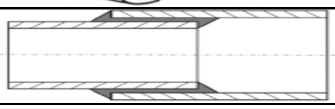
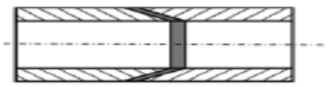
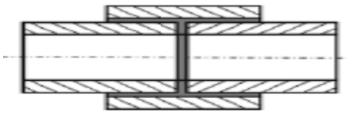
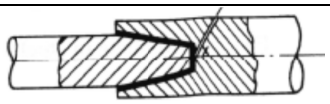
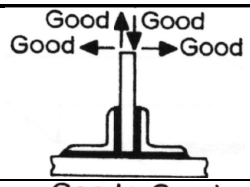
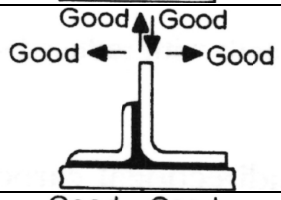
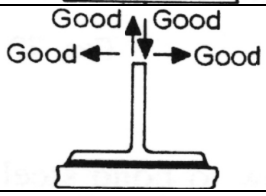
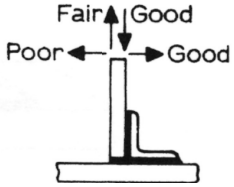
es uniforme sobre la superficie pegada, presentando una concentración de tensiones en uno de los bordes. Aquí la fuerza no se distribuye de forma uniforme sobre la superficie pegada y todo el adhesivo no trabaja al mismo tiempo, siendo un poco mayor su resistencia que el caso del pelado. Este tipo de unión también debe ser evitada siempre que sea posible.

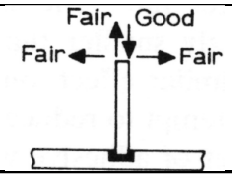
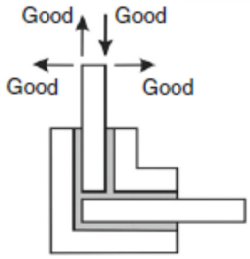
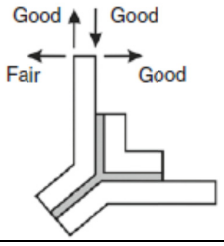
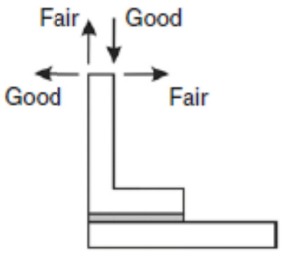
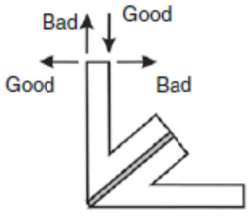
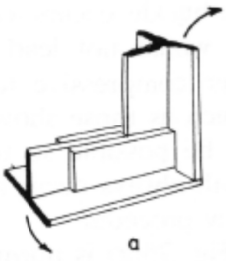
Todas estas solicitaciones pueden ser aplicadas de forma pura o mediante combinación de esfuerzos y pueden ser realizados estáticamente o dinámicamente, y estas cargas dinámicas pueden ser aplicadas de forma regular (vibraciones) o irregular (instantánea de impacto), siendo este último supuesto el caso del presente estudio. Además, las juntas con estas solicitaciones, pueden estar trabajando en ambientes agresivos, la aplicación del espesor del adhesivo puede ser realizada de forma controlada y con limitación de tiempo, etc. Con lo cual, finalmente se tienen bastantes parámetros a valorar para la selección del tipo de adhesivo, tratamiento superficial del sustrato y el tipo de junta a ser utilizada en la unión.

5.2.6.2. Recomendaciones para el diseño de una junta adhesiva.

Siempre que se diseña una junta adhesiva se ha de procurar hacer trabajar al adhesivo a cortadura o compresión, evitando la concentración de tensiones. Si no es posible, se debe rediseñar la junta para que trabaje en unas condiciones próximas a las óptimas, aumentando las superficies de pegado, colocando radios en las esquinas con adhesivo, etc. En la tabla 5.7 se encuentran una serie de recomendaciones de diseño, en función del esfuerzo a que está sometido el tipo de junta [230, 231 y 232]:

Unión solapada.	Reducción de concentración de tensiones.	
	Reducción de concentración de tensiones.	
	Reduce la rigidez de la parte final de la junta.	
	Reduce la rigidez de la parte final de la junta.	
	Buena. Fuerzas alineadas	
	Optima. Fuerzas alineadas	
	Muy buena, pero difícil de realizar.	
	Muy buena, pero de difícil producción.	

	Buena pero difícil de alinear los sustratos.	
Pelado inducido. 	Incrementar el área de la superficie pegada	
	Aumentar la rigidez de la zona	
	Plegar un sustrato sobre el otro (si es posible)	
Unión a tope.	Trabajo a cortadura de la unión.	
	Se evita desalineación que provoca desgarro y aumento de superficie.	
	Trabajo a cortadura de la unión.	
	Se evita desalineación que provoca desgarro y aumento de la superficie.	
	Trabajo a cortadura de la unión.	
Juntas en T.	Buen funcionamiento con solicitaciones de tracción, compresión y momentos que dan lugar a desgarro.	
		
		
	Buen funcionamiento con solicitaciones de compresión y momentos que dan lugar a desgarro, en una dirección solamente.	

	Buen funcionamiento solamente frente a solicitaciones de compresión.	
Juntas en esquina.	Buen funcionamiento con solicitaciones de tracción, compresión y momentos que dan lugar a desgarro.	
	Buen funcionamiento con solicitaciones de tracción, compresión y momentos que dan lugar a desgarro, en una dirección solamente	
	Buen funcionamiento con solicitaciones de compresión y momentos que dan lugar a desgarro, en una dirección solamente	
	Buen funcionamiento con solicitaciones de compresión y momentos que dan lugar a desgarro, en una dirección solamente	
Esquinas en T	Buen funcionamiento de este tipo de juntas en esquina, para uniones de perfiles en T.	

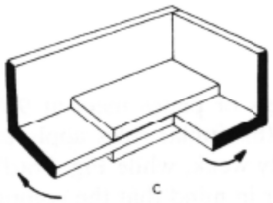
Esquinas en L	Buen funcionamiento de este tipo de juntas en esquina, para uniones de perfiles en L.	

Tabla 5.7: *Recomendaciones para realizar un buen diseño de junta adhesiva.*

5.2.6.3. Influencia de los parámetros geométricos de la junta solapada.

Los factores geométricos a considerar durante el diseño de una junta adhesiva son la anchura y longitud del solapamiento, así como el espesor del adhesivo depositado sobre la junta y el del sustrato.

La resistencia a cortadura de una junta es directamente proporcional a la anchura del solapamiento, y tiene cierta relación con la longitud del solapamiento, pero no de forma lineal, en la figura 5.12 se puede observar estas correlaciones [230].

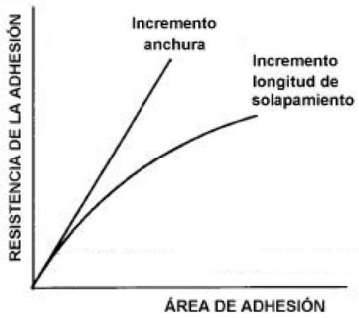


Figura 5.12: *Variación de la resistencia de la unión adhesiva en función de la anchura y longitud de solapamiento de la junta (fuente Ref. [230]).*

Esta diferencia de la resistencia de la unión adhesiva en función de la longitud y anchura del área solapada pegada, se debe a que las tensiones se acumulan en los extremos de la zona de solapamiento. Cuando se incrementan la longitud del solape, manteniendo la misma fuerza aplicada, se disminuye la tensión máxima en los extremos, pero si se sigue incrementando esta longitud, solamente se consigue una mínima reducción de esta tensión máxima, descargando las zonas centrales de la unión. Por lo que no es conveniente solapar más de unos 30 mm de longitud, puesto que no se consigue un incremento significativo de la junta adhesiva.

El remate de esta zona del extremo del sustrato pegado también es muy importante evitando el efecto de concentración de tensiones, consiguiendo un incremento de hasta el 40 % de resistencia de la junta, con grandes radios en la arista del sustrato al utilizar adhesivos rígidos [242], siendo menor en el caso de los adhesivos dúctiles. De igual forma es importante, para evitar la concentración de tensiones, el acabado del pegamento en esta zona, si está

rematado en esquina sufre mayor concentración de tensiones que si está acabado en ángulo [231], cómo puede ser observado en la figura 5.13.

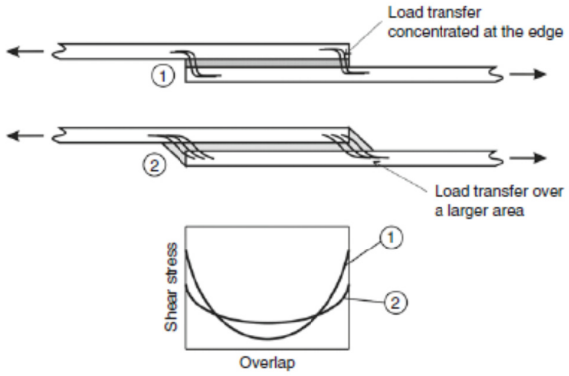


Figura 5.13: *Distribución de tensiones esquemática, en los extremos pegados de una junta solapada, con el adhesivo rematado en esquina y en ángulo (fuente Ref. [231].*

La rigidez y el grosor del sustrato son otros elementos importantes que influyen en la resistencia de la junta. Estos parámetros fueron estudiados por De Bruine y Houwink y se muestran en la figura 5.14 [230], donde el *factor de junta*, es definido como la relación entre el grosor del sustrato y el solapamiento de la junta adhesiva.

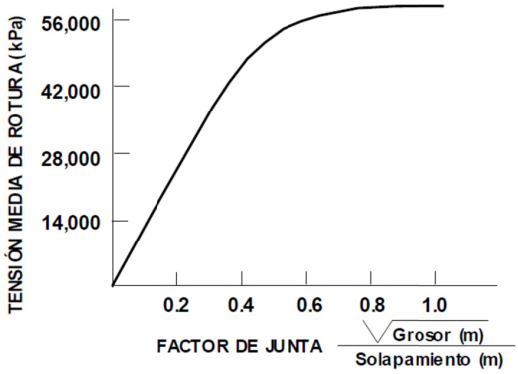


Figura 5.14: *Representación de la relación entre la resistencia de una junta adhesiva y el factor de junta (fuente Ref.[230]).*

El espesor del adhesivo va a ser un parámetro fundamental de la resistencia de la unión adhesiva, que en general va a depender del tipo de adhesivo utilizado, cómo se puede intuir de la tabla 5.4. En la gráfica de la figura 5.15, se muestra el resultado de un estudio [243] en el que se evalúa la influencia del espesor del adhesivo, poliuretano en este caso, en la resistencia de una unión sometida a cortadura, resultando que la resistencia máxima se obtiene para espesores delgados, del orden de unos 100 µm, decreciendo rápidamente hasta espesores de 1 mm, y a partir de ahí permaneciendo aproximadamente constante.

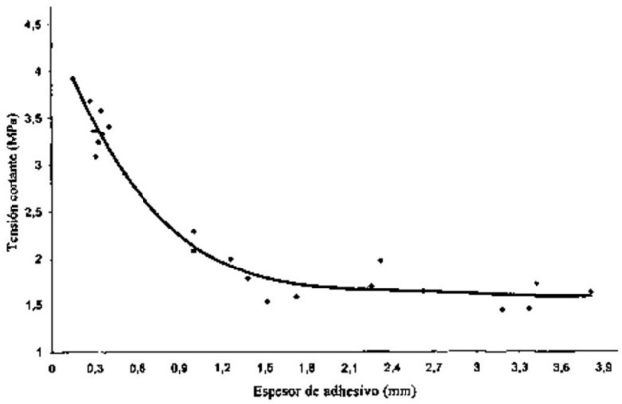


Figura 5.15: *Tensión de rotura de uniones a solape en función del espesor del adhesivo de poliuretano (fuente Ref.[243]).*

El parámetro del espesor, va a ser un elemento que vendrá dado por el fabricante del adhesivo. En el caso del adhesivo que se ha utilizado para este estudio, Araldit 2011, se recomienda utilizar un espesor de capa de entre 50 µm y 100 µm para obtener la mayor resistencia a cortadura de la junta [166]. En general un adhesivo rígido va a tener su máxima resistencia con espesores en torno a 0.1 mm, mientras que uno flexible va a necesitar espesores mayores a 1 mm para poder alcanzar su funcionamiento óptimo [230].

5.2.6.4. Comportamiento de una junta adhesiva bajo cargas de impacto.

Una propiedad de los adhesivos es la capacidad para absorber cargas de impacto. Para la mayoría de los polímeros se da una relación de dependencia entre la velocidad de aplicación de cargas de impacto a que están sometidas y las propiedades mecánicas que tienen en esas condiciones. Aunque, por lo general al aumentar la velocidad de deformación de una unión adhesiva, el adhesivo tiene un comportamiento ligeramente más rígido, al igual que aumenta su resistencia levemente, mientras que la deformación en rotura disminuye [232]. En la figura 5.16, se puede observar el resultado de un estudio de Harris y Adams [244], sobre juntas solapadas sometidas a cargas de impacto, con diferentes tipos de epoxi, en este se aprecia que la diferencia de carga que es capaz de soportar la junta, no se ve muy influenciada por la velocidad de aplicación de esta. En este mismo estudio se comprobó que cuando se utilizan adherentes de gran resistencia, la energía que absorbe la junta es relativamente pequeña, incrementándose al utilizar sustratos de baja resistencia, presentando una significativa deformación plástica en el adherente antes del fallo de la junta.

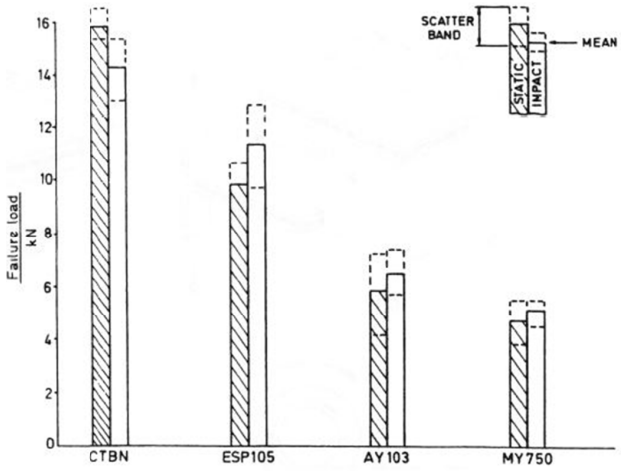


Figura 5.16: *Carga estática y de impacto que absorbe una junta solapada con 4 adhesivos distintos (fuente Ref. [232]).*

Esto es especialmente atractivo, por ejemplo, para la industria del automóvil, donde la utilización de materiales plásticos o aluminios llevan a un considerable ahorro en peso, y donde la utilización de uniones pegadas, sobre esos sustratos de baja resistencia pueden dar lugar a una resistencia estructural aceptable incluso frente a condiciones de gran solicitación, cómo pueden ser una colisión del vehículo. En este caso lo importante es la energía que absorbe la estructura protegiendo al pasajero y para ello las juntas deben aguantar la suficiente fuerza cómo para no romper mientras se deforma la estructura. Siento por tanto, la **energía** que absorbe la junta y la **fuerza** que puede soportar durante el impacto, los dos parámetros interesantes en un estudio de impacto. Estos parámetros han sido evaluados en este estudio, para el tipo de adhesivo estructural utilizado en el sistema de alineación LINK de CMS.

5.2.7. Control de calidad de la junta adhesiva.

En el control de calidad de una junta adhesiva van a estar involucrados muchos factores, que están relacionados entre sí, por un lado se ha de realizar el control de los elementos constituyentes de la junta de forma individual, antes de su pegado, y por otro el ensamblaje resultante de esos elementos individuales. En este control han ser tenidas en cuenta las condiciones en las que se ha realizado la junta, así como las condiciones en las que será utilizada.

Una vez realizado el pegado de la junta, se va a realizar el control de calidad de la junta desde dos puntos de vista, desde un punto de vista cualitativo, mediante *Evaluaciones No Destructivas (NDE)*, cuya finalidad consiste en detectar defectos presentes en la junta, y obtener de forma directa una correlación entre la resistencia de la junta y algún parámetro mecánico, físico o químico, que pueda ser evaluado sin causar daño a la junta. Si esto no es suficiente, hay que proceder a aplicar *Ensayos Destructivos* sobre la junta, en este caso ya se obtiene la resistencia real de la junta y si hay fallos en la interfase de adhesivo [230, 231 y 232].

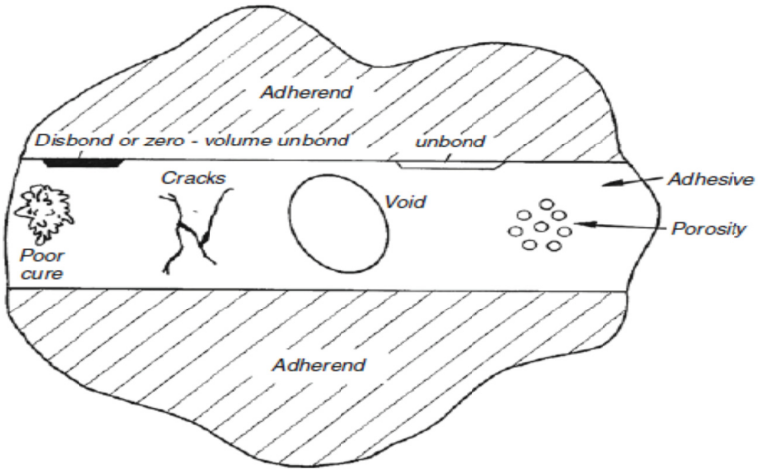


Figura 5.17: *Tipos de defectos que pueden aparecer en una unión adhesiva.*

Los defectos que pueden aparecer en una unión son de muchos tipos (Figura 5.17). En las juntas metálicas estos suelen ser en forma de oquedades o despegado del adhesivo.

En la *intercara* los defectos suelen ser provocados por errores en los pre-tratamientos sobre los adherentes. Y que solo podrán ser detectados si se realizan controles sobre el adherentes, previos al pegado, donde se evalúe la buena mojabilidad del sustrato o la calidad del pre-tratamiento, por ejemplo el espesor del anodizado realizado.

En la masa del *adhesivo* los defectos suelen ser debidos a deficiencias en la curación del adhesivo, cómo un curado muy rápido que provoca un adhesivo poroso o por estar poco o excesivamente curado que puede provocar además de porosidades algunos huecos en su seno, producidos por elementos volátiles o aire. Un elemento que va a influir sobre la durabilidad del adhesivo va a ser la excesiva humedad presente en el adhesivo previamente a su curado.

5.2.7.1. Ensayos No Destructivos.

Este tipo de ensayos están centrados en detectar fallos, que puedan afectar a la resistencia de la junta a corto o largo tiempo. Hay dos tipos de parámetros que pueden ser evaluados en los ensayos, por un lado los relacionados con la resistencia de la intercara del adhesivo y el adherente, en la que se intentarán detectar los **fallos adhesivos** de esta intercara, en la que están en juego las fuerzas intermoleculares, pero al ser unos espesores muy reducidos, incluso en comparación del espesor del adhesivo, será muy difícil poder realizar ensayos no destructivos una vez pegada la junta, en los que poder detectar defectos. Sin embargo si será más sencillo realizar ensayos en los que poder evaluar la resistencia del adhesivo, donde se puedan evaluar los **fallos cohesivos** del mismo, y estos parámetros podrán ser evaluados con NDE con cierto grado de confianza.

Los NDE utilizados con mayor frecuencia son:

-Inspección visual: suele aplicarse siempre, por ser un filtro rápido y que permite detectar fallos importantes que son visibles a simple vista sobre la junta adhesiva, estos suelen ser impactos, burbujas, inclusiones de partículas ajenas al adhesivo, des-laminaciones del adherente, despegues del adhesivo, fracturas en la junta.

-Test de la moneda: es otro test muy simple que cosiste en golpear la superficie de la junta con un objeto metálico y detectar las variaciones que puedan producirse en el sonido emitido en ciertos puntos, lo que suele ser indicativo de algún tipo de defecto en esos puntos.

-Emisiones acústicas: está basado en la detección, mediante micrófonos de alta frecuencia o dispositivos piezoeléctricos, de ondas acústicas o mecánicas que se producen por las variaciones físicas o mecánicas del material de la junta. Es un buen sistema para detectar, en algunos casos, corrosiones en la intercara de la unión.

-Inspección por ultrasonidos: existen varias técnicas para realizar la evaluación de la junta mediante ultrasonidos. Se basan en emitir un pulso de ondas de alta frecuencia que van a interactuar con la junta, analizándose la señal resultante. Las variaciones detectadas en ella van a indicar posibles defectos en el interior de la junta.

-Radiografía de rayos X: Es un método para detectar discontinuidades o variaciones de densidad a través de los cambios de absorción de rayos X en los materiales que atraviesa. Es poco utilizado en las juntas metálicas, ya que el adhesivo es mucho menos denso que el adherente. Pero si puede ser utilizado en sustratos de fibras reforzadas, puesto que la densidad del sustrato y la del adhesivo son del mismo orden, debiendo ser ajustado la energía y flujo a utilizar para la junta en cuestión.

-Radiografía de neutrones: es similar al anterior aunque no es tan sensible a las variaciones de densidad o espesor de los materiales. Está basado en que los neutrones son absorbidos por los materiales hidrogenados, como los polímeros de los adhesivos. De este modo es posible detectar la presencia de huecos o poros en el volumen del adhesivo presente en la junta. Es un método caro y difícil de.

-Métodos térmicos: Consiste en calentar una de las caras de la junta y observar la opuesta mediante métodos termo-gráficos: las áreas donde puede estar despegado el adhesivo, como ofrecen más resistencia a la transferencia del calor, aparecerán cómo áreas más frías que el resto.

-Holografía óptica: Está basada en la interferometría holográfica, la cual permite detectar variaciones superficiales sub-micrométricas. Para ello se aplica un tipo de carga uniformemente distribuida sobre la junta, cómo una vibración, presión o calor, con lo que los defectos aparecerán en el holograma, en forma de perturbación local.

5.2.7.2. Ensayos destructivos normalizados aplicados a las juntas adhesivas.

Cuando se requiere conocer de forma precisa la resistencia de una junta adhesiva frente a un tipo de solicitación o en diferentes condiciones ambientales de utilización, es necesaria realizar los ensayos destructivos normalizados que aparecen en las diferentes normativas existentes. Adicionalmente existen una serie de normas de aplicación a los pasos previos a los ensayos, cómo es la preparación superficial de los adherentes, las condiciones en que han de ser realizado los pegados de las probetas y luego los ensayos, la nomenclatura a utilizar, métodos de muestreo que han de ser utilizados, forma en que han de ser presentado los resultados, etc.

En el **Apéndice B**, se encuentra una recopilación de las normas más representativas que son de aplicación a los adhesivos, extraídas de las referencias [230, 232 y 245].

La Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) [245], dentro de su Comité Técnico de Normalización 143, se centra en Adhesivos y Sellantes. Este comité ha desarrollado la normalización de:

> *Adhesivos:* en los aspectos de terminología, clasificación, características, aplicación y métodos de ensayo.
>
> *Sellantes* para juntas de edificación en sus distintas aplicaciones: Fachadas, acristalamientos, sellantes adhesivos (sistemas para acristalamiento estructural, tejas, parquet, espejos) mejora del comportamiento al fuego, justas en sanitarios, suelos.
>
> *Tiene algunas exclusiones que han sido desarrolladas en otros comités:*
>
> Adhesivos especiales para baldosas cerámicas, Adhesivos de uso sanitario y Sellantes para carreteras, autopistas y bases aéreas.

El Comité Técnico de Normalización 143 esta subdividido a su vez en siete subcomités:

> SC1 Terminología y ensayos físicos-químicos.
> SC2 Adhesivos estructurales.
> SC3 Adhesivos para papel, embalaje y productos higiénicos desechables.
> SC4 Adhesivos para la construcción.
> SC5 Adhesivos para piel y materiales para calzado.
> SC6 Adhesivos para la madera.
> SC7 Adhesivos para tubería de plástico.
> SC8 Sellantes para la construcción.

Los ensayos mecánicos a adhesivos suelen aplicarse a un tipo de junta en concreto, en lugar de realizar un ensayo de la resistencia de la masa del adhesivo en sí mismo, como suele ser el caso de los metales. Los ensayos más usuales son aquellos en los que se realiza el experimento al adhesivo en combinación con el adherente a utilizar, estando la junta sometida a ensayos

de tracción en uniones a tope, cizalla en uniones solapadas, desgarro y pelado. También existe la posibilidad de realizar ensayos al adhesivo mecanizado en forma de probeta, en este caso sería de aplicación la normativa utilizada para caracterizar los materiales plásticos.

A continuación se describe brevemente el ensayo UNE más representativo, para definir la resistencia de una junta adhesiva, sometida a solicitaciones de impacto, que ha servido de base para definir los ensayos a realizar en este estudio: Esta norma es la UNE-EN ISO 9653 referente a Adhesivos y describe los '*Métodos de ensayo de la resistencia a la cizalladora por impacto en juntas pegadas'*.

5.2.7.2.1. Métodos de ensayo de la resistencia a la cizalladura por impacto en juntas pegadas

El ensayo UNE-EN ISO 9653 pretende determinar el valor de impacto mediante la utilización de una máquina de ensayo tipo péndulo Izod en una probeta metal-metal. El valor de impacto es la energía absorbida por la probeta normalizada al ser cizallada por un golpe simple del martillo de una máquina de ensayo y se expresa en julios por metro cuadrado. La normativa ASTM equivalente es la D950. En la Norma UNE-EN ISO 179 se encuentra más información adicional sobre las máquinas de ensayo de impacto, así como sobre los datos que pueden ser tomados.

En este tipo de ensayo, la cabeza del martillo de impacto ha de golpear con su cara de impacto de forma uniforme y alineada sobre la cara de impacto de la probeta.

El soporte de sujeción de la probeta ha de ser mecanizado de una sola pieza de acero y atornillado sólidamente a la base de la máquina de ensayo (Figura 5.18). Las esquinas donde se ubica la probeta han de ser redondeadas. Y ha de estar provisto de un tornillo prisionero para realizar la fijación de la probeta al soporte. Este ha de colocarse de forma que el martillo golpee a la probeta en el punto de máxima velocidad. Y ha de golpear lo más cerca posible a la zona de unión donde está el adhesivo.

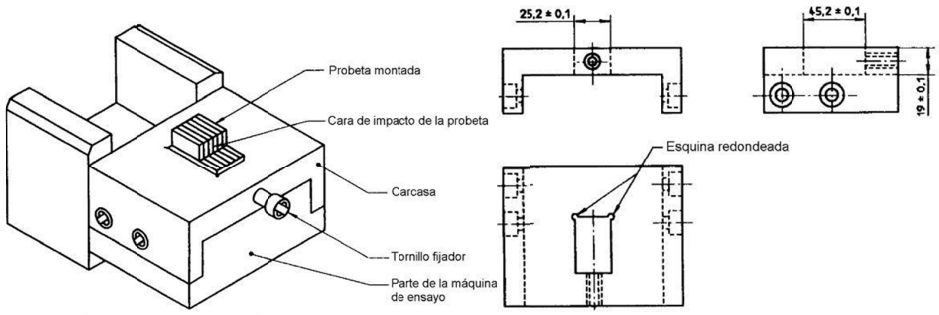


Figura 5.18: *Soporte de sujeción de una probeta estándar para ensayos de impacto Izod en adhesivos.*

Para nuestro ensayo se ha realizado una adaptación en la que se utilizan los martillos Charpy disponibles para realizar el ensayo Izop. Para ello se ha diseñado un soporte que se describirá más adelante.

El ensayo es recomendable realizarlo a 23ºC ± 2ºC y 50% ± 5 % de HR.

Siempre que sea posible las probetas han de ceñirse a las dimensiones de la figura 5.19. Si no es posible se ha de intentar mantener constante las dimensiones de la pieza base y reducir el área pegada, recortando la pieza pequeña. En el estudio realizado se ha utilizado una probeta, en la que se ha intentado respetar las dimensiones recomendadas, enfocada para poder ser utilizada con un martillo Charpy, y que se describirá más adelante.

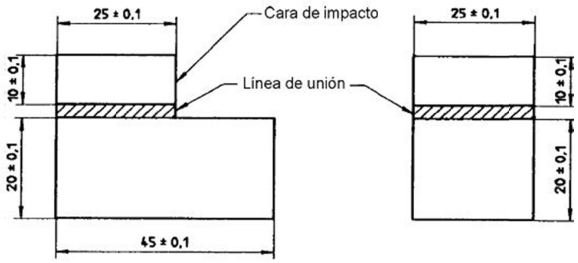


Figura 5.19: *Dimensiones de las probetas normalizadas para ensayo de impacto de adhesivos.*

La cara de impacto de la probeta ha de ser plana, perpendicular al plano de unión y paralela a la cara de choque del péndulo. Si la cara impactada no se deforma, las probetas pueden ser reutilizas.

El número de probetas a ensayar deben ser al menos 10, en nuestro caso se prepararon un mínimo de 12 por cada punto de ensayo. Cómo en los primeros ensayos se comprobó que la dispersión era pequeña, se redujo este número a 7-8 para los posteriores.

El pegado de las probetas se ha realizado siguiendo las recomendaciones del fabricante del adhesivo [166].

Las probetas han sido sometidas a un proceso de preparación superficial, según las ASTM D2651, ya descritas.

Estas probetas han sido acondicionadas para el ensayo según la Norma UNE-EN ISO 291.

Procedimiento del Ensayo:

> Se monta la probeta en el soporte y se fija correctamente el tornillo prisionero para evitar movimientos de esta. Se apoya la cabeza de impacto de la máquina suavemente sobre la superficie de la probeta, ajustando el soporte de sujeción para que la cara del martillo de impacto se adapte correctamente a la superficie de impacto de la probeta.
>
> Se eleva el martillo a la posición de ensayo y se deja caer sobre la probeta. La energía absorbida por la probeta durante el impacto es

recogida por los sensores de la máquina y guardada para su posterior tratamiento, además en nuestro caso, al ser una máquina instrumentada, podrá ser obtenida la fuerza instantánea aplicada por el martillo sobre la probeta, pudiendo ser representada una curva Fuerza-tiempo para cada probeta ensayada.

El tipo de modelo de rotura observado para cada ensayo se obtiene de acuerdo con la Norma UNE EN ISO 10365.

El valor del impacto de la probeta, es calculado cómo la energía absorbida para producir la rotura de la probeta dividida por el área de la superficie pegada, expresado en J/m^2. Estos resultados no pueden ser extendidos a superficies diferentes a las ensayadas.

La precisión de este método de ensayo no es conocida, puesto que no hay una estadística suficiente, sobre los resultados de los ensayos llevados a cabo, entre laboratorios.

Cada ensayo ha de ser acompañado de un informe en el que debe constar:

La norma utilizada.
Identificación de las probetas utilizadas.
Identificación del adhesivo sometido al ensayo.
Método de preparación de las probetas, con sus dimensiones y material utilizado.
Medida del espesor del adhesivo una vez realizado el pegado y método utilizado.
Proceso de acondicionamiento utilizado y condiciones atmosféricas del ensayo.
Número de probetas ensayadas.
Área de la sección pegada.
Valores mínimos, máximos y medios de los valores de impacto. Además de los porcentajes con el tipo de rotura que hayan sufrido las probetas.

5.2.8. Efectos de la radiación sobre los adhesivos.

Cómo se ha descrito a lo largo de este trabajo, la radiación va a ser un parámetro fundamental a la hora de definir los componentes a utilizar en CMS. Las uniones adhesivas tienen bastante importancia dentro de este detector, principalmente en las regiones más internas del mismo, donde se intenta minimizar la cantidad de material presente, para no interferir en el trabajo de detección de los diferentes dispositivos.

Cómo ya ha sido dicho, en el CERN se han llevado a cabo estudios sobre materiales sometidos a radiación, a lo largo de las últimas décadas, con el fin de proporcionar a los diseñadores de componentes de los aceleradores y detectores, unas bases de datos, con materiales utilizados en este tipo de dispositivos, sobre los que se ha estudiados los efectos que la radiación provoca sobre una serie de sus propiedades físico, químicas o mecánicas. Estos estudios se han centrado en algunos materiales orgánicos e inorgánicos

usados en aceleradores de partículas [35, 36, 38, 221, 223, 224 y 225], recubrimientos de cables o fibras [33, 37, 226] y en ciertos tipos de adhesivos utilizados para realizar uniones adhesivas [34, 39, 40, 41, 220 y 222]. Se puede destacar de la información contenida en estos documentos:

-Las pruebas realizadas a materiales orgánicos disponibles comercialmente que son utilizados como revestimientos y aislantes de cables eléctricos [33]. Estos han sido sometidos a fuertes dosis de radiación y se han evaluado sus propiedades mecánicas de resistencia a tracción, elongación en rotura y rigidez. Presentando los resultados en forma de gráficas y tablas en función de la dosis absorbida. Este estudio se completó posteriormente con otro sobre materiales libre de alógenos utilizado como aislante para cables [37]. En la figura 5.20 se muestra una distribución gráfica donde aparecen los niveles recomendables de utilización de estos materiales.

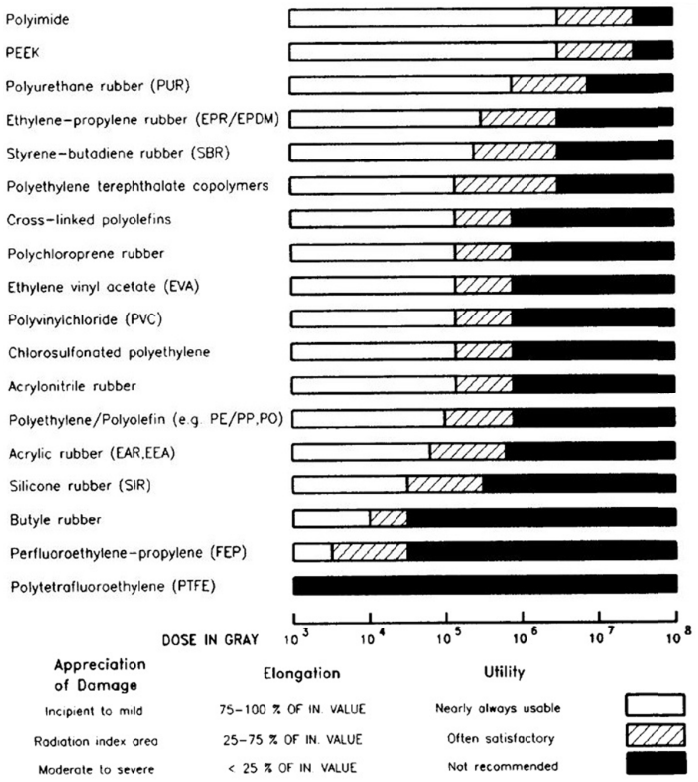


Figura 5.20: *Clasificación de los materiales en función de su resistencia a radiación (Fuente Ref. [37]).*

-El estudio sobre el comportamiento de las resinas termoplásticas y termoestables, principalmente epoxis utilizados para el aislante del bobinado de imanes [34]. En la figura 5.21 se encuentran los resultados uno de los epoxis estudiados frente a irradiación, de estas gráficas se deduce que esta resina se comporta mejor mecánicamente trabajando en condiciones de vacío, hasta cierto nivel de dosis absorbida por encima de 4×10^6 Gy, donde se comporta mejor trabajando al aire,

aunque ya sus propiedades mecánicas se han degradado de forma muy significativa. Y en la

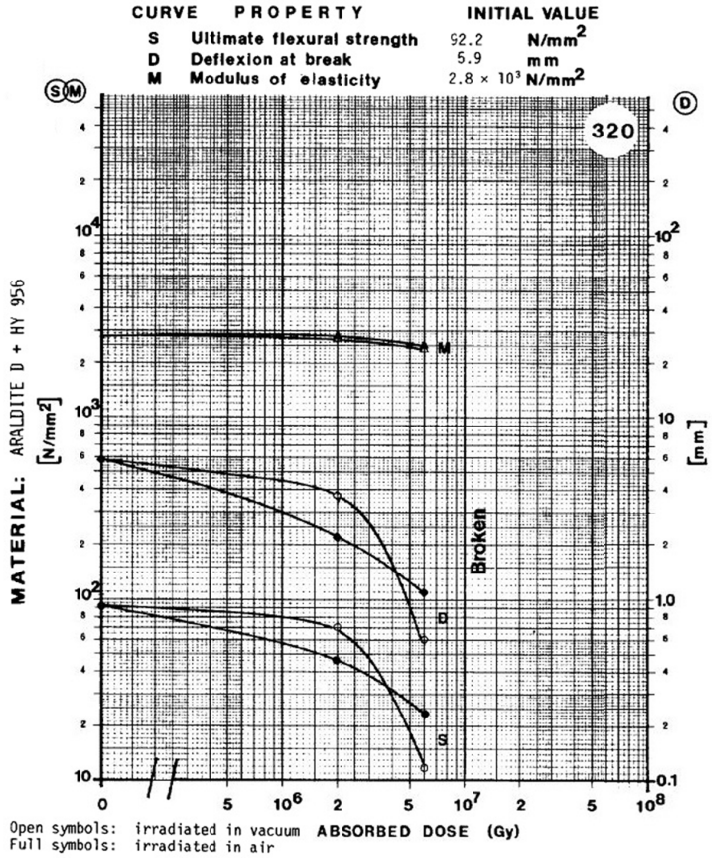


Figura 5.21: *Resultados de los test de flexión realizados a probetas de epoxi sin irradiar e irradiadas a diferentes dosis, en vacío y al aire (Fuente Ref. [34]).*

-Los ensayos sobre el comportamiento frente a la radiación de diferentes materiales y componentes utilizados en instalaciones de áreas sometidas a irradiación de aceleradores para altas energías. Siendo sometidos estos materiales hasta niveles de 10^8 Gy. En la tabla 5.22 se encuentra una tabla donde se muestra de forma comparativa la resistencia de una serie de resinas termoestables, de donde se extrae el buen funcionamiento de los epoxis en estas situaciones.

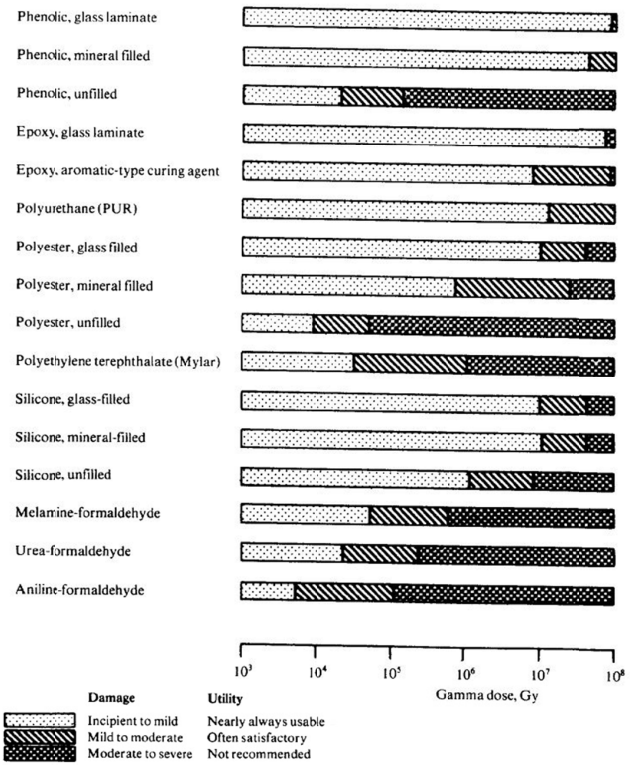


Figura 5.22: *Efectos de la radiación sobre las resinas termoestables (Fuente Ref. [35]).*

-Las pruebas del comportamiento frente a irradiación de una serie de resinas termoplásticas y termoestables y materiales compuestos formados con estas [39]. De este estudio se desprende que el material compuesto suele resistir mejor, en torno a un orden de magnitud, frente a la irradiación que la resina simple. En la figura 5.23 se puede observar el resultado comparativo de esta resistencia para resinas termoestables.

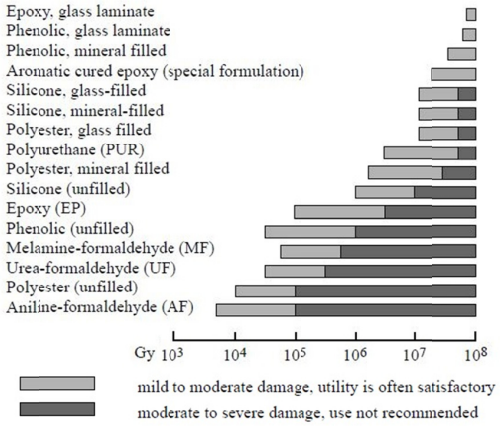


Figura 5.23: *Clasificación de la resistencia frente a irradiación de las resinas termoestables y materiales compuestos (Fuente Ref. [39]).*

-Los estudios centrados en el comportamiento a nivel molecular de las resinas epoxis frente a la irradiación [41], se ha observado que la irradiación puede provocar una reticulación o una degradación. La reticulación es la formación de nuevos enlaces transversales entre las moléculas del polímero, lo que se traduce en aumento de los pesos moleculares medios, de su resistencia a tracción, rigidez, etc, y de una disminución de su elongación en rotura, de su elasticidad, etc. La degradación por el contrario es la ruptura de uniones primarias de la cadena del polímero, lo que se traduce en una disminución del peso molecular medio. Al producirse una exposición a la radiación ambos fenómenos se producen de forma simultánea, aunque en general uno predominara y determinará las alteraciones que se producirán sobre las propiedades mecánicas, eléctricas y físicas del producto resultante. En este estudio se ha constatado que:

La estabilidad de las resinas epoxis sometidas a irradiación depende principalmente de su estructura molecular y de la fuerza de sus enlaces químicos. Hay composiciones que se empiezan a deteriorar en torno a 10^5 Gy y otras que son tan resistentes como las cerámicas. Las resinas epoxis del grupo aminas glicéricos son las más resistentes.

La densidad de la resina aumenta con la dosis, por la reticulación.

La viscosidad también aumenta en función de la dosis recibida.

Por encima de 2×10^6 Gy se aprecia una disminución de la tasa de grupos epoxis.

Las propiedades eléctricas de las resinas irradiadas se ven poco afectadas por la irradiación cuando ya se ven afectadas gravemente las mecánicas.

Es probable que el efecto de las radiaciones ionizantes sobre las resinas epoxis sea similar a la acción del curado químico, desde el punto de vista que estas abren los anillos epoxis y causan la formación de grupos hidroxilos.

Las resinas epoxis con curado en fríos son generalmente mucho menos resistentes que las que curan a temperaturas elevadas.

Con la irradiación se produce una descomposición gaseosa, principalmente de H_2, siendo menor esta cantidad liberada cuanto mayor radio-resistente sea la resina.

Los cambios producidos por la irradiación sobre las probetas de resina ensayadas son similares físicamente a los producidos por el envejecimiento producido por el calor: cambios de color, fisuras, sopladuras, etc. Constatando que las resinas resistentes a altas temperaturas son también muy resistentes a la radiación.

> La exposición de una resina en un ambiente radiactivo de alta energía, puede ser considerada equivalente a una exposición en cualquier ambiente que entrañe una absorción de energía. La exposición radiactiva se puede considerar en cierto sentido análoga a una pirolisis a base de temperatura.

Se puede concluir que el principal tipo de enlace químico de un polímero es el covalente, que es muy sensible a las radiaciones ionizantes, cómo es el caso de la radiación γ [40]. Los principales cambios químicos esperados en los adhesivos, por la acción de la irradiación [40, 223], son las roturas de enlaces de la cadena polimérica (Scission) y la formación de enlaces adicionales, a menudo entre las cadenas rotas (Cross-Linking), dando esto último lugar a un cambio de las propiedades mecánicas (cristalización, fragilización, reticulación de las cadenas del polímero, rigidez, mayor resistencia, aumento de la densidad, etc., obteniendo un adhesivo más rígido y resistente al aumentar el grado de entrecruzamiento del adhesivo) y ópticas (perdida de transparencia) del adhesivo en cuestión. Por el contrario, la irradiación también provoca la rotura de enlaces que conducen a la rotura de cadenas sobre las macromoléculas (Scission), este efecto normalmente produce deterioro sobre el material resultando este más flexible y débil. Ambos efectos se producen de forma simultánea, y dependiendo de la estructura molecular, de la presencia de algún tipo de adhesivos, y también del ambiente inerte u oxidante, va a dominar uno de los efectos sobre el otro. Además van a acontecer otra serie de efectos por la radiación, como la formación de dobles enlaces o la introducción de moléculas de bajo peso molecular en la red del polímero. Un ambiente oxidante va a dar lugar que el oxígeno reaccione rápidamente con los radicales libres producidos durante la irradiación, resultando que la reacción de oxidación será dominante, por lo que los efectos que puede producir la radiación sobre las propiedades físicas en materiales macromoleculares, pueden ser muy importantes en presencia de oxígeno, comparas con unas condiciones de vacío, en la figura 5.21 puede observarse este efecto. Además en condiciones de atmósfera de oxígeno, la relación entre la radiación y la degradación inducida, en algunos polímeros, va a estar influenciada por otros factores a parte de la dosis total absorbida, particularmente es importante el fenómeno tiempo y temperatura, que incluye efectos de tasa de dosis y post-irradiación, que pueden ser tan importantes como las diferencias entre la estructura molecular del polímero a la hora de determinar su frente a los efectos de la radiación. Generalmente si un polímero se irradia a temperatura inferior a la de su transición vítrea este efecto multiplicador del daño de la temperatura no ser va a producir.

Al estudiar los efectos de la radiación sobre una unión adhesiva [40], se ha constatado que la interface adhesivo-adherente normalmente no es sensible a los efectos de la radiación. Cómo esta es la responsable en la resistencia de una unión, en muchos casos, no se observará deterioro de la unión hasta que no empiece la degradación del polímero. Resultando en una reducción de la deformación en rotura y del módulo de elasticidad a altas dosis. Este efecto es incluso más pronunciado en el caso de materiales más blandos, como las siliconas. Esto no es válido en el caso de realizar una preparación superficial

deficiente del adherente donde puedan encontrarse elementos contaminantes u oxidantes.

Las resinas epoxis, en general, van a tener un comportamiento excelente hasta niveles de 100 KGy, como se puede intuir de la figura 5.23, que son las máximas dosis esperadas en los componentes más expuestos del sistema de alineación LINK, con coeficiente de seguridad 1, incluso si se utiliza un coeficiente de seguridad 3 para las dosis previstas, cómo recomienda CMS, este tipo de resina sigue manteniendo un comportamiento aceptable frente a los parámetros estudiados. Y para el caso de los materiales compuestos de fibra reforzada, estos van a mejorar las prestaciones frente a irradiación en un orden de magnitud [39], o sea 1 MGy al menos, por lo que las estructuras LINK DISC y ALINGMENT RING situadas en la región de η=3 van a estar trabajando siempre en condiciones seguras, con un coeficiente de seguridad 10.

Para las estructuras de fibra de carbono fue utiliza resina epoxi de curado mediante calor, que cómo se ha explicado son por lo general más resistentes frente a la irradiación que las que curan a temperatura ambiente. Pero en el caso de los insertos mostrados a lo largo de este estudio, que son añadidos a la estructura de fibra una vez curada y a estructuras metálicas, así como el pegado de elementos simples entre sí o cuando el adhesivo es utilizado cómo sellante de piezas para evitar manipulaciones o movimientos indeseados, no era posible utilizar un epoxi de curado por calor, entre otros motivos, porque muchos de estos elementos fueron pegados durante el proceso de instalación de las estructuras en CMS. Por todo esto fue necesario seleccionar una resina epoxi de curado a temperatura ambiente y de amplio espectro de utilización. Seleccionando el Araldit 2011, en base a los resultados de resistencias frente a irradiación obtenidos en estas bases de datos [40] y que aparecen en las siguientes figuras:

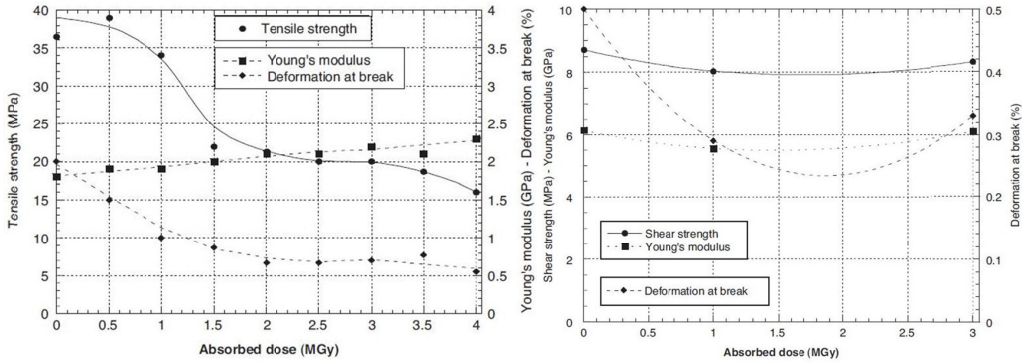


Figura 5.24: *Efecto de la radiación gamma sobre probetas de Araldit 2011 sometidas a tracción según ISO R-527 (Izq.) y sobre ensayos de pelado según ASTM D 1876 con adherentes compuestos de fibra de vidrio con epoxi (Der.).*

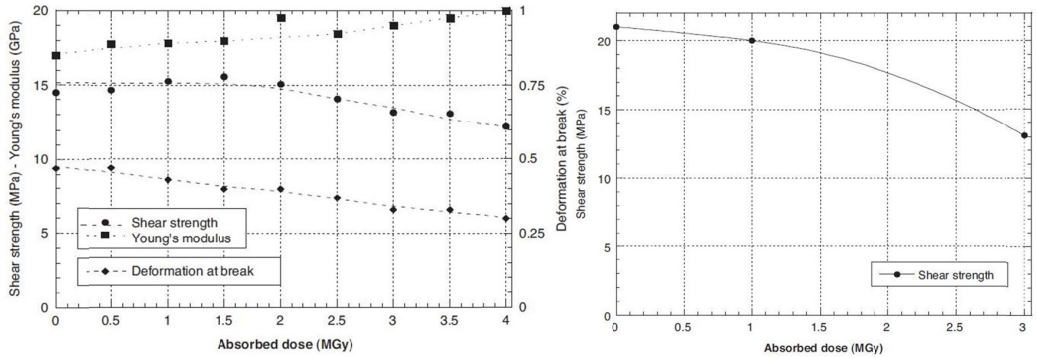


Figura 5.25: *Efecto de la radiación gamma sobre probetas de ensayos de pelado según ASTM D 1876, pegadas con Araldit 2011, con adherentes de aluminio, y tratamiento superficial previo de chorreado con arena (Izq.) o con desengrasado más decapado superficial con sosa caustica (Der.).*

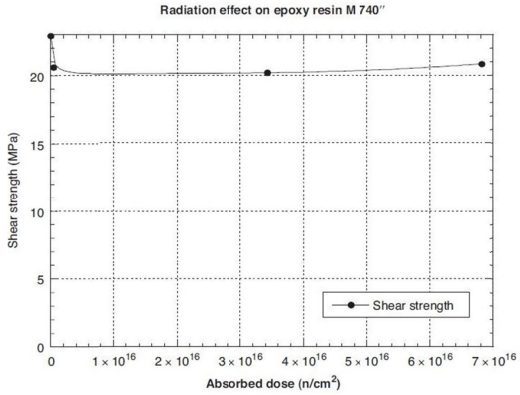


Figura 5.26: *Efecto de los neutrones rápidos sobre probetas de ensayos de pelado según ASTM D 1876 (pero reduciendo la superficie pegada a 1 cm^2), pegadas con Araldit 2011, con adherentes de aluminio, y tratamiento superficial previo de chorreado con arena.*

El adhesivo Araldit 2011 utilizado cómo un material para formar piezas tiene un comportamiento mecánico bueno frente a la irradiación gamma, cómo se desprende de la figura 5.24 (Izq.), para los niveles a que serán sometidos los componentes en CMS (<300 KGy). Si este se utiliza para realizar uniones adhesivas donde el adherente es un material compuesto de fibra de vidrio, según la figura 5.24 (Der.), las propiedades siguen siendo buenas en esos niveles. De igual forma son buenas las prestaciones, según la figura 5.25, cuando el adherente es aluminio, mejorando su resistencia cuando el tratamiento es un decapado superficial con sosa caustica frente a chorreado con arena. Y por último, como se observa en la figura 5.26, los neutrones no producirán efectos apreciables sobre las propiedades mecánicas de la junta adhesiva en los niveles que se esperan en CMS, que son 10^{14} neutrones/cm^2. De todo ello se desprende que el comportamiento mecánico de este adhesivo frente a irradiación, se espera que sea bueno en las condiciones a que se verá sometido en CMS durante la vida del experimento, pero todas estas pruebas han sido realizadas en condiciones de ensayo cuasi-estáticos y cómo ya se

comentó al principio del trabajo se necesita evaluar el comportamiento con la irradiación frente a cargas de impactos. En condiciones ambientales de no irradiación, según los datos de la gráfica 5.16 obtenidos del trabajo de Harris y Adams [244], es previsible que su resistencia frente a cargas de impacto sea similar a frente a cargas estáticas, pero no ha sido posible encontrar información de este adhesivo sobre su resistencia frente a cargas de impacto, ni el fabricante dispone de esta información en condiciones de operación de ambiente no radiactivo. Por lo que ha sido necesaria la preparación y realización de los ensayos que se muestran a continuación en este capítulo, adaptándolos a las necesidades de ambiente radiactivo del presente estudio y a la infraestructura de ensayos disponible. De forma análoga ha sido necesario la realización de ensayos para valorar la estabilidad dimensional de las uniones adhesivas frente a las dosis de irradiación que van a recibir estas durante su utilización en el detector.

5.2.9. Análisis tensional de la junta adhesiva.

Entre los diferentes tipos de juntas explicados y sus posibles solicitaciones a que se puede ver sometida, históricamente ha sido la junta solapada simple sometida a tracción cuasi-estática la que ha centrado la atención a la hora de analizar su comportamiento tensional, principalmente porque este es el diseño de junta más ampliamente utilizado a nivel industrial y por ser una geometría que puede ser probada mediante ensayos normalizados relativamente sencillos, no obstante también ha sido analizado el comportamiento de otros tipos de juntas menos utilizadas, para las cuales también existen ensayos normalizados (Apéndice B).

Seguidamente van a ser descritos algunas de las teorías que analizan las juntas adhesivas, en distintos supuestos [230, 231 y 232]:

5.2.9.1. Unión solapada sometida a cargas cuasi-estáticas.

La junta más sencilla de realizar y utilizada es la unión solapada simple, esta consiste en adherir entre sí dos sustratos mediante una delgada lámina de adhesivo. Los resultados obtenidos con esta junta van a estar muy influenciados por el tipo del adhesivo utilizado, y la preparación superficial de los sustratos utilizados.

Considerando un adhesivo que solamente se deforma por cortadura producida por una carga aplicada de forma cuasi-estática, con adherentes rígidos, se obtiene la forma más simple, de análisis elástico lineal, de esta junta (Figura 5.27, Izq.):

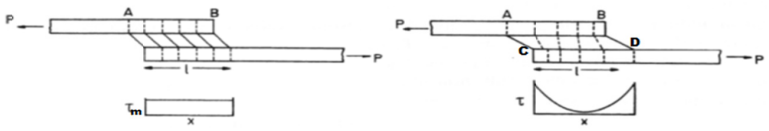


Figura 5.27: *Deformación esquemática en una junta solapada simple con adherente rígido (Izq.) o elástico (Der.).*

Y la tensión de cortadura (τ_m), en este caso, viene dada por:

$$\tau_m = \frac{P}{b \times l} \tag{5.4}$$

Y que es la tensión a cortadora promedio en todo el adhesivo, siendo P la carga aplicada sobre el adherente, b la anchura de la junta y l su longitud. En este supuesto la tensión de tracción a la que está sometido el adherente decrecerá desde el punto A llegando hasta cero en el punto B, siendo en A donde se encuentra la tensión de tracción máxima a que está sometido el adherente. Para el supuesto de adherentes flexibles, la deformación se irá reduciendo progresivamente, con la tensión que soporta, hasta llegar a cero en B. En este caso las tensiones máximas en el adhesivo se van a dar en los puntos C y D. Suponiendo que hay una continuidad perfecta entre adhesivo y adherente en su intercara. Se observa que en el caso de adherente rígido el adhesivo al cizallarse forma paralelogramos uniformes, mostrando formas distorsionadas en el caso de los sustratos flexibles. Este efecto de cortadura diferencial fue analizado por **Volkersen** [246]:

En este análisis [232] se asume que el adhesivo se deforma únicamente por cortadura, mientras que el adherente la hace solo por tracción, de la forma mostrada en la figura 5.28.

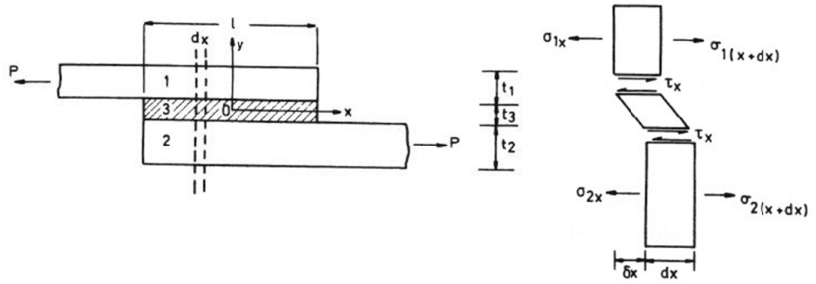


Figura 5.28: *Análisis de tensiones según la teoría de Volkersen.*

El desplazamiento relativo entre ambos sustratos a lo largo de la zona de solapamiento pegada, vendrá dada por,

$$\delta_x = \delta_0 - \int_{-\frac{l}{2}}^{x} \varepsilon_1 \times dx + \int_{-\frac{l}{2}}^{x} \varepsilon_2 \times dx \tag{5.5}$$

siendo δ_0 el desplazamiento relativo cuando x=- l/2 y ε_1 y ε_2 son la distribución de la deformación producida en el adherentes 1 y 2 (la notación 3 hace referencia al adhesivo).

Considerando una anchura unitaria de junta y aplicando una carga P sobre el sustrato unitario 1 se tiene,

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E \times t_1} \times \left[P - \int_{-\frac{l}{2}}^{x} \tau_x \times dx \right] \tag{5.6}$$

Y para el sustrato 2,

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E \times t_2} \times \int_{-\frac{l}{2}}^{x} \tau_x \times dx \tag{5.7}$$

con $E=E_1=E_2$ cómo el módulo de elasticidad del sustrato.

En el caso del adhesivo se tiene que,

$$\delta_x = \frac{t_3}{G} \times \tau_x \tag{5.8}$$

siendo $G=G_3$ el módulo de cortadura del adhesivo.

Sustituyendo los valores de la ecuación (5.5) por los de las ecuaciones (5.6), (5.6) y (5.6) y operando se obtiene la siguiente ecuación diferencial,

$$\tau_x'' = \omega^2 \times \tau_x \tag{5.9}$$

cuya solución es,

$$\tau_x = A_1 \times \cosh \omega x + A_2 \times \sinh \omega x \tag{5.10}$$

donde A1 y A2 son constantes arbitrarias definidas por las condiciones de contorno. Y procediendo adimensionalmente se tiene,

$$\overline{\tau} = \frac{\tau_x}{\tau_m} \tag{5.11}$$

Aplicando las condiciones de contorno apropiadas se obtiene la relación de distribución de tensión a cortadura para el adhesivo:

$$\overline{\tau} = \frac{\omega \times \cosh \omega X}{2 \times \sinh \frac{\omega}{2}} + \left(\frac{\psi - 1}{\psi + 1} \right) \times \frac{\omega \times \sinh \omega X}{2 \times \cosh \frac{\omega}{2}} \tag{5.12}$$

siendo

$$\omega^2 = (\psi + 1) \times \phi \; ; \qquad \psi = \frac{t_1}{t_2} \; ; \quad \phi = \frac{G \times l^2}{E \times t_1 \times t_3} \; ; \qquad X = \frac{x}{l} \; ; \; -1/2 \leq X \leq 1/2$$

Cuando el sustrato es de igual espesor $t_1 = t_2 = t$. Y entonces $\psi = 1$ y $\omega = \sqrt{2 \times \phi}$.

La tensión de cortadura máxima en el adhesivo se da en los extremos de la junta:

$$\overline{\tau}_{max} = \sqrt{\frac{\phi}{2}} \times \coth \sqrt{\frac{\phi}{2}} \tag{5.13}$$

Para el caso de grandes longitudes de solapamiento de la junta,

$$\overline{\tau}_{max} = \sqrt{\frac{G \times l^2}{2 \times E \times t \times t_3}} \tag{5.14}$$

y operando (5.14) con (5.4) y (5.11), se obtiene el valor absoluto de la tensión de cortadura máxima en el adhesivo, τ_{max}:

$$\tau_{max} = \frac{P}{l} \times \sqrt{\frac{G \times l^2}{2 \times E \times t \times t_3}} \tag{5.15}$$

esta es proporcional al factor (FP),

$$FP = \sqrt{\frac{G}{2 \times E \times t \times t_3}} \tag{5.15.1}$$

que no depende de la longitud de solapamiento de la junta. Además de aquí se deduce que se puede reducir esta concentración de tensiones aumentando el espesor del sustrato o su módulo elástico, de igual forma se reduce la concentración de tensiones al aumentar el espesor del adhesivo o reducir su módulo de cortadura. Aunque esto último no siempre puede ser aplicado, ya que aumentar espesor de adhesivo y reducir su módulo de cortadura van acompañadas normalmente de una reducción de su resistencia a cortadura, con lo cual se puede anular el efecto positivo mencionado, aunque esto podría ser llevado a cabo, por ejemplo, mediante una reformulación del adhesivo que le confiera unas propiedades menos rígidas, sin reducir significativamente su resistencia a cortadura.

Esta teoría, que va a ser suficientemente precisa en gran parte de los problemas de juntas utilizados en ingeniería, no tiene presente dos importantes fenómenos que se producen sobre la junta. La dirección de las fuerzas P que actúan sobre los sustratos no están alineadas, lo que va a provocar un momento flector añadido a la tensión de la junta. Además se produce una flexión de los adherentes que dan lugar a una rotación de la junta. Esta rotación que altera la dirección de la línea de la carga en la región de solape, da lugar a un problema que geométricamente no va a ser lineal, ya que el desplazamiento de la junta no va a ser proporcional a la carga aplicada. Este efecto fue analizado por **Goland y Reissner** [247], que suponen al adhesivo y adherente cómo sólidos linealmente elásticos.

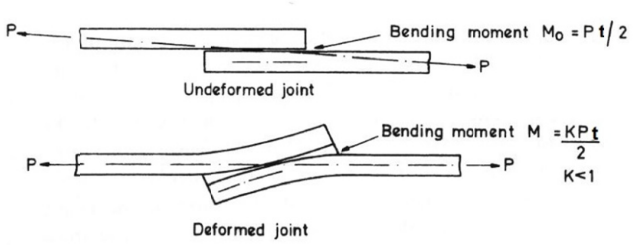


Figura 5.29: *Análisis de tensiones según la teoría de Goland y Reissner. Aplicando una carga pequeña (Superior) o una carga suficiente para deformar la junta (Inferior).*

En este análisis [232], cuyos efectos estudiados están gráficamente expresados en la figura 5.29, se tuvo en cuenta el factor de momento de flexión, k, que relaciona el momento flector del adherente en el extremo de la zona solapada, M_0, con la carga aplicada mediante la relación:

$$M_0 = k \times P \times \frac{t}{2} \tag{5.16}$$

siendo t el espesor de los sustratos (el del adhesivo se ha sido despreciado) y P es la carga aplicada sobre ellos. Al deformarse la junta produciendo una rotación de esta, se produce una realineación de las cargas reduciéndose el efecto del momento flector, por lo que el factor K es siempre menor que 1 (Figura 5.29 (Inferior)), en este caso. Cuando la carga aplicada es pequeña y no llega a deformar la junta, entonces tiene lugar la situación mostrada en la figura 5.29 (Superior) siendo el momento en ese caso,

$$M_0 = P \times \frac{t}{2} \tag{5.17}$$

Esta sería la situación, de la primera aproximación de Goland y Reissner, en la se supuso una junta monolítica indeformable, mientras que el caso anterior

sería el que se aplica para una junta con sustratos metálicos deformables, que es la situación real, esta fue la segunda aproximación.

El valor de k, para una junta de anchura unitaria, viene dado como [248]:

$$\frac{1}{k} = 1 + 2 \times \sqrt{2} \times \tanh\left[\frac{l}{4 \times t} \times \sqrt{6 \times (1 - v_s^2) \times \frac{P}{E \times t}}\right] \tag{5.17}$$

donde v_s, es el coeficiente de Poisson del sustrato. El coeficiente k es dependiente de la geometría de la junta y sus propiedades, así como de la fuerza aplicada sobre la misma.

El efecto negativo de excentricidad de la carga puede ser reducido con ciertas soluciones de las propuestas en la Tabla 5.7, con el sustrato pre-deformado en la zona de solape, modificando los extremos del sustrato o cambiando el tipo de junta.

En la segunda aproximación, la capa de adhesivo es considerada flexible, y donde las deformaciones de tracción y cortadura en el adherente son despreciables frente a las del adhesivo. En esta aproximación el adhesivo se considera como un sistema infinitesimal de muelles situados entre ambos sustratos. En el supuesto de estado tensional de deformación plana, mediante este planteamiento se pueden obtener las distribuciones de tensiones de cortadura (τ_{3x}) y desgarro (σ_{3y}). Este supuesto es válido cuando se cumpla:

$$\frac{t \times G_3}{t_3 \times G_1} < 0.1 \quad y \quad \frac{t \times E_3}{t_3 \times E_1} < 0.1 \tag{5.18}$$

Este límite superior de validez se obtiene por consideraciones de energía de deformación en las que se desprecia el trabajo realizado por las tensiones en el adherente (τ_{1x} y σ_{1y}) comparadas con el realizado por las tensiones en el adhesivo (τ_{3x} y σ_{3y}), resultando [229]:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\sigma_{3y}} = \frac{4 \times P \times t}{\Delta \times l^2} \times \Bigg[\Bigg(\Big(\sinh\Big(\gamma \times \frac{l}{2 \times t}\Big) \times \cos\Big(\gamma \times \frac{l}{2 \times t}\Big) - \cosh\Big(\gamma \times \\ \frac{l}{2 \times t}\Big) \times \sin\Big(\gamma \times \frac{l}{2 \times t}\Big)\Big) \times \Big(\gamma \times \frac{l}{2 \times t}\Big)^2 \times \frac{k}{2} - \gamma \times \frac{l}{2 \times t} \times k' \times \\ \cosh\Big(\gamma \times \frac{l}{2 \times t}\Big) \times \cos\Big(\gamma \times \frac{l}{2 \times t}\Big)\Bigg) \times \cosh\Big(\gamma \times \frac{x}{t}\Big) \times \cos\Big(\gamma \times \frac{x}{t}\Big) + \\ \Bigg(\Big(\cosh\Big(\gamma \times \frac{l}{2 \times t}\Big) \times \sin\Big(\gamma \times \frac{l}{2 \times t}\Big) + \sinh\Big(\gamma \times \frac{l}{2 \times t}\Big) \times \cos\Big(\gamma \times \\ \frac{l}{2 \times t}\Big)\Big) \times \Big(\gamma \times \frac{l}{2 \times t}\Big)^2 \times \frac{k}{2} - \gamma \times \frac{l}{2 \times t} \times k' \times \sinh\Big(\gamma \times \frac{l}{2 \times t}\Big) \times \sin\Big(\gamma \times \\ \frac{l}{2 \times t}\Big)\Bigg) \times \sinh\Big(\gamma \times \frac{x}{t}\Big) \sin\Big(\gamma \times \frac{x}{t}\Big)\Bigg]\end{aligned} \tag{5.19}$$

y

$$\boldsymbol{\tau_{3x}} = -\frac{P}{4 \times l} \times \left[\sqrt{\frac{2 \times G_3}{E_1 \times t \times t_3}} \times l \times (1 + 3 \times k) \times \frac{\cosh\left(\sqrt{\frac{8 \times G_3}{E_1 \times t \times t_3}} \times x \right)}{\sinh\left(\sqrt{\frac{2 \times G_3}{E_1 \times t \times t_3}} \times l \right)} + 3 \times (1 - k) \right] \tag{5.20}$$

con,

$$\Delta = \frac{1}{2} \times \left(\sinh\left(\gamma \times \frac{l}{t} \right) + \sin\left(\gamma \times \frac{l}{t} \right) \right) \; ; \; \gamma^4 = \frac{6 \times E_3 \times t}{E_1 \times t_3} \; ;$$

$$k' = \frac{k \times l}{2 \times t} \times \sqrt{\left[3 \times (1 - v_s^2) \times \left(\frac{P \times E_1}{t} \right) \right]}$$

Posteriormente otros autores indicaron que la solución al estado tensional mostrada para la ecuación (5.19) presentaba inconsistencias y Sneedon [249] propone una modificación. Aunque la formulación más correcta con alguna mejora fue presentada por Z.J. Wu [250].

Volkersen [230], tratando al adhesivo de igual forma que Goland y Reissner, planteó un sistema de ecuaciones para describir las tensiones de tracción y cortadura presentes en la capa de adhesivo de una unión solapada doble, aquí se omiten también las tensiones en el adherente. En general, estos límites de utilización serán de aplicación a cualquier teoría que haga las suposiciones de Goland y Reissner en los que se omiten las deformaciones a cortadura y tracción del adherente.

A pesar de que las deficiencias que pueden presentar los análisis elásticos de Volkersen y Goland y Reissner, bastantes trabajos posteriores mediante elementos finitos, como el de Adams y Peppiat [251], han llegado a la conclusión de que los resultados que generan son bastante buenos. En las figura 5.30, se muestra una comparativa de los resultados analíticos de Volkersen para el caso de junta solapada doble y Goland-Reissner para la junta solapada simple, y en estos se observa que se aproximan bastante bien al resultado mediante simulación por elementos finitos a este tipo de juntas.

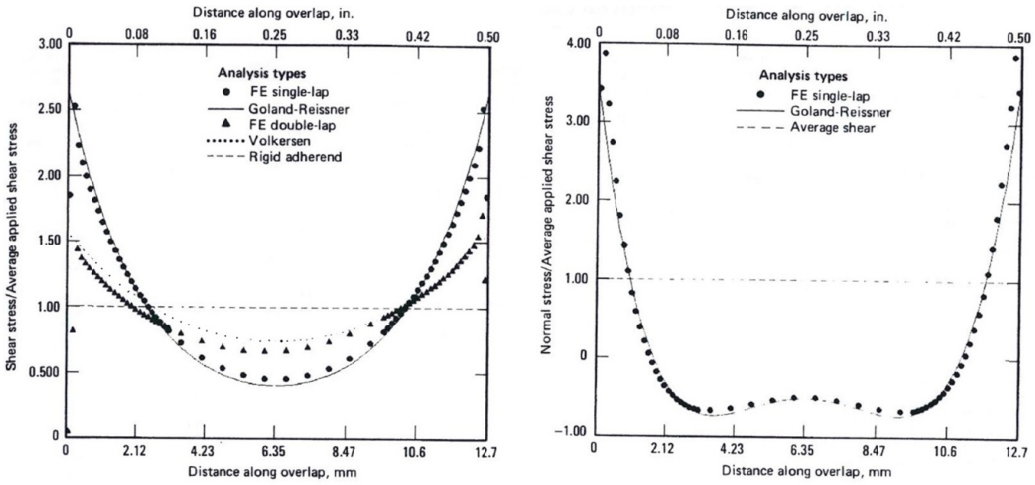


Figura 5.30: *Comparación de los resultados de Goland-Reissner y Volkersen con elementos finitos (Fuente Ref. [229]).*

Estas soluciones indican que al final de la zona solapada puede darse una tensión de desgarro significativa, lo que puede ser de gran importancia cuando los sustratos son materiales compuestos de fibra, donde puede darse una deslaminación del sustrato.

Adams y Peppiat realizaron un estudio de la junta solapada cómo un problema tridimensional [232, 252], en lugar de bidimensional. Demostrando que la tensión a lo largo de la anchura de la junta es debida a la deformación causada por la relación de Poisson en el adherente, que origina una reducción uniforme de anchura y espesor del sustrato a lo largo de la junta (Figura 5.31), alcanzando un máximo de tensión en la parte final de la junta. Aquí argumentan que la tensión de cortadura y tracción en la dirección de la carga aplicada no van a verse significativamente influenciadas por las tensiones transversales causadas por la deformación de Poisson sobre el adherente. Por esta razón se suele ignorar la anchura de la junta adhesiva.

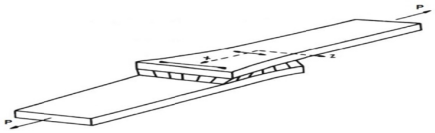


Figura 5.31: *Deformación transversal causada por el efecto Poisson sobre una junta solapada simple.*

Hasta ahora se ha considerado que tanto los sustratos como los adhesivos tienen un comportamiento elástico, pero en la actualidad muchos adhesivos epoxis modificados con elastómeros van a tener un comportamiento elastoplástico. Este comportamiento ha sido tenido en cuenta en muchos estudios, los trabajos más extensos sobre el tema los realizó **L.J. Hart-Smith** [232]. Es en esencia una evolución del análisis a cortadura de Vorkensen y las teorías de Goland y Reissner teniendo en cuenta la deformación de los adherentes en la zona de solapamiento. La filosofía de diseño de L.J. Hart-

Smith es que el adhesivo nunca debe ser el eslabón más débil de la junta, que como se ha descrito es el ideal para poder estimar la resistencia de una junta adhesiva con cierta fiabilidad. Esta teoría estipula que la resistencia del adhesivo se define no por la forma de la curva tensión-deformación sino por la energía de deformación a cortadura por unidad de área pegada, y en este caso la junta fallará bajo una carga dada, si la deformación por cortadura en la junta alcanza la energía máxima por cortadura admisible por el adhesivo en cuestión. Esto aparece representado para una junta solapada doble en la figura 5.32.

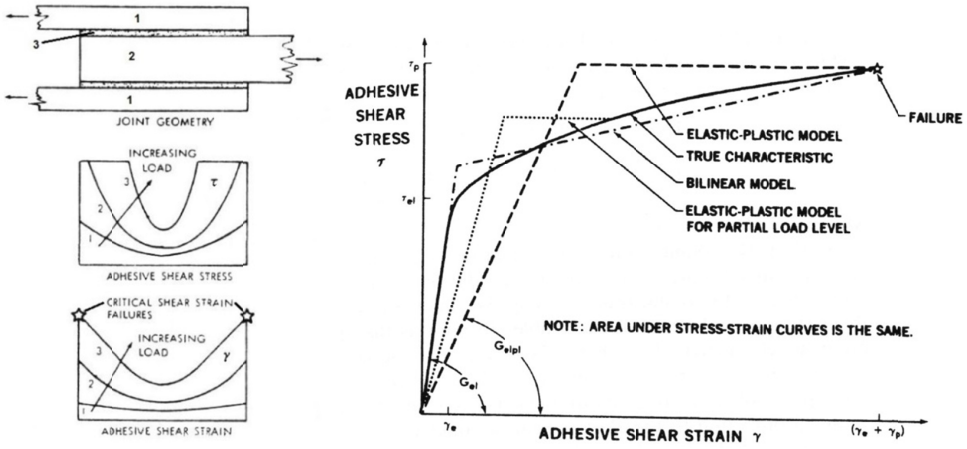


Figura 5.32: *Desarrollo de las distribuciones de tensión y deformación por cortadura en una junta solapada doble, sobre la que se incrementa gradualmente la carga aplicada (Izq.), según teoría de Hart-Smith y curvas tensión deformación a cortadura de un adhesivo, mostrando diferentes modelos matemáticos alternativos (Der.) (Fuente Ref. [232]).*

Actualmente la forma más apropiada de realizar estudios teóricos sobre juntas adhesivas es mediante la simulación por medio de **modelos de Elementos Finitos**. De esta forma va a ser posible realizar estudios previos a juntas con morfologías complicadas de resolver analíticamente, obteniendo resultados bastante precisos. A continuación, en la figura 5.33 y tabla 5.8, se muestra como ejemplo una serie de modelos de elementos finitos utilizados sobre diferentes juntas estándar [229], en todas las juntas se cumple que: para el adhesivo el espesor es 0.254 mm, su módulo de elasticidad 3730 Mpa y coeficiente Poisson 0.4; para el sustrato el espesor es 3.18 mm, su módulo de elasticidad 69 Gpa y coeficiente Poisson 0.33; la longitud solapada son 12.7 mm, la longitud del sustrato 102 mm, la anchura del adherente 25.4 mm y la carga aplicada 1.78 kN.

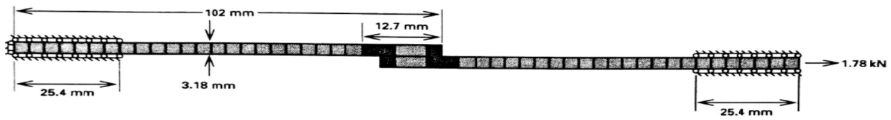


Figura 5.33: *Geometría de la junta simulada y condiciones de contorno utilizadas en todos los casos (Fuente Ref. [229]).*

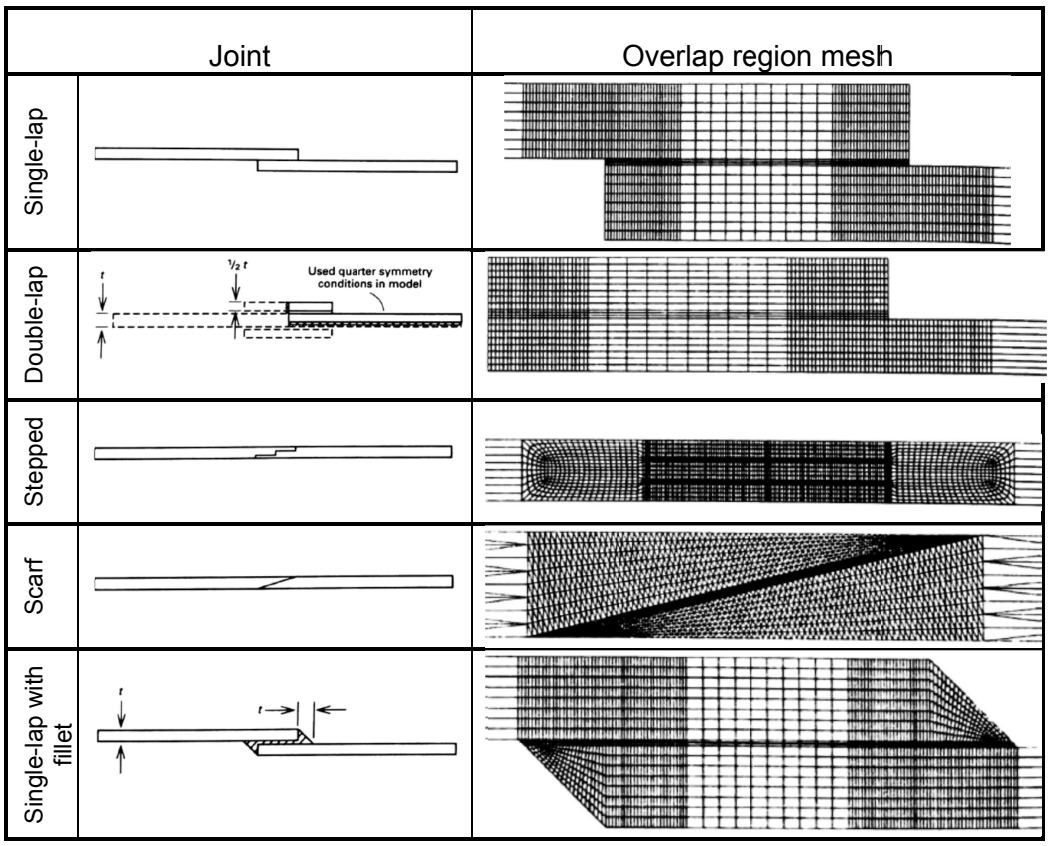


Tabla 5.8: *Mallado utilizado para el análisis mediante elementos finitos en esas juntas típicas de uniones adhesivas (Fuente Ref. [229]).*

En la figura 5.34 se muestran los resultados comparativos de tensiones de tracción, cortadura, tensión principal máxima y Von Mises (o equivalente) para una junta solapada simple, doble, en escalón y en cuña. Las tensiones se han mostrado utilizando los valores de la fila media de elementos del adhesivo y se han normalizado en función de la tensión media de cortadura a que está sometida la junta. En estos resultados se muestra que la junta solapada simple es la que más tensión de tracción soporta en los extremos de la zona pegada siendo 1.5 veces mayor que la junta solapada doble, 1.9 veces mayor que la junta en escalón y hasta 7 veces mayor que la junta en cuña, sindo esta última la que menos concentración de tensiones tiene en los extremos y la que tiene una distribución de tensiones más uniforme sobre toda la superficie de la junta. Para el caso de las tensiones de cortadura también es la junta en cuña la que proporciona una distribución de tensiones más uniforme, mientras que la junta solapada doble presenta un máximo en los extremos del pegado de 1.7 veces esta tensión de cortadura, la junta en escalón 2 veces y la solapada simple 2.5 veces. Como se desprende de estos resultados parece obvio que la junta en cuña es la idónea para ser utilizada en una unión adhesiva, pero es la más difícil de llevar a cabo industrialmente, sobre todo si se trata sustratos de materiales compuestos de fibra. Una solución intermedia pasaría por utilizar la junta en escalón, que es más sencilla de realizar, aunque las más sencilla de

realizar y por tanto la más utilizada a nivel industrial es la junta solapada simple.

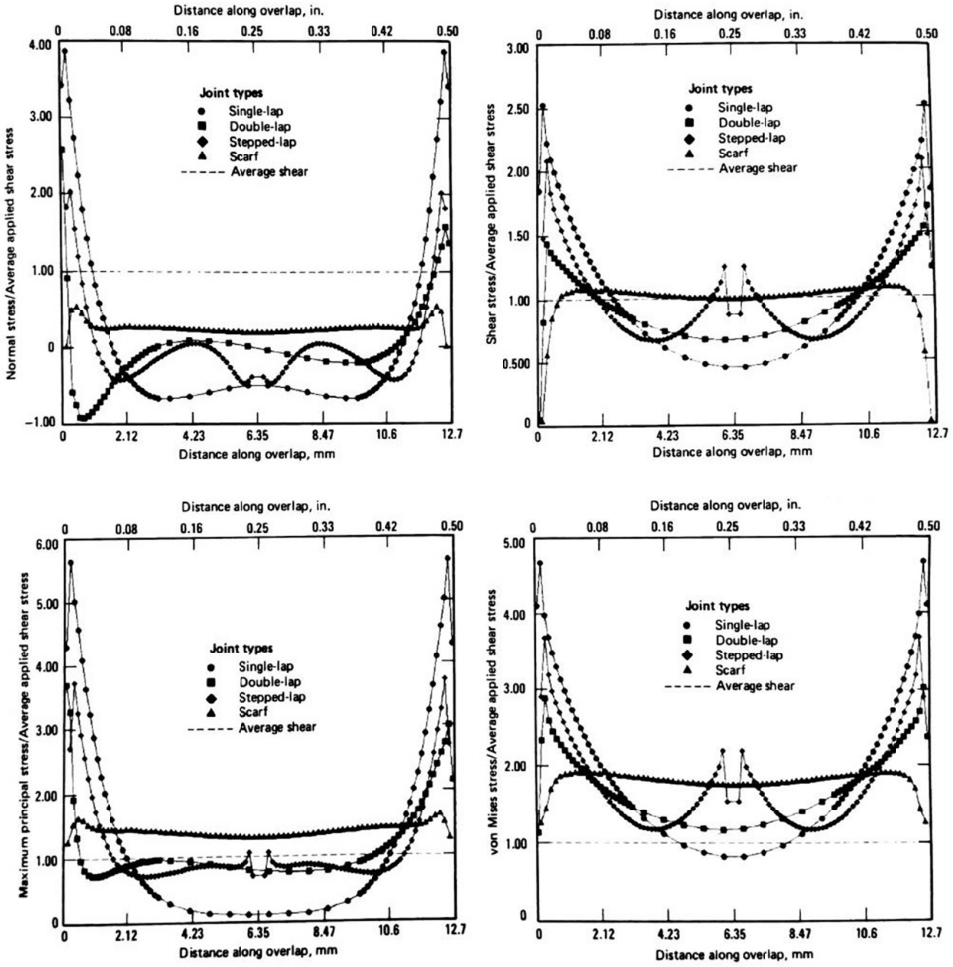


Figura 5.34: *Resultado del análisis tensional por elementos finitos a distintas juntas adhesiva (Fuente Ref. [229]).*

Los valores que se muestran en la figura 5.33 relativos a las tensiones Principales Máximas y von Mises, pueden ser considerados como un potencial criterio de fallo de la junta. Utilizándose las tensiones Principales Máximas en el caso de una junta con adhesivos rígidos y von Mises para los dúctiles. En esta situación también será la junta en cuña la ideal, por presentar la distribución de tensiones más uniforme. El resto de juntas presentan significativas concentración de tensiones en el borde exterior de la región pegada, siendo el caso de la junta solapada simple el más desfavorable.

En la figura 5.35 se muestra una comparativa de las tensiones a las que está sometida una junta solapada simple, cuando la terminación de la zona pegada acaba en esquina o si rebosa el pegamento terminando con un chaflán a 45º. La tensión que aparece es la que corresponde al elemento situado en el plano

medio de la capa de adhesivo. En este caso se observa la importancia de esta terminación en la reducción de la concentración de tensiones sobre el extremo de la zona pagada, y que en el caso de la figura se consigue reducir esta concentración en más de un 50%, en todos los casos tensionales estudiados.

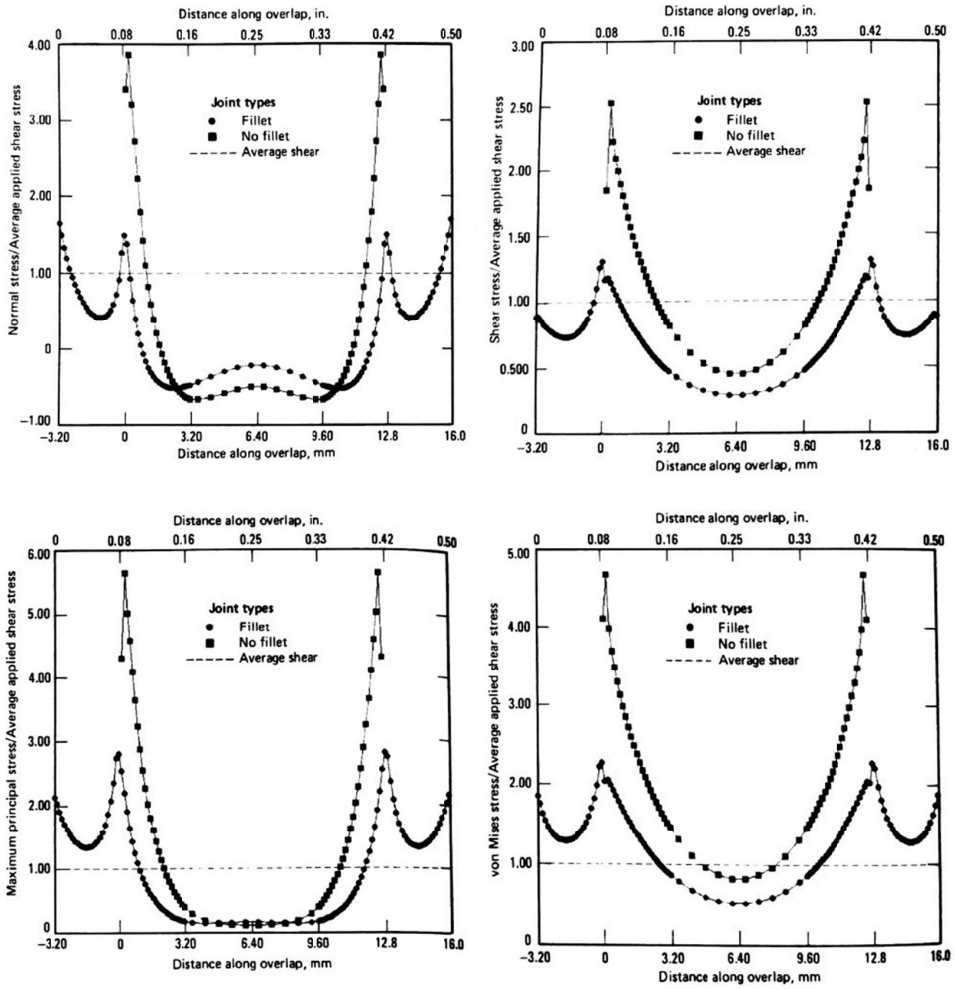


Figura 5.35: *Comparativa de tensiones a las que se ve sometida una junta solapada simple con el extremo de la zona pegada acabada en esquina respecto a la acabada en chaflán de 45º (Fuente Ref. [229]).*

Cómo ya se explicó en el punto 5.2.6.3 de este capítulo, hay varios parámetros que tienen una gran influencia en la mejora de la resistencia de una junta adhesiva, y que básicamente contribuyen a reducir la concentración de tensiones en los puntos singulares de esta, siendo este de la terminación de la junta uno de los principales. Otras terminaciones cómo pueden ser radios en vez de chaflanes, distintas dimensiones de chaflanes o redondear las aristas de los sustratos en estas zonas también contribuye de forma significativa a la reducción de esta concentración de tensiones [229].

5.2.9.2. Unión solapada sometida a cargas dinámicas de impacto.

Las prestaciones de una junta adhesiva sometida a cargas de impacto es una consideración muy importante en el diseño de estructuras aplicadas a la industria aeronáutica o del transporte terrestre en general. Bajo las condiciones de impacto, por lo general, un adhesivo tiende a reaccionar frente a la deformación soportando mayor tensión (figura 5.16), pero volviéndose menos dúctil, lo que causa que resista cargas superiores, pero en cambio sea capaz de absorber menos energía. Por esto los test de impactos más usuales se limitan a realizar la medición de la energía requerida para la rotura de la unión pegada mediante un dispositivo pendular, aunque también suele ser frecuente realizar la medida de fuerza aplicada a lo largo del tiempo del ensayo, con la instrumentación de una célula de carga. La curva obtenida en este último caso va a presentar un comportamiento oscilante. Esto se puede justificar por la naturaleza discontinua de la propagación de las grietas, puesto que cuando la grieta alcanza la condición crítica y crece se produce un alivio de tensiones locales produciéndose una disminución de la carga. Pero al seguir avanzando el martillo de impacto vuelve a comenzar este ciclo de producción y rotura de grieta. Otra justificación para esta oscilación de la curva va a ser porque la probeta al recibir el impacto va a comenzar a vibrar, y esta vibración no va a depender únicamente de esta, sino que la vibración va a depender de todo el sistema formado por la probeta más el banco de pruebas. No obstante va a ser complicado distinguir las diferentes contribuciones sobre la curva, teniendo solamente la información de esta. Las operaciones de filtrado de esta curva, por ejemplo las altas frecuencias, puede dar lugar a la perdida de información importante. Aunque por otro lado, los datos sin procesar pueden llegar a hacer suponer como propiedades del material los efectos que son puramente dinámicos, como pueden ser los picos de fuerza de rotura. Por lo que este tipo de ensayos a menudo requiere un cuidadoso estudio de los resultados para evitar interpretaciones erróneas. Existen varios métodos para caracterizar la junta adhesiva bajo cargas de impacto, a continuación se muestra alguno de ellos [231]:

El método UNE-EN ISO 11343, que es un método de **impacto en cuña,** para la determinación de la resistencia dinámica al agrietamiento de uniones adhesivas de alta resistencia bajo condiciones de impacto y que se muestra de forma esquemática en la figura 5.36. Un aspecto importante de este test es que en el caso de un crecimiento de grieta de forma estable parte de la energía se pierde en la deformación del metal. Por lo que este test mide las propiedades de la junta más que del adhesivo en sí mismo, aunque en este caso el adherente va a tener un espesor similar al de la situación real.

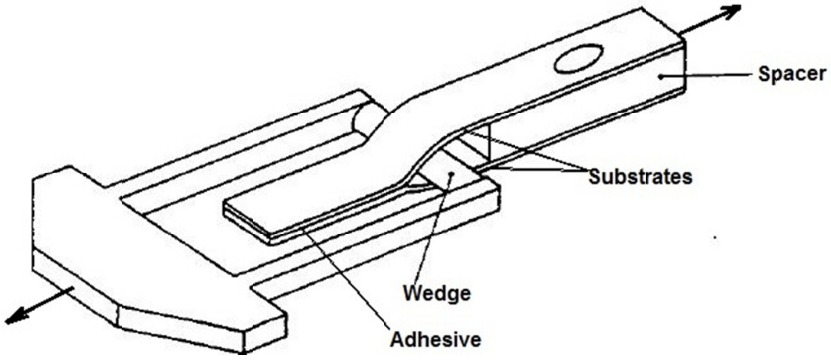


Figura 5.36: *Esquema de una muestra utilizada para un test de impacto en cuña.*

El sistema de **Hopkinson**, es un dispositivo creado para realizar test de impacto a muy rápidos, por debajo de 10^2 s^{-1} llegando hasta 10^3 s^{-1}. El dispositivo utiliza una explosión o proyectil, para generar una onda de presión en un extremo de una larga barra cilíndrica suspendida horizontalmente, que se propaga por su interior llegando hasta el otro extremo de la estrecha barra, donde se sitúa la muestra a ensayar. En la figura 5.37 aparece un esquema de este sistema.

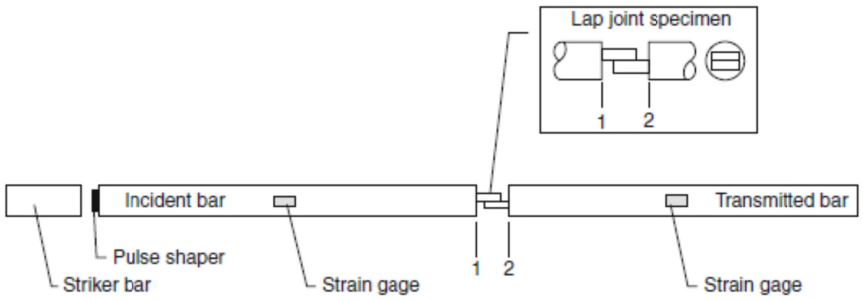


Figura 5.37: *Esquema de un sistema de Hopkinson utilizado para caracterizar juntas solapadas.*

El test más utilizado es el Método de ensayo de la resistencia a la **cizalladura por impacto** en juntas pegadas, según la norma UNE-EN ISO 9653, o su correspondiente ASTM D950, y que ha sido descrito en el punto 5.2.7.2.1 del presente capítulo. Consistente en impactar, con un péndulo Izod, sobre un bloque pegado a otro bloque mayor que está fijado a una base en la máquina de ensayo, cizallándolo por la unión adhesiva. Y la energía para cizallar la junta se obtiene a través de la perdida de energía del péndulo. Este método es utilizado porque de esta forma se consigue una gran superficie para el martillo de impacto en el adherente y por otro lado se pretende crear una condición de cortadura pura y constante sobre toda la sección pegada.

Adams y Harris [253 y 231] realizaron un estudio sobre este ensayo, analizando en detalle la influencia de los errores de orientación del martillo de impacto sobre la superficie de la probeta donde se produce el golpe del martillo, puesto que un cierto grado de incertidumbre en esa orientación va a ser inevitable, tanto por el error en la colocación de la cara de impacto de la

probeta, ajustando la base donde descansa la probeta en la máquina, respecto al punto donde el martillo alcanza la velocidad máxima y donde debería ser perfectamente paralelo a la cara de impacto de la misma, cómo errores en el pegado de la probeta, figura 5.38. En este estudio han simulado por elementos finitos el caso de impacto perfectamente paralelo, impacto localizado en la parte superior de la cara de impacto de la probeta e impacto en la parte inferior.

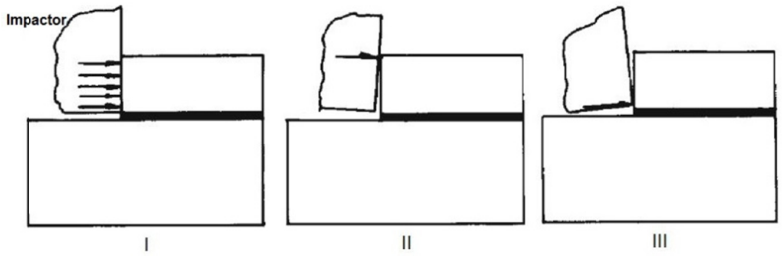


Figura 5.38: *Desalineaciones que pueden darse al impactar el martillo sobre la probeta, en un ensayo de resistencia a la cizalladura por impacto.*

De los resultados obtenidos de este análisis, que se resumen en las figuras 5.39, se desprende que la distribución de tensiones a lo largo de la junta adhesiva no puede considerarse constante en ninguna de las tres situaciones estudiadas, produciéndose siempre una apreciable concentración de tensiones en el adhesivo, en la zona de la cara de impacto de la probeta, siendo tanto tensión de cortadura como de desgarro y decreciendo de forma pronunciada hasta llegar al otro extremo de la superficie pegada de la probeta. La variación de la tensión de cortadura a lo largo de la superficie pegada es generada por un mecanismo de deformación diferencial motivado por la capacidad de deformación del sustrato de la probeta. La tensión de desgarro se puede considerar generada por la rotación que se produce sobre el sustrato al impactar el martillo sobre la cara de impacto, que en este caso tampoco será lineal por la capacidad de deformación del sustrato. Cuando se producen desalineaciones de la carga de impacto estos efectos tensionales se van a ver fuertemente amplificados, cómo se refleja en la figura 5.39A, aquí las tensiones mostradas son las de la línea media de la lámina de adhesivo, aunque en general las tensiones son bastante uniformes en todo el espesor de esta, excepto en la zona próxima al impacto donde pueden encontrarse variaciones máximas menores al 10%, como puede observarse en la figura 5.39B.

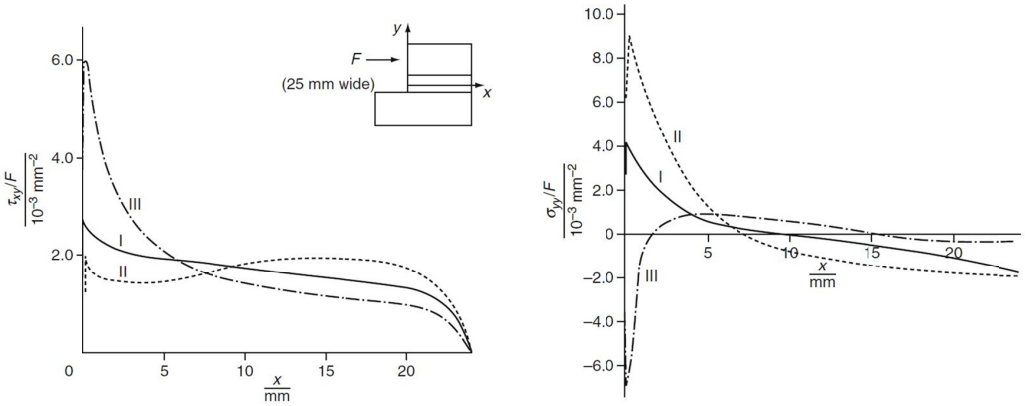


Figura 5.39A: *Distribuciones de tensiones de tracción y cortadura en el punto medio de la capa de adhesivo por unidad de carga aplicada, en un ensayo de resistencia a la cizalladura por impacto (Fuente Ref. [253]).*

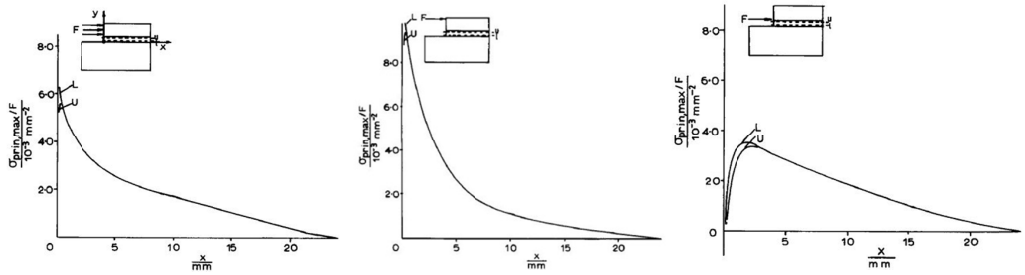


Figura 5.39B: *Distribuciones de tensiones principales máximas en la zona superior de la capa de adhesivo (U) y en la inferior (L) por unidad de carga aplicada, en un ensayo de resistencia a la cizalladura por impacto (Fuente Ref. [253]).*

El caso donde el impacto es perpendicular a la cara del sustrato es el que menos concentración de tensiones va a generar sobre el borde de la junta. Cuando el impacto se produce en la parte superior de la probeta, el momento inducido sobre la probeta será mayor y por tanto el efecto sobre la tensión de desgarro, por el contrario la deformación local producida sobre el sustrato tendrá poca influencia sobre la tensión de cortadura. Si el impacto del martillo se produce cerca de la unión pegada se produce una tensión de pelado negativa motivada por el pequeño momento aplicado sobre la probeta y la deformación local de compresión producida sobre la probeta; al mismo tiempo esta deformación local del sustrato produce un estiramiento del adhesivo en esta zona que produce un pico de tensión de cortadura. Estos aspectos se refieren a la situación inicial del impacto, después la situación va a evolucionar en función del daño que se produzca sobre la unión. Las condiciones de carga y energía de deformación absorbida van a ser dependientes de cada caso específico, esto es importante ya que la energía elástica de los sustratos puede ser mucho mayor que la de rotura del adhesivo. Por ello este ensayo de impacto no es del todo adecuado para dar una estimación absoluta de la energía que absorbe el adhesivo, por su dependencia con el equipo utilizado, donde las probetas utilizadas no se parecen a la situación real de la junta, y las

condiciones del ensayo, teniendo especial cuidado con la importancia que tiene la posible desalineación de martillo sobre la superficie de impacto de la probeta. Siendo la principal utilidad de este ensayo el estudio comparativo de diferentes adhesivos entre sí, o como es nuestro caso el mismo adhesivo que ha sido sometido a diferente nivel de degradación externa, cómo es la radiación.

5.3. El adhesivo Araldit 2011.

A través de la información expuesta en los puntos precedentes de este capítulo se ha ido argumentando la idoneidad en la selección del adhesivo Araldit® 2011, también denominado Araldit® AW 106 / HV 953U [166]. Este adhesivo es una resina epoxi bicomponente, multipropósito, de curado a temperatura ambiente, alta resistencia a cortadura y al pelado, además de ser elástico y tenaz, con buena resistencia frente a cargas dinámicas. Es adecuado para el pegado de una amplia variedad de metales, cerámicas, vidrios, plásticos rígidos, caucho y para la mayoría de metales de uso común. Es útil tanto para pequeñas producciones artesanales, que es el caso estudiado, como para la mayoría de aplicaciones industriales.

A continuación se muestran una serie de datos relativos a este adhesivo, que son pertinentes en el estudio realizado:

En la tabla 5.9 aparecen unos datos comparativos entre ambos componentes de la resina y su mezcla.

	2011/A	2011/B	2011 (mixed)
*Colour - visual (A112)**	*Neutral*	*pale yellow*	pale yellow
Specific gravity	ca. 1.15	ca. 0.95	ca. 1.05
*Viscosity at 25°C (Pas) (A191)**	*30-50*	*20-35*	30-45
Pot Life (100 gm at 25°C)	-	-	ca. 100 minutes
*Lap shear strength at 23°C (A501)**	-	-	*> 19 MPa*

Tabla 5.9: *Características del adhesivo Araldit 2011 (Fuente Ref. [166]).*

El componente 2011/A es la resina epoxi en base a Bisfenol A-epiclorhidrina. Y la resina epoxi en base a Bisfenol F.

El componente 2011/B es el endurecedor que contiene entre otros componentes, N(3-dimetilaminopropil)-1,3-propilendiamina.

La vida útil del producto almacenado a temperatura entre 2ºC y 40ºC es de unos 5 años.

Ambos componentes se mezclan a partes iguales en volumen, y ha de ser aplicado entre los sustratos, tras realizarles el tratamiento superficial adecuado, en una fina capa de adhesivo de 50 µm a 100 µm para así obtener la mayor resistencia a cortadura de la junta. El tratamiento recomendable consiste en realizar un desengrasado con acetona seguido de una abrasión mecánica o ataque químico con ácido.

Los tiempos de curado van a estar relacionados con la temperatura según la tabla 5.10.

Temperature	°C	10	15	23	40	60	100
Cure time to reach	hours	24	12	7	2	-	-
LSS > 1MPa	minutes	-	-	-	-	30	6
Cure time to reach	hours	36	18	10	3	-	-
LSS > 10MPa	minutes	-	-	-	-	45	7

Tabla 5.10: *Tiempos medios para alcanzar un mínimo de resistencia a cortadura en una junta, en función de la temperatura de curado (Fuente Ref. [166]).*

En las tablas 5.11 y 5.12 se muestra una serie de propiedades típicas de este adhesivo, obtenidas a través de ensayos normalizados:

Propiertie	Test value
Roller peel test (ISO 4578) - Cure : 16 hours/40ºC	5 N/mm
Shore Hardness – cure 16 hours/40°C	D 74
Glass transition temperature - Cure : 16 hours/40ºC	ca. 45ºC
Thermal conductivity (ISO 8894/90) - Cure : 20 minutes/100ºC - Test: At 23ºC	0.22W/mK
Minimum dielectric strength at 50 Hz, 24□C (VSM 77170) - Instantaneous value	25-27 kV/mm
Water vapour permeability (NF 41001) (38ºC, 90% rh) Cure : 5 days/23ºC (Test on a 1mm thick film)	16g/m2/24 hours
Shear modulus (DIN 53445) Cure : 16 hours/40ºC	0ºC - 1.2GPa 50ºC - 0.2GPa
Flexural Properties (ISO 178) Cure 16 hours/ 40ºC - tested at 23ºC Flexural Strength	60 MPa
Flexural Properties (ISO 178) Cure 16 hours/ 40ºC - tested at 23ºC Flexural Modulus	1900 MPa

Tabla 5.11: *Propiedades del adhesivo Araldit 2011, según una serie de ensayos normalizados (Fuente Ref. [166]).*

Fluctuating load as % of static shear strength (Mean static lap shear strength: 16.3 MPa.)	**No. of load cycles to joint failure** (load cycle frequency of 90 Hz)
30	10^5 -10^6
20	10^6 - 10^7
15	>10^7

Tabla 5.12 *Ensayo de fatiga sobre una junta solapada simple según DIN 53285. Curado durante 20 minutos a 100ºC (Fuente Ref. [166]).*

Seguidamente se ofrecen datos de valores medios de la resistencia de una junta adhesiva solapada simple (ISO 4587) utilizando este adhesivo, en función del tipo de material del sustrato (figuras 5.40 y 5.41) y en función de la temperatura de uso (figura 5.42).

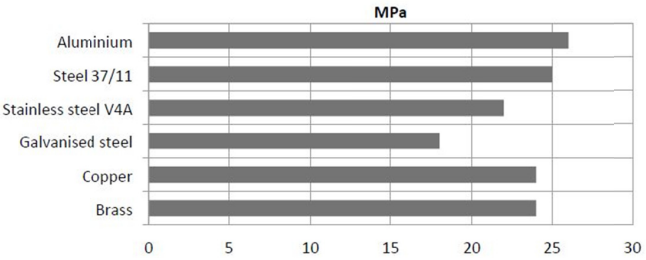


Figura 5.40: *Resistencia a cortadura de juntas metálicas según ISO 4587, con un pre-tratamiento de chorreado con arena (Fuente Ref. [166]).*

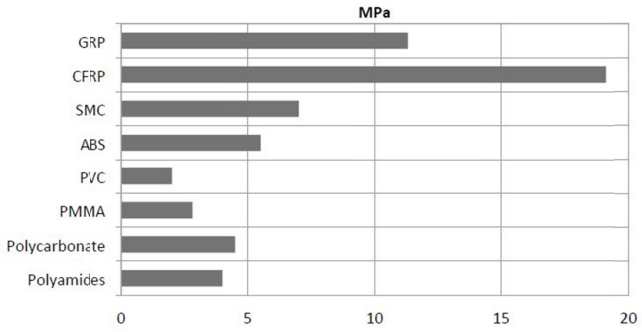


Figura 5.41: *Resistencia a cortadura de juntas no metálicas según ISO 4587, con un pre-tratamiento de ligera abrasión superficial y desengrase con alcohol (Fuente Ref. [166]).*

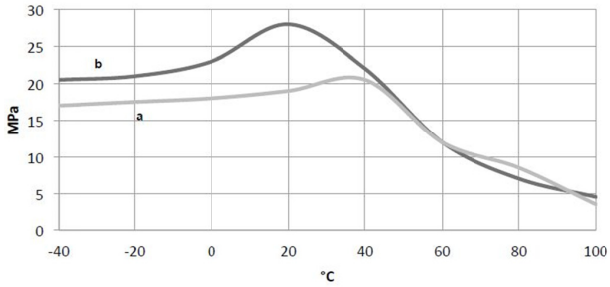


Figura 5.42: *Resistencia a cortadura de una junta en función de la temperatura, según ISO 4587: (a) curado durante 7 días a 23ºC y (b) curado durante 24 h a 23º más 30 minutos a 80ºC (Fuente Ref. [166]).*

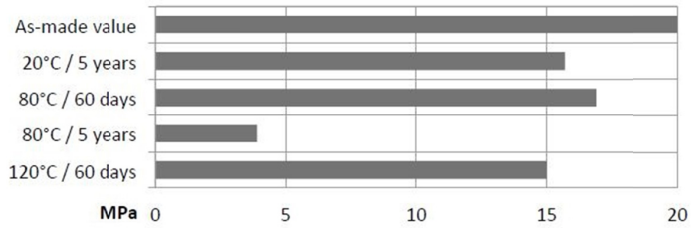


Figura 5.43: *Resistencia a cortadura de una junta frente al envejecimiento por temperatura. Curado durante 16 h a 40º C. (Fuente Ref. [166]).*

Como puede desprenderse de estos datos la mayor resistencia de este adhesivo se obtendrá con sustratos de aluminio tratados, cómo son buena parte de los componentes del sistema de alineación LINK, en el resto, el sustrato de aluminio irá adherido sobre elementos de fibra de carbono con matriz polimérica (CFRP), que como se observa en esta información también obtienen buena resistencia a cortadura. Por otro lado, como ya se ha explicado, nuestra temperatura de utilización va a estar en torno a los 20 ºC. Y el pegado y curado de los componentes se realizó a temperatura ambiente.

Por todo lo anterior y por los resultados mostrados frente a irradiación en las bases de datos del CERN (Figuras 5.24, 5.25 y 5.26), se puede presuponer que, a priori, la resistencia de las juntas adhesivas del sistema de alineación LINK de CMS, (aparte de otras uniones utilizadas en CMS, en otros sistemas, como es el caso de las juntas estructurales utilizadas en la construcción de las DT del sistema de detección de muones) va a ser buena, en condiciones normales y de irradiación frente a esfuerzos de cortadura.

Sin embargo, no se ha encontrado información de la resistencia de este adhesivo frente a esfuerzos de impacto, ni siquiera en condiciones normales, ni se dispone de información relativa a su estabilidad dimensional frente a la radiación recibida. Por ello se ha desarrollado un programa de estudio, para evaluar la influencia de estas características sobre las juntas pegadas que se han utilizado en el sistema de alineación LINK, y que están descritas a lo lardo de los siguientes puntos del presente capítulo.

5.4. Secuencia del desarrollo experimental seguido para la caracterización de las juntas adhesivas utilizadas.

Cómo se ha comentado en varias ocasiones durante el desarrollo del presente trabajo, se ha visto la necesidad de realizar un estudio de la estabilidad dimensional y de la resistencia frente a impacto de los insertos pegados, utilizados por el sistema de alineación LINK, en relación con las dosis de irradiación a que van a estar sometidas estos elementos durante la vida útil del experimento CMS. Y además, en prevención de las futuras actualizaciones de mejora sobre el LHC y CMS, que pueden alargar su vida útil varios años más, estas fijaciones van a verse sometidas a unas dosis de irradiación mayores a las previstas inicialmente y que fueron expuestas en el capítulo 2 del presente trabajo. Por todo ello se ha desarrollado un sistema de ensayos, en vistas a poder estudiar estos parámetros, que se detalla a continuación:

En primer lugar ha sido necesario definir el tipo de probetas que mejor pueden representar las características del tipo de juntas utilizadas en el sistema LINK, donde una cantidad importante son uniones de sustratos de aluminio-aluminio y en menor cantidad son uniones de sustrato de aluminio-CFRP, además el adhesivo se ha utilizado cómo sellante mecánico, para evitar manipulaciones o efectos vibracionales. En consecuencia se han elegido dos tipos de probetas distintas, que se describen más adelante: una pensada expresamente para comprobar la estabilidad dimensional (P_I) y otra distinta para comprobar la

resistencia a cargas de impacto (P_{II} y P_{II}'), las probetas P_{II} también han sido utilizadas para estudiar la estabilidad dimensional. Estas probetas han sido estudiadas frente a irradiación con el instrumental disponible en el Ciemat [158] y en la Universidad de Cantabria [253]. Las dimensiones de los dos tipos de probetas que se han utilizado aparecen en la figura 5.45. Las probetas han sido tratadas y pegadas cómo se detalla en los siguientes puntos del capítulo.

Tras dejarlas curar durante una semana en condiciones de humedad y temperatura controladas, se procedió a realizar un control dimensional a todas las probetas de ambos tipos antes de comenzar el proceso de degradación por irradiación, para utilizarlas de referencia.

Una vez caracterizadas dimensionalmente, fueron agrupadas para ser sometido cada grupo a un nivel de irradiación diferente, quedando uno de ellos sin irradiar para ser utilizado como referencia. La operación se ha llevado a cabo en las instalaciones NAYADE del Ciemat, según el procedimiento que se describe más adelante. Tras este proceso se las ha dejado estabilizar al menos una semana antes de realizar un nuevo control dimensional, o cualquier otro control sobre ellas.

Finalmente, se ha estudiado la estabilidad dimensional de ambos tipos de probetas y la resistencia a impacto de las probetas P_{II}, y P_{II}', según la metodología desarrollada para cada caso, que se describe de forma esquemática a continuación y que se desarrolla más adelante:

5.4.1. Estabilidad dimensional.

Para poder llevar a cabo el estudio de la estabilidad dimensional se han utilizado ambos tipos de probetas P_I y P_{II}, lo que requirió una caracterización inicial muy precisa. Para el control dimensional se ha utilizado una Máquina de Medición por Coordenadas (MMC), modelo EURO C-574 APEX de la firma Mitutoyo [202], con el software de medición MCOSMOS con una precisión por debajo de las 5 µm. La secuencia seguida durante el proceso ha consistido en:

Una vez irradiadas las probetas se procede a realizar un control dimensional sobre ambos tipos de probetas 10 del tipo P_I y 64 del tipo P_{II}, comparando los resultados con los valores de partida sin irradiar y así obteniendo una medida de su estabilidad frente a la dosis recibida.

De forma complementaria se ha estudiado la estabilidad de estas juntas irradiadas sometiéndolas a un ambiente de humedad muy alta 90%RH durante una semana, a 26º C de temperatura, introduciendo las probetas irradiadas, P_I del número 1 al 5, en una cámara climática, mientras se mantenían, como referencia, las probetas del número 6 al 10 en condiciones ambientales normales.

De igual forma se procedió con las probetas tipo P_{II} de los números 1 a 6, irradiadas, y de los números 49 a 56, sin irradiar, manteniendo en condiciones ambientales normales, como referencia, las probetas 7 a 12, irradiadas, y las probetas 57 a 64, sin irradiar.

La estabilidad frente a alta humedad se obtiene de la comparación entre los valores antes y después de permanecer dentro de la cámara climática y de su doble verificación respecto a las probetas utilizadas como referencia, que no han sido sometidas a este proceso.

Finalmente se procedió a irradiar adicionalmente las probetas números 1 al 5 del tipo P_I a muy altas dosis. Dejando como referencia las probetas tipo P_I, con números del 6 al 10, y del tipo P_{II}, con números del 49 al 54. A través del análisis comparativo de estos resultados se obtiene la estabilidad dimensional del adhesivo frente a muy altas.

Adicionalmente, de todas estas medidas se pueden obtener unos resultados de estabilidad dimensional temporal de la junta adhesiva, puesto que el tiempo transcurrido, entre las medidas tomadas como referencia para las probetas (tipo P_I, con números del 1 al 5 y del 6 al 10, y del tipo P_{II}, con números del 9 al 12 y del 49 al 54) y las últimas medidas de control dimensional realizadas sobre estas ha sido superior a 5 meses. Siendo un período de tiempo, lo suficientemente amplio, para poder ser considerado representativo, a la hora de estudiar posibles cambios producidos por fenómenos temporales, asociados a fenómenos estacionales o a la irradiación.

5.4.2. Resistencia frente a impacto.

La resistencia frente a impacto se ha estudiado con las probetas tipo P_{II}, ensayadas sobre una máquina de tipo péndulo INSTRON IMPACTOR II (CEAST 9050) [254]. Para ello se han diseñado dos campañas de ensayos distintas, con condiciones distintas:

En la Primera campaña, se iban a ensayar las probetas P_{II} del número 1 al 64. Utilizando 12 probetas para cada nivel de irradiación y 16 probetas para obtener las condiciones de la junta sin irradiar. Pero se observó que los valores eran bastante homogéneos, por tanto se decidió limitar el número de probetas para nivel de irradiación a unas 8. Ensayando finalmente las probetas 1 a 8, 13 a 20, 25 a 32, 37 (rompió defectuosamente), 38 a 45 y 55 a 64. Estas disponían de un tratamiento superficial suave en la pieza 'base' y 'normal' en la pieza 'tapa'. Por otro lado se comprobó que la célula de carga del martillo instrumentado de 5J, en la máquina de impacto se saturaba, dada la fragilidad de la rotura y las curvas fuerza-tiempo resultaron cortadas a ~2100 N, obteniendo únicamente los valores de energía a través de la diferencia de altura del martillo con y sin probeta. Por ello se tomó la decisión de realizar una segunda tanda de ensayos, colocando un segundo martillo disponible de 50 J y con varias veces más capacidad de la célula de carga, para poder obtener las curvas de fuerza-tiempo completas.

Para la segunda campaña de ensayos, se utilizaron el resto de probetas P_{II} no ensayadas en la campaña anterior, que fueron las probetas 9 a 12, 21 a 24, 33 a 36, 46 a 48 y 49 a 54 y además se reciclaron las probetas ya ensayadas, a las que se les denominó P_{II}' ya que este tipo de probetas en las que la rotura se produce por el adhesivo y a baja energía comparada con la que soporta el adherente, suelen poder reciclarse, siempre que no se hayan deformado. Estas probetas recicladas P_{II}' fueron sometidas a un tratamiento superficial 'agresivo',

adicional al que inicialmente tenían para la primera campaña, con el objetivo de ver si la modificación de la interfase de la unión, da lugar a algún cambio significativo a la hora de evaluar la resistencia de la junta frente a irradiación, cuando esta se somete a cargas de impacto.

A partir de los resultados de estas dos campañas de ensayos, se han obtenido unos valores de la resistencia de la junta frente a cargas de impacto, en unas condiciones que están expuestas en los siguientes puntos de este capítulo.

5.5. Definición de las probetas.

Se ha identificado que el tipo de ensayo normalizado más idóneo a seguir para la resistencia frente a impacto en el caso estudiado, es el propuesto por la norma UNE-EN-ISO 9653, que versa sobre métodos de ensayo de la resistencia a la cizalla por impacto en juntas pegadas, y que ha sido descrito en el punto 5.2.7.2.1 de este capítulo.

Siguiendo las recomendaciones de la norma se ha buscado las dimensiones de las probetas más convenientes para nuestro dispositivo y que se ciñan en lo posible a las dimensiones propuestas por la norma, representadas en la figura 5.19. En primer lugar se tiene una limitación de anchura de la misma, motivada por la cuchilla instrumentada del martillo, lo que ha limitado este parámetro a 15 mm; las alturas de la pieza 'base' y 'tapa' de la probeta se han podido respetar y también la longitud de la pieza 'base'. Para obtener la longitud de la pieza donde se produce el impacto, pieza 'tapa', se ha realizado un primer ensayo probando con probetas de varias longitudes, 10 mm, 15 mm, 20 mm y 25 mm (esta última no llegó a ser utilizada), buscando el valor más idóneo para el martillo de 5 J. Para esto fueron preparadas 2 probetas con cada una de esas dimensiones distintas que se querían comprobar, las probetas se ensayaron sin irradiar y con un tratamiento superficial 'suave', en las figura 5.44 se muestran las probetas que fueron. Y cuyos resultados se encuentran en la tabla 5.13. Estas han sido denominadas $P_{II}{}^{t}$.

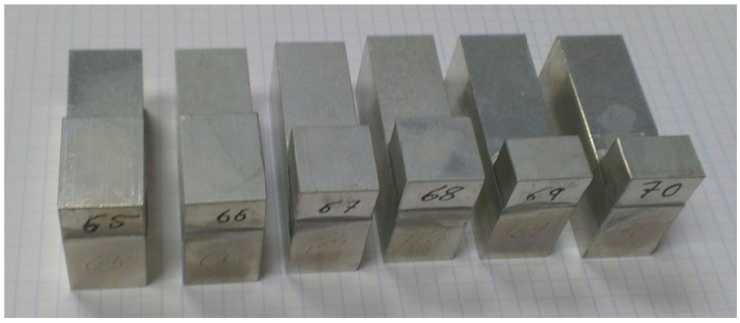


Figura 5.44: *Probetas de impacto tipo $P_{II}{}^{t}$ con distintas secciones pegadas.*

De estos resultados se deduce que las probetas con una sección pegada de 15×15 mm^2 van a ser las que proporcionen los valores de energía de rotura más ajustados al martillo de 5 J utilizado. Quedando las dimensiones de las probetas P_{II}, según se muestra en la figura 5.45.

Probeta Nº.	Sección pegada (mm^2)	Espesor de la junta (mm)	Energía de rotura (J)
65	15×20	0.07	No rompe
66	15×20	0.06	No rompe
67	15×15	0.05	0.891
68	15×15	0.06	1.055
69	15×10	0.04	0.302
70	15×10	0.03	0.358

Tabla 5.13: *Resultados de los ensayos de probetas de impacto tipo $P_{II}{}^{t}$ con distintas secciones pegadas.*

Por otro lado, para el estudio de estabilidad, además de utilizar las P_{II} realizando un control dimensional sobre ellas en cada una de las distintas situaciones a que se verá sometida, se consideró que podría ser de ayuda utilizar probetas con una superficie pegada más amplia, para de esa forma tener una dimensión mayor sobre la que realizar las comprobaciones dimensionales en cada una de las situaciones distintas, puesto que la máquina utilizada tiene una incertidumbre en la medición según la relación que aparece en la formula (5.21), que lleva implícito una incertidumbre mínima de unos 3 µm. Por todo ello, se propuso la probeta P_I, cuyas dimensiones aparecen en la figura 5.45, para complementar las medidas sobre las probetas P_{II}, y con las que se obtienen mayor precisión al realizar las medidas sobre la dimensión de 45 mm, como se explica más adelante.

$$Incertidumbre = 2.9 \times \frac{0.4 \times L}{100} \qquad (5.21)$$

donde el valor de la $Incertidumbre$ se da en µm y L es la dimensión máxima medida en mm.

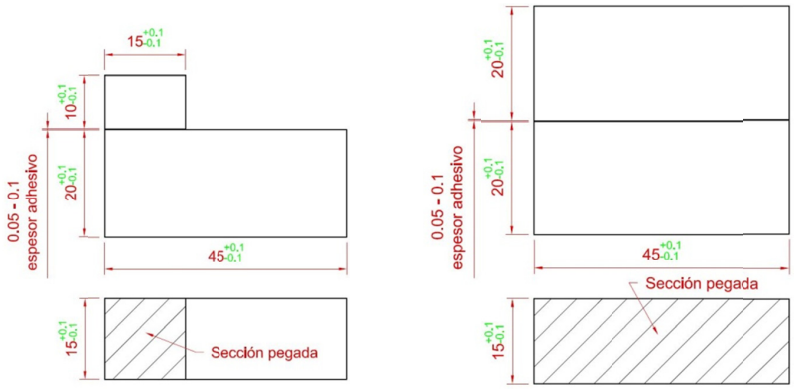


Figura 5.45: *Dimensiones de las probetas P_{II} y P_{II}' utilizadas para el estudio de la energía absorbida por impacto (Izq.) y de las probetas P_I utilizadas para el estudio de la estabilidad de la unión adhesiva (Der.), frente a la irradiación.*

5.5.1. Utillaje de adaptación para ensayo Izod en la máquina utilizada.

Para la realización de este ensayo se ha utilizado la máquina, más cercana al nivel de energía esperado en el ensayo de las probetas P_{II} y P_{II}', disponible en el laboratorio del departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales, de la Universidad de Cantabria, la INSTRON IMPACTOR II (CEAST 9050). Puesto que solamente se disponía de los útiles para la realización de ensayos Charpy, se ha realizado una mecánica de adaptación para poder ensayar las probetas Izod con ella, tanto si esta está instrumentada con el martillo de 5 J, cómo con el de 50 J. En la figura 5.46 se observa la pieza diseñada para este estudio montada sobre la máquina con la disposición para el martillo de 5 J, así como los modelos 3D con ambas disposiciones. Este utillaje va montado sobre una de las dos columnas utilizadas para la realización del ensayo Charpy.

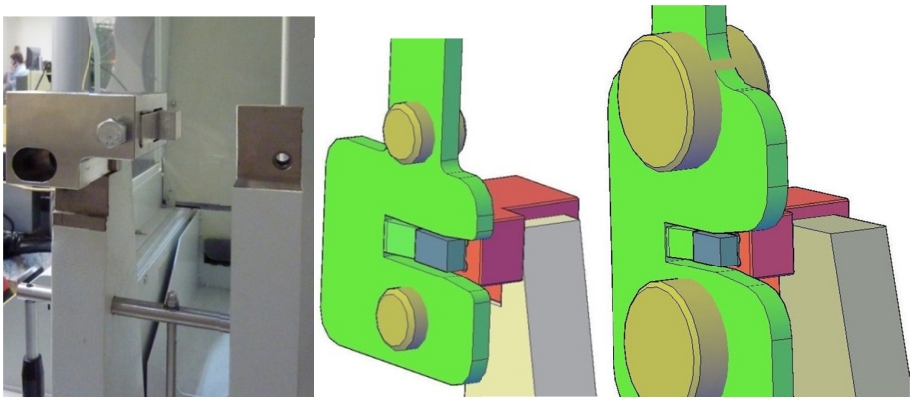


Figura 5.46: *Utillaje de adaptación de probeta Izod con instrumentación Charpy, y que corresponde a la disposición con martillo de 5 J (Izq.). Representación 3D de la disposición con martillo de 5 J (Centro) y de 50 J (Der.).*

5.5.2. Fabricación de probetas.

Todas las probetas se han fabricado a partir de planchas de aluminio EN AW7075, con tratamiento T6/T651, que es el utilizado en la mayoría de los insertos que el sistema LINK ha implementado en CMS, y el cual es material original sobrante de la fabricación llevada a cabo en su día.

La morfología de las probetas es la que aparece en la figura 5.45, y han sido fabricadas en la Unidad de Fabricación y Apoyo a I+D del Ciemat, utilizando para ello Centros de Mecanizado CNC. El acabado superficial de las piezas que componen las probetas tras el mecanizado fue una rugosidad N5.

Se han fabricado más de 90 piezas 'base' para las probetas (70 para fabricar las probetas P_{II} y P_{II}', 20 para las P_I y algunos repuestos) y más de 70 piezas 'tapa' donde impacta el martillo, para las probetas P_{II} y P_{II}'. Una vez fabricadas se les ha grabado un número, en un lateral de las piezas 'base' y 'tapa',

mediante un lápiz eléctrico vibratorio, con profundidad suficiente para que el número se mantenga a pesar de los tratamientos de ataque con ácido que sufre la superficie de la probeta y cuyo resultado se puede apreciar en la figura 5.47, para las piezas 'base'.

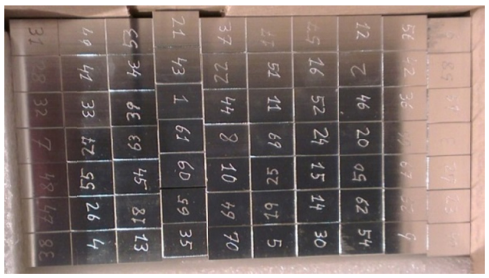


Figura 5.47: *Pieza 'base' de las probetas, donde aparece su número grabado mediante un lápiz eléctrico vibratorio.*

5.6. Tratamiento superficial de los sustratos a unir.

En el punto 5.2.5 se han descrito brevemente los tratamientos superficiales más usuales, que se aplican para la preparación superficial de los sustratos, antes de aplicar el adhesivo. A todas las probetas fabricadas se les ha aplicado un tratamiento superficial de ataque con ácido crómico (CAE), que ha sido también el utilizado en gran parte de los insertos que el sistema de alineación LINK tiene en CMS. Este está basado en la norma ASTM D2651-01, y ha sido escogido en base a lo descrito a lo largo del presente capítulo:

El tratamiento comienza con una fase de desengrasado previo de las piezas, que son introducidas durante unos 15 minutos dentro de un disolvente (acetona y alcohol isopropílico al 50%), en un pequeño recipiente que va colocado dentro de la cubeta de una máquina de ultrasonidos, cuyo baño se encuentra a unos 50º C. En la figura 5.48 se muestran varias piezas 'tapa' y 'base' durante este proceso.

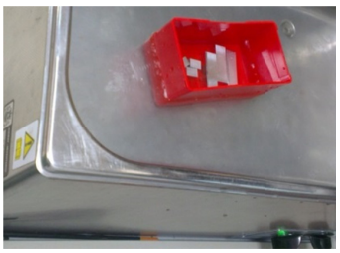


Figura 5.48: *Desengrasado en máquina de ultrasonidos, previo al ataque con ácido, de las piezas que componen las probetas.*

Seguidamente se aplica el ataque con ácido, que se llevó a cabo, en tres condiciones distintas que se han denominado tratamiento '*suave*', '*normal*' y '*agresivo*'. La agresividad va a ser función de la concentración superficial de material por cada kg de preparado y del tiempo que han permanecido en la disolución, siendo los parámetros para estas tres denominaciones los que

aparecen en la tabla 5.14, donde se detalla las piezas que han sido tratadas con cada uno de ellos.

Tipo de tratamiento	Concentración (cm^2/kg)	Tiempo (minutos)	Piezas Tratadas
Suave	515.8	10	70 Piezas 'base' para P_{II} (y P_{II}') y P_{II}^t y 8 Piezas "tapa' P_{II}^t
Normal	712	14	68 Piezas 'tapa' P_{II} (y P_{II}') y 20 Piezas 'base' P_I
Agresivo	329	19	43 Piezas 'tapa' P_{II}' y 43 Piezas "base' P_{II}'

Tabla 5.14: *Definición de los tres niveles de agresividad utilizada en los tratamientos superficiales y sustratos a los que son aplicados.*

Cada kilógramo del preparado utilizado para el ataque de los sustratos contiene 24.35 gramos de dicromato potásico, unos 244 gramos de ácido sulfúrico al 98% y unos 732 gramos de agua ultrapura. Esta última es agua ultrapura tipo I con una resistividad de 18,2 MΩ·cm a 25 °C y un contenido de carbono orgánico total (TOC) ≤ 5 ppb, obtenida con un equipo Milli-Q Element A10 Century [255], alimentado mediante agua desionizada, y que es la utilizada en todas las fases del tratamiento. En la figura 5.49 aparece el material utilizado para realizar el preparado.



Figura 5.49: *Material utilizado para realizar el preparado: Dicromato potásico (Izq.), pesaje del dicromato en báscula de precisión (Central izq.), medida del ácido sulfúrico (Central der.) y medida del agua a la salida de la máquina (Der.).*

El proceso seguido para el tratamiento de ataque con ácido crómico consistió, para cada kilógramo de preparado en:

Calentar los 732 gr de agua a ~55º C en microondas.

Añadir los 24.35 gr de dicromato y remover la mezcla.

Se añaden los 244 gr de ácido, removiendo continuamente.

Con ello se obtiene una solución mezcla cuya temperatura está en torno a los 70ºC. En ella se introducen las piezas de las probetas en la concentración y tiempo descritos en la tabla 5.14, removiendo de vez en cuando. Las piezas fueron precalentadas, a ~65º C en un horno (Figura 5.49).

Seguidamente se enjuagan las piezas en unos 2 litros de agua fría ultrapura, durante unos 5 minutos.

A continuación se introducen en unos 2 litros de agua ultrapura a ~65º C, durante unos 10 minutos.

Se extraen del agua y se introducen las piezas en el horno a 65ºC durante unos 15 minutos para proceder a su secado.

Finalmente se sacan del horno introduciéndolas en dobles bolsas de auto-cierre para su almacenamiento y traslado hasta el lugar donde se realizará el pegado.



Figura 5.50: *Piezas de las probetas durante la fase de calentamiento previo a su introducción en la disolución (Izq.). Aspecto que presenta la mezcla en tres momentos distintos del tratamiento (Der).*

En la figura 5.50 se muestra el aspecto que presenta la mezcla en tres momentos distintos del tratamiento, antes de introducir las piezas tiene un aspecto rojo-anaranjado, cuando está terminado el tratamiento el color ya es rojo-muy oscuro y a mitad del tratamiento presenta un color rojizo intermedio.

5.6.1. Rugosidad superficial de las probetas.

Como se ha explicado a lo largo de este capítulo la rugosidad superficial de los sustratos tiene una clara influencia en la resistencia de una junta adhesiva [256], que además está condicionada por el tipo de tratamiento que ha sido aplicado [235]. La resistencia de la junta va a estar, por otra parte, muy influenciada por la energía superficial del sustrato que dependiente de su estructura cristalográfica y molecular y de su rugosidad, que, a su vez, es dependiente de su morfología topográfica superficial. El primer parámetro es responsable de la unión por mecanismos de absorción, mientras la rugosidad lo

hace mediante anclaje mecánico, que a su vez produce un aumento de la superficie, lo que beneficia la adhesión por mecanismos de absorción, y que parece ser el mecanismo principal de la unión, ya que si no la rugosidad sería importante frente a cortadura y menor a tracción, pero la realidad es que aumenta la resistencia tanto a tracción como a cortadura, cuando se realiza un tratamiento superficial que aumente el área de contacto entre el sustrato y el adhesivo. Y en el caso de este estudio, con sustratos metálicos unidos mediante un adhesivo polimérico, los mecanismos de adhesión por unión electrostática y difusión, van a tener una influencia muy baja en la resistencia de la junta [235].

La resistencia óptima en probetas de aluminio se obtiene con una rugosidad superficial de 1 µm a 2 µm aproximadamente. Si es mayor, la resistencia disminuye, probablemente porque aumenta el número de entallas que pueden provocar la formación de grietas que inicien la rotura de la unión y una rugosidad fina pero que tenga una energía superficial elevada, mejora la resistencia de la unión debido a que facilita el trabajo a los mecanismos de absorción, en el caso de ataques básicos sobre sustratos de aluminio no presenta este comportamiento, siendo sus resultados para esos valores de rugosidad relativamente pobres [235].

5.6.1.1. Parámetros de rugosidad controlados.

Seguidamente se describen los parámetros de rugosidad que se han considerado más representativos para los resultados de las probetas tratadas:

Estos se han obtenido de las normas UNE-EN-ISO 4287, UNE-EN-ISO 4288, UNE-EN-ISO 11562, UNE-EN-ISO 12085 y UNE-EN-ISO 13565. Las notaciones utilizadas y parámetros R calculados sobre el perfil de rugosidad aparecen representados en las figuras 5.51 y 5.52.

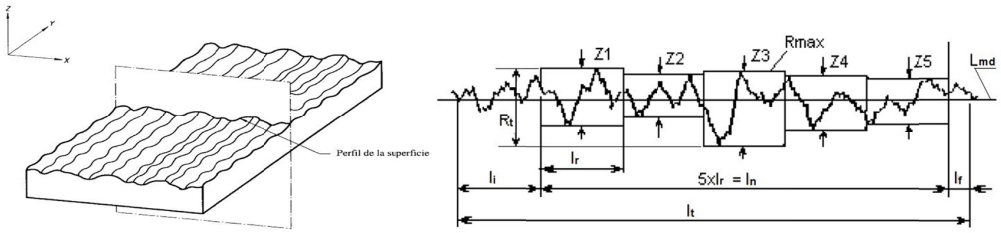


Figura 5.51: *Notación empleada para describir los parámetros de rugosidad superficial.*

Durante una medición lineal de rugosidad (figura 5.51), la aguja del rugosímetro realiza un desplazamiento total (l_t) de la aguja sobre la superficie de medida, desechando de la medida el inicio de la trayectoria seguida (l_i) y la parte final de la misma (l_f), quedándose con la parte central llamada longitud de evaluación (l_n). Esta a su vez es dividida en 5 tramos iguales llamados longitud de muestreo (l_r). Los parámetros evaluados son:

R_a, desviación media aritmética del perfil evaluado, respecto a la línea media (L_{md})

$$R_a = \frac{1}{l_n} \times \int_0^{l_n} |z| \times dx \tag{5.22}$$

R_q, desviación media cuadrática del perfil evaluado, respecto a la línea media (L_{md})

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l_n} \times \int_0^{l_n} z^2 \times dx} \tag{5.23}$$

R_z, promedio de la altura máxima del perfil, de los 5 tramos de longitud de muestreo.

$$R_z = \frac{1}{5} \times \sum_1^5 Z_i \tag{5.24}$$

R_{max}, máxima profundidad de la rugosidad Z_i, entre los distintos tramos de muestreo.

R_t, altura total del perfil, suma de la mayor altura de pico Z_p y de la mayor profundidad de valle Z_v, comprendido en la longitud de evaluación.

R_p, promedio de altura de los pico (Z_{pi}) en la longitud de evaluación.

R_v, promedio de profundidad de los valles (Z_{vi}) en la longitud de evaluación.

R_{sm}, paso medio de la rugosidad del perfil, es la anchura media de valle o surco del perfil evaluado.

$$R_{sm} = \frac{1}{n} \times \sum_1^n X_{si} \tag{5.24}$$

R_{sk}, factor de asimetría del perfil evaluado.

$$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3} \times \left[\frac{1}{l_n} \times \int_0^{l_n} z^3 \times dx \right] \tag{5.25}$$

R_{ku}, factor de aplastamiento del perfil evaluado.

$$R_{ku} = \frac{1}{R_q^4} \times \left[\frac{1}{l_n} \times \int_0^{l_n} z^4 \times dx \right] \tag{5.26}$$

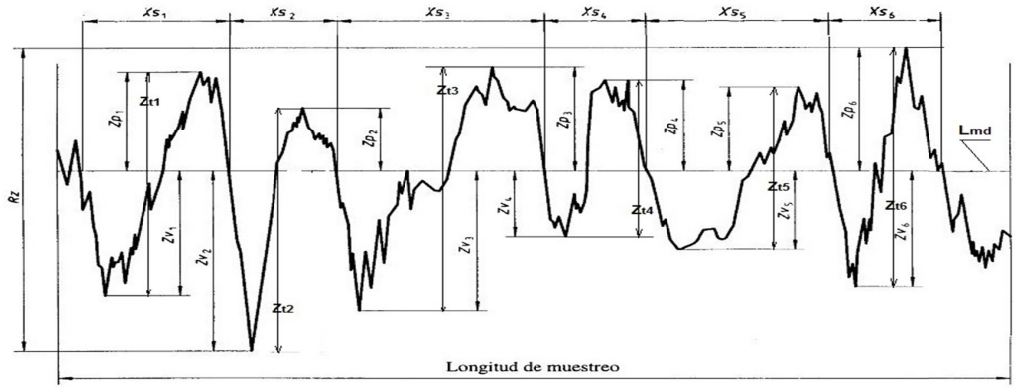


Figura 5.52: *Parámetros R calculados sobre el perfil de rugosidad superficial.*

La forma más representativa de realizar una medición de rugosidad sobre una superficie, con un rugosímetro lineal, es mediante dos medidas lineales perpendiculares entre sí, en que a ser posible una de ellas siga las dirección del mecanizado de la pieza que en el caso de la figura 5.51 sería siguiendo los ejes X e Y, siendo la Z la variación de la altura de la rugosidad durante el desplazamiento de la aguja del palpador.

Para realizar estas mediciones se ha utilizado un rugosímetro Perthometer M1, con unidad de avance PFM y palpador NHT 6-100, del Grupo Mahr [257], que se muestra en la Figura 5.53, junto con todas las probetas que se han evaluado. Los parámetros de medida del rugosímetro se han ajustado, en base a la norma UNE-EN-ISO 3274, siendo: longitud de evaluación 4 mm, longitud básica de muestreo 0.8 mm, número de longitudes de muestreo 5, velocidad de medición 0.5 mm/s, número de puntos tomados 11200, longitud de onda de corte (CutOff) 0.8 mm, punta del palpador 2 µm con un ángulo de cono de 90º.



Figura 5.53: *Medición de la rugosidad en la coordenada 'y' sobre la pieza 'tapa' de la probeta P_{II} nº. 52, con el rugosímetro Perthometer M1. Aquí se muestran las diferentes probetas evaluadas, con los sistemas de referencia utilizados en cada una de ellas.*

5.6.1.2. Resultados de rugosidad superficial de las probetas en función del tratamiento.

En este apartado se han evaluado 5 tipos distintos de superficies, una sin tratamiento superficial, que es la de referencia, y 4 con distintos tipos de agresión superficial del tratamiento CAE aplicado. Para estudiar cada tipo se han utilizado 3 muestras. En la tabla 5.15, se encentran esquematizadas todas estas variables y elementos implicados:

Los resultados de estas mediciones de rugosidad [258] se muestran en las tablas 5.16 y 5.17, donde se exponen comparativamente con los resultados de la energía y fuerza, obtenidos en los ensayos de impacto, una vez se han pegado las piezas 'tapa' y 'base', con la excepción de las piezas sin tratamiento que no han sido ensayadas. Por tanto se han caracterizado y ensayado 3 probetas correspondientes al tratamiento utilizado en la primera campaña de ensayos y otras 3 pertenecientes a la segunda campaña. Las piezas

caracterizadas en este apartado no han sido sometidas a irradiación, aunque los resultados de rugosidad son extrapolables a todas las probetas que se han fabricado para las dos campañas de ensayos, ya que la estructura superficial de aluminio no sufre degradación con estos niveles de irradiación a las que han sido sometidas las probetas. Aquí se ha caracterizado la superficie del material utilizado para formar las probetas, sin tener en cuenta el tipo de condiciones ambientales a que se ha visto sometida la junta una vez pegada, esto se tratará más adelante.

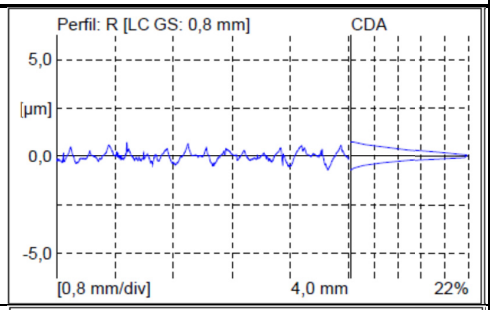
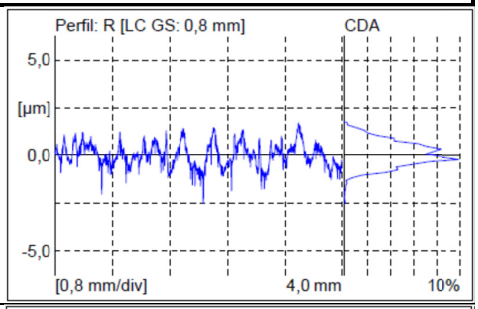
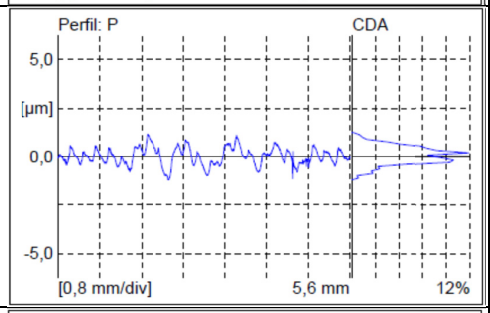
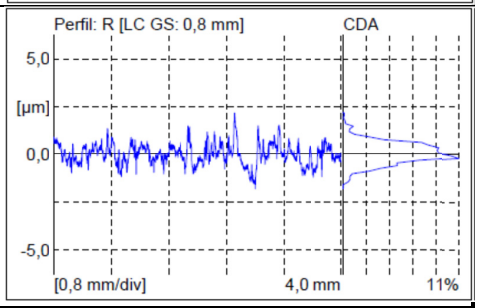
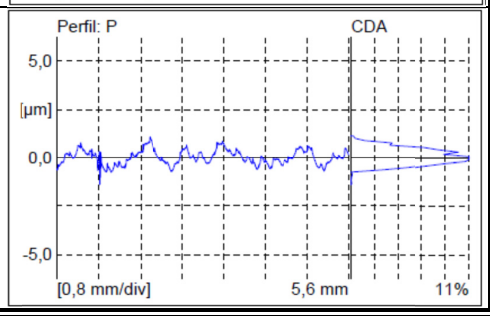
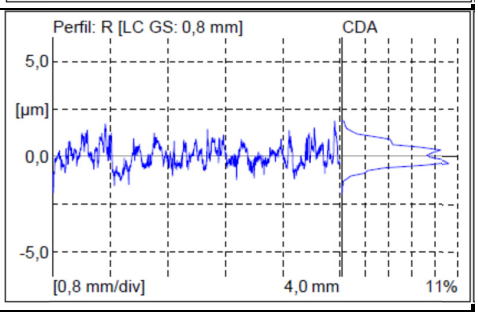
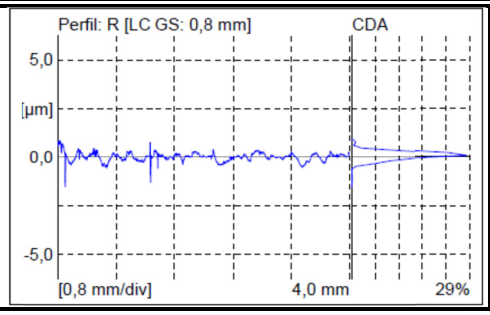
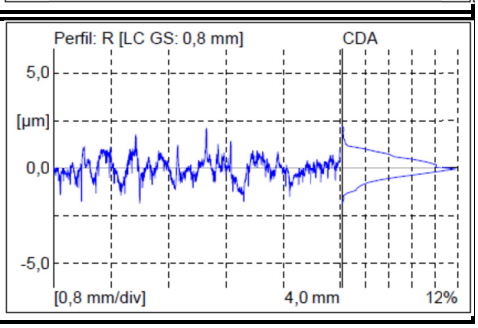
Tipo de tratamiento	Piezas Tratadas
Sin tratamiento (ST)	Piezas 'base': N1, N2 y N3.
Suave (S)	Piezas 'base' P_{II}: nº. 52, 53 y 54
Normal (N)	Piezas 'tapa' P_{II}: nº. 52, 53 y 54
Suave+Agresivo (S+A)	Piezas 'base' P_{II}': nº. 59, 60 y 61
Normal+Agresivo (N+A)	Piezas 'tapa' P_{II}': nº. 59, 60 y 61

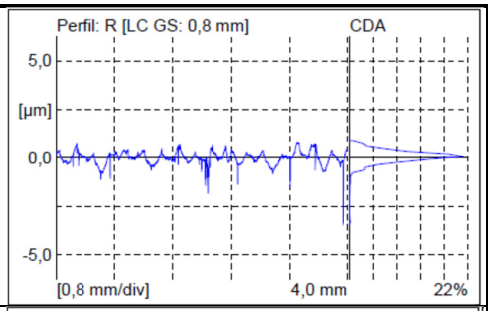
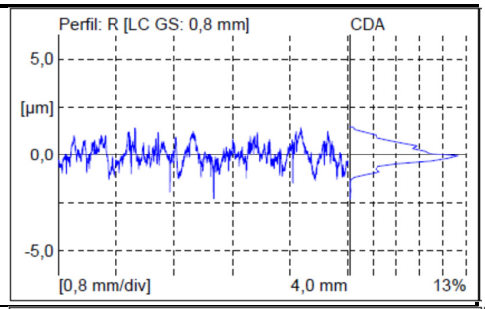
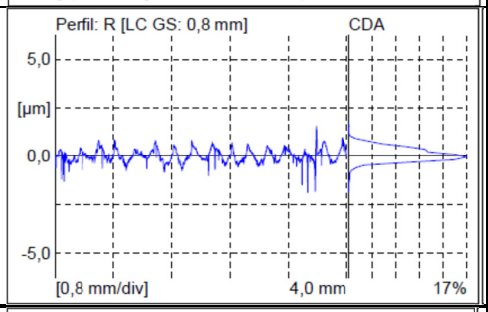
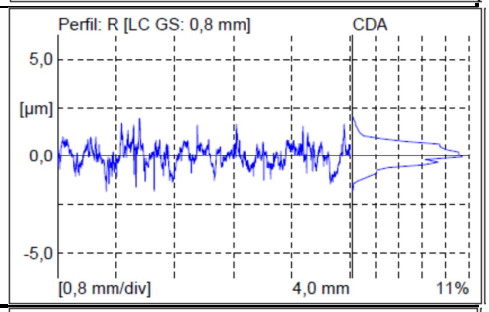
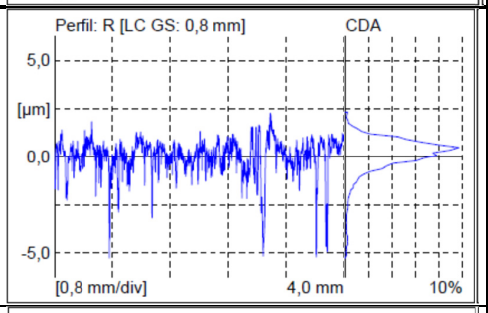
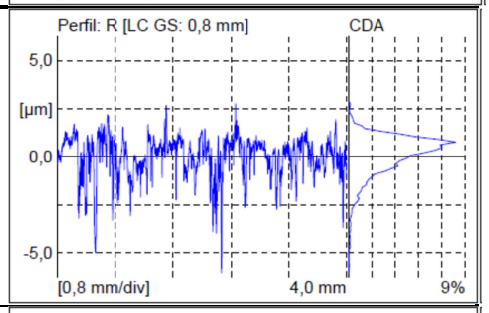
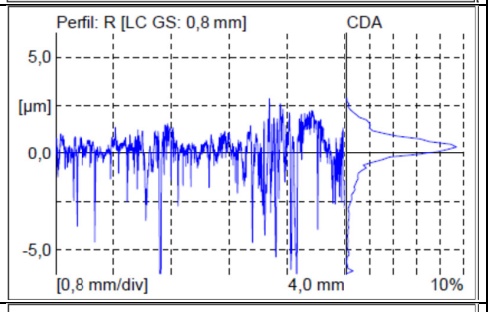
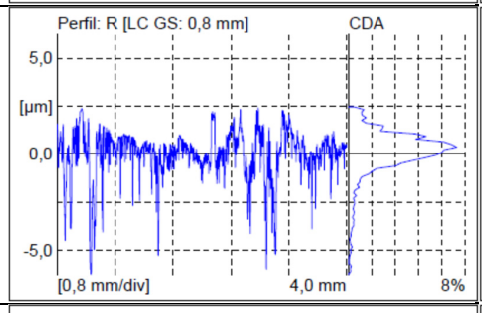
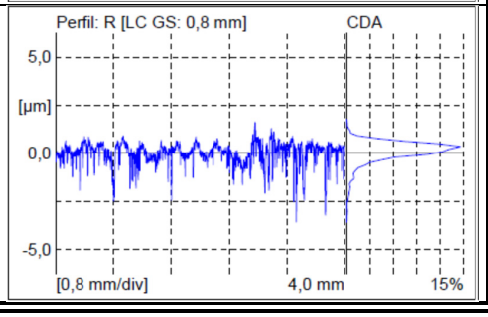
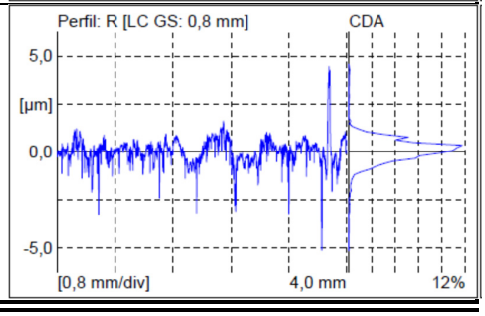
Tabla 5.15: *Variables y elementos evaluados en el estudio de la rugosidad.*

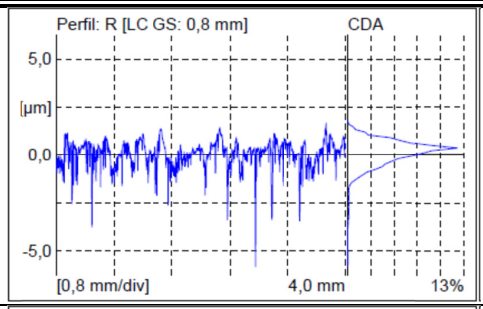
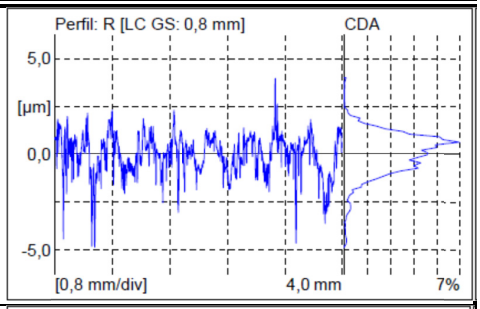
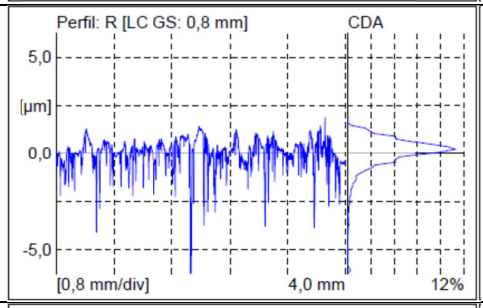
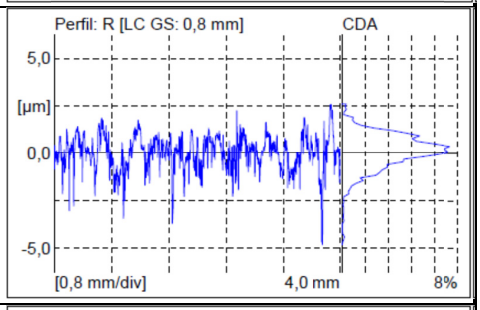
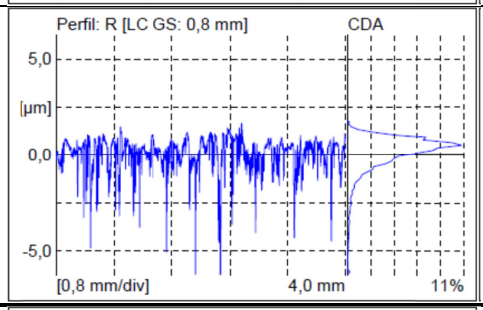
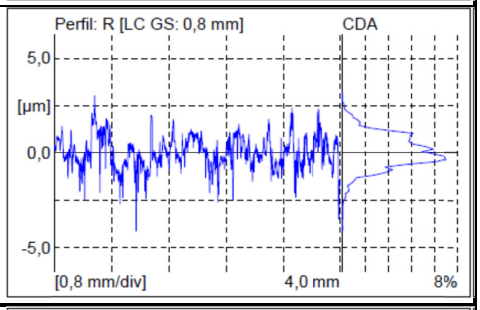
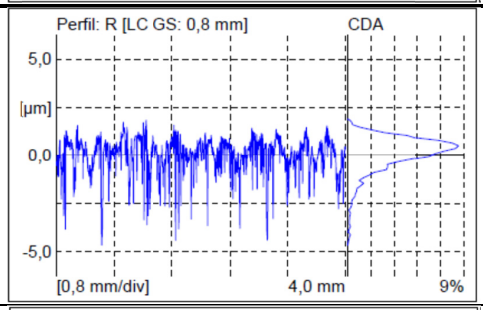
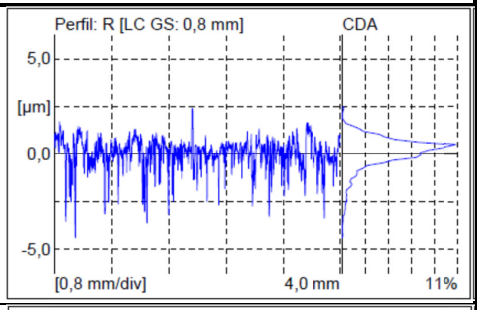
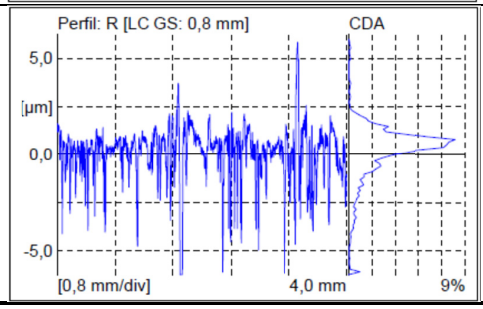
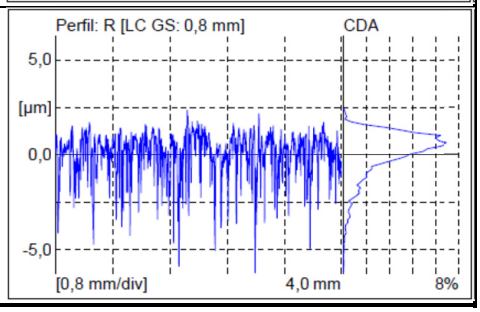
Pieza Eval.	R_a (μm)	R_q (μm)	R_z (μm)	R_{max} (μm)	R_t (μm)	R_p (μm)	R_v (μm)	R_{sm} (μm)	R_{sk}	R_{ku}	**Ener. y Fuer.** (J) y (N)
N1bx	0,205	0,257	1,172	1,32	1,47	0,62	0,55	220,2	0,02	2,77	No Evaluada
N1by	0,511	0,627	3,264	4,00	4,26	1,42	1,84	206,9	0,04	2,89	
N2bx	0,278	0,336	1,374	1,64	1,67	0,61	0,76	297	-0,36	2,49	No Evaluada
N2by	0,444	0,559	2,629	4,01	4,01	1,36	1,27	133,3	0,02	3,35	
N3bx	0,172	0,216	1,054	1,75	1,80	0,50	0,56	220,8	-0,10	3,82	No Evaluada
N3by	0,459	0,563	2,843	3,64	3,80	1,44	1,40	127,5	0,37	2,83	
P_{II}*52bx*	0,174	0,233	1,379	2,45	2,45	0,56	0,82	200,2	-0,19	5,88	0,723 J 2715,61 N
P_{II}*52by*	0,434	0,550	3,120	3,64	3,98	1,51	1,61	127,2	-0,09	3,37	
P_{II}*52tx*	0,654	0,953	5,707	7,46	7,56	1,60	4,11	71,2	-1,95	9,71	
P_{II}*52ty*	0,807	1,073	6,339	7,57	8,82	2,22	4,12	86,2	-1,37	6,16	
P_{II}*53bx*	0,258	0,375	2,328	4,29	4,29	0,64	1,69	187,2	-2,30	19,6	0,704 J 2606,77 N
P_{II}*53by*	0,440	0,547	2,932	3,56	3,75	1,27	1,66	121,1	-0,10	2,91	
P_{II}*53tx*	0,840	1,316	7,573	10,85	12,16	1,81	5,76	81,4	-2,34	12,2	
P_{II}*53ty*	0,868	1,273	6,714	8,91	8,96	2,01	4,70	83,9	-1,68	7,54	
P_{II}*54bx*	0,278	0,351	2,085	3,46	3,46	0,94	1,14	167,1	0,09	4,22	0,552 J 3578,19 N
P_{II}*54by*	0,438	0,551	3,127	3,81	3,83	1,58	1,55	125,2	0,01	3,19	
P_{II}*54tx*	0,404	0,572	3,542	4,49	5,22	1,03	2,51	55,9	-1,69	7,94	
P_{II}*54ty*	0,481	0,705	5,290	9,59	9,59	1,85	3,44	89,7	-0,03	12,4	
P_{II}*'59bx*	0,530	0,725	5,179	6,98	7,51	1,36	3,82	74,1	-1,62	9,81	0,724 J 3406,76 N
P_{II}*'59by*	0,824	1,068	5,894	7,19	8,84	2,46	3,44	97,6	-0,90	5,02	
P_{II}*'59tx*	0,686	0,939	5,585	6,25	6,52	1,60	3,99	58,1	-1,55	6,51	
P_{II}*'59ty*	0,605	0,837	5,176	6,13	6,83	1,68	3,49	46,4	-1,30	6,07	
P_{II}*'60bx*	0,566	0,884	6,046	10,94	11,40	1,33	4,71	75,8	-3,57	30,1	0,724 J 3344,18 N
P_{II}*'60by*	0,700	0,924	5,424	7,41	7,41	1,95	3,48	83,1	-0,74	5,20	
P_{II}*'60tx*	1,110	1,848	10,677	21,80	23,92	3,11	7,57	74,6	-3,67	29,8	
P_{II}*'60ty*	0,901	1,199	7,145	8,42	8,61	1,93	5,22	57,0	-1,42	5,33	
P_{II}*'61bx*	0,677	0,986	6,612	9,15	9,39	1,36	5,25	54,7	-2,43	12,7	Fallo
P_{II}*'61by*	0,691	0,871	5,256	6,16	7,19	2,20	3,06	115,7	-0,11	3,62	
P_{II}*'61tx*	1,231	1,902	11,229	16,34	17,86	2,22	9,01	79,3	-2,76	14,1	
P_{II}*'61ty*	1,293	1,835	10,682	20,39	20,39	2,65	8,03	65,6	-2,27	13,2	

Tabla 5.16: *Resultados de las medidas de rugosidad realizadas a las piezas que componen las probetas evaluadas, comparadas con la fuerza y energía de rotura frente a impacto.*

Cada pieza de las que componen la probeta es caracterizada mediante dos medidas perpendiculares entre sí (x e y), según lo expuesto en el punto anterior. La dirección de medición sobre el eje 'x' está tomada sobre la longitud de la probeta, en los 45 mm, mientras que la 'y' fue medida sobre la anchura de esta, en la dirección de 15 mm. Para diferenciar entre pieza 'tapa' y 'base', de cada probeta, se utiliza el sufijo 't' o 'b', y a continuación el eje medido 'x' o 'y'.

	Medición sobre la coordenada X	*Medición sobre la coordenada Y*
N1		
N2		
N3		
$P_{II}52b$		

$P_{II}53b$		
$P_{II}54b$		
$P_{II}52t$		
$P_{II}53t$		
$P_{II}54t$		

P_{II}'59b		
P_{II}'60b		
P_{II}'61b		
P_{II}'59t		
P_{II}'60t		

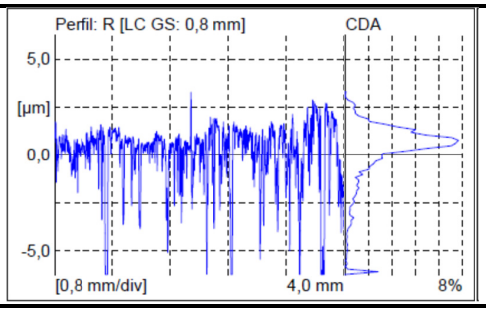
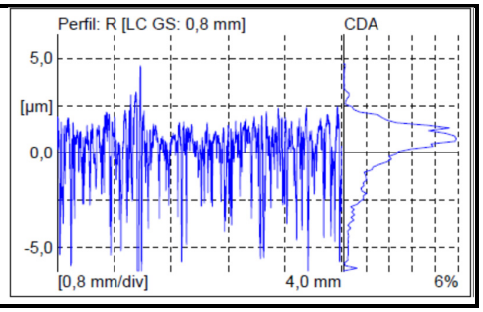
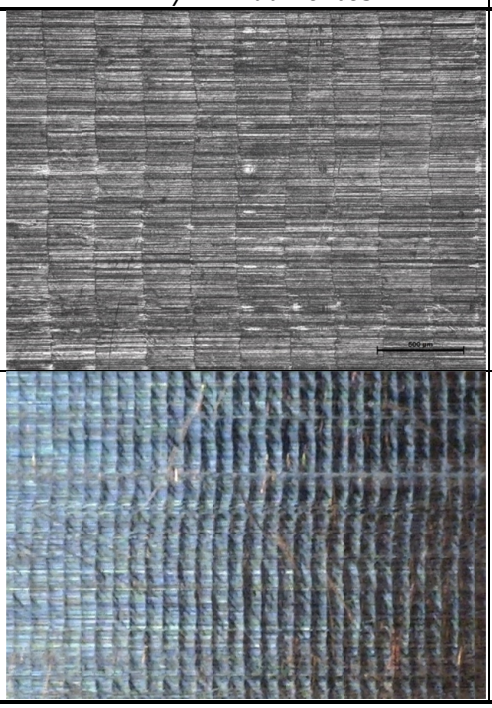
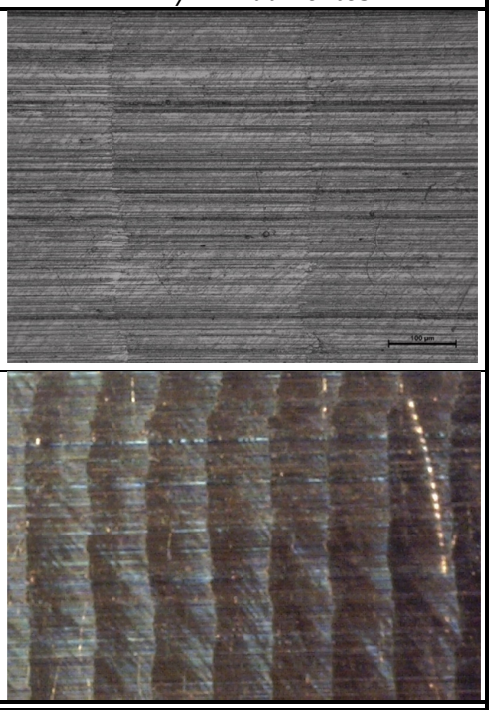
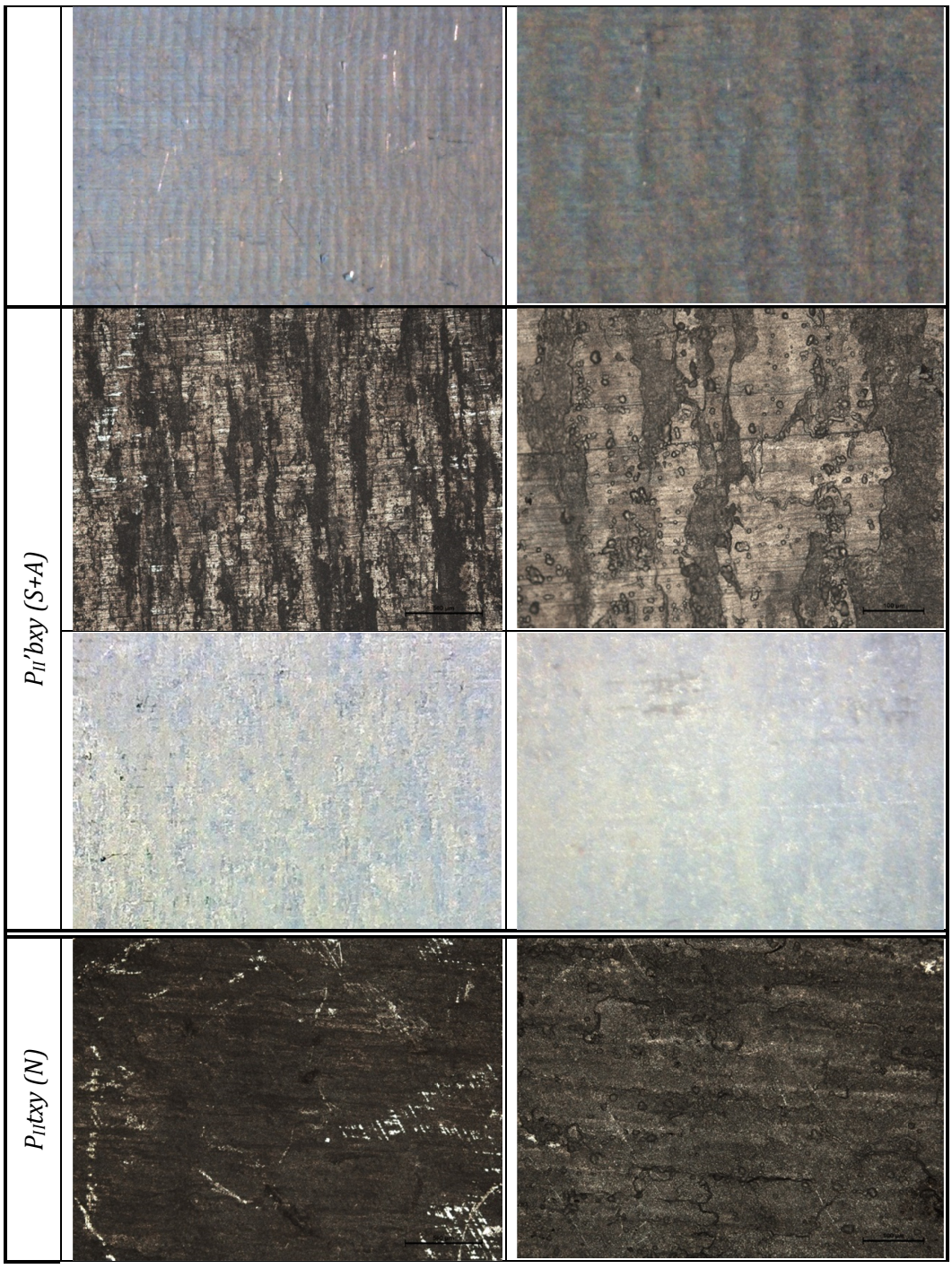
Pll'61t		

Tabla 5.17: *Gráficos de las medidas de rugosidad, de las piezas que componen las probetas evaluadas.*

	×50 / ×20 aumentos	*×200 / ×90 aumentos*
Nbxy (ST)		
Pllbxy (S)		


P_{II}'bxy (S+A)
P_{II}txy (N)

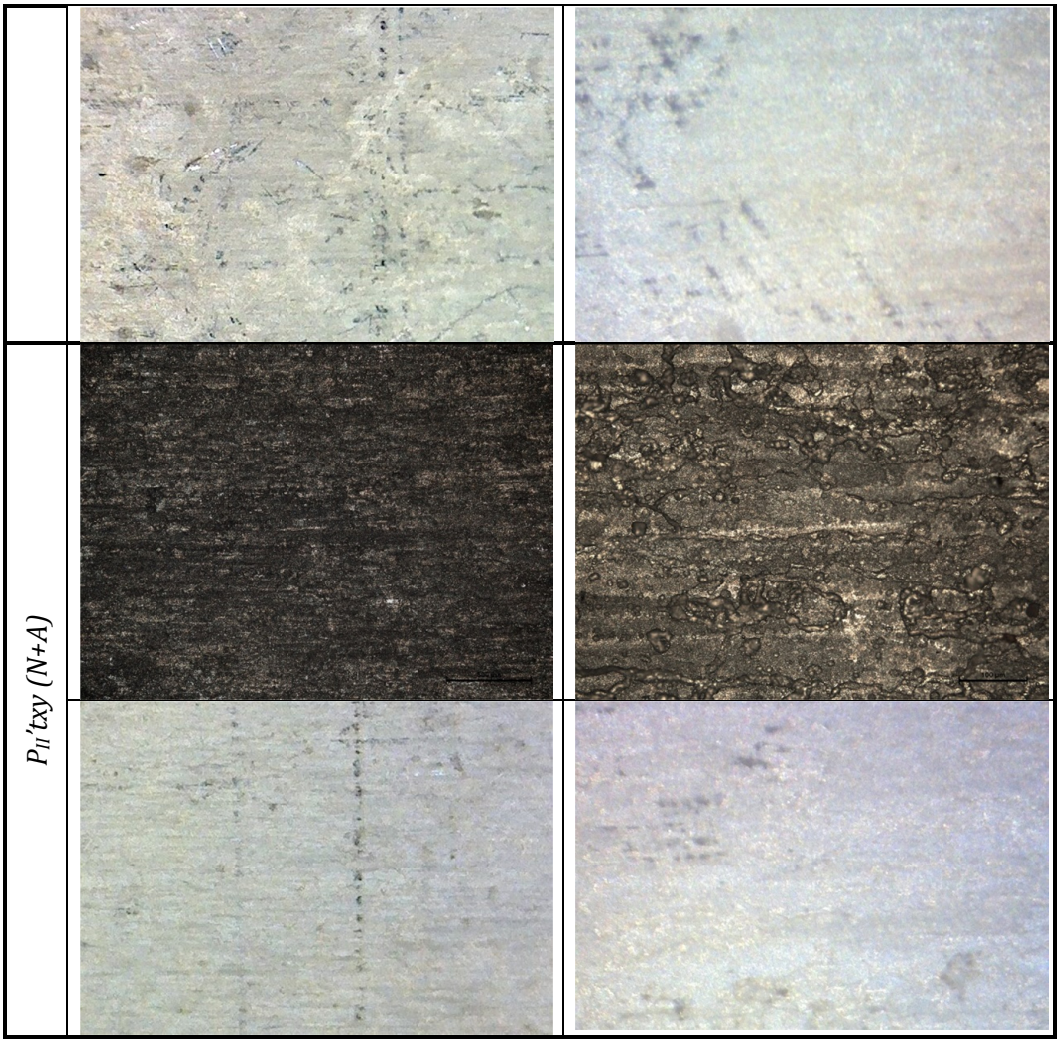


Tabla 5.18: *Fotografías del estado superficial de las piezas que forman las probetas en los 5 supuestos de estado superficial distintos. Realizadas a ×50 aumentos (tamaño regla 500 µm), ×200 aumentos (tamaño regla 500 µm), ×20 aumentos, ×90 aumentos. El eje de medición de la rugosidad 'x', en las piezas que componen las probetas, se corresponde con la horizontal de las fotografías y el eje 'y' con la vertical.*

En la tabla 5.19 se resumen las condiciones superficiales obtenidas en cada una de los 5 supuestos propuestos en la tabla 5.15, en este caso se ha diferenciado entre la rugosidad en el eje x e y de la pieza 'base', puesto que el mecanizado ha producido unos surcos que han quedado bastante marcados sobre la superficie de estas piezas, en la tabla 5.18 puede observarse fotografías del estado superficial en las 5 supuestos diferentes. La superficie de la pieza 'tapa' quedó más regular en ambos ejes y por ello no se ha diferenciado entre ambos ejes a la hora de mostrar los resultados.

Pieza Evaluada	R_a (μm)	R_q (μm)	R_z (μm)	R_{max} (μm)	R_t (μm)	R_p (μm)	R_v (μm)	R_{sm} (μm)	R_{sk}	R_{ku}
Nbx (ST)	0,218	0,270	1,200	1,57	1,65	0,58	0,62	246,0	-0,15	3,03
Nby (ST)	0,471	0,583	2,912	3,88	4,02	1,41	1,50	155,9	0,14	3,02
PIIbx (S)	0,237	0,320	1,931	3,40	3,40	0,71	1,22	184,8	-0,80	9,90
PIIby (S)	0,437	0,549	3,060	3,67	3,85	1,45	1,61	124,5	-0,06	3,16
PII'bx (S+A)	0,591	0,865	5,946	9,02	9,43	1,35	4,59	68,2	-2,54	17,54
PII'by (S+A)	0,738	0,954	5,525	6,92	7,81	2,20	3,33	98,8	-0,58	4,61
PIItxy (N)	0,676	0,982	5,861	8,15	8,72	1,75	4,11	78,1	-1,51	9,33
PII'txy (N+A)	0,971	1,427	8,416	13,22	14,02	2,20	6,22	63,5	-2,16	12,50

Tabla 5.19: *Resumen de las condiciones obtenidas, en cada uno de los 5 supuestos de estado superficial, para las piezas que componen las probetas.*

Los parámetros de rugosidad que aparecen en la tabla 5.19, son los que tienen todas las piezas que componen las probetas utilizadas en la primera campaña de ensayos de impacto P_{II} y en la segunda P_{II}'.

A partir de estos resultados se puede comentar que:

-Se demuestra que, como es sabido, los tratamientos superficiales eliminan el óxido superficial, así como una pequeña capa de aluminio de pocas micras y crean sobre esta una nueva capa de óxido muy delgada. Esto se aprecia en las fotografías de la tabla 5.18, donde se observa cómo van desapareciendo los surcos que genera el mecanizado, según aumenta el grado de agresión del tratamiento sobre la superficie de las piezas, llegando a desaparecer completamente con los tratamientos más agresivos. Se puede suponer que con el tratamiento normal (N), ya se han eliminado todos los surcos del mecanizado y se ha creado una nueva capa de óxido de aluminio bastante uniforme sobre la superficie, como puede deducirse por el color blanquecino de las fotos. Las rayas negras que aparecen sobre las fotos son debidas al rozamiento producido entre las piezas y a las medidas del rugosímetro sobre su superficie.

-En paralelo se aprecia cómo van aumentando, con la agresión, el número de picos y su altura, en las curvas de rugosidad R de la tabla 5.17, y por otro lado también se observa un ligero desplazamiento vertical del centro de la curva de distribución de amplitud (CDA) al igual que un ensanchamiento de la misma al aumentar la agresión de la superficie.

-De igual forma en la tabla 5.19, se aprecia como varían los parámetros de la rugosidad con el tipo de tratamiento utilizado:

Destacando el incremento que experimenta R_a, como puede observarse en la figura 5.54, y que cómo se ha explicado anteriormente va a ser el parámetro principal y más sencillo de

evaluar. De igual forma se produce un incremento gradual de los parámetros R_q, R_z, R_{max} y R_t.

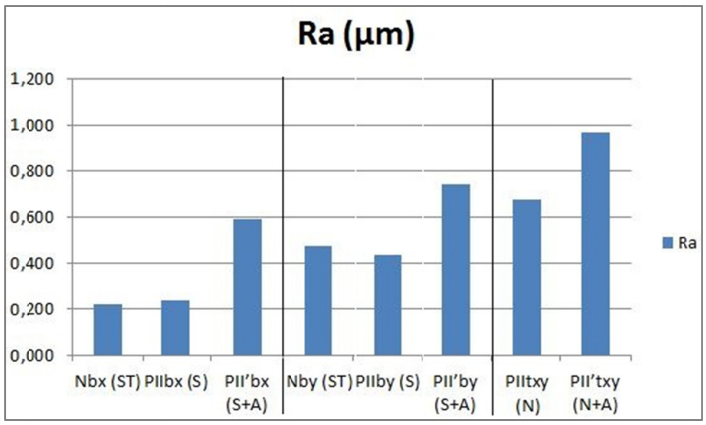


Figura 5.54: *Variación de R_a en función del nivel de agresión superficial, comparando: las piezas 'base' de las probetas en la dirección x (zona izquierda del gráfico), las piezas 'base' en la dirección y (zona central) y las piezas 'tapa' (zona derecha).*

También es destacable cómo cambia la relación R_v/R_p, que va aumentando con el nivel de agresividad del tratamiento, indicando que se producen valles cada vez más profundos en relación a los picos creados, Esta relación se muestra en la figura 5.55.

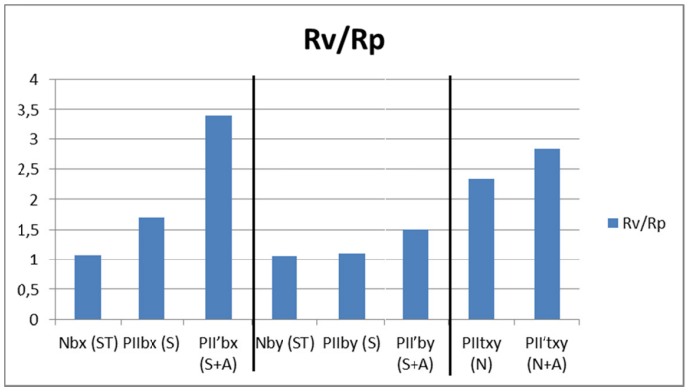


Figura 5.55: *Variación de la relación R_v/R_p en función del nivel de agresión superficial, comparando: las piezas 'base' de las probetas en la dirección x (zona izquierda del gráfico), las piezas 'base' en la dirección y (zona central) y las piezas 'tapa' (zona derecha).*

Además, como puede observarse en la figura 5.56, se aprecia un aumento del valor absoluto de los parámetros R_{sk} y R_{ku}, con la agresión sufrida por la superficie. Estos parámetros son indicativos de una asimetría de la curva CDA y de la existencia de picos y valles aislados en la curva de rugosidad R.

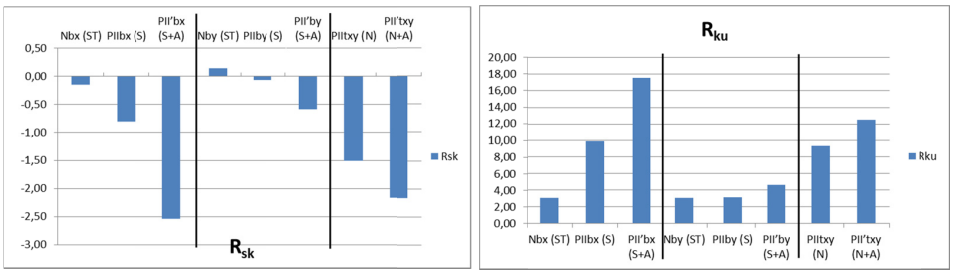


Figura 5.56: *Variación de R_{sk} y R_{ku} en función del nivel de agresión superficial, comparando: las piezas 'base' de las probetas en la dirección x (zona izquierda del gráfico), las piezas 'base' en la dirección y (zona central) y las piezas 'tapa' (zona derecha).*

-De la tabla 5.16 (y de los resultados mostrados en los siguientes puntos), se deduce, que la resistencia y fuerza de rotura frente a impacto parecen aumentar con la agresividad del tratamiento superficial aplicado a las piezas. Esto se tratará más adelante, durante el desarrollo de los ensayos de impacto a todas las probetas de ambas campañas de ensayos.

5.7. Pegado de probetas.

Durante el proceso de pegado y curado de las probetas, se ha intentado que se hiciera en condiciones similares a las utilizadas durante el pegado de los insertos en CMS, que fueron definidas en función de las condiciones recomendadas por el fabricante del adhesivo Araldit 2011, y que han sido expuestas en el punto 5.3 de este capítulo.

El procedimiento de pegado de las probetas se ha desarrollado de la siguiente manera [258]:

En primer lugar, se han sacado de las dobles bolsas las piezas que forman las probetas, ordenándolas según su numeración. Durante todo el proceso las piezas han de ser manipuladas con guantes, para evitar contaminar la superficie que ha sido tratada para el pegado.

Seguidamente, se procede a la medición de la cota de ~30 mm, correspondiente a las piezas 'tapa' y 'base' apiladas antes del pegado, mediante un calibre digital que tiene una precisión de ± 10 µm.

Una vez anotados los valores de todas las probetas se procede a preparar la mezcla del adhesivo, aplicando sobre la cara de pegado de la pieza 'tapa', una cierta cantidad de adhesivo utilizando un dosificador de jeringa.

La pieza 'tapa' se coloca sobre la pieza 'base' controlando que no queden burbujas entre ambas.

Se controla con el calibre, que el espesor de la película adhesiva esté entre las 100 µm y las 150 µm. Por las pruebas realizadas con anterioridad se comprobó que este espesor se reducirá en unas 50 µm,

por la fluencia que el peso de la pieza producirá sobre la capa de adhesivo.

A continuación se elimina el pegamento que ha rebosado por los laterales. Dejando la probeta unida sobre una superficie lo más horizontal posible, ya que sino la pieza 'tapa' se desplazará durante el fraguado del adhesivo. Por esta razón se debe seguir un control de las probetas unidas, cada pocos minutos, realineando las piezas que se hayan desplazado, hasta que transcurran aproximadamente 90 minutos, a partir de los cuales el adhesivo ya empieza a adquirir cierta consistencia evitando la fluencia.

Se dejan curar durante al menos 24 horas, durante las que no deben ser manipuladas. Estas probetas se dejan reposar una semana antes de someterlas a cualquiera de los procesos descritos en este capítulo.

Al cabo de ese tiempo se vuelve a realizar un control dimensional, con el calibre, de la cota de ~30 mm para obtener el valor del espesor de capa de adhesivo resultante, para cada probeta.

En la figura 5.57 se muestran las probetas de impacto para la primera campaña de ensayos, P_{II}, y las probetas para controlar la estabilidad dimensional, P_I, una vez pegadas.



Figura 5.57: *Probetas P_{II} y P_I durante su proceso de curado.*

En la figura 5.58 aparecen las probetas de la segunda campaña de ensayos, P_{II}', y que han sido recicladas de las primeras probetas ensayadas del conjunto de las probetas de la primera campaña de ensayos. Para diferenciarlas claramente de las de la primera campana, se han pegado las probetas utilizando la superficie opuesta de las piezas 'tapa' y el extremo opuesto de la cara de pegado en las piezas 'base' en estas probetas recicladas. Además, así se evitan posibles restos de pegamento que no hayan sido eliminados de las superficies anteriormente pegadas.

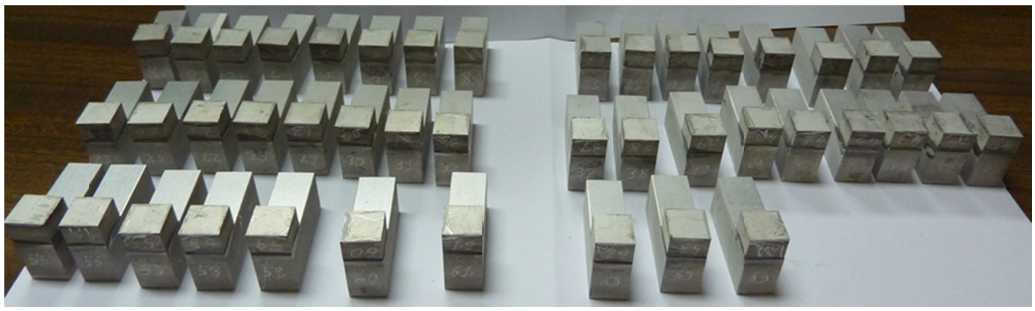


Figura 5.58: *Probetas P_{II}' durante su proceso de curado.*

Durante todo el proceso de curado y ensayo de estabilidad dimensional, las condiciones de temperatura y humedad han sido vigiladas, controlando que la temperatura no bajara de 20 ºC. Estos valores se muestran en las gráficas de la figura 5.59.

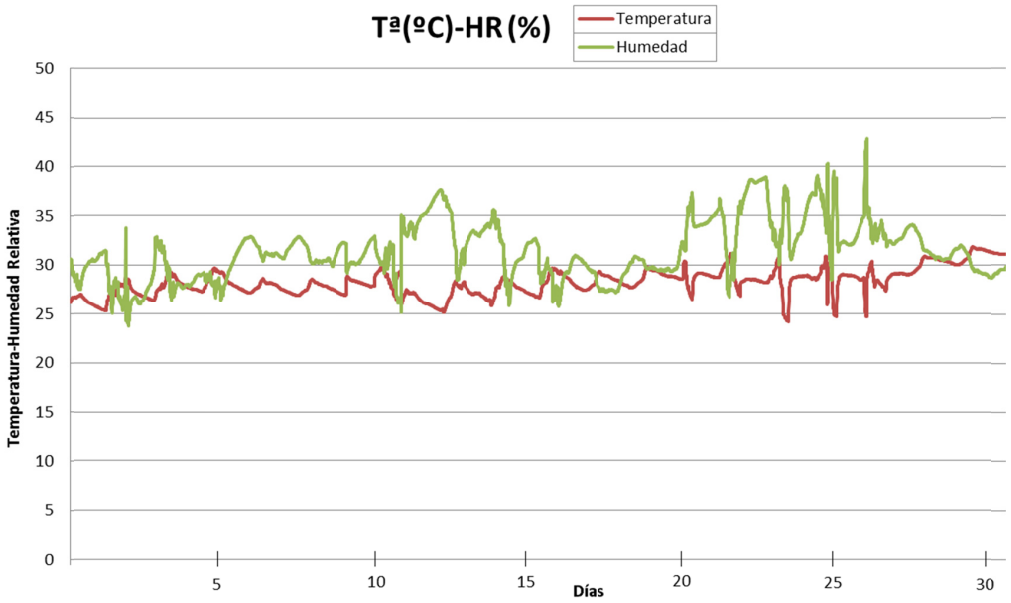


Figura 5.59: *Temperatura y humedad relativa a que han estado sometidas las probetas durante el proceso de curado y algunos ensayos de la estabilidad dimensional, (aparecen agrupados los diferentes períodos de estudio).*

El espesor de adhesivo que se ha conseguido en los diferentes tipos de probetas pegadas P_I, P_{II} y P_{II}', se muestra en la tabla 5.20. Las cantidades que aparecen en la tabla se han obtenido a partir de un valor medio entre diferentes medidas realizadas sobre cada una de las probetas, con un calibre digital de 10 µm de precisión. Como se observa en la tabla, los valores están entre los recomendados por el fabricante, para conseguir las condiciones óptimas de la resistencia de la junta adhesiva.

P_I		P_{II}				P_{II}'			
Prob.	*Espesor*	*Prob.*	*Espesor*	*Prob.*	*Espesor*	*Prob.*	*Espesor*	*Prob.*	*Espesor*
P_I-1	0.05	P_{II}-1	0.05	P_{II}-33	0.05	P_{II}'-1	0.04	P_{II}'-45	0.08
P_I-2	0.03	P_{II}-2	0.06	P_{II}-34	0.05	P_{II}'-2	0.05	P_{II}'-55	0.04
P_I-3	0.07	P_{II}-3	0.05	P_{II}-35	0.06	P_{II}'-3	0.04	P_{II}'-56	0.04
P_I-4	0.08	P_{II}-4	0.06	P_{II}-36	0.05	P_{II}'-4	0.03	P_{II}'-57	0.09
P_I-5	0.05	P_{II}-5	0.05	P_{II}-37	0.04	P_{II}'-5	0.04	P_{II}'-58	0.07
P_I-6	0.07	P_{II}-6	0.05	P_{II}-38	0.04	P_{II}'-6	0.04	P_{II}'-59	0.04
P_I-7	0.06	P_{II}-7	0.06	P_{II}-39	0.05	P_{II}'-7	0.04	P_{II}'-60	0.06
P_I-8	0.07	P_{II}-8	0.05	P_{II}-40	0.04	P_{II}'-8	0.04	P_{II}'-61	0.03
P_I-9	0.05	P_{II}-9	0.05	P_{II}-41	0.04	P_{II}'-13	0.05	P_{II}'-62	0.05
P_I-10	0.04	P_{II}-10	0.05	P_{II}-42	0.03	P_{II}'-14	0.04	P_{II}'-63	0.04
		P_{II}-11	0.06	P_{II}-43	0.03	P_{II}'-15	0.05	P_{II}'-64	0.06
		P_{II}-12	0.05	P_{II}-44	0.04	P_{II}'-16	0.05		
		P_{II}-13	0.07	P_{II}-45	0.07	P_{II}'-17	0.05		
		P_{II}-14	0.04	P_{II}-46	0.05	P_{II}'-18	0.03		
		P_{II}-15	0.05	P_{II}-47	0.07	P_{II}'-19	0.03		
		P_{II}-16	0.04	P_{II}-48	0.06	P_{II}'-20	0.06		
		P_{II}-17	0.05	P_{II}-49	0.06	P_{II}'-25	0.06		
		P_{II}-18	0.05	P_{II}-50	0.05	P_{II}'-26	0.02		
		P_{II}-19	0.06	P_{II}-51	0.05	P_{II}'-27	0.04		
		P_{II}-20	0.06	P_{II}-52	0.06	P_{II}'-28	0.06		
		P_{II}-21	0.05	P_{II}-53	0.05	P_{II}'-29	0.05		
		P_{II}-22	0.05	P_{II}-54	0.06	P_{II}'-30	0.02		
		P_{II}-23	0.06	P_{II}-55	0.06	P_{II}'-31	0.06		
		P_{II}-24	0.06	P_{II}-56	0.05	P_{II}'-32	0.06		
		P_{II}-25	0.04	P_{II}-57	0.11	P_{II}'-37	0.08		
		P_{II}-26	0.06	P_{II}-58	0.05	P_{II}'-38	0.08		
		P_{II}-27	0.05	P_{II}-59	0.04	P_{II}'-39	0.08		
		P_{II}-28	0.04	P_{II}-60	0.05	P_{II}'-40	0.08		
		P_{II}-29	0.04	P_{II}-61	0.05	P_{II}'-41	0.09		
		P_{II}-30	0.06	P_{II}-62	0.04	P_{II}'-42	0.08		
		P_{II}-31	0.04	P_{II}-63	0.07	P_{II}'-43	0.04		
		P_{II}-32	0.05	P_{II}-64	0.06	P_{II}'-44	0.09		

Tabla 5.20: *Espesor del adhesivo, en mm, aplicado en las probetas* P_I, P_{II} *y* P_{II}'.

5.8. Irradiación de la unión adhesiva de las probetas.

En la unidad de Irradiación Náyade, perteneciente a la Unidad de Corrosión de Sistemas Energéticos, de la división de Materiales Estructurales, en el Departamento de Tecnología del Ciemat, se ha realizado un estudio para evaluar, en función de la morfología de las probetas, su número, la cantidad de dosis necesaria, las fuentes disponibles para poder ser utilizadas y los porta-muestras posibles, la disposición de probetas más eficiente a utilizar y la distribución de fuentes que se han de colocar a su alrededor, y de esta manera conseguir los objetivos previstos de forma óptima. A continuación se da información sobre la Unidad de Irradiación utilizada y se detallan los resultados obtenidos [258]:

5.8.1. Unidad de irradiación Náyade.

La radiación electromagnética ionizante, al interaccionar con la materia, puede inducir cambios a través de fenómenos primarios de ionización, formación de radicales o excitación de moléculas. Estos cambios se traducen en la alteración de sus propiedades de forma tal que pueden suponer en unos casos, una mejora de su comportamiento, aportando un beneficio, o por el contrario una degradación significativa de sus parámetros. En determinadas aplicaciones va a ser necesario estudiar este cambio de comportamiento para poder obtener una caracterización de la materia ante su uso normal, o frente a requerimientos de homologación o cualificación. Este es el objetivo de la instalación Náyade.

La instalación Náyade, está clasificada como IR-06m en el catálogo de instalaciones radiactivas disponibles en el CIEMAT. Es una instalación (figura 5.60) que permite exponer diferentes tipos de materiales a la radiación gamma emitida por fuentes de Co-60. Fue proyectada y construida en 1964 para hacer trabajos de investigación, se diseñó como una piscina pensando en la versatilidad que ofrece el agua como blindaje biológico. La piscina tiene 1.2 m de lado y 4.5 m de profundidad, lo que le proporciona blindaje biológico suficiente para unos 100000 Ci. En sus comienzos la instalación Náyade fue cargada con 4200 Ci de Co-60 y en sucesivas recargas se ha llegado a la dotación actual, de unos 2000 Ci distribuidos en 60 fuentes, agrupadas en seis lotes de diferente actividad (A, B, C, D, E y F), esta es debida fundamentalmente a la edad de cada lote, siendo el lote F el más reciente, y por consiguiente, el que contiene las fuentes más activas.



Figura 5.60: *Vista exterior de la Instalación Náyade (Izq). Vista superior de la piscina, donde se muestra la distribución de fuentes agrupadas en 6 lotes (Der. Superior). Porta muestras escogido para el ensayo, colocado en el centro del lote de fuentes utilizada (Der. Inferior).*

Esta instalación posee los equipos y sistemas necesarios para garantizar la seguridad a través de controles de nivel del agua, detectores de radiación, control de la pureza del agua a través de medidas de conductividad y pH. Estos sistemas están controlados desde una consola de control, que además puede controlar el posicionamiento y extracción automáticos de los porta muestras.

Para llevar a cabo irradiaciones de materiales voluminosos, que son los que frecuentemente solicita la industria, se dispone de un dispositivo que es capaz de hacer girar las fuentes radiactivas alrededor de la muestra para garantizar un flujo aproximadamente uniforme de irradiación. Este dispositivo permite casi anular los efectos de falta de uniformidad que se darían en irradiaciones estáticas.

En nuestro caso se ha utilizado una irradiación estática, con una disposición de fuentes que proporcionan una tasa de ~2.2 KGys/hora sobre la unión adhesiva de las probetas P_{II} y P_{II}', la ubicación exacta dentro de la piscina aparece en la figura 5.60 derecha, inferior. Esa ubicación corresponde al dispositivo llamado *G-III (exterior)*, donde se han colocado 24 fuentes uniformemente distribuidas, con las siguientes cantidades y tipos: 12 del tipo *F*, 8 del *E* y 4 del *D*, estas fuentes se pueden observar en la figura 5.61. En el centro de este dispositivo G-III, rodeado por las fuentes, se encuentran las muestras a irradiar, dentro de un porta muestras de volumen útil 150 mm de diámetro y 100 m de altura, y que aparece en la figura 5.61.



Figura 5.61: *Fuentes utilizadas en la instalación Náyade, son varillas cilíndricas de 100 mm de longitud (Izq.) y porta muestras que pertenece al dispositivo de irradiación GIII (exterior) (Centro). Distribución de las probetas en el interior del porta muestras (Der.).*

5.8.2. Disposición de las probetas.

Para conseguir una irradiación uniforme en la junta adhesiva de las probetas estas han sido distribuidas como aparece en la figura 5.61 (Der.), y 5.62, dispuestas en 3 alturas, con una distribución de hasta 12 probetas radialmente colocadas, en cada uno de los tres niveles; pudiendo ser irradiadas al mismo tiempo hasta 36 probetas con esa configuración. El pegamento se sitúa lo más cercano posible a las fuentes, y perpendicular a estas, para recibir la irradiación

de forma directa, sin que el aluminio de las piezas que forman las probetas haga la función de blindaje. Las probetas tipo P_I se disponen de forma que el lado donde se ha grabado el número que identifica cada muestra, se encuentre orientado hacia el exterior del porta muestras, siendo este lado el que recibe un nivel mayor de dosis.

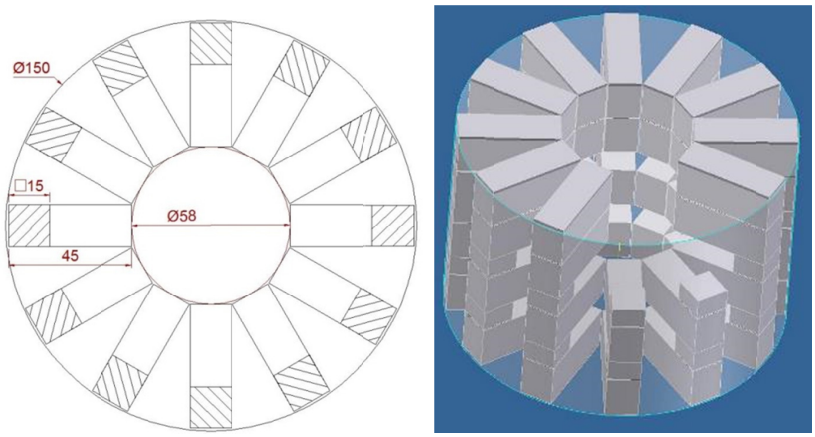


Figura 5.62: *Disposición que tienen las probetas dentro del volumen útil disponible, en el interior del dispositivo porta muestras que se ha utilizado, para su irradiación en la instalación Náyade.*

Ha sido utilizado un utillaje diseñado para conocer exactamente la dosis recibida en el adhesivo, este que aparece en la figura 5.63 con los dosímetros de evaluación montados, de esta forma quedan posicionados dentro del porta muestras, en el centro de donde va ubicada la unión adhesiva de las probetas P_{II} y P_{II}'. Estos dosímetros tienen un diámetro de 20 mm, que cubre perfectamente el área pegada, obteniendo así la dosis absorbida integrada a toda su área. Para el caso de las probetas P_I, se ha tomado otra medida con los dosímetros colocados en la posición interna del útil. Obteniendo de esta forma dos medidas integradas, una correspondiente a la zona interna y otra a la externa de esta probeta. Los resultados de tasa de dosis obtenida aparecen en la tabla 5.21.

5.8.3. Dosimetría FRICKE.

Es un sistema que proporciona un método seguro para la medida de la dosis absorbida en agua, basado en un proceso de oxidación de ion ferroso a férrico en disolución acuosa ácida, debido a radiaciones ionizantes. El dosímetro es una disolución de sulfato ferroso amónico, que indica la dosis absorbida por la disolución mediante el incremento que experimenta su absorbancia, a una longitud de onda determinada. Es aplicable para:

Un intervalo de la dosis entre 40 y 400 Gy.
Tasa de Dosis Absorbida no sea superior a 106 Gy/s.
Radioisótopos emisores de rayos gamma, con energía del fotón por encima de 0.6 MeV.
Una temperatura del dosímetro durante la irradiación entre 10 y 60 ºC.



Figura 5.63: *Dosímetros utilizados para realizar la dosimetría FRICKE, montados en el útil que los posiciona dentro del porta muestras utilizado.*

Para analizar las muestras dosimétricas se utiliza un espectrofotómetro de alta precisión, que es capaz de medir valores de absorbancia por encima de 2, con una incertidumbre de 1% en la región de 300 nm.

El procedimiento consiste en colocar los viales de vidrio sellado, que contienen la mezcla dosimétrica, en el interior del porta muestras utilizado, una vez medidas las mezclas con el espectrofotómetro. A continuación se introduce el porta muestras durante un tiempo estipulado, 5 minutos en nuestro caso, en la posición de irradiación de la piscina. Seguidamente se realiza la medición con el espectrofotómetro, y se obtiene la dosis recibida por la disolución en función de la variación que experimenta su absorbancia. De esta forma se logra conocer la tasa de dosis que van a recibir las probetas ubicadas en el dispositivo *G-III (exterior)*, con esa distribución de probetas, durante la irradiación.

Para este estudio se ha realizado una dosimetría en la que se han estimado las tasas de dosis en dos posiciones distintas de las probetas, para cubrir el área pegada de las probetas P_I. Estos resultados se muestran en la tabla 5.21:

DATOS DOSIMÉTRICOS						
Dosímetro	Tiempo (min)	D. Óptica (A)	Tª Espect. (ºC)	Coeficiente Conversión	Dosis (Gy)	T.de dosis (Gy/min)
1	5,0	0,654	24,1	277,29	181,35	36,269
2	5,0	0,683	24,0	277,48	189,52	37,904
3	5,0	0,689	23,9	277,68	191,32	38,264
4	5,0	0,673	23,5	278,46	187,40	37,480
5	5,0	0,658	23,5	278,46	183,22	36,645
6	5,0	0,646	23,4	278,65	180,01	36,002
7	5,0	0,643	23,7	278,07	178,80	35,759
8	5,0	0,659	23,6	278,26	183,37	36,675
9						
10						
11						
12						
		T.de dosis media (kGy/h)	2,212	Td(Vbis)(KGy/h)	2,031	
		Posición Exterior		Posición Interior		
	Falta de uniformidad de dosis		7,00%			

Tabla 5.21: *Resultados de la dosimetría FRICKE llevada a cabo con 8 dosímetros. Mostrando los resultados de la posición Exterior e Interior del porta muestras utilizado para irradiar nuestras probetas.*

En los valores dosimétricos obtenidos se aprecia una falta de uniformidad máxima del 7 %, esta será la incertidumbre que se tendrá en la dosis recibida por las probetas de cada grupo de irradiación de los que se muestran a continuación y que dependerá de la posición que ocupe cada probeta alrededor del eje del porta muestras, una vez situado el porta probetas en el centro de las fuentes. Esta incertidumbre se podría minimizar utilizando el dispositivo rotacional motorizado, pero no se hubiera podido haber utilizado la ubicación escogida dentro de la piscina, la cual garantiza una tasa de dosis mucho mayor.

5.8.4. Niveles de irradiación recibida por las probetas.

Basándose en las tasas que se obtienen con la disposición elegida, se pueden calcular los tiempos necesarios para que cada grupo de probetas alcance el nivel de irradiación requerido en este estudio.

Durante este estudio se han realizado dos campañas de irradiación diferentes, en las que se han irradiados las probetas tipos P_I, P_{II} y P_{II}'.

En la primera campaña de irradiación se han irradiado los grupos de probetas llamados:

I, correspondiente a las probetas tipo P_{II}, de los número 37 al 48.
II, correspondiente a las probetas tipo P_{II}, de los número 25 al 36.
III, correspondiente a las probetas tipo P_{II}, de los número 13 al 24.
IV, correspondiente a las probetas tipo P_{II}, de los número 1 al 12.

V y V_{bis} corresponde a los valores de dosis recibida por las 10 probetas tipo P_I en la posición exterior e interior del porta muestras. Siendo la exterior el lado donde está grabado el número de cada probeta.

Los valores de dosis recibidos durante la primera campaña, por las probetas estudiadas, se muestran en la tabla 5.22.

IRRADIACIÓN					
		Tiempo de irradiación			
Muestra	Dosis (kGy)	Días	Horas	Minutos	Segundos
I	10,00	0	4	31	11
II	50,00	0	22	35	57
III	100,00	1	21	11	53
IV	303,10	5	16	59	44
V	263,10	4	22	54	58
Vbis	241,50	4	22	54	42

Tabla 5.22: *Dosis recibidas por cada grupo de probetas estudiadas y tiempos de irradiación, durante la primera campaña.*

Durante la segunda campaña la irradiación se ha realizado sobre los grupos de probetas llamados:

1, correspondiente a las probetas tipo P_{II}', de los números 37 al 43.
2, correspondiente a las probetas tipo P_{II}', de los número 25 al 31.
3, correspondiente a las probetas tipo P_{II}', de los número 13 al 19.
4, correspondiente a las probetas tipo P_{II}', de los número 1 al 7.
5, correspondiente a las probetas tipo P_{II}', números 8, 20, 32, 44, 45, 62, 63 y 64.
6 y 6_{bis} corresponde a los valores de dosis recibida por las probetas tipo P_I de los números 1 al 5, en la posición exterior e interior del porta muestras. Siendo la exterior el lado donde está grabado el número de cada probeta.

En la tabla 5.23 se muestran los valores de dosis recibidos por las probetas estudiadas, durante la segunda campaña de irradiaciones.

IRRADIACIÓN					
		Tiempo de irradiación			
Muestra	Dosis (kGy)	Días	Horas	Minutos	Segundos
1	10,00	0	4	31	11
2	50,00	0	22	35	57
3	100,00	1	21	11	53
4	303,10	5	16	59	44
5	2070,88	39	0	0	1
6	2020,88	38	1	24	1
6bis	1854,97	38	1	24	1

Tabla 5.23: *Dosis recibidas por cada grupo de probetas estudiadas y tiempos de irradiación, durante la segunda campaña.*

El procedimiento que se ha seguido durante la irradiación consiste en: introducir en el porta muestras 3 grupos de irradiación al mismo tiempo, situado cada grupo en un nivel distinto. Una vez alcanzado el nivel de dosis más bajo, requerido por el primer grupo, se extrae el porta muestras, sacando las probetas de este grupo e introduciendo en su lugar el siguiente que se había previsto según los cronogramas de las figuras 5.64 y 5.65, correspondientes a la primera y segunda campañas de irradiación. Repitiendo este proceso hasta irradiar todos los grupos de muestras, con las dosis previstas.

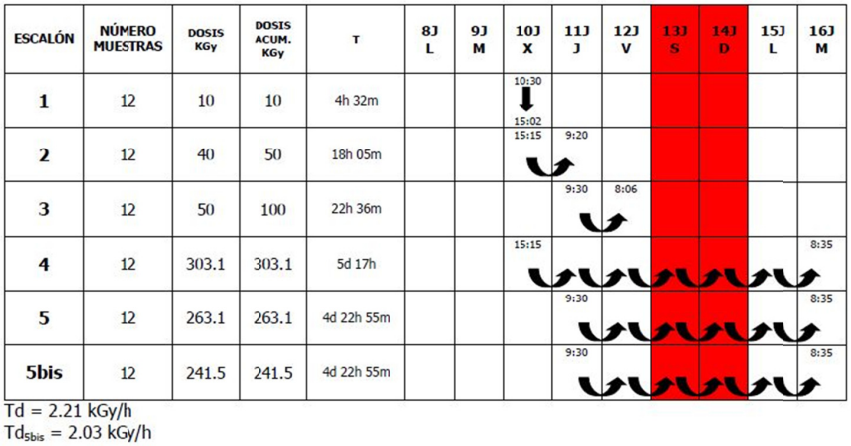


Figura 5.64: *Cronograma utilizado para la primera campaña de irradiación de las probetas* P_I y P_{II} *estudiadas.*

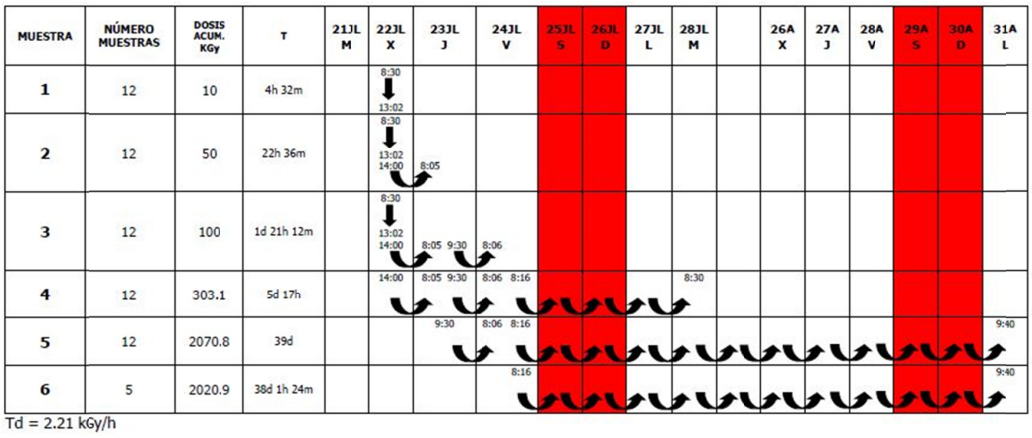


Figura 5.65: *Cronograma utilizado en la segunda campaña de irradiación de las probetas* P_I y P_{II}' *estudiadas.*

A continuación, en la tabla 5.24, se muestran las dosis acumuladas por cada una de las probetas utilizadas durante el presente estudio. En el caso de las probetas P_I, la dosis que reciben se considera la media entre las posiciones exterior e interior. Las probetas P_I fueron irradiadas durante la segunda campaña de nuevo, siendo la dosis total recibida la suma de ambas campañas.

P_I		P_{II} *(primera Campaña de irradiación)*				P_{II}' *(Segunda Campaña de irradiación)*			
Prob.	*Dosis (KGy)*	*Prob.*	*Dosis (KGy)*	*Prob.*	*Dosis (KGy)*	*Prob.*	*Dosis (KGy)*	*Prob.*	*Dosis (KGy)*
Primera Campaña		P_{II}-1	303.1	P_{II}-33	50	P_{II}'-1	303.1	P_{II}'-45	2070.88
P_I-1	252.3	P_{II}-2	303.1	P_{II}-34	50	P_{II}'-2	303.1	P_{II}'-55	0
P_I-2	252.3	P_{II}-3	303.1	P_{II}-35	50	P_{II}'-3	303.1	P_{II}'-56	0
P_I-3	252.3	P_{II}-4	303.1	P_{II}-36	50	P_{II}'-4	303.1	P_{II}'-57	0
P_I-4	252.3	P_{II}-5	303.1	P_{II}-37	10	P_{II}'-5	303.1	P_{II}'-58	0
P_I-5	252.3	P_{II}-6	303.1	P_{II}-38	10	P_{II}'-6	303.1	P_{II}'-59	0
P_I-6	252.3	P_{II}-7	303.1	P_{II}-39	10	P_{II}'-7	303.1	P_{II}'-60	0
P_I-7	252.3	P_{II}-8	303.1	P_{II}-40	10	P_{II}'-8	2070.88	P_{II}'-61	0
P_I-8	252.3	P_{II}-9	303.1	P_{II}-41	10	P_{II}'-13	100	P_{II}'-62	2070.88
P_I-9	252.3	P_{II}-10	303.1	P_{II}-42	10	P_{II}'-14	100	P_{II}'-63	2070.88
P_I-10	252.3	P_{II}-11	303.1	P_{II}-43	10	P_{II}'-15	100	P_{II}'-64	2070.88
Segunda Campaña		P_{II}-12	303.1	P_{II}-44	10	P_{II}'-16	100		
P_I-1	1937.93	P_{II}-13	100	P_{II}-45	10	P_{II}'-17	100		
P_I-2	1937.93	P_{II}-14	100	P_{II}-46	10	P_{II}'-18	100		
P_I-3	1937.93	P_{II}-15	100	P_{II}-47	10	P_{II}'-19	100		
P_I-4	1937.93	P_{II}-16	100	P_{II}-48	10	P_{II}'-20	2070.88		
P_I-5	1937.93	P_{II}-17	100	P_{II}-49	0	P_{II}'-25	50		
P_I-6	0	P_{II}-18	100	P_{II}-50	0	P_{II}'-26	50		
P_I-7	0	P_{II}-19	100	P_{II}-51	0	P_{II}'-27	50		
P_I-8	0	P_{II}-20	100	P_{II}-52	0	P_{II}'-28	50		
P_I-9	0	P_{II}-21	100	P_{II}-53	0	P_{II}'-29	50		
P_I-10	0	P_{II}-22	100	P_{II}-54	0	P_{II}'-30	50		
Total Acumulada		P_{II}-23	100	P_{II}-55	0	P_{II}'-31	50		
P_I-1	2190.23	P_{II}-24	100	P_{II}-56	0	P_{II}'-32	2070.88		
P_I-2	2190.23	P_{II}-25	50	P_{II}-57	0	P_{II}'-37	10		
P_I-3	2190.23	P_{II}-26	50	P_{II}-58	0	P_{II}'-38	10		
P_I-4	2190.23	P_{II}-27	50	P_{II}-59	0	P_{II}'-39	10		
P_I-5	2190.23	P_{II}-28	50	P_{II}-60	0	P_{II}'-40	10		
P_I-6	252.3	P_{II}-29	50	P_{II}-61	0	P_{II}'-41	10		
P_I-7	252.3	P_{II}-30	50	P_{II}-62	0	P_{II}'-42	10		
P_I-8	252.3	P_{II}-31	50	P_{II}-63	0	P_{II}'-43	10		
P_I-9	252.3	P_{II}-32	50	P_{II}-64	0	P_{II}'-44	2070.88		
P_I-10	252.3								

Tabla 5.24: *Dosis acumuladas por cada una de las probetas utilizadas en el estudio.*

En la figura 5.66, se puede observar el efecto de cambio de color producido en la estructura del adhesivo, aquí se aprecia el ennegrecimiento que experimenta el adhesivo según va recibiendo una dosis mayor, durante el proceso de irradiación sufrido. Esta figura muestra el aspecto que presentan las probetas,

de los distintos grupos de irradiación, tras las dos campañas de irradiación, comparadas con probetas sin irradiar.

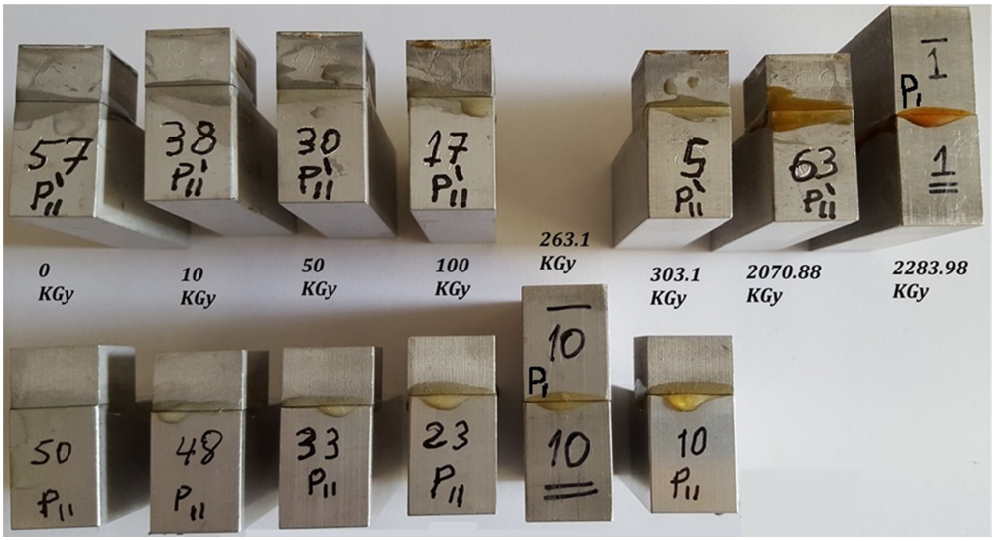


Figura 5.66: *Aspecto que presentan las probetas que han sido sometidas a la primera (fila superior) y segunda campaña (fila inferior) de irradiación.*

Aquí se observa que entre 50 y 100 KGy ya empieza a producirse un cambio de color apreciable sobre el adhesivo, lo que es indicativo de un posible cambio estructural, pero que como se muestra en los resultados de los siguientes puntos no implica un cambio apreciable en su comportamiento frente a impactos ni frente a la estabilidad dimensional, aunque si puede ser considerado un cambio de tendencia de las curvas.

5.9. Estabilidad dimensional de las probetas.

Todas las probetas P_I y P_{II}, una vez pegadas y tras dejarlas al menos durante una semana curando a temperatura y humedad controlada (Figura 5.59), se les realizo un exhaustivo control dimensional, en la Máquina de Medición por Coordenadas, modelo EURO C-574 APEX (Figura 5.67) de la firma Mitutoyo [202], bajo el software de medición MCOSMOS, con una incertidumbre de la medida que según la fórmula (5.21) es de ~3.5 µm. Este control ha consistido en realizar un barrido de puntos sobre dos de las superficies de las piezas pegadas (Figura 5.67), antes de proceder a su irradiación. Y a través de los puntos tomados, mediante el software de medición, se han obtenido unos parámetros angulares y de distancias entre los planos medidos. Estos valores se han tomado como referencia durante el estudio realizado en este apartado.

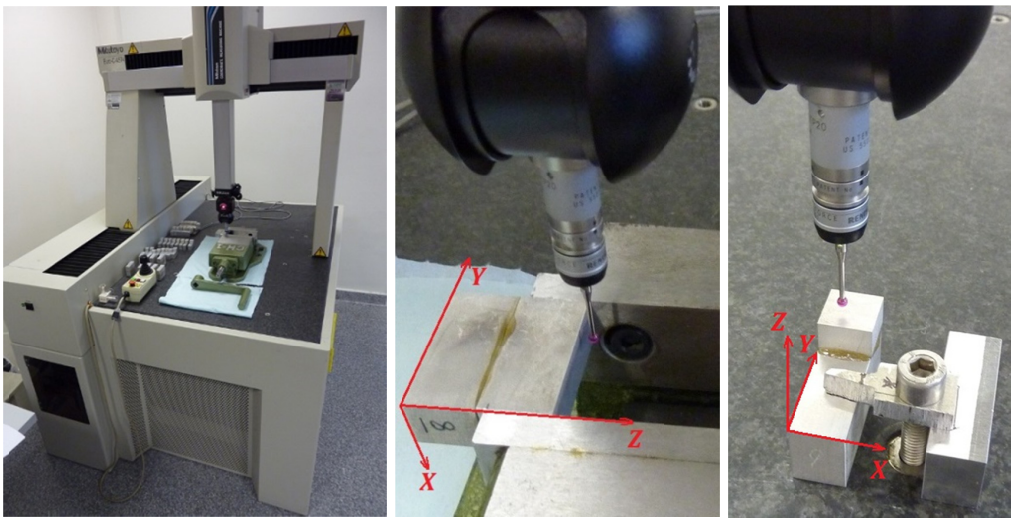


Figura 5.67: *MMC Mitutoyo EURO C-574 APEX del Ciemat durante el proceso de control dimensional de una probeta P_I (Izq.). Detalle durante el control a la probeta P_I (Centro). Detalle durante el control a la probeta P_{II} (Der.). En las figuras aparece el sistema de referencia utilizado en el control de las probetas P_I y P_{II}.*

Posteriormente estas probetas se han sometido a una serie de condiciones que se describen a continuación. Tras cada una de estas situaciones se llevó a cabo un nuevo control dimensional. Mediante el estudio comparativo entre la situación inicial de las probetas, después de realizar el pegado, y la situación tras cada uno de los supuestos, se obtiene la estabilidad de la unión adhesiva frente a esos casos supuestos [258], en los que se intenta recrear lo más fielmente posible las condiciones reales a las que se verán sometidas las uniones adhesivas, que han sido utilizadas en el sistema de alineación LINK de CMS.

5.9.1. Parámetros evaluados en las probetas P_I.

Las probetas P_I tienen las dimensiones que aparecen en la Figura 5.45 (Der.), estas han sido escogidas para poder realizar el control de la estabilidad dimensional, a priori, con mayor precisión que con las P_I, por los motivos que han sido argumentados anteriormente. Se han controlado los puntos que aparecen en la figura 5.68, utilizando el sistema de referencia que se muestra en la figura 5.67. El proceso seguido para la realización del control dimensional sobre cada probeta se ha desarrollado de la siguiente manera:

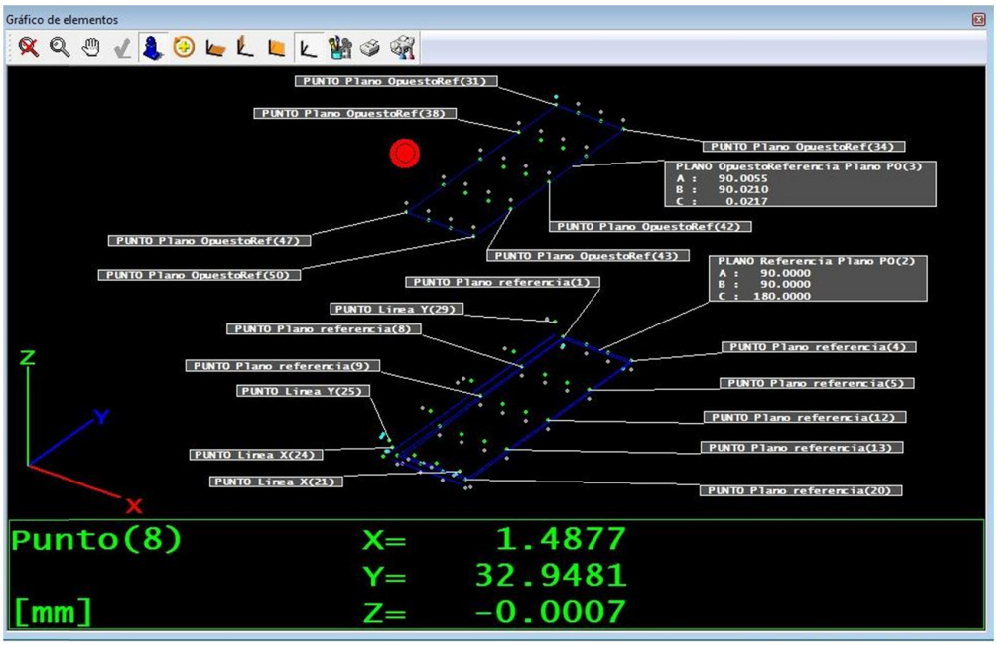


Figura 5.68: *Ventana del programa MCOSMOS, donde aparecen los diferentes puntos tomados sobre la probeta P_1 y los elementos creados con estos.*

Se coloca la probeta P_1 en la mordaza, según aparece en la figura 5.67, aplicando una ligera presión de amarre, que impida movimientos indeseados de la probeta sin introducir deformaciones.

Seguidamente se define la situación de la pieza respecto al sistema de coordenadas de la máquina, palpando cuatro puntos sobre el plano *XY*, tres puntos sobre el plano *ZX* para definir el eje *X* y tres puntos sobre el plazo *YZ* que definen el eje *Y*.

A continuación se ejecuta automáticamente el programa creado para la caracterización dimensional de esta probeta. Durante la ejecución del programa se realiza un barrido de 20 puntos sobre el plano XY, llamado 'plano de referencia', y otros 20 sobre el plano paralelo situado a ~40 mm, llamado 'plano opuesto'.

Con estos puntos el programa calcula, entre otros parámetros, la *distancia* que hay entre ambos planos y el *ángulo* que forman entre sí, seleccionando la componente proyectada sobre el plano *YZ*, por ser la que tiene una mayor precisión al ser evaluada sobre la longitud de 45 mm. Estos son los dos parámetros de referencia seleccionados y utilizados para comparar entre sí los controles dimensionales realizados sobre estas probetas, en los diferentes supuestos estudiados.

Este control se ha realizado al menos dos veces sobre la misma probeta, para garantizar que los valores se repiten, dentro de la incertidumbre de medida de la máquina.

En la tabla 5.25 se muestran los resultados para cada una de las 10 probetas evaluadas P_I. En ésta aparecen los valores medios que se han obtenido de las medidas realizadas a cada probeta, siendo estos la referencia tomada en los siguientes puntos de este estudio de estabilidad. La medidas se han realizado a una temperatura comprendida entre los 25.2º C y 25.5º C, aunque los valores que se muestran en las tablas se corresponden a la temperatura normalizada, puesto que la máquina aplica de forma automática una compensación por temperatura.

Valores Refer.	(Dist. en *mm*) / (Ang. En *Grados*)	Valor Promedio
P_I-*1*	Dist. Planos	39,4245
	Ang.YZ	0,0110
P_I-*2*	Dist. Planos	39,4299
	Ang.YZ	-0,0178
P_I-*3*	Dist. Planos	39,4256
	Ang.YZ	0,0014
P_I-*4*	Dist. Planos	39,4378
	Ang.YZ	-0,0217
P_I-*5*	Dist. Planos	39,4164
	Ang.YZ	-0,0112
P_I-*6*	Dist. Planos	39,4048
	Ang.YZ	0,0006
P_I-*7*	Dist. Planos	39,8528
	Ang.YZ	-0,0034
P_I-*8*	Dist. Planos	39,8458
	Ang.YZ	-0,0101
P_I-*9*	Dist. Planos	39,8460
	Ang.YZ	-0,0155
P_I-*10*	Dist. Planos	39,8493
	Ang.YZ	-0,0207

Tabla 5.25: *Valores de referencia de las probetas P_I utilizados durante el estudio de estabilidad dimensional.*

Con el fin de evaluar la repetitividad que se consigue con este método, el proceso se realizó 24 veces, de forma repetitiva sobre la misma probeta en dos momentos distintos, separados entre sí unos 3 meses. Así se ha cuantificado la dispersión estadística sobre los valores obtenidos de este ensayo, obteniendo una desviación estándar S_d= 0,0008 mm para los valores de distancia y S_α= 0,0016º para los angulares; valores que están dentro de la incertidumbre de medida de la máquina. De esta forma se puede acotar el error que se obtiene al realizar medidas comparativas relativas, cómo es el caso estudiado, aunque no el valor absoluto, que viene dado por la incertidumbre de la fórmula (5.21).

5.9.2. Parámetros evaluados en las probetas P_{II}.

Las probetas P_{II} tienen las dimensiones que aparecen en la Figura 5.45 (Izq.). Sobre estas probetas han sido controlados los puntos que aparecen en la figura 5.69, utilizando el sistema de referencia que se muestra en la figura 5.67. El proceso seguido para la realización del control dimensional sobre cada probeta se ha desarrollado de la siguiente manera:

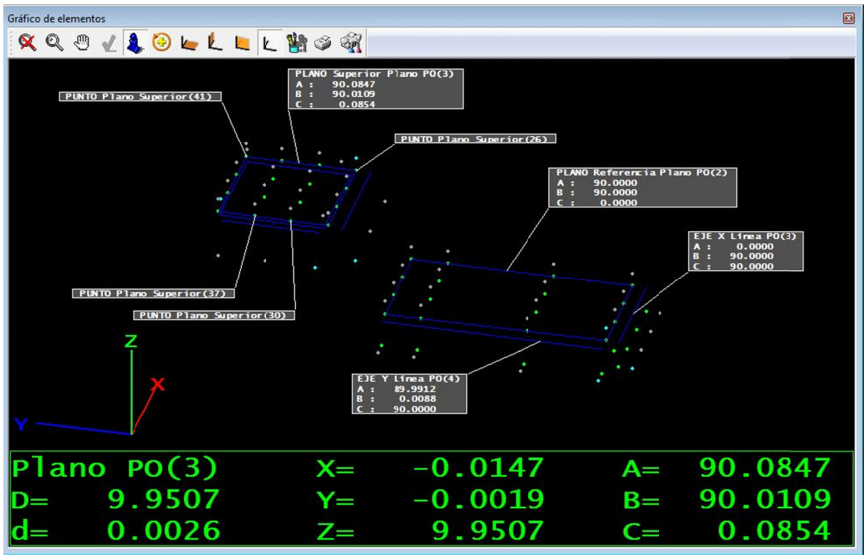


Figura 5.69: *Ventana del programa MCOSMOS, donde aparecen los diferentes puntos tomados sobre la probeta P_{II} y los elementos creados con estos.*

Se coloca la probeta P_{II} sobre la mesa de la máquina, según aparece en la figura 5.67, fijando la pieza a esta mediante un sistema de presión.

Seguidamente se define la situación de la pieza respecto al sistema de coordenadas de la máquina, palpando cuatro puntos sobre el plano *XY*, tres puntos sobre el plano *ZX* para definir el eje *X* y tres puntos sobre el plazo *YZ* que definen el eje *Y*.

A continuación se ejecuta automáticamente el programa creado para la caracterización dimensional de esta probeta. Durante la ejecución del programa se realiza un barrido de 20 puntos sobre el plano XY, llamado 'plano de referencia', de la pieza 'base' de la probeta, y otros 16 sobre el plano paralelo situado a ~10 mm, situado sobre la pieza 'tapa', llamado 'plano superior'.

Con estos puntos el programa calcula, entre otros parámetros, la *distancia* que hay entre ambos planos y el *ángulo* que forman entre sí. Estos son los dos parámetros de referencia seleccionados y utilizados para comparar entre sí los controles dimensionales realizados sobre estas probetas, en los diferentes supuestos estudiados.

Este control se ha realizado al menos dos veces sobre la misma probeta, para garantizar que los valores se repiten, dentro de la incertidumbre de medida de la máquina.

Val. Ref.	Valor Promedio (Dist: mm) (Ang: grad.)	**Val. Ref.**	Valor Promedio (Dist: mm) (Ang: grad.)	**Val. Ref.**	(Valor Promedio (Dist: mm) (Ang: grad.)	**Val. Ref.**	Valor Promedio (Dist: mm) (Ang: grad.)
P_{II}-1	9,9241	P_{II}-17	10,0016	P_{II}-33	9,9691	P_{II}-49	9,9338
	0,1579		0,0956		-0,0991		0,1426
P_{II}-2	9,9671	P_{II}-18	9,9855	P_{II}-34	9,9993	P_{II}-50	9,9435
	0,1281		-0,0609		0,0653		0,1127
P_{II}-3	9,9515	P_{II}-19	9,9961	P_{II}-35	10,0202	P_{II}-51	9,9689
	0,0720		0,0680		-0,0763		0,1873
P_{II}-4	10,0128	P_{II}-20	9,9688	P_{II}-36	10,0151	P_{II}-52	9,9760
	-0,2670		-0,0953		-0,0366		0,0194
P_{II}-5	9,9798	P_{II}21	10,0624	P_{II}-37	9,9218	P_{II}-53	9,9818
	0,1252		-0,0845		0,1821		0,0186
P_{II}-6	9,9924	P_{II}-22	10,1092	P_{II}-38	10,0579	P_{II}-54	10,0158
	-0,0726		-0,1507		-0,1697		0,1485
P_{II}-7	9,9164	P_{II}-23	9,9695	P_{II}-39	9,9776	P_{II}-55	9,9857
	0,1634		0,0600		0,1384		0,1683
P_{II}-8	9,9577	P_{II}-24	9,9201	P_{II}-40	10,0905	P_{II}-56	9,9613
	0,0391		0,1908		-0,1600		0,1468
P_{II}-9	10,0169	P_{II}-25	10,0221	P_{II}-41	10,0042	P_{II}-57	9,9910
	-0,1070		0,1016		0,1105		-0,0644
P_{II}-10	9,9773	P_{II}-26	9,9786	P_{II}-42	10,0295	P_{II}-58	10,0454
	-0,0494		-0,1260		0,0833		-0,1090
P_{II}-11	9,9495	P_{II}-27	9,9760	P_{II}-43	10,0615	P_{II}-59	9,9736
	-0,0829		0,1802		-0,1558		0,2382
P_{II}-12	9,9891	P_{II}-28	10,0823	P_{II}-44	9,9950	P_{II}-60	10,0453
	0,0950		-0,2180		-0,1336		0,1683
P_{II}-13	10,0143	P_{II}-29	9,9932	P_{II}-45	9,9327	P_{II}-61	9,9997
	-0,2468		-0,0962		0,1689		-0,1631
P_{II}-14	9,9080	P_{II}-30	10,0249	P_{II}-46	10,0165	P_{II}-62	9,9798
	0,1742		-0,2096		-0,1076		0,0736
P_{II}-15	9,9292	P_{II}-31	9,9282	P_{II}-47	9,9132	P_{II}-63	10,0336
	0,2195		0,1467		0,1664		-0,2068
P_{II}-16	9,9827	P_{II}-32	9,9470	P_{II}-48	10,0331	P_{II}-64	9,9640
	0,0926		-0,1584		0,1504		-0,0883

Tabla 5.26: *Valores de referencia de las probetas P_{II} utilizados durante el estudio de estabilidad dimensional.*

En la tabla 5.26 se muestran los resultados de los valores medios que se han obtenido, para cada una de las 64 probetas P_{II} evaluadas. Estos son los parámetros de referencia que se han tomado para el estudio de estabilidad, que se ha desarrollado en siguientes puntos del capítulo. Las medidas han sido realizadas a una temperatura comprendida entre los 24.8º C y 25.6º C, aunque los valores que se muestran en las tablas se corresponden a la temperatura normalizada, ya que la máquina aplica de forma automática una compensación por temperatura.

5.9.3. Estabilidad tras la primera campaña de irradiación.

Una vez terminado el proceso de irradiación sobre las probetas, que se ha realizado según el método expuesto en el punto 5.8, estas han permanecido estabilizándose durante una semana, en condiciones ambientales controladas (Figura 5.59). A continuación, se ha realizado un nuevo control dimensional sobre las P_I y P_{II}, siguiendo el procedimiento que se ha explicado anteriormente. Los valores que se han obtenido para cada probeta irradiada, se han comparado con los de referencia, y una vez procesados los valores obtenidos en ambas calibraciones se obtienen los resultados que aparecen en la tabla 5.27, para las probetas P_I y 5.28 para las probetas P_{II}.

De los resultados de estabilidad frente a la irradiación que aparecen en la tabla 5.27, relativos a las probetas P_I, se puede apreciar cierta tendencia a una ligera reducción del espesor medio de la capa de adhesivo de *~ 1 µm*, así como una pequeña variación en su ángulo de unos *20 µrad.* Estas probetas han recibido una dosis media de 252.3 KGy, con valores máximos medios en la zona exterior de 263.1 KGy y mínimos medios de 241.5 KGy en la zona interior de la probeta. Si la irradiación provoca una ligera reducción de espesor, la diferencia de la dosis recibida entre los extremos de la junta, puede motivar ese cambio de ángulo en el espesor de la junta, de la forma que se muestra en la figura 5.70.

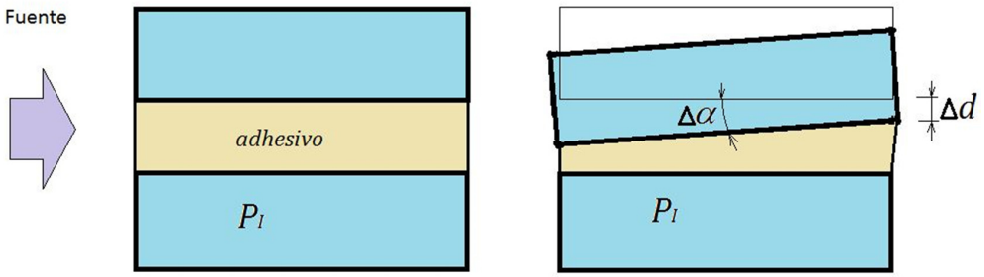


Figura 5.70: *Posible distorsión que produce la irradiación en la junta adhesiva.*

P_I *(Primera campaña de irradiación (252.3 KGy))*			
Diferencia, Valor Antes-Después irradiación	(Distancia en *mm*) (Angulo en *grados*)	Dif. Valores Promedio por probeta	Diferencias promedio de las probetas P_I
P_I-1	Dist. entre Planos	0,0012	Distancia entre planos: ***Δ_d=0,0009 mm (S_d=0,0004)*** Angulo entre planos en YZ ***Δ_α=-0,0011˚ (S_α=0,0022)***
	Angulo YZ	-0,0034	
P_I-2	Dist. entre Planos	0,0012	
	Angulo YZ	0,0004	
P_I-3	Dist. entre Planos	0,0011	
	Angulo YZ	0,0026	
P_I-4	Dist. entre Planos	0,0015	
	Angulo YZ	-0,0009	
P_I-5	Dist. entre Planos	0,0006	
	Angulo YZ	0,0003	
P_I-6	Dist. entre Planos	0,0005	
	Angulo YZ	-0,0054	
P_I-7	Dist. entre Planos	0,0002	
	Angulo YZ	-0,0017	
P_I-8	Dist. entre Planos	0,0009	
	Angulo YZ	0,0004	
P_I-9	Dist. entre Planos	0,0010	
	Angulo YZ	-0,0021	
P_I-10	Dist. entre Planos	0,0006	
	Angulo YZ	-0,0013	

Tabla 5.27: *Resultados de la estabilidad dimensional de las probetas P_I, tras la primera campaña de irradiación. Mostrando los valores medios de las variaciones angulares y de distancia, y las deviaciones estándar, que se obtienen de la evaluación de los planos de referencia tomados sobre las probetas, antes y después de la irradiación.*

Aunque esta variación angular se produjera por el gradiente de irradiación, el efecto no sería importante para los componentes más críticos (colimadores y óptica) del sistema LINK en CMS, ya que las juntas adhesivas que se utilizan para fijar estos elementos se ubican perpendicularmente a la irradiación, por lo que todo el adhesivo de la junta se irradiaría de forma uniforme, evitándose este efecto.

P_{II} *(primera Campaña de irradiación)*			
Probeta	*Dosis (KGy)*	Δ_d *(mm)*	Δ_α= *(grados)*
P_{II}-1	303.1	0,0002	-0,0005
P_{II}-2	303.1	0,0002	-0,0010
P_{II}-3	303.1	0,0025	-0,0053

P_{II}-4	303.1	-0,0005	0,0002
P_{II}-5	303.1	-0,0003	0,0007
P_{II}-6	303.1	0,0007	-0,0031
P_{II}-7	303.1	-0,0002	0,0000
P_{II}-8	303.1	-0,0002	0,0022
P_{II}-9	303.1	-0,0002	-0,0001
P_{II}-10	303.1	-0,0008	-0,0001
P_{II}-11	303.1	0,0003	0,0023
P_{II}-12	303.1	-0,0003	0,0019
Media		0,0001	-0,0002
Desviación Estándar		0,0009	0,0022

Probeta	*Dosis (KGy)*	Δ_d *(mm)*	Δ_α= *(grados)*
P_{II}-13	100	0,0012	-0,0008
P_{II}-14	100	0,0000	-0,0012
P_{II}-15	100	-0,0017	0,0043
P_{II}-16	100	-0,0001	-0,0010
P_{II}-17	100	0,0005	0,0040
P_{II}-18	100	0,0002	0,0000
P_{II}-19	100	-0,0008	0,0034
P_{II}-20	100	0,0011	0,0010
P_{II}-21	100	0,0001	-0,0013
P_{II}-22	100	-0,0001	0,0004
P_{II}-23	100	0,0006	0,0024
P_{II}-24	100	0,0004	0,0011
Media		0,0001	0,0010
Desviación Estándar		0,0008	0,0020

Probeta	*Dosis (KGy)*	Δ_d *(mm)*	Δ_α= *(grados)*
P_{II}-25	50	0,0001	-0,0004
P_{II}-26	50	-0,0006	0,0021
P_{II}-27	50	-0,0003	0,0007
P_{II}-28	50	-0,0005	0,0005
P_{II}-29	50	0,0000	-0,0002
P_{II}-30	50	0,0003	0,0001
P_{II}-31	50	-0,0005	0,0010
P_{II}-32	50	-0,0002	0,0008
P_{II}-33	50	-0,0002	-0,0004
P_{II}-34	50	0,0007	-0,0031
P_{II}-35	50	0,0001	-0,0004
P_{II}-36	50	-0,0007	0,0018
Media		-0,0002	0,0002
Desviación Estándar		0,0004	0,0013

Probeta	*Dosis (KGy)*	Δ_d *(mm)*	Δ_α= *(grados)*
P_{II}-37	10	-0,0013	0,0017
P_{II}-38	10	-0,0002	0,0005
P_{II}-39	10	-0,0005	0,0034
P_{II}-40	10	0,0001	-0,0009
P_{II}-41	10	-0,0001	0,0006
P_{II}-42	10	0,0000	-0,0008
P_{II}-43	10	0,0006	-0,0020
P_{II}-44	10	-0,0002	-0,0010
P_{II}-45	10	-0,0004	0,0010
P_{II}-46	10	-0,0004	0,0010
P_{II}-47	10	-0,0002	-0,0007
P_{II}-48	10	-0,0003	0,0019
Media		-0,0002	0,0004
Desviación Estándar		0,0004	0,0015
Probeta	*Dosis (KGy)*	Δ_d *(mm)*	Δ_α= *(grados)*
P_{II}-49	0	-0,0001	0,0005
P_{II}-50	0	-0,0004	0,0012
P_{II}-51	0	-0,0003	0,0007
P_{II}-52	0	0,0000	0,0030
P_{II}-53	0	-0,0006	-0,0007
P_{II}-54	0	0,0003	0,0006
P_{II}-55	0	0,0001	0,0003
P_{II}-56	0	0,0000	0,0009
P_{II}-57	0	0,0003	0,0014
P_{II}-58	0	-0,0004	-0,0007
P_{II}-59	0	0,0000	-0,0003
P_{II}-60	0	-0,0001	0,0004
P_{II}-61	0	-0,0003	-0,0012
P_{II}-62	0	-0,0019	0,0055
P_{II}-63	0	-0,0001	0,0006
P_{II}-64	0	-0,0003	-0,0018
Media		-0,0002	0,0009
Desviación Estándar		0,0005	0,0016

Tabla 5.28: *Resultados de la estabilidad dimensional de las probetas P_{II}, tras la primera campaña de irradiación. Mostrando los valores medios de las variaciones angulares y de distancia, y las deviaciones estándar, que se obtienen de la evaluación de los planos de referencia tomados sobre las probetas, antes y después de la irradiación.*

En la tabla 5.28 se muestran los resultados de estabilidad relativos a las probetas P_{II}, frente a la irradiación. Estos se resumen en la figura 5.71, donde no se puede apreciar la misma tendencia de comportamiento frente a la radiación, ya que los valores de desplazamiento y ángulos mostrados, así como sus desviaciones estándar, son similares en las probetas irradiadas y sin irradiar. Excepto en el caso de las probetas P_{II} que han sido irradiadas a un nivel de dosis apreciable (100 KGy y 303,1 KGy), en este caso se aprecia una muy ligera reducción de espesor en ambos tipos, y un giro angular del mismo sentido que el observado sobre las P_I, con las probetas P_{II} irradiadas a 100 KGy, respecto a la posición de las fuentes de irradiación, aunque no se observa lo mismo con las irradiadas a 303,1 KGy. Este tipo de deformación podría ser un fenómeno similar al que se muestra en la figura 5.70, para las P_I.

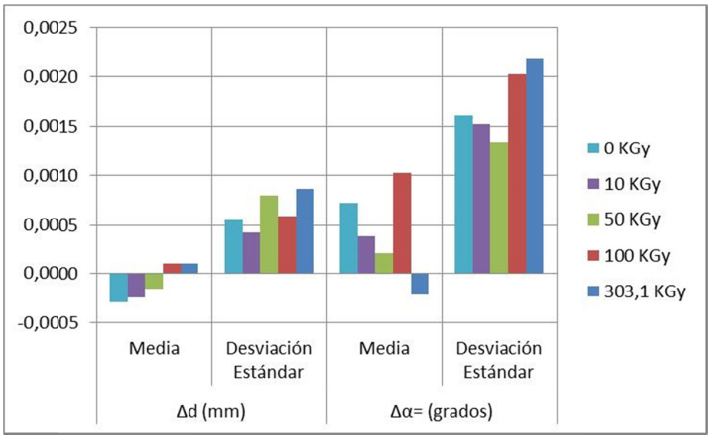


Figura 5.71: *Estabilidad dimensional de las probetas P_{II}, tras la primera campaña de irradiación.*

Puesto que las desviaciones estándar para los resultados obtenidos con las probetas P_{II}, poseen valores relativamente grandes respecto a los valores medios, sus resultados son compatibles con los resultados obtenidos para las P_I, e incluso con la ausencia de movimientos en la junta adhesiva de la probeta. Las probetas P_I, como se ha explicado, dan mejores precisiones en los resultados que las P_{II}, por lo que es posible que se haya producido el fenómeno representado en la figura 5.70. En los siguientes puntos se intenta estudiar esta posibilidad, pero hay que tener presente que este efecto de cambio angular de los sustratos con la irradiación, había sido observado con los adhesivos ópticos que han sido estudiados para realizar uniones entre los dispositivos del sistema LINK, y cuyos resultados se han mostrado en el capítulo 4 [204], para niveles de irradiación similares a los estudiados en este punto.

5.9.4. Estabilidad frente a humedad.

Una vez terminado el proceso de irradiación sobre las probetas, estas han permanecido estabilizándose durante una semana, en condiciones ambientales controladas (Figura 5.59). A continuación, se ha realizado un control dimensional sobre las probetas P_I y P_{II}, siendo estos valores la referencia para el estudio de la estabilidad frente a humedad.

Inmediatamente después, se han introducido en una cámara climática las probetas P_I de los números 1 al 5, y P_{II} de los números 1 al 6 y del 49 al 56, donde han permanecido durante una semana, sometidas a unas condiciones de 26ºC y 90% RH. Dejando en el exterior, como referencia, las probetas P_I de los números 6 al 10, y P_{II} de los números 7 al 12 y del 57 al 64. Pasado ese tiempo, se han sacado de la cámara climática, y seguidamente se ha vuelto a realizar un control dimensional a todas estas probetas. Comparando estos últimos valores con los resultados previos, se obtienen los resultados que aparecen en la tabla 5.29, para las probetas P_I y 5.30 para las probetas P_{II}.

P_I *(Probetas sometidas a 26˚C y 90% RH)*			
Diferencia Valor Antes-Después Cámara climática	(Distancia en *mm*) (Angulo en *grados*)	Dif. Valores Promedio por probeta	Diferencias promedio de las probetas P_I
P_I-*1*	Dist. entre Planos	-0,0028	***Cámara climática:*** Distancia entre planos: ***Δ_d= -0,0021 mm*** ***(S_d= 0,0005)*** Angulo entre planos en YZ: ***Δ_α= -0,0008˚*** ***(S_α= 0,0018)***
	Angulo YZ	-0,0001	
P_I-*2*	Dist. entre Planos	-0,0018	
	Angulo YZ	-0,0002	
P_I-*3*	Dist. entre Planos	-0,0024	
	Angulo YZ	-0,0008	
P_I-*4*	Dist. entre Planos	-0,0016	
	Angulo YZ	0,0009	
P_I-*5*	Dist. entre Planos	-0,0021	
	Angulo YZ	-0,0038	
P_I-*6*	Dist. entre Planos	0,0002	***Referencia (no sometidas a cámara)***: Distancia entre planos: ***Δ_d= -0,0008mm*** ***(S_d= 0,0008)*** Angulo entre planos en YZ: ***Δ_α= 0,0008˚*** ***(S_α= 0,0032)***
	Angulo YZ	0,0053	
P_I-*7*	Dist. entre Planos	-0,0006	
	Angulo YZ	0,0012	
P_I-*8*	Dist. entre Planos	-0,0008	
	Angulo YZ	-0,0007	
P_I-*9*	Dist. entre Planos	-0,0019	
	Angulo YZ	-0,0034	
P_I-*10*	Dist. entre Planos	-0,0010	
	Angulo YZ	0,0015	

Tabla 5.29: *Resultados de la estabilidad dimensional de las probetas P_I, frente a la humedad ambiental, tras la primera campaña de irradiación. Mostrando los valores medios de las variaciones angulares y de distancia, y sus deviaciones estándar. Estos se obtienen de la evaluación de los planos de referencia tomados sobre las probetas, antes y después de ser introducidas en la cámara climática.*

P_{II} (Probetas a 26 C y 90% RH)			
Probetas introducidas en cámara climática			
Prob.	Dosis (KGy)	Δ_d (mm)	Δ_α= (grados)
P_{II}-1	303.1	0,0007	-0,0045
P_{II}-2	303.1	0,0011	-0,0071
P_{II}-3	303.1	0,0000	-0,0021
P_{II}-4	303.1	-0,0004	-0,0014
P_{II}-5	303.1	0,0009	-0,0008
P_{II}-6	303.1	-0,0002	0,0005
Media		0,0004	-0,0026
Desviación Estándar		0,0006	0,0028
Probetas referencia, no introducidas en cámara climática			
Prob.	Dosis (KGy)	Δ_d (mm)	Δ_α= (grados)
P_{II}-7	303.1	-0,0001	0,0000
P_{II}-8	303.1	0,0000	-0,0057
P_{II}-9	303.1	0,0000	0,0007
P_{II}-10	303.1	0,0002	-0,0012
P_{II}-11	303.1	-0,0003	-0,0012
P_{II}-12	303.1	-0,0002	-0,0005
Media		-0,0001	-0,0013
Desviación Estándar		0,0002	0,0022
Probetas introducidas en cámara climática			
Prob.	Dosis (KGy)	Δ_d (mm)	Δ_α= (grados)
P_{II}-49	0	0,0006	-0,0001
P_{II}-50	0	0,0011	0,0036
P_{II}-51	0	0,0014	-0,0077
P_{II}-52	0	0,0004	-0,0058
P_{II}-53	0	0,0008	0,0014
P_{II}-54	0	0,0001	-0,0025
P_{II}-55	0	0,0000	0,0000
P_{II}-56	0	0,0001	0,0003
Media		0,0006	-0,0014
Desviación Estándar		0,0005	0,0037
Probetas referencia, no introducidas en cámara climática			
Prob.	Dosis (KGy)	Δ_d (mm)	Δ_α= (grados)
P_{II}-57	0	0,0000	-0,0005
P_{II}-58	0	-0,0001	-0,0001
P_{II}-59	0	0,0001	0,0006
P_{II}-60	0	-0,0001	-0,0012
P_{II}-61	0	0,0004	0,0018
P_{II}-62	0	0,0005	-0,0026

P_{II}-63	0	0,0003	-0,0008
P_{II}-64	0	-0,0004	-0,0011
Media		0,0001	-0,0005
Desviación Estándar		0,0003	0,0013

Tabla 5.30: *Resultados de la estabilidad dimensional de las probetas P_{II}, frente a la humedad ambiental, tras la primera campaña de irradiación. Mostrando los valores medios de las variaciones angulares y de distancia, y sus desviaciones estándar. Estos valores se obtienen de la evaluación de los planos de referencia tomados sobre las probetas, antes y después de ser introducidas en la cámara climática.*

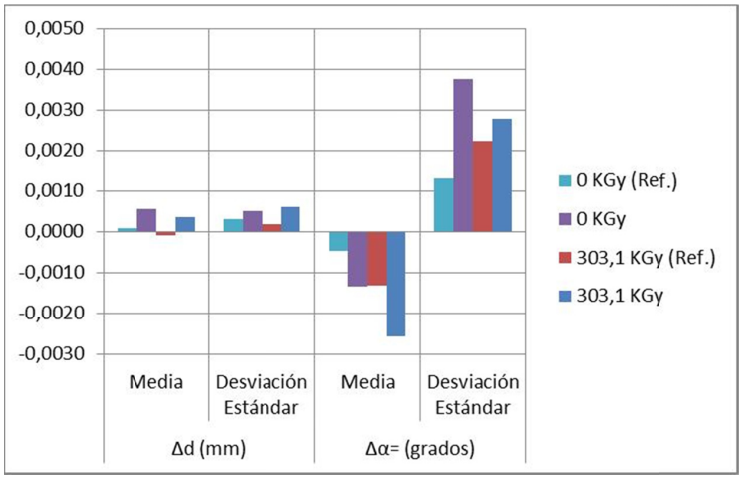


Figura 5.72: *Comparativa de la estabilidad dimensional de las probetas P_{II}, sometidas a una humedad del 90%RH y 26ºC durante una semana, respecto a las de referencia en condiciones ambientales normales.*

De los resultados de la tabla 5.29, se desprende que en las probetas P_I se ha producido una expansión de unos 2 µm en la junta adhesiva, por la absorción de humedad, respecto al control dimensional realizado justo antes de ser introducidas en la cámara climática. De igual forma se observa ese incremento de espesor en la figura 5.72, para las probetas P_{II}, respecto a las probetas de referencia, que habían permanecido en condiciones controladas, fuera de la cámara. También se observa, para ambos tipos de probeta, la posibilidad de un cambio angular, que parece estar amplificado por los efectos de la radiación.

5.9.5. Estabilidad tras la segunda campaña de irradiación.

En esta fase, se procedió a irradiar las probetas tipo P_I, de los números 1 al 5, con una dosis muy alta de 1937,93 KGy. Dejando como referencia las probetas tipo P_I, con números del 6 al 10. Las probetas permanecieron unas 4 semanas estabilizándose, desde la última fase en la que fueron sometidas a la cámara climática, antes de ser sometidas a esta segunda campaña de irradiación. Tras

la segunda campaña de irradiación, las probetas P_I han permanecido estabilizándose durante más de dos semanas, antes de proceder a realizar sobre ellas un nuevo control dimensional.

P_I (Segunda campaña de irradiación (1937,93 KGy))			
Diferencia, Valor 1ª Camp. -Después 2ª Campaña.	(Distancia en *mm*) (Angulo en *grados*)	Dif. Valores Promedio por probeta	Diferencias promedio de las probetas P_I
P_I-1	Dist. entre Planos	-0,0016	***Irradiadas adicionalmente:*** Distancia entre planos: ***Δ_d= -0,0017mm (S_d= 0,0006)*** Angulo entre planos en YZ: ***Δ_α= 0,0008° (S_α= 0,0026)***
	Angulo YZ	0,0036	
P_I-2	Dist. entre Planos	-0,0022	
	Angulo YZ	0,0001	
P_I-3	Dist. entre Planos	-0,0008	
	Angulo YZ	-0,0015	
P_I-4	Dist. entre Planos	-0,0022	
	Angulo YZ	-0,0017	
P_I-5	Dist. entre Planos	-0,0017	
	Angulo YZ	0,0036	
P_I-6	Dist. entre Planos	0,0010	***Referencia (no sometidas a nueva irradiación)***: Distancia entre planos: ***Δ_d= 0,0002 mm (S_d= 0,0007)*** Angulo entre planos en YZ: ***Δ_α= 0,0015° (S_α= 0,0022)***
	Angulo YZ	0,0033	
P_I-7	Dist. entre Planos	0,0008	
	Angulo YZ	-0,0008	
P_I-8	Dist. entre Planos	0,0000	
	Angulo YZ	-0,0008	
P_I-9	Dist. entre Planos	-0,0002	
	Angulo YZ	0,0040	
P_I-10	Dist. entre Planos	-0,0006	
	Angulo YZ	0,0019	

Tabla 5.31: *Resultados de la estabilidad dimensional de las probetas P_I, tras la segunda campaña de irradiación. Mostrando los valores medios de las variaciones angulares y de distancia, y sus desviaciones estándar. Estos se obtienen de la evaluación de los planos de referencia tomados sobre las probetas, antes y después de esta irradiación.*

De los resultados de la tabla 5.31, se desprende que en las probetas P_I se ha producido un aumento de espesor de la junta cercano a los 2 µm, supuestamente producido por la irradiación de la segunda campaña, respecto al control dimensional que se había realizado previamente, después de la primera campaña de irradiación. Esta posibilidad está apoyada con los resultados mostrados para las probetas de referencia, donde no se aprecia cambio de espesor.

5.9.6. Estabilidad temporal.

Para analizar la estabilidad temporal, las probetas han permanecido en condiciones ambientales normales durante varios meses, con el motivo de evitar una repetición de condiciones estacionales y se han sometido ocasionalmente en este período, a las solicitaciones que han sido detalladas en los puntos precedentes. Durante este tiempo, se ha realizado un control dimensional de las probetas ensayadas en diferentes momentos, y con los valores obtenidos de este estudio, se obtiene el resultado de estabilidad de la unión adhesiva en función de los cambios ambientales estacionales, para las probetas irradiadas y sin irradiar. Los resultados de este estudio se muestran en las siguientes gráficas, en estas se compara el control dimensional realizado a las probetas de referencia, llevado a cabo una semana después de proceder al pegado de las probetas, respecto al control realizado una vez sometidas a cada uno de los supuestos anteriores, o al control dimensional realizado con las probetas que permanecían como referencia:

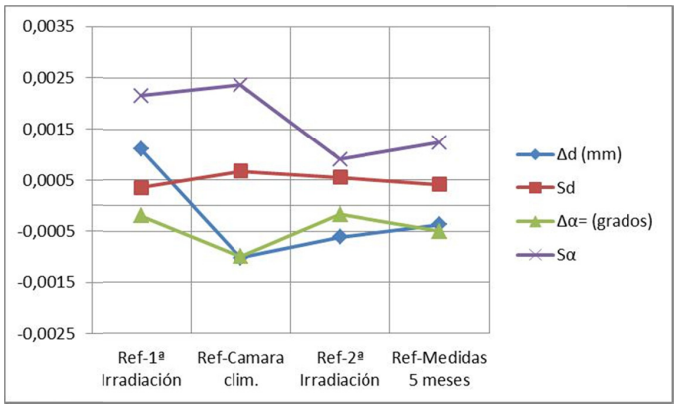


Figura 5.73: *Estabilidad dimensional temporal de la junta adhesiva para las probetas P_I-1 hasta P_I-5.*

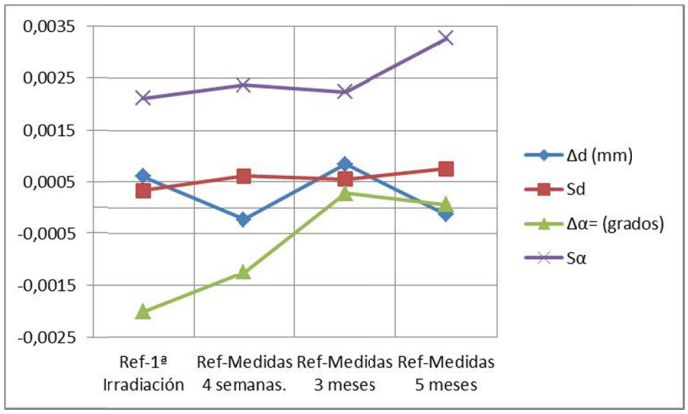


Figura 5.74: *Estabilidad dimensional temporal de la junta adhesiva para las probetas P_I-6 hasta P_I-10. Son las probetas de referencia de las P_I-6 hasta P_I-10.*

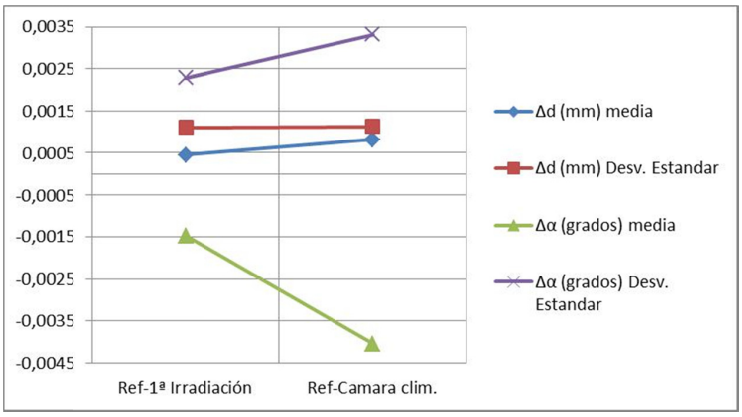


Figura 5.75A: *Estabilidad dimensional temporal de la junta adhesiva para las probetas P_{II}-1 hasta P_{II}-6.*

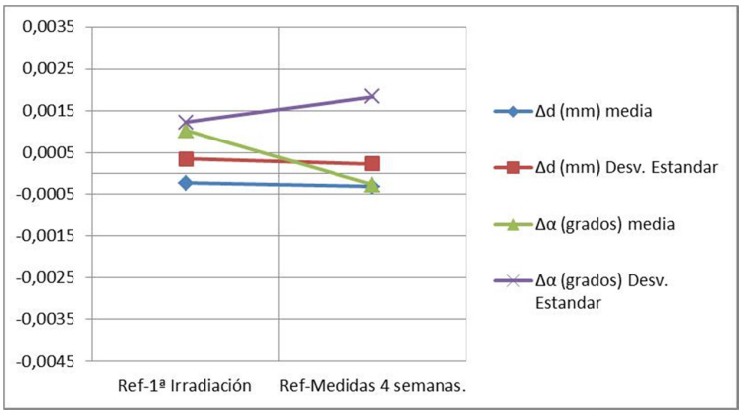


Figura 5.75B: *Estabilidad dimensional temporal de la junta adhesiva para las probetas P_{II}-7 hasta P_{II}-12. Son las probetas de referencia de las P_{II}-1 hasta P_{II}-6.*

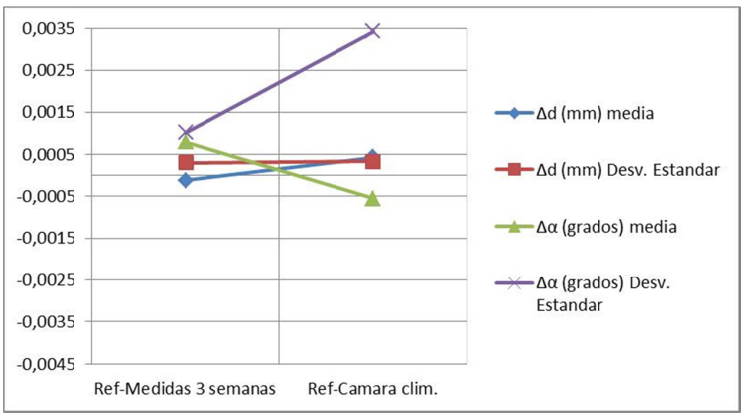


Figura 5.75C: *Estabilidad dimensional temporal de la junta adhesiva para las probetas P_{II}-49 hasta P_{II}-56.*

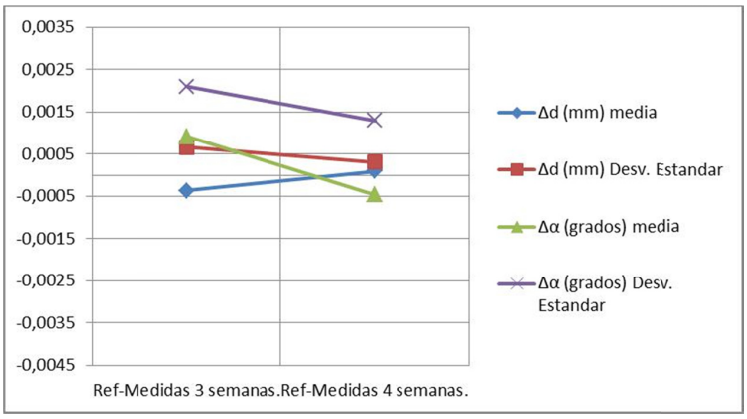


Figura 5.75D: *Estabilidad dimensional temporal de la junta adhesiva para las probetas P_{II}-57 hasta P_{II}-64. Son las probetas de referencia de las P_{II}-49 hasta P_{II}-56.*

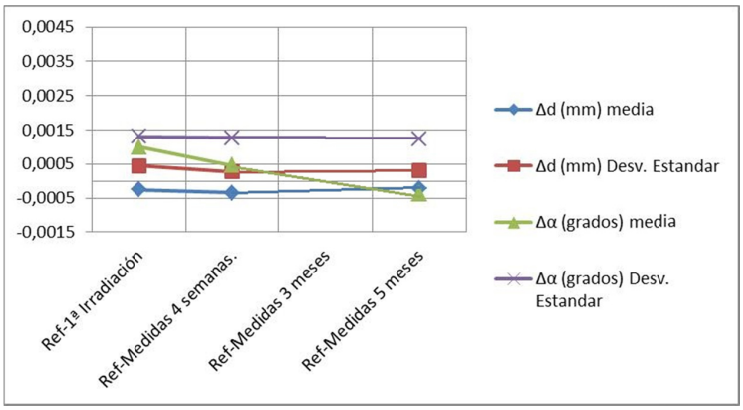


Figura 5.75E: *Estabilidad dimensional de la junta adhesiva para las probetas P_{II}-9 hasta P_{II}-12.*

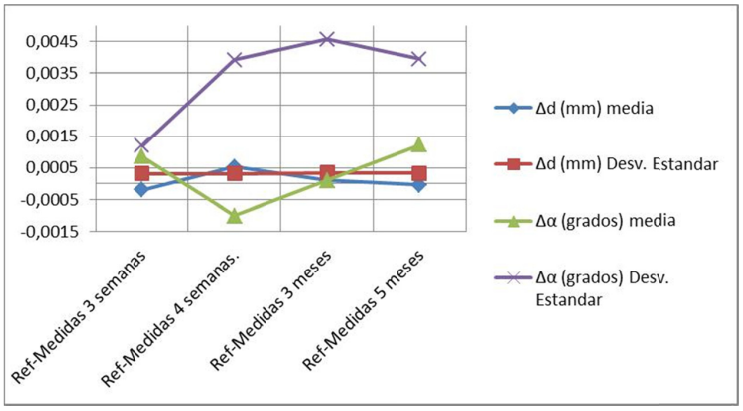


Figura 5.75F: *Estabilidad dimensional de la junta adhesiva para las probetas P_{II}-49 hasta P_{II}-54.*

En las figuras 5.73 y 5.74 se observa la estabilidad de la junta adhesiva, estimada sobre las probetas P_I. Las medidas realizadas con estas probetas han sido llevadas a cabo: una semana después de terminar la primera irradiación, tras la permanencia de estas en la cámara climática (o el control sobre las probetas de referencia) realizada una semana después del control anterior, tras la segunda irradiación (o el control de las de referencia) realizadas unos dos meses y medio más tarde y por último una medida de estabilidad realizada pasados otros dos meses. De estos datos se puede concluir que las variaciones máximas observadas, respecto a la situación inicial, estarán en torno a 1 µm para cambios de espesor del adhesivo y ~35 µrad para las rotaciones de las piezas que forman los sustratos, en cualquiera de las situaciones a las que se ha sometido la junta.

La estimación de la estabilidad sobre las probetas P_{II} se muestra en la serie de figuras 5.75. Las medidas realizadas con estas probetas, en la mayoría de los casos no han podido abarcar el mismo período de tiempo que las anteriores, puesto que son probetas que se rompen durante los ensayos de impacto, lo que da lugar a que las medidas de estabilidad que se muestran para estas probetas, son en general más limitadas en el tiempo. Los controles dimensionales que se han realizado sobre estas son: una semana después de terminar la primera irradiación (o el control de las probetas de referencia) realizado unas tres semanas de las primeras medidas realizadas como referencia sobre todas las probetas, a la salida de la cámara climática (o el control de las de referencia) realizada una semana después de las anteriores, una medida de estabilidad pasados unos dos meses y medio y por último otra medida de estabilidad pasados otros dos meses más. De estos controles dimensionales se puede concluir que las variaciones máximas observadas, respecto a la situación inicial, estarán por debajo de 1 µm en cambios de espesor del adhesivo y ~25 µrad (excepto el grupo de probetas P_{II}-*1* hasta P_{II}-*6*, a su salida de la cámara climática, que llega a las 60 µrad) para rotaciones de las piezas que forman los sustratos, en cualquiera de las situaciones a las que se ha sometido la junta.

De estos datos no se puede concluir que se produzca una distorsión de la junta, puesto que los valores que se obtienen están dentro de la incertidumbre de la medida realizada, aunque se puede apreciar una ligera tendencia a la disminución del espesor de la junta y a cambios angulares, tras la irradiación. Además se aprecia una ligera tendencia a la recuperación de las condiciones iniciales con el paso del tiempo. De estos resultados se puede poner el límite de distorsión al que puede llegar a verse sometida la junta adhesiva, por la combinación de los cambios estacionales y las dosis de radiación absorbidas por las juntas adhesivas; este límite es ~1 µm al referirnos a posibles cambios de espesor del adhesivo y ~35 µrad en las rotaciones que se pueden producir entre las piezas que forman los sustratos. Como se ha ido explicando a través de los capítulos precedentes de este estudio, estos valores límites estarían dentro de las cantidades permisibles para el correcto funcionamiento del sistema de alineación LINK de CMS, y cuya estabilidad de funcionamiento se muestra en el siguiente capítulo.

5.10. Ensayo de impacto sobre las probetas.

Para realizar el estudio de la resistencia de la junta adhesiva frente a impacto, se han desarrollado dos campañas de ensayos, en las que se han estudiado las probetas P_{II} y P_{II}', sobre una máquina de tipo péndulo INSTRON IMPACTOR II (CEAST 9050) [254], según el procedimiento descrito en el apartado 5.2.7.2.1. El ensayo está basado en la norma UNE-EN ISO 9653, equivalente a la ASTM D950. Para ensayar las probetas Izod mediante la instrumentación de ensayos Charpy disponible en el laboratorio del departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales, de la Universidad de Cantabria, se ha colocado un útil de adaptación (figura 5.46) sobre lamáquina (figura 5.76).

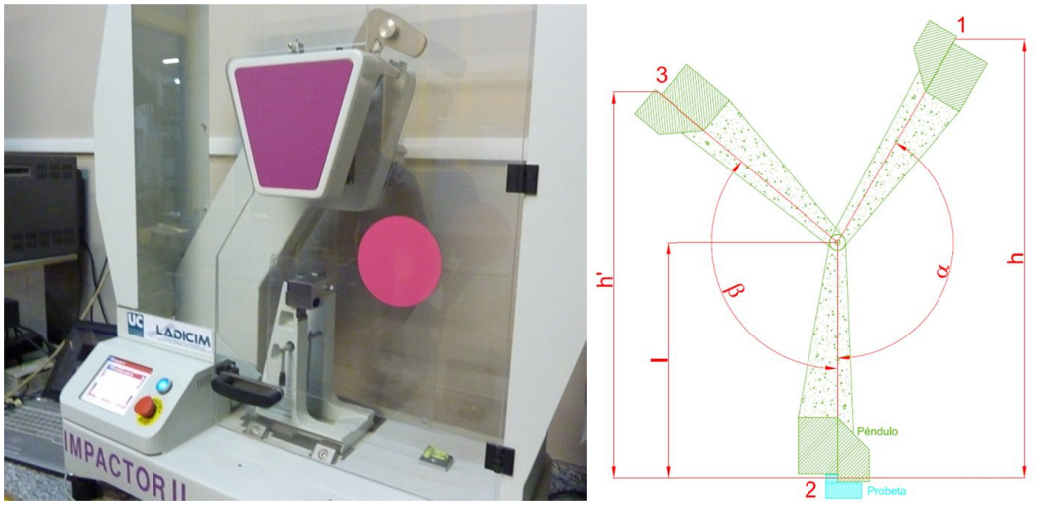


Figura 5.76: *Máquina de ensayo de impacto utilizada, con el utillaje de adaptación a las probetas P_{II} y P_{II}' instalado (Izq.). Fundamento del ensayo Izod (Der.).*

El fundamento de una máquina de ensayos de tipo péndulo es muy simple (Figura 5.76 (Der.)): consiste en hacer descender un péndulo situado en la posición de inicio 1, a una altura *h*, sobre una probeta situada en la parte baja de la trayectoria del péndulo, alcanzando en este punto 2 su velocidad máxima, al convertir su energía potencial en cinética. Al interaccionar con la probeta se gasta una cierta cantidad de energía para romperla. El péndulo continúa su trayectoria hasta el punto 3, situado a una altura *h'*, menor que la anterior. La energía empleada en romper la probeta E_S se obtiene de la diferencia entre la energía potencial que tenía el péndulo antes de comenzar su descenso y el remanente después de romper la probeta, y cuyo valor se obtiene de la expresión (5.27).

$$E_S = m \times g \times (h - h') \qquad (5.27)$$

donde m es la masa del péndulo, g la aceleración de la gravedad, h y h' se obtienen de,

$$h = l - l \times \cos \propto \quad (5.27.1)$$

$$h' = l - l \times \cos \beta \quad (5.27.2)$$

siendo l la longitud del péndulo.

De modo que la energía utilizada en el impacto sin instrumentar (E_S):

$$E_s = m \times g \times (\cos \beta - \cos \propto) \quad (5.28)$$

La velocidad de impacto no instrumentada V_S, que adquiere el péndulo en el punto más bajo de su trayectoria se obtiene mediante la expresión:

$$V_s = \sqrt{2 \times g \times h} \quad (5.29)$$

Con el valor de la energía absorbida por la probeta, dividido entre la superficie de rotura de la misma, se obtiene la resistencia al impacto Izod de este tipo de junta adhesiva, en J/m^2. Según la norma, no dispone de la suficiente estadística entre laboratorios como para poder asignar una precisión a este método y no son extrapolables los resultados de este ensayo a otro donde se modifiquen las condiciones, como puede ser por ejemplo cambiar las dimensiones de las probetas utilizadas.

Para la realización de los ensayos se ha utilizado la disposición instrumentada de la máquina de impacto, de esta forma se obtiene información adicional sobre cada probeta ensayada: Fuerza instantánea aplicada, deformación provocada sobre la probeta en cada momento, velocidad que lleva el péndulo en cada posición y la energía integrada en cada momento del ensayo.

De la información disponible, además de la energía no instrumentada, se va a estudiar la curva Fuerza-Tiempo, para extraer de ella la fuerza máxima en el momento de la rotura, así como el momento en que se inicia el aumento de la fuerza aplicada y la anchura de la curva alrededor del pico máximo, que se presenta como la deformación en rotura. Los resultados de estos parámetros se presentan en función de la dosis de radiación a que se ha sometido el material.

La energía instrumentada E_i, es la energía consumida en acelerar, deformar y romper la probeta. Su valor se define cómo el área bajo la curva Fuerza-Deformación.

$$E_i = \int F(\varepsilon) \times d\varepsilon \quad (5.30)$$

siendo ε el desplazamiento que realiza el martillo respecto al soporte de la probeta. La deformación en la probeta se obtiene mediante,

$$\varepsilon_i = \iint \frac{F(t)}{m} \times d^2 t \quad (5.31)$$

y la velocidad de deformación instrumentada v_i se calcula a través de la expresión,

$$v_i = \int \frac{F(t)}{m} \times dt \qquad (5.32)$$

siendo $F(t)$, la fuerza aplicada en cada momento t sobre la probeta.

En los resultados del ensayo que se ha llevado a cabo sobre cada probeta, se acompaña al valor de la energía de rotura de cada probeta (E): el espesor de la junta adhesiva (e), la fuerza máxima de rotura (F_{max}), momento en que comienza la aplicación de la fuerza sobre la probeta (t_i), deformación en rotura (ε_r), dosis de irradiación recibida (Irr), el tratamiento superficial utilizado en los sustratos (T_S) y % de adhesivo que ha quedado adherido a la pieza 'base' de cada probeta ($\%_b$). Este último parámetro se calcula mediante el tratamiento de las imágenes tomadas a las superficies despegadas de las probetas ensayadas; para sacar el porcentaje se selecciona el área de adhesivo que ha quedado pegada a la superficie de la pieza y se divide por la superficie total de la unión adhesiva (Figura 5.77).

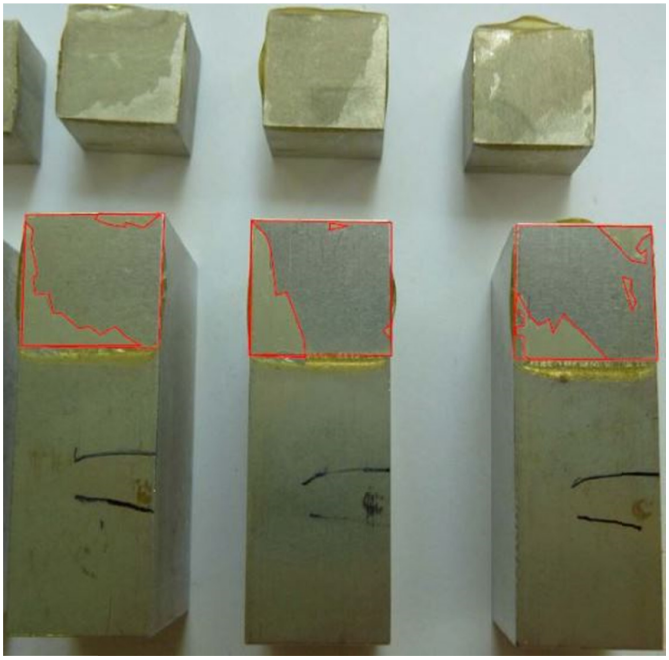


Figura 5.77: *Selección del área de adhesivo que ha quedado pegada a la superficie de la pieza 'base', mediante tratamiento de imágenes, en las probetas P_{II}, números 6, 7 y 8.*

Para evitar provocar fisuras en el adhesivo curado, durante la preparación de las probetas P_{II} y P_{II}', no se ha eliminado el adhesivo sobrante de estas probetas después del curado, permaneciendo este en la esquina de unión de ambas piezas (Figura 5.78) sobre la cara de impacto. Por ello las probetas presentan un pequeño chaflán en la unión de la pieza 'tapa' y 'base', lo que supone que este borde va a estar sometido durante el ensayo a una menor

concentración de tensiones de la que tendría si este se hubiera eliminado, según lo que se ha expuesto en el punto 5.2 de este capítulo.

5.10.1. Primera campaña de ensayos.

En esta campaña se han ensayado una serie de probetas P_{II}, pertenecientes a los grupos de irradiación de la primera tanda de irradiaciones desarrollada [258]. En un primer momento iban a ser ensayadas todas las probetas P_{II} de los números 1 al 64, utilizando las 12 probetas que se habían seleccionado para cada uno de los grupos creados; estas fueron previamente irradiadas a los distintos niveles previstos, y otras 16 probetas se prepararon para obtener las condiciones de la junta sin irradiar. Pero se observó que los valores que se habían obtenido eran bastante homogéneos, por tanto se decidió limitar el número de probetas a ensayar de cada nivel de irradiación a unas 8. Finalmente, las probetas que se han utilizado durante esta primera campaña han sido las numeradas del 1 al 8, 13 al 20, 25 al 32, 37 (rompió defectuosamente), 38 al 45 y 55 al 64.

Los ensayos han sido realizados con el péndulo instrumentado de 5 J, que tiene una célula de carga capaz de detectar fuerzas de hasta ~2 KN. Durante los ensayos se ha observado, que la fuerza necesaria para producir la rotura F_{max} de las probetas está muy por encima de este límite. Por ello, las curvas Fuerza-Tiempo han resultado truncadas en ese valor, debido a la saturación de la célula de carga utilizada. A pesar de ello, los datos relativos al momento en que comienza a aplicarse la fuerza sobre la probeta t_i, en ms, y la deformación que se produce en el momento de la rotura ε_r, en mm, sí que son de utilidad para el estudio. Para solventar el problema del corte en la las curvas fuerza-tiempo, se tomó la decisión de realizar la segunda tanda de ensayos utilizando el martillo instrumentado de 50J, cuya célula de carga tiene varias veces la capacidad de la anterior, y así obtener las curvas de fuerza-tiempo completas. Además, las probetas P_{II} que no se han ensayado durante la primera campaña, van a permitir comparar los resultados de ambas campañas, en las que el martillo utilizado no ha sido el mismo y el punto de impacto sobre la cara de la probeta es ligeramente distinto; en esta primera campaña el péndulo ha impactado ligeramente inclinado respecto a la cara de impacto, sobre el lateral derecho de la probeta (Figura 5.78 (Izq.)), por este motivo se induce sobre la junta adhesiva una componente de momento adicional, que se aprecia en la superficie de rotura de las probetas (Figuras 5.77 y 5.78 (Der.)). La marca de impacto de la cuchilla del péndulo está a unos 7.5 mm de la junta adhesiva.



Figura 5.78: *Probetas P_{II}, números 25, 26 y 27, ensayadas durante la primera campaña; donde se aprecia el chaflán de adhesivo sobrante, en la esquina formada por ambas piezas de cada probeta, sobre la cara de impacto. En el lateral derecho de la cara de impacto se observa la huella descentrada dejada por el péndulo al impactar sobre las probetas (Izq.). Distribución del adhesivo en ambos sustratos tras la rotura (Der.).*

Todas las probetas P_{II}, disponían de un tratamiento superficial 'suave' en la pieza 'base' y 'normal' en la pieza 'tapa'. En la tabla 5.32 se muestran los resultados obtenidos para las probetas ensayadas, a 23º C, durante la primera campaña:

P_{II} (primera Campaña de ensayos IZOD)							
Probeta	*Dosis (KGy)*	*e (mm)*	*E (J)*	*F_{max}*	*t_i (ms)*	*ε_r (mm)*	*$\%_b$*
P_{II}-1	303,1	0,05	0,590	fallo	0,0910	0,214	1,58
P_{II}-2	303,1	0,06	0,529	fallo	0,0900	0,297	27,44
P_{II}-3	303,1	0,05	0,580	fallo	0,0900	0,325	27,41
P_{II}-4	303,1	0,06	0,604	fallo	0,0900	0,328	29,81
P_{II}-5	303,1	0,05	0,503	fallo	0,0910	0,243	3,12
P_{II}-6	303,1	0,05	0,545	fallo	0,0910	0,285	23,40
P_{II}-7	303,1	0,06	0,580	fallo	0,0910	0,313	23,50
P_{II}-8	303,1	0,05	0,550	fallo	0,0910	0,276	21,29
Media		0,05	0,560		0,0906	0,285	19,69
Desviación Estándar		0,01	0,034		0,0005	0,040	11,05
Probeta	*Dosis (KGy)*	*e (mm)*	*E (J)*	*F_{max}*	*t_i (ms)*	*ε_r (mm)*	*$\%_b$*
P_{II}-13	100	0,07	0,550	fallo	0,0920	0,234	3,12
P_{II}-14	100	0,04	0,506	fallo	0,0920	0,237	3,89
P_{II}-15	100	0,05	0,564	fallo	0,0900	0,348	6,76
P_{II}-16	100	0,04	0,545	fallo	0,0910	0,262	19,17
P_{II}-17	100	0,05	0,642	fallo	0,0900	0,281	18,97
P_{II}-18	100	0,05	0,532	fallo	0,0910	0,274	19,21
P_{II}-19	100	0,06	0,547	fallo	0,0910	0,282	27,62
P_{II}-20	100	0,06	0,534	fallo	0,0920	0,279	28,06
Media		0,05	0,553		0,0911	0,275	15,85
Desviación Estándar		0,01	0,040		0,0008	0,035	10,05

Tabla 5.32A: *Resultados obtenidos en la primera campaña de ensayos, con las probetas P_{II}, a 23º C. Para dosis de 303,1 KGy y 100 KGy.*

P_{II} (primera Campaña de ensayos IZOD)							
Probeta	Dosis (KGy)	e (mm)	E (J)	F_{max}	t_i (ms)	ε_r (mm)	$\%_b$
P_{II}-25	50	0,06	0,506	fallo	0,0910	0,277	16,08
P_{II}-26	50	0,04	0,558	fallo	0,0900	0,299	25,35
P_{II}-27	50	0,06	0,606	fallo	0,0900	0,327	29,41
P_{II}-28	50	0,05	0,513	fallo	0,0910	0,251	11,25
P_{II}-29	50	0,04	0,513	fallo	0,0920	0,225	6,61
P_{II}-30	50	0,04	0,526	fallo	0,0910	0,239	7,81
P_{II}-31	50	0,06	0,529	fallo	0,0910	0,271	24,92
P_{II}-32	50	0,04	0,490	fallo	0,0910	0,237	15,48
Media		0,05	0,530		0,0909	0,266	17,11
Desviación Estándar		0,01	0,037		0,0006	0,035	8,58
Probeta	Dosis (KGy)	e (mm)	E (J)	F_{max}	t_i (ms)	ε_r (mm)	$\%_b$
P_{II}-37	10	0,04	fallo	fallo	fallo	fallo	fallo
P_{II}-38	10	0,04	0,564	fallo	0,0900	0,260	22,32
P_{II}-39	10	0,05	0,477	fallo	0,0910	0,223	8,28
P_{II}-40	10	0,04	0,564	fallo	0,0910	0,276	31,45
P_{II}-41	10	0,04	0,524	fallo	0,0910	0,242	3,43
P_{II}-42	10	0,03	0,561	fallo	0,0910	0,273	16,16
P_{II}-43	10	0,03	0,534	fallo	0,0930	0,216	3,31
P_{II}-44	10	0,04	0,540	fallo	0,0930	0,222	2,53
P_{II}-45	10	0,07	0,625	fallo	0,0900	0,302	18,68
Media		0,04	0,549		0,0913	0,252	13,27
Desviación Estándar		0,01	0,042		0,0012	0,031	10,60
Probeta	Dosis (KGy)	e (mm)	E (J)	F_{max}	t_i (ms)	ε_r (mm)	$\%_b$
P_{II}-55	0	0,06	0,609	fallo	0,0910	0,265	15,11
P_{II}-56	0	0,05	0,631	fallo	0,0900	0,313	31,75
P_{II}-57	0	0,11	0,590	fallo	0,0910	0,282	18,11
P_{II}-58	0	0,05	0,516	fallo	0,0910	0,239	10,42
P_{II}-59	0	0,04	0,553	fallo	0,0890	0,297	14,30
P_{II}-60	0	0,05	0,566	fallo	0.0910	0,302	28,34
P_{II}-61	0	0,05	0,580	fallo	0,0900	0,310	26,74
P_{II}-62	0	0,04	0,392	fallo	0,0890	0,203	16,60
P_{II}-63	0	0,07	0,457	fallo	0,0920	0,228	10,45
P_{II}-64	0	0,06	0,508	fallo	0,0920	0,222	7,75
Media		0,06	0,540		0,0906	0,266	17,96
Desviación Estándar		0,02	0,073		0,0011	0,040	8,27

Tabla 5.32B: *Resultados obtenidos en la primera campaña de ensayos, con las probetas P_{II}, a 23º C. Para dosis de 50 KGy, 10 KGy y sin irradiar.*

A continuación, en la figura 5.79 se muestran gráficamente estos resultados, agrupando las probetas por grupos de irradiación:

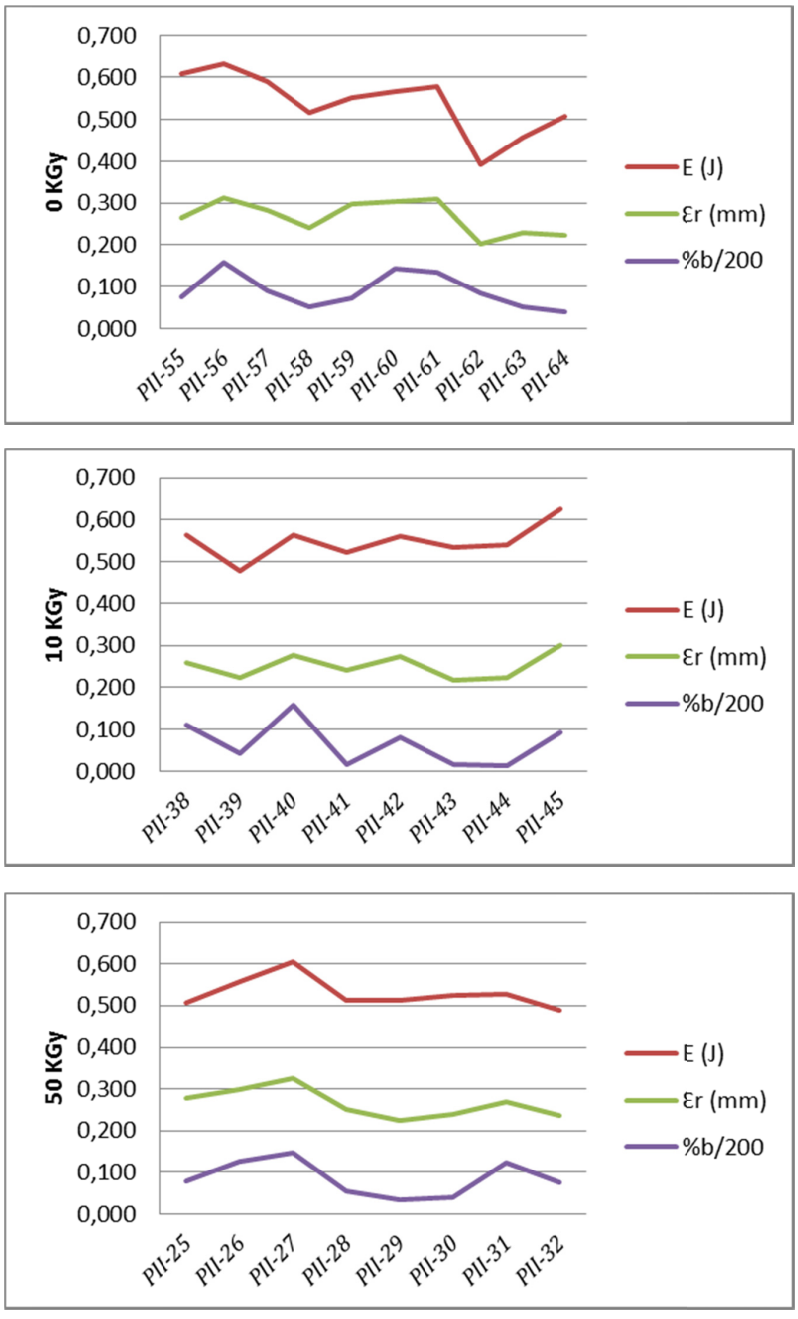


Figura 5.79A: *Representación gráfica de los resultados obtenidos por grupos de irradiación, en la primera campaña de ensayos, sobre las probetas P_{II}. Para dosis de 50 KGy, 10 KGy y sin irradiar.*

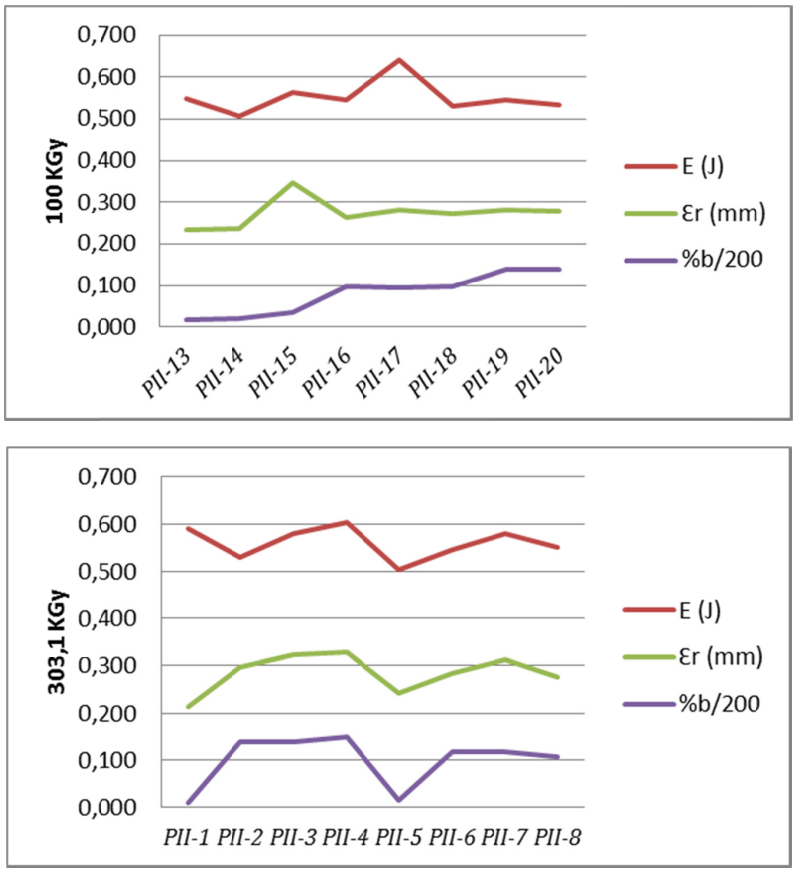


Figura 5.79B: *Representación gráfica de los resultados obtenidos por grupos de irradiación, en la primera campaña de ensayos, sobre las probetas P_{II}. Para dosis de 100 KGy y 303,1 KGy.*

En estas gráficas se observa que existe una cierta correlación lineal entre los valores obtenidos de deformación en rotura de las probetas ε_r, en mm, y el % de adhesivo que ha quedado adherido a la pieza 'base' de cada probeta $\%_b$, que puede ser representada según la relación (5.33).

$$\%_b = 200 \times (\varepsilon_r - 0{,}18) \qquad (5.33)$$

Esta a su vez, como la forma de rotura de la junta adhesiva es frágil incluso sin irradiar, la curva Fuerza-Deformación tiene forma de triángulo estrecho, con la F_{max}, representando la altura del triángulo y la ε_r, la base del mismo. Por ello la anchura también está relacionada con la energía que es capaz de absorber la junta durante el impacto. Parece que existe una cierta tendencia que indica que cuanto mayor sea el área de adhesivo que ha quedado pegada sobre la base mayor será su resistencia frente a impactos, pero es de suponer que esta relación puede ser válida dentro de unos límites, que se pueden situar entre los valores representados en la tabla. Hay que tener presente que la pieza 'base' tiene un tratamiento superficial 'suave', mientras que la 'tapa' lo tiene 'normal' y según se ha descrito durante el punto 5.6, el tratamiento normal tiene mejores propiedades adhesivas que el suave. Según lo expuesto a lo largo del presente capítulo, puede existir una relación entre la rugosidad superficial obtenida por el

tratamiento y su resistencia adhesiva frente a impacto, al igual que existe frente a solicitaciones estáticas [235], puesto que el tratamiento va a ayudar al adhesivo a conseguir una mejor adhesión superficial, por lo que es de esperar que, al mejorar el tratamiento, el %b aumente, al igual que la resistencia frente a impactos. En la segunda campaña de ensayos se va a intentar validar esta teoría. Por otro lado, de los datos de la tabla 5.32, se puede argumentar que no existe una relación entre el espesor y la resistencia de la junta frente a impacto, para los espesores medidos, los cuales están dentro de los valores recomendados por el fabricante para obtener las prestaciones estáticas óptimas.

La resistencia de la junta adhesiva frente a impactos, en función del nivel de radiación a que se ha sometido, está representada en la figura 5.80.

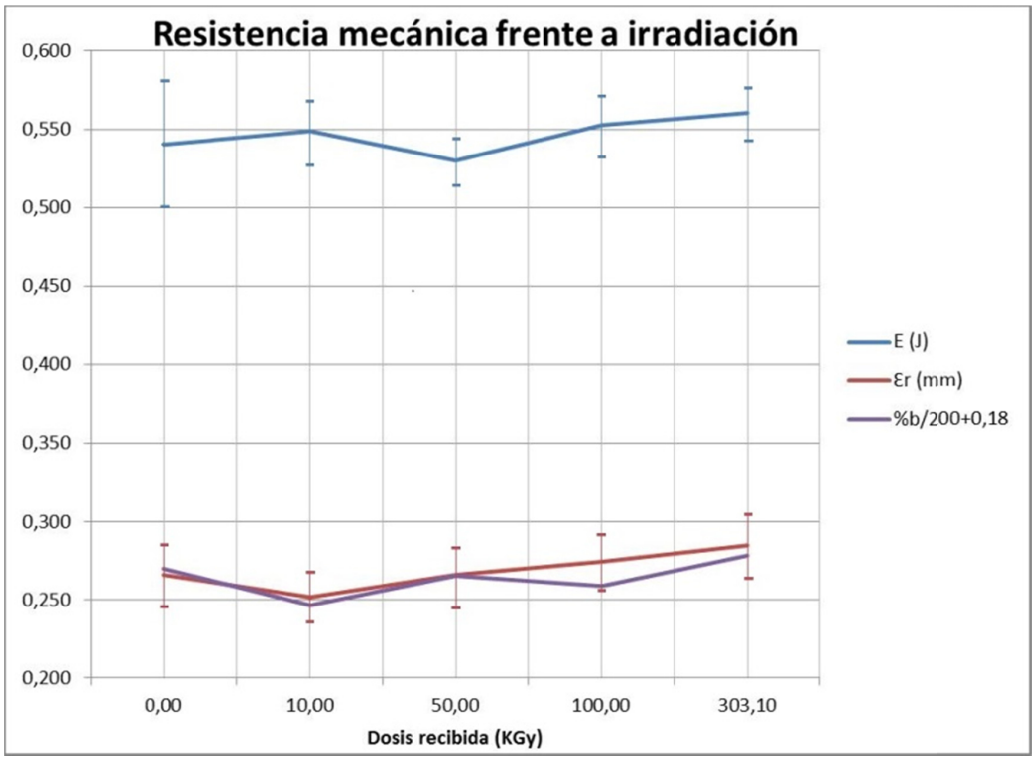


Figura 5.80: *Resistencia de las probetas P_{II}, frente a la radiación recibida por la junta adhesiva, durante la primera campaña de ensayos IZOD.*

De los resultados mostrados en la figura 5.80 se desprende que no se existe una degradación apreciable de las propiedades mecánicas de la junta adhesiva, hasta las dosis a que se ha sometido las probetas. Por todo ello es de suponer que las juntas adhesivas del sistema de alineación LINK, van a tener un comportamiento adecuado durante todo el período de funcionamiento del detector CMS.

En la segunda campaña de ensayos se va a intentar corroborar esta observación, aumentando de forma muy significativa la dosis máxima a que se

han sometido las probetas, para así estudiar su comportamiento frente a las mejoras que está previsto implementar en el LHC y CMS, al final de su vida útil. Esto permitirá seguir utilizando estos experimentos durante varios años más, y consecuentemente implicará que los componentes del sistema de alineación LINK se van a ver sometidos a dosis de radiación mayores de las previstas inicialmente.

5.10.2. Segunda campaña de ensayos.

Durante esta segunda campaña se han ensayado una serie de probetas P_{II}, pertenecientes a los grupos de la primera tanda de irradiaciones, que no se habían utilizado en la primera campaña de ensayos y también se han ensayado todas las probetas P_{II}' pertenecientes a la segunda tanda de irradiaciones [258]. Las probetas que se han utilizado durante esta segunda campaña han sido las P_{II} numeradas del 9 al 12, 21 al 24, 33 al 36, 46 al 48 y 49 al 54. Y las P_{II}' numeradas del 1 al 7, 13 al 19, 25 al 31, 37 al 43, 55 al 61 y 8, 20, 32, 44, 45, 62, 63, 64.

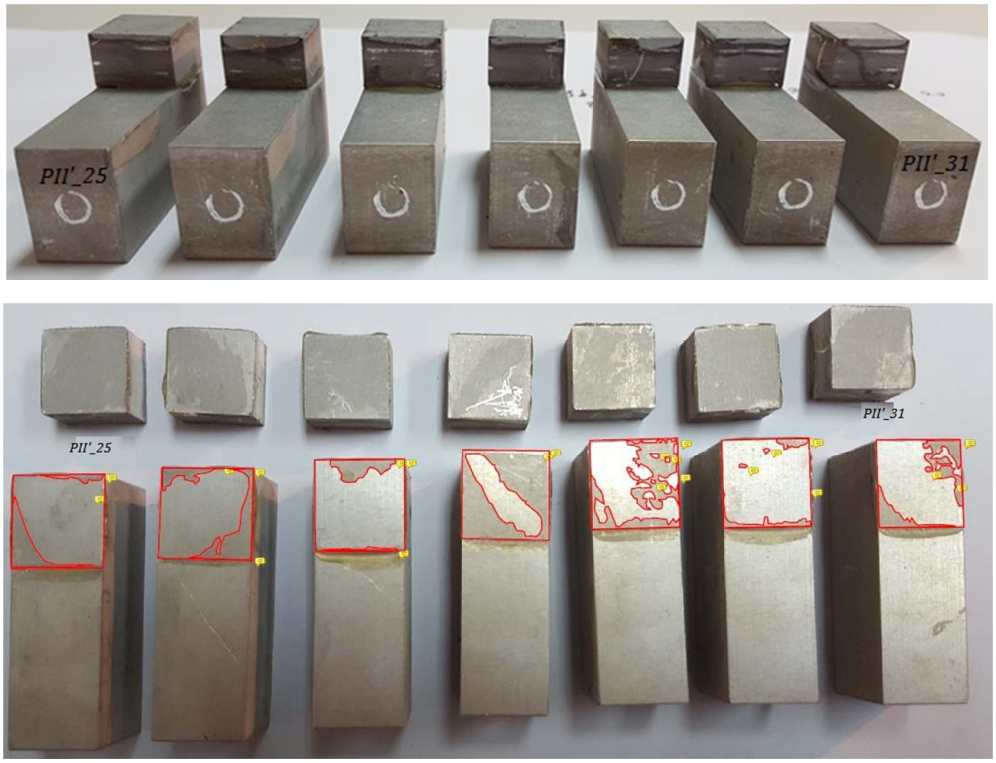


Figura 5.81: *Probetas P_{II}', números 25 al 31, ensayadas durante la segunda campaña. En la cara de impacto se observa la huella dejada por el péndulo al impactar sobre las probetas (Superior). Distribución del adhesivo despegado en ambos sustratos tras la rotura (Inferior), se observa la relación de la dirección de rotura con la posición de la huella del péndulo.*

Los ensayos han sido realizados con el péndulo instrumentado de 50 J, que tiene una célula de carga con una capacidad varias veces la de la anterior, para evitar la saturación de la célula de carga como ocurrió en la campaña

anterior. De los valores que se obtienen del ensayo instrumentado se han utilizado los datos relativos al momento en que comienza a aplicarse la fuerza sobre la probeta t_i, en ms, la deformación que se produce en el momento de la rotura ε_r, en mm y la fuerza máxima necesaria para producir la rotura, además se han podido obtener las curvas fuerza-tiempo completas. Por otro lado, las probetas P_{II} que no se habían ensayado durante la primera campaña, permiten comparar los resultados de ambas campañas, en las que el martillo utilizado no ha sido el mismo y por ello el punto de impacto sobre la cara de la probeta puede ser ligeramente distinto; en esta segunda campaña el péndulo ha golpeado, por regla general, ligeramente inclinado respecto a la cara de impacto, sobre el lateral derecho de la probeta, (Figura 5.81 (Superior)), aunque menos que en las probetas de la campaña anterior, por este motivo se induce sobre la junta adhesiva una componente de momento adicional, que se aprecia en la superficie de rotura de las probetas, (Figuras 5.81 (Inferior)), en estas también se aprecia que la dirección de rotura es diferente cuando el péndulo golpea centrado o descentrado a la derecha o izquierda. La marca de impacto de la cuchilla del péndulo está a unos 7.5 mm de la junta adhesiva. Esto es debido a que al ser un material frágil, la rotura de la probeta se produce con una deformación del orden de 0.1 mm, según los resultados obtenidos, y por tanto es una magnitud similar a las tolerancias de fabricación y pegado que la norma exige a las probetas, por lo que el péndulo comienza la rotura de la probeta a partir del punto donde impacta en primer lugar, sin llegar a repartir la fuerza uniformemente sobre la línea de impacto marcada en la probeta.

Todas las probetas P_{II}, disponían de un tratamiento superficial 'suave' en la pieza 'base' y 'normal' en la pieza 'tapa'. Y las P_{II}' de un tratamiento superficial 'suave+agresivo' en la pieza 'base' y 'normal+agresivo' en la pieza 'tapa'. A continuación se muestran los resultados obtenidos para las probetas ensayadas durante la segunda campaña de ensayos, estos se han obtenido a 21º C y 71 % RH:

5.10.2.1. Probetas de la primera tanda de irradiaciones *(P_{II})*.

En la tabla 5.33 se muestran los resultados obtenidos para las probetas P_{II} durante la segunda campaña de ensayos, y que son las que no se habían ensayado durante la primera campaña, pertenecientes a la primera tanda de irradiaciones, y por ello sirven para realizar una comparación entre los resultados de los ensayos con el péndulo de 5 J, y la nueva disposición con el de 50J, pudiendo de esta forma estudiar los errores sistemáticos relativos de ambos procesos:

P_{II} (segunda Campaña de ensayos IZOD)								
Probeta	Dosis (KGy)	e (mm)	E (J)	F_{max}	t_i (ms)	ε_r (mm)	$\%_b$	Pos. Impacto
P_{II}-9	303,1	0,05	0,742	3102,00	0,04	0,385	9,38	Descentr.
P_{II}-10	303,1	0,05	0,627	2644,87	0,042	0,309	7,22	Descentr.
P_{II}-11	303,1	0,06	0,781	3287,04	0,042	0,29	5,60	Centrado
P_{II}-12	303,1	0,05	0,781	3389,07	0,043	0,311	2,86	Centrado
Media		0,05	0,733	3105,75	0,0418	0,324	6,26	
Desviación Estándar		0,01	0,073	329,42	0,0013	0,042	2,75	
Probeta	Dosis (KGy)	e (mm)	E (J)	F_{max}	t_i (ms)	ε_r (mm)	$\%_b$	
P_{II}-21	100	0,05	0,628	3312,89	0,04	0,403	2,16	Centrado
P_{II}-22	100	0,05	0,570	3384,99	0,041	0,392	1,05	Centrado
P_{II}-23	100	0,06	0,744	2610,85	0,04	0,347	12,98	Descentr.
P_{II}-24	100	0,06	0,705	3393,16	0,042	0,428	4,28	Centrado
Media		0,06	0,662	3175,47	0,0408	0,393	5,12	
Desviación Estándar		0,01	0,078	378,14	0,0010	0,034	5,41	
Probeta	Dosis (KGy)	e (mm)	E (J)	F_{max}	t_i (ms)	ε_r (mm)	$\%_b$	
P_{II}-33	50	0,05	0,723	2662,55	0,039	0,33	10,46	Descentr.
P_{II}-34	50	0,05	0,723	2706,09	0,039	0,313	5,00	Descentr.
P_{II}-35	50	0,06	0,686	2998,60	0,041	0,33	9,60	Descentr.
P_{II}-36	50	0,05	0,742	3125,13	0,042	0,309	5,43	Centrado
Media		0,05	0,719	2873,09	0,0403	0,321	7,62	
Desviación Estándar		0,00	0,023	224,72	0,0015	0,011	2,81	
Probeta	Dosis (KGy)	e (mm)	E (J)	F_{max}	t_i (ms)	ε_r (mm)	$\%_b$	
P_{II}-46	10	0,05	0,742	3197,24	0,042	0,298	9,39	Descentr.
P_{II}-47	10	0,07	0,744	2923,77	0,042	0,309	4,68	Descentr.
P_{II}-48	10	0,06	0,879	2696,57	0,04	0,352	18,62	Descentr.
Media		0,06	0,788	2939,19	0,0413	0,320	10,90	
Desviación Estándar		0,01	0,079	250,69	0,0012	0,029	7,09	
Probeta	Dosis (KGy)	e (mm)	E (J)	F_{max}	t_i (ms)	ε_r (mm)	$\%_b$	
P_{II}-49	0	0,06	0,705	3398,60	0,042	0,411	4,99	Centrado
P_{II}-50	0	0,05	0,552	3209,49	0,042	0,218	2,09	Centrado
P_{II}-51	0	0,05	0,704	3163,23	0,042	0,277	1,65	Descentr.
P_{II}-52	0	0,06	0,723	2715,61	0,041	0,301	6,27	Descentr.
P_{II}-53	0	0,05	0,704	2606,77	0,04	0,311	14,78	Descentr.
P_{II}-54	0	0,06	0,552	3578,19	0,043	0,218	2,03	Centrado
Media		0,06	0,657	3111,98	0,04	0,29	5,30	
Desviación Estándar		0,01	0,081	380,52	0,00	0,07	5,01	

Tabla 5.33: *Resultados obtenidos en la segunda campaña de ensayos, con las probetas* P_{II}.

En las gráficas se observa que, al igual que ocurría en las probetas de la primera campaña de ensayos, también existe una cierta correlación lineal entre los valores de deformación en rotura ε_r, en mm, obtenidos de las probetas P_{II} y el % de adhesivo que ha quedado adherido a la pieza 'base' de cada probeta $\%_b$, que puede ser representada según la relación (5.34).

$$\%_b = 200 \times (\varepsilon_r - 0{,}28) \qquad (5.34)$$

En la figura 5.82 se muestran gráficamente estos resultados, agrupando las probetas por grupos de irradiación:

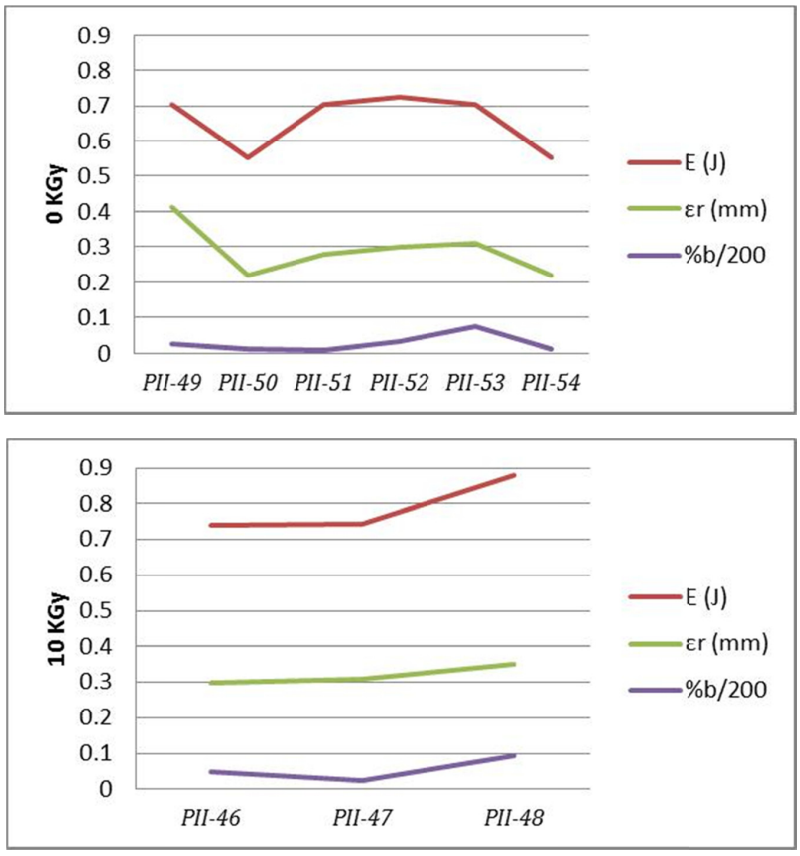


Figura 5.82A: *Representación gráfica de los resultados obtenidos por grupos de irradiación, en la segunda campaña de ensayos, sobre las probetas P_{II}. Para dosis de 10 KGy y sin irradiar.*

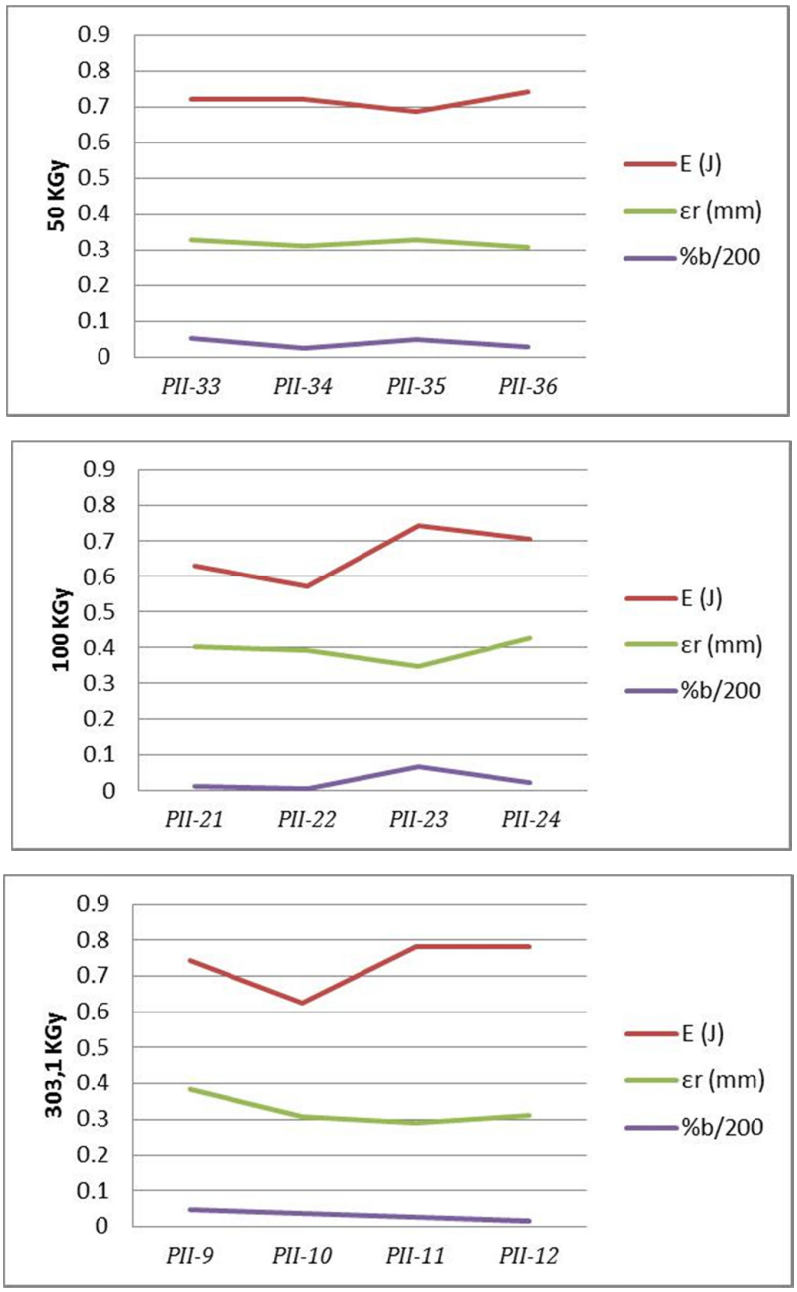


Figura 5.82B: *Representación gráfica de los resultados obtenidos por grupos de irradiación, en la segunda campaña de ensayos, sobre las probetas P_{II}. Para dosis de 50 KGy, 100 KGy y 303,1 KGy.*

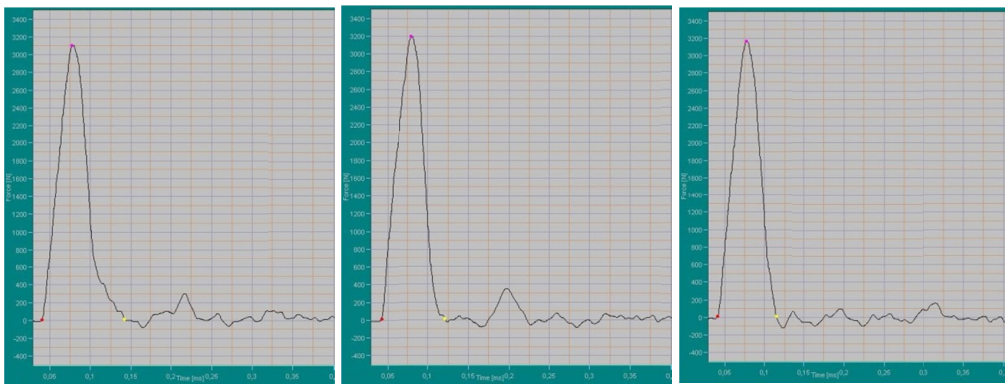


Figura 5.83: *Curva Fuerza-Tiempo de la probeta P_{II} 9 (Izq.), irradiada a 303 KGy; P_{II} 46 (Cent.), irradiada a 10 KGy; y P_{II} 51 (Der.), sin irradiar, durante la segunda campaña de ensayos. Impacto ligeramente descentrado a la derecha.*

En la figura 5.83, se aprecia que la forma de rotura de la junta adhesiva es frágil, mostrando una morfología en las curvas F-t similar para las diferentes probetas ensayadas, en las tres gráficas mostradas el impacto del péndulo se ha realizado en el lateral derecho de la cara de impacto. Cuando el impacto del péndulo está más centrado sobre la cara de la probeta, la gráfica cambia ligeramente, ensanchándose la base del triángulo y cambiando la pendiente en la zona baja de fuerza, cómo se observa en la figura 5.84. Se aprecia además un aumento de la fuerza necesaria para producir la rotura de la probeta, pero no de la energía, como puede deducirse de la tabla 5.33, donde se especifica en su última columna la posición de impacto del péndulo.

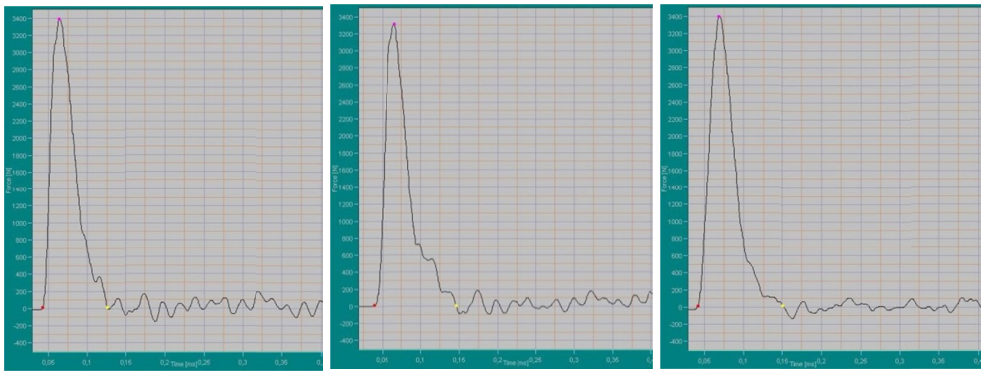


Figura 5.84: *Curva Fuerza-Tiempo de la probeta P_{II} 12 (Izq.), irradiada a 303 KGy; P_{II} 21 (Cent.), irradiada a 100 KGy; y P_{II} 49 (Der.), sin irradiar, durante la segunda campaña de ensayos. Impacto centrado.*

En la figura 5.85, se muestra la resistencia de la junta adhesiva de las probetas P_{II} frente a impactos, en función del nivel de radiación a que se han sometido las probetas:

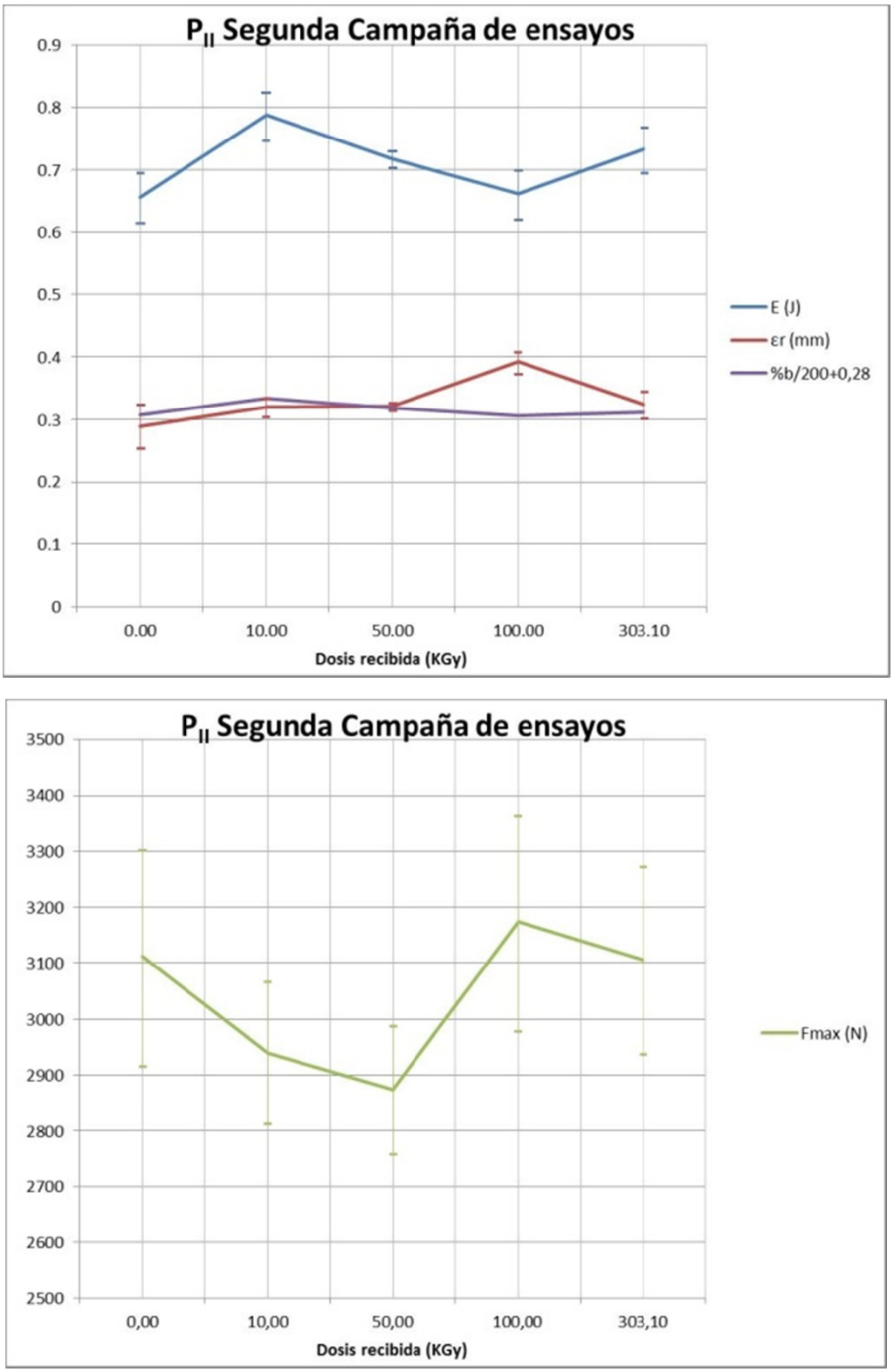


Figura 5.85: *Resistencia de las probetas P_{II}, frente a la radiación recibida por la junta adhesiva, durante la segunda campaña de ensayos IZOD.*

De los resultados mostrados en la figura 5.85 no se observa una degradación apreciable de las propiedades mecánicas de la junta adhesiva, hasta las dosis a que han sido estudiadas las probetas. Comparando estos resultados con los de la figura 5.80 (que deberían ser similares) se observa un ligero aumento del valor de la energía y la deformación en rotura de las P_{II}, respecto a los resultados de la primera campaña. Estas discrepancias entre ensayos deben ser englobados dentro de los errores sistemáticos que proporcionan ambas configuraciones para los ensayos con el péndulo de 5 J y el péndulo de 50 J.

5.10.2.2. Probetas de la segunda tanda de irradiaciones *(P_{II}')*.

En la tabla 5.34 se muestran los resultados obtenidos para las probetas P_{II}' durante la segunda campaña de ensayos, pertenecientes a la segunda tanda de irradiaciones:

P_{II}' (segunda Campaña de ensayos IZOD)								
Probeta	*Dosis (KGy)*	*e (mm)*	*E (J)*	*F_{max}*	*t_i (ms)*	*ε_r (mm)*	*$\%_b$*	*Pos. Impacto*
P_{II}'-1	303,1	0,04	0,726	3895,19	0,024	0,459	97,813	Centrado
P_{II}'-2	303,1	0,05	0,862	2944,18	0,037	0,356	21,993	Descentr.
P_{II}'-3	303,1	0,04	0,881	3291,12	0,042	0,332	40,700	Descentr.
P_{II}'-4	303,1	0,03	0,706	2760,51	0,038	0,301	63,067	Descentr.
P_{II}'-5	303,1	0,04	0,745	3813,56	0,043	0,252	23,505	Centrado
P_{II}'-6	303,1	0,04	0,842	3171,39	0,039	0,337	28,740	Descentr.
P_{II}'-7	303,1	0,04	0,842	2998,60	0,040	0,330	42,279	Descentr.
Media		0,04	0,801	3267,79	0,038	0,338	45,44	
Desviación Estándar		0,01	0,072	435,10	0,006	0,063	27,07	
Probeta	*Dosis (KGy)*	*e (mm)*	*E (J)*	*F_{max}*	*t_i (ms)*	*ε_r (mm)*	*$\%_b$*	
P_{II}'-13	100	0,05	0,784	3020,37	0,040	0,307	29,202	Descentr.
P_{II}'-14	100	0,04	0,784	3793,15	0,035	0,296	11,010	Centrado
P_{II}'-15	100	0,05	0,784	3659,82	0,042	0,241	2,594	Centrado
P_{II}'-16	100	0,05	0,706	3167,31	0,040	0,288	13,421	Descentr.
P_{II}'-17	100	0,05	0,764	2552,35	0,036	0,366	33,945	Descentr.
P_{II}'-18	100	0,03	0,901	3605,40	0,043	0,312	3,180	Centrado
P_{II}'-19	100	0,03	0,553	3329,21	0,041	0,205	1,844	Descentr.
Media		0,04	0,754	3303,94	0,040	0,288	13,60	
Desviación Estándar		0,01	0,106	432,33	0,003	0,052	13,11	

Tabla 5.34A: *Resultados obtenidos en la segunda campaña de ensayos, con las probetas P_{II}'. Para dosis de 303,1 KGy y 100 KGy.*

P_{II}' (segunda Campaña de ensayos IZOD)								
Probeta	Dosis (KGy)	e (mm)	E (J)	F_{max}	t_i (ms)	ε_r (mm)	$\%_b$	
P_{II}'-25	50	0,06	0,940	3376,83	0,040	0,315	17,758	Descentr.
P_{II}'-26	50	0,02	0,881	3062,55	0,000	0,516	24,924	Descentr.
P_{II}'-27	50	0,04	0,901	3942,81	0,035	0,231	11,883	Centrado
P_{II}'-28	50	0,06	0,764	2704,73	0,035	0,347	69,837	Descentr.
P_{II}'-29	50	0,05	0,764	3477,51	0,014	0,366	37,972	Descentr.
P_{II}'-30	50	0,02	0,784	3760,50	0,043	0,261	8,798	Centrado
P_{II}'-31	50	0,06	0,842	3680,23	0,041	0,311	24,522	Centrado
Media		0,04	0,839	3429,31	0,030	0,335	27,96	
Desviación Estándar		0,02	0,071	428,36	0,016	0,092	20,84	
Probeta	Dosis (KGy)	e (mm)	E (J)	F_{max}	t_i (ms)	ε_r (mm)	$\%_b$	
P_{II}'-37	10	0,08	0,610	3443,50	0,044	0,375	5,797	Centrado
P_{II}'-38	10	0,08	0,842	3023,09	0,041	0,456	20,801	Descentr.
P_{II}'-39	10	0,08	0,784	3185,00	0,042	0,424	21,016	Descentr.
P_{II}'-40	10	0,08	0,687	3546,90	0,043	0,303	4,211	Centrado
P_{II}'-41	10	0,09	0,726	3831,25	0,042	0,282	7,758	Centrado
P_{II}'-42	10	0,08	0,764	3076,15	0,040	0,445	16,351	Descentr.
P_{II}'-43	10	0,04	0,745	3795,87	0,040	0,284	13,224	Centrado
Media		0,08	0,737	3414,54	0,042	0,367	12,74	
Desviación Estándar		0,02	0,074	331,12	0,001	0,077	6,98	
Probeta	Dosis (KGy)	e (mm)	E (J)	F_{max}	t_i (ms)	ε_r (mm)	$\%_b$	
P_{II}'-55	0	0,04	0,803	3865,26	0,042	0,288	11,468	Centrado
P_{II}'-56	0	0,04	0,879	2878,88	0,04	0,345	33,961	Descentr.
P_{II}'-57	0	0,09	0,743	3419,01	0,044	0,375	2,002	Centrado
P_{II}'-58	0	0,07	0,840	2842,14	0,04	0,466	23,223	Descentr.
P_{II}'-59	0	0,04	0,724	3406,76	0,043	0,383	1,794	Centrado
P_{II}'-60	0	0,06	0,724	3344,18	0,044	0,375	3,331	Centrado
P_{II}'-61	0	0,03	fallo	fallo	fallo	fallo	25,861	fallo
Media		0,05	0,786	3292,70	0,042	0,372	12,63	
Desviación Estándar		0,02	0,065	383,06	0,002	0,058	13,31	

Tabla 5.34B: *Resultados obtenidos en la segunda campaña de ensayos, con las probetas P_{II}'. Para dosis de 50 KGy, 10 KGy y sin irradiar.*

P_{II}' (segunda Campaña de ensayos IZOD)								
Probeta	Dosis (KGy)	e (mm)	E (J)	F_{max}	t_i (ms)	ε_r (mm)	$\%_b$	
P_{II}'-8	2070,88	0,04	0,668	2412,22	0,035	0,339	35,782	Descentr.
P_{II}'-20	2070,88	0,06	0,610	3368,67	0,042	0,243	15,280	Centrado
P_{II}'-32	2070,88	0,06	0,706	2225,82	0,036	0,381	37,900	Descentr.
P_{II}'-44	2070,88	0,09	0,776	2780,92	0,042	0,273	7,268	Descentr.
P_{II}'-45	2070,88	0,08	0,591	2469,36	0,039	0,279	24,842	Descentr.
P_{II}'-62	2070,88	0,05	0,768	2867,99	0,040	0,288	15,039	Descentr.
P_{II}'-63	2070,88	0,04	0,745	2693,85	0,038	0,324	37,453	Descentr.
P_{II}'-64	2070,88	0,06	0,629	2986,36	0,042	0,265	25,934	Descentr.
Media		0,06	0,687	2725,65	0,039	0,299	24,94	
Desviación Estándar		0,02	0,073	362,44	0,003	0,045	11,63	

Tabla 5.34: *Resultados obtenidos en la segunda campaña de ensayos, con las probetas P_{II}'. Para dosis de 50 KGy, 10 KGy y sin irradiar.*

A continuación, en la figura 5.86 se muestran gráficamente estos resultados, agrupando las probetas por grupos de irradiación: en estas gráficas se observa que también existe una cierta correlación entre los valores obtenidos de deformación en rotura de las probetas ε_r, en mm, y el % de adhesivo que ha quedado adherido a la pieza 'base' de cada probeta $\%_b$, pero ya no es una correlación tan clara cómo en las P_{II}. Esto puede ser debido a que en las probetas P_{II}' el tratamiento superficial es más agresivo en ambas superficies, mientras que en las anteriores, la base tenía un tratamiento más suave. Se observa un aumento del % de adhesivo que queda adherido sobre la superficie de la base al aumentar la agresividad del tratamiento aplicado a su superficie, que puede estar motivado por la mejora de las propiedades adherentes de la superficie de las P_{II}' con este tratamiento. También se observa un aumento de la fuerza necesaria para producir la rotura cuando el impacto está centrado en la cara de la probeta, pero no se observa una correlación con la energía requerida para romper la probeta.

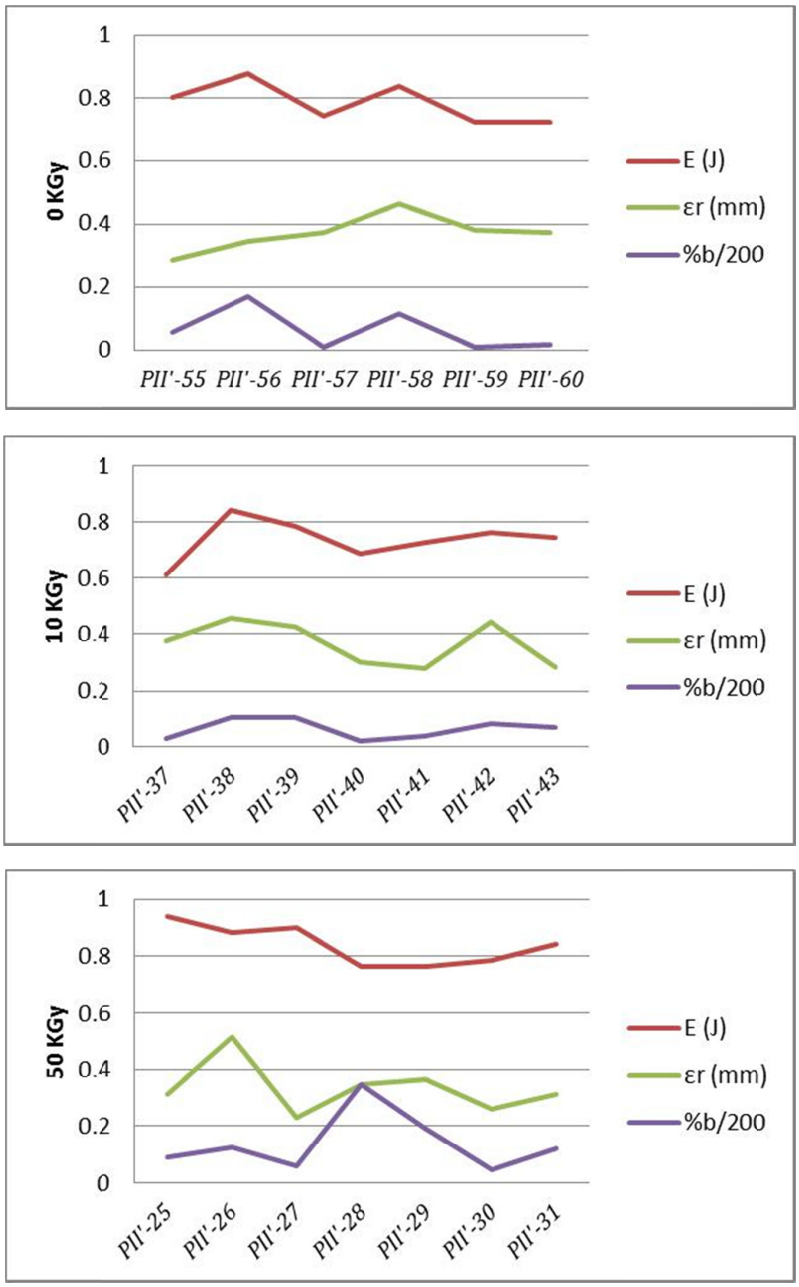


Figura 5.86A: *Representación gráfica de los resultados obtenidos por grupos de irradiación, en la segunda campaña de ensayos, sobre las probetas P_{II}'. Para dosis de 50 KGy, 10 KGy y sin irradiar.*

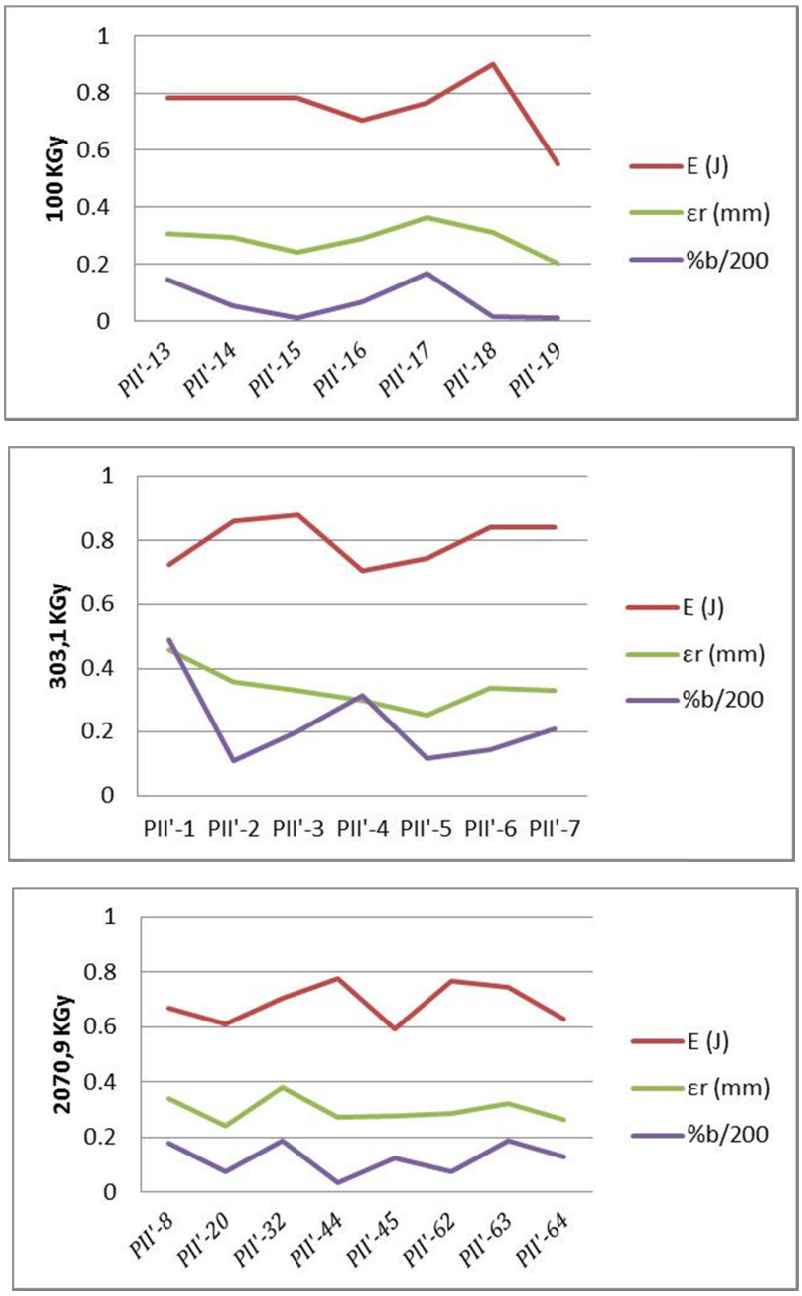


Figura 5.86B: *Representación gráfica de los resultados obtenidos por grupos de irradiación, en la segunda campaña de ensayos, sobre las probetas P_{II}'. Para dosis de 100 KGy, 303,1 KGy y 2070,88 KGy.*

En la figura 5.87, se aprecia que la forma de rotura de la junta adhesiva es frágil, mostrando una morfología en las curvas F-t similar para las diferentes probetas ensayadas. En las seis gráficas mostradas el impacto del péndulo se ha realizado en el lateral derecho de la cara de impacto. Cuando el impacto del péndulo está más centrado sobre la cara de la probeta, la gráfica cambia ligeramente, ensanchándose la base del triángulo y a veces cambiando la

pendiente de la curva en la zona baja de la fuerza, cómo se observa en la figura 5.88, también se aprecia un aumento de la fuerza necesaria para producir la rotura de la probeta, pero no de la energía, como puede deducirse de la tabla 5.34, donde en la última columna, se hace referencia a la posición del impacto del péndulo sobre la cara de impacto de la probeta.

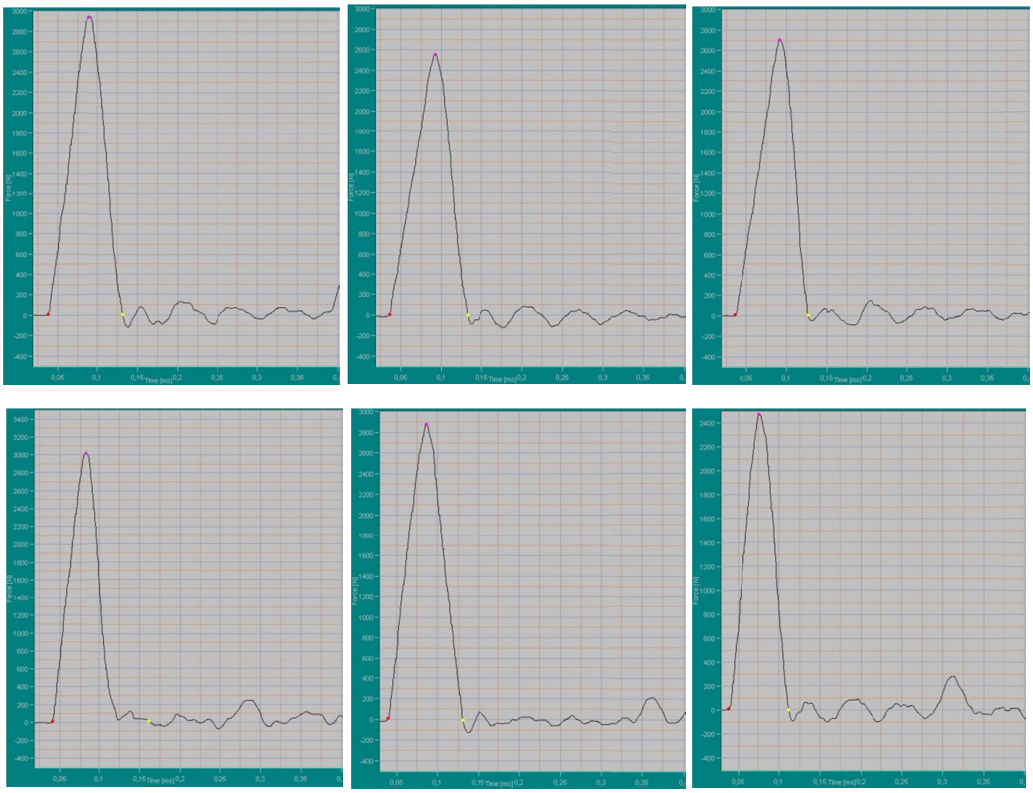


Figura 5.87: *Curva Fuerza-Tiempo de la probeta P_{II}' 2 (Sup. Izq.), irradiada a 303 KGy; P_{II}' 17 (Sup. Cent.), irradiada a 100 KGy; y P_{II}' 28 (Sup. Der.), irradiada a 50 KGy; P_{II}' 38 (Inf. Izq.), irradiada a 10 KGy; P_{II}' 56 (Inf. Cent.), sin irradiar; y P_{II}' 45 (Inf. Der.), irradiada a 2071 KGy; durante la segunda campaña de ensayos. Impacto descentrado.*

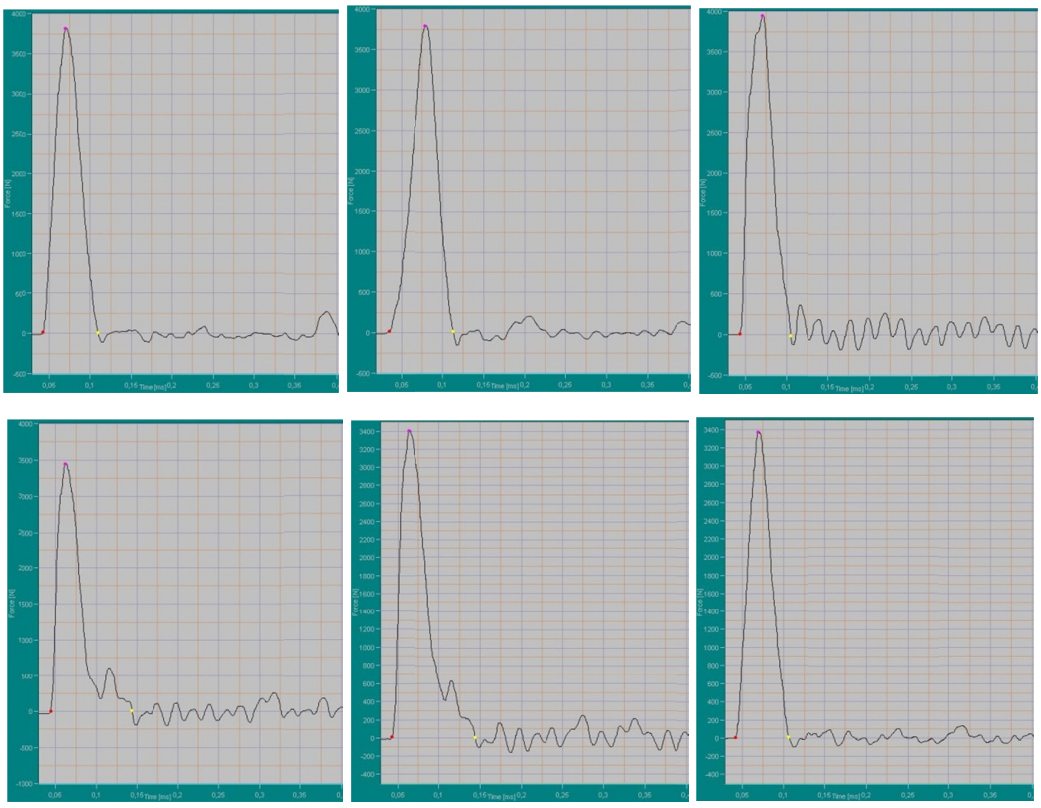


Figura 5.88: *Curva Fuerza-Tiempo de la probeta P_{II}' 5 (Sup. Izq.), irradiada a 303 KGy; P_{II}' 14 (Sup. Cent.), irradiada a 100 KGy; y P_{II}' 27 (Sup. Der.), irradiada a 50 KGy; P_{II}' 37 (Inf. Izq.), irradiada a 10 KGy; P_{II}' 59 (Inf. Cent.), sin irradiar; y P_{II}' 20 (Inf. Der.), irradiada a 2071 KGy; durante la segunda campaña de ensayos. Impacto centrado.*

En la figura 5.89, se muestra la resistencia de la junta adhesiva de las probetas P_{II}' frente a impactos, en función del nivel de radiación a que se ha sometido la probeta:

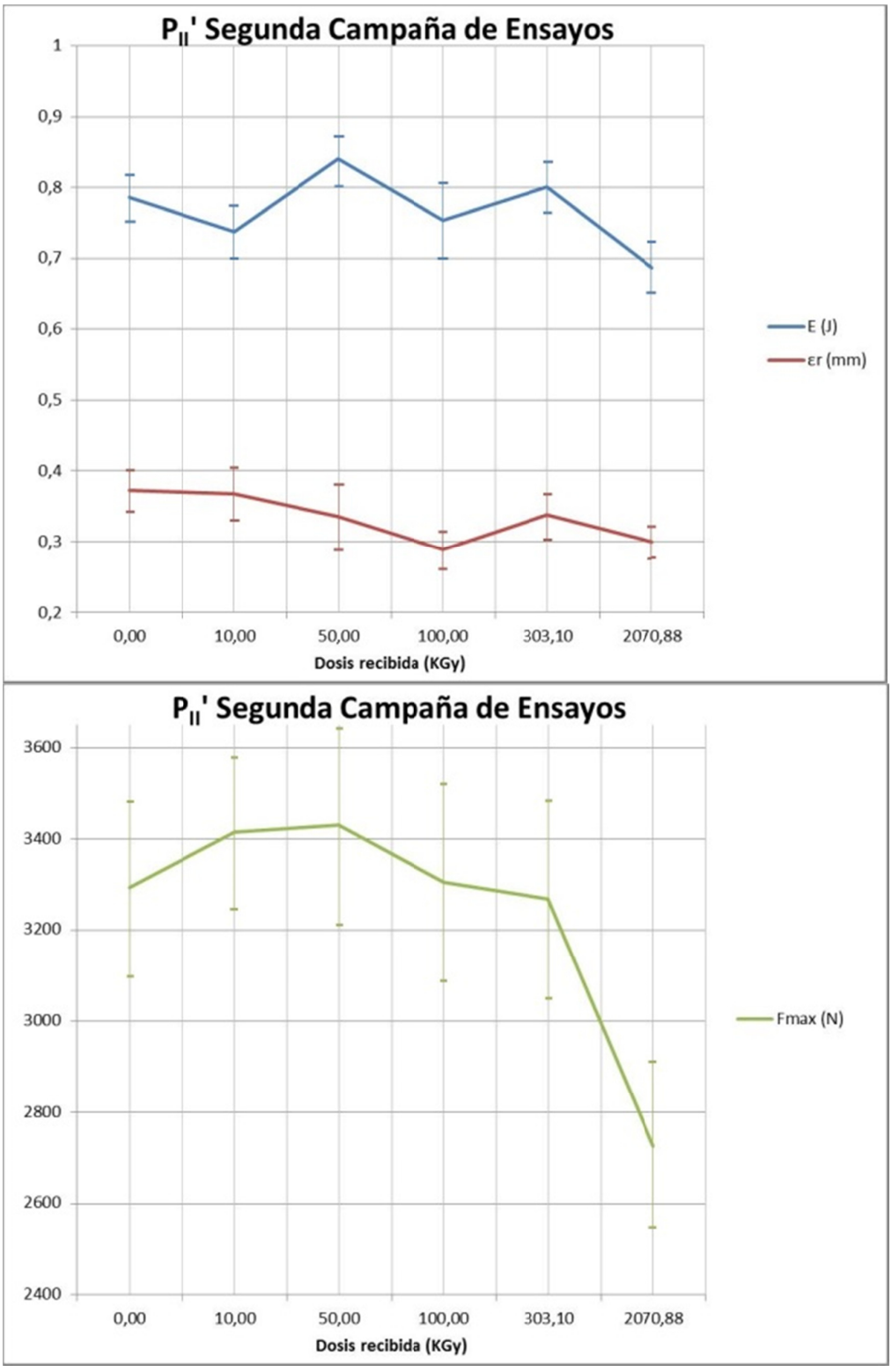


Figura 5.89: *Resistencia de las probetas P_{II}', frente a la radiación recibida por la junta adhesiva, durante la segunda campaña de ensayos IZOD.*

De los resultados mostrados en la figura 5.89 no se observa una degradación apreciable de las propiedades mecánicas de la junta adhesiva, para las dosis previstas en CMS. Sí se aprecia una degradación significativa de las propiedades de resistencia frente a impacto al llegar a los 2071 KGys, en las P_{II}': la energía para romper la probeta se reduce un 14 %, la fuerza para realizar la rotura desciende más del 20 % y la deformación en rotura disminuye un 24%, respecto a los valores sin irradiar. Aunque la fuerza de rotura parece mostrar un claro decaimiento a los niveles de dosis máximas, según la tabla 5.34, este parámetro se encuentra muy influenciado por la posición de impacto del péndulo sobre la cara de la probeta. En cambio, la posición de impacto sobre la cara de la probeta no parece influir, de forma apreciable, sobre la energía necesaria para producir la rotura de la probeta a cualquier dosis.

Durante la segunda campaña de ensayos se ha observado una desviación estándar el doble de la observada con el péndulo de 5J en la valoración de la energía sin instrumentar, que podría ser debida a los errores sistemáticos que introduce esta nueva disposición. Igualmente se observan mayores errores sistemáticos en la valoración de la deformación en rotura durante esta segunda campaña. También se aprecia un aumento del valor de la energía y la deformación en rotura de las P_{II}', respecto a los resultados de la primera campaña, incluso se aprecia un ligero aumento respecto a las probetas P_{II} ensayadas en la segunda campaña, lo que indicaría un aumento de la energía necesaria para romper las juntas adhesivas de las probetas P_{II}' (disponen de un tratamiento más agresivo que las P_{II}), que estaría en concordancia con la mejora del comportamiento a cortadura que suele venir asociado al tratamiento superficial que potencia los mecanismos de adhesión de una resina polimérica (anclaje mecánico y absorción) con un sustrato de alta energía superficial. Como se ha demostrado con los resultados de rugosidad, el segundo tratamiento aplicado a las probetas P_{II}' ha conseguido aumentar la superficie (absorción) y el número y profundidad de los picos de rugosidad (anclaje mecánico), y como se observa de los resultados de estos ensayos esto ha conllevado un aumento de su resistencia frente a impacto, respecto a las P_{II}.

Capítulo 6: Resultados del Sistema de alineación LINK.

En este capítulo se muestran los análisis, de los datos proporcionados por el Sistema de alineación LINK, que han permitido conocer los movimientos y los periodos de estabilidad mecánica de los diversos componentes de CMS, y que aseguran la buena reconstrucción geométrica de las partículas cargadas detectadas. El análisis se extiende a lo largo de las diversas operaciones realizadas con CMS, tanto en superficie del punto P5 (SX5) durante las primeras pruebas del solenoide realizadas durante el 2006, como posteriormente desde el año 2008 hasta el 2013, una vez instalado el detector en el área de colisión asignada en el colisionador LHC (UXC55).

6.1. Medidas de resolución del LINK en 2006 durante las pruebas del imán.

En este punto se describen los resultados obtenidos por el sistema de alineación LINK de los datos registrados durante el test del imán de CMS, llevado a cabo durante la segunda mitad del año 2006. Está basada en los documentos [259, 260, 261 y 262], donde se describen los movimientos relativos detectados (de micrómetros a centímetros) entre los elementos del detector y las rotaciones de las estructuras de CMS (de microradianes a miliradianes). Además se compara la posición reconstruida de los sensores del sistema LINK con los controles dimensionales realizados en el CERN, mediante fotogrametría. Y finalmente se describen los movimientos inducidos por el campo magnético sobre el detector.

6.1.1. Descripción del sistema de alineación instalado durante las pruebas del imán.

Para la realización de la prueba de funcionamiento del imán de CMS se instaló en el detector una parte reducida del sistema de alineación de CMS, con vistas a validar su funcionamiento en condiciones reales.

El sistema de alineación de CMS ha sido descrito en los capítulos 3 y 4, en los que se ha detallado la composición, funcionamiento y precisión de los componentes que forman cada uno de los sub-sistemas de alineación (BARREL, ENDCAP, TRACKER y LINK) y cuya distribución esquemática en CMS se muestra en la figura 3.1.

En la figura 6.1 se muestra la geometría del sistema de alineación de CMS que ha estado operativa durante la prueba del imán de CMS (Magnet Test and Cosmic Challenge (MTCC)). Este sistema reducido ha consistido en: tres cuadrantes del plano ZR del sub-sistema LINK (Figura 6.2, esta figura es casi idéntica a la Figura 3.16, que representa el sistema final utilizado, salvo que en la ME11 se instrumenta un ASPD, al que le llega el rayo secundario del LD, bifurcado en un pentaprisma modificado, ubicado en la TP), correspondientes a las posiciones de los planos φ de 75º, 255º y 315º, en el lado positivo del

detector; el sub-sistema alineación ENDCAP completo (Figura 3.13), para el lado positivo de CMS; y la instrumentación completa de los sectores 10 y 11 del sub-sistema de alineación BARREL, del lado positivo.

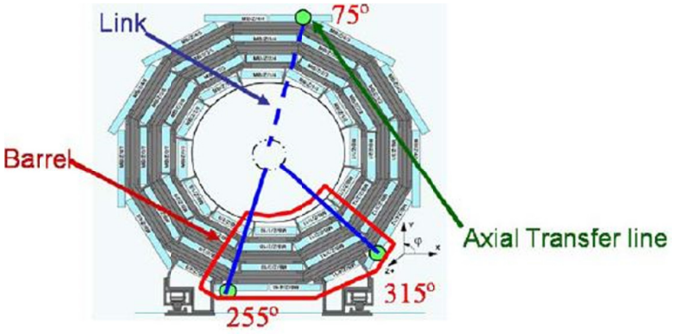


Figura 6.1: *Vista transversal del sistema de muones del barrel donde se indican los elementos instalados durante la prueba del imán.*

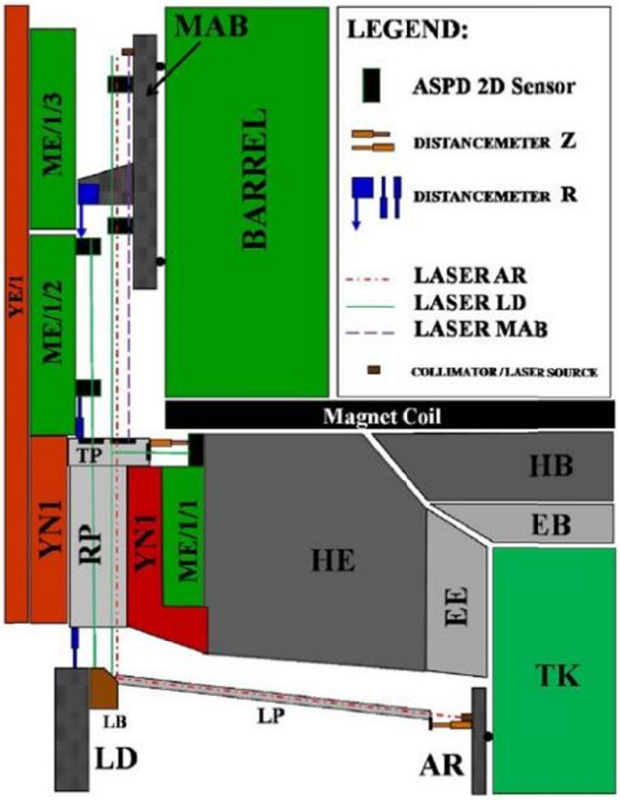


Figura 6.2: *Representación esquemática de los componentes del sistema de alineación LINK sobre un cuadrante ZR de CMS, durante las pruebas del imán.*

Esta disposición ha conllevado la instalación de un total de 275 sensores 1D (distanciómetros e inclinómetros), 125 fotodetectores (DCOPs y ASPDs), 100 videocámaras, 534 fuentes de luz (LEDs y láseres semiconductores), y un gran número de sondas de temperatura, humedad y campo magnético.

Durante la *fase I* de la prueba del imán, se instaló una maqueta simulando el TRACKER de CMS, permitiendo la instalación sobre ella del AR del sistema de alineación LINK. La maqueta se retiró durante la *fase II*, para realizar un detallado mapa del campo magnético en el interior del solenoide.

Todos los componentes, estructuras de fibra de carbono y diferentes sensores utilizados para esta prueba, se calibraron previamente a su instalación, de la forma que han sido descritas en los capítulos 3 y 4, con precisiones de decenas de micrómetros en longitudes y decenas de microradianes para las orientaciones angulares. Durante la instalación se ha realizado un control dimensional de la posición 'absoluta' que ocupan en CMS todos los componentes, mediante métodos topográficos y de fotogrametría, con precisiones de 50 a 300 μm, en función de la posición espacial de cada componente.

El sistema de lectura, control y el software de reconstrucción que se ha utilizado ha sido descrito el punto 3.4.3. A modo de ejemplo se describe a continuación la secuencia de lectura de cada cuadrante del sistema LINK:

> Se encienden todos los láseres del AR simultáneamente durante un corto intervalo de tiempo, estos impactan sobre los ASPDs situados en las TPs y los MABs, leyendo el sistema la posición de impacto sobre el área activa de cada ASPD.
>
> A continuación, estos láseres se apagan y se encienden los láseres situados sobre los MABs, alcanzando a los ASPDs situados sobre los MABs y las TPs, guardando el sistema la posición donde inciden los láseres sobre los ASPDs.
>
> Finalmente se apagan estos últimos y se encienden los situados sobre los LD, que llegan hasta los ASPDs situados sobre las TP, ME11, ME12 y MABs, procediendo el sistema a guardar las posiciones donde son detectados los láseres sobre cada uno de estos ASPDs.
>
> Este ciclo, que se denomina 'evento' o 'suceso', se repite cada cierto tiempo, comenzando siempre por el AR. La lectura de los sensores de proximidad y los inclinómetros se realiza en modo continuo.

Estos datos se guardan on-line en una base de datos Oracle, mediante el uso del administrador RDB, suministrado por el software de control y adquisición de datos PVSS. Estos datos son convertidos en secuencias ordenadas de datos de elementos monitorizados en el sistema orientado a objetos ROOT. Mediante especializados programas de ROOT que realizan un escrutinio de los datos obtenidos y aplican calibraciones para convertir los datos obtenidos en bruto en valores más útiles, se realiza una reconstrucción completa de los eventos para cada sub-sistema. A continuación estos ficheros ROOT se transfieren del entorno privado on-line al Tier-0 y el CAF (offline) a través del 'CMS Storage Manager', que esencialmente sigue el mismo camino que los datos de los sucesos de física que se producen en CMS, para ser utilizados cómo entrada por COCOA para la reconstrucción off-line de la geometría.

6.1.2. Visión general de los resultados del sistema LINK durante el MTCC.

El sistema completo de adquisición y flujo de datos del sistema LINK estuvo operacional durante el MTCC. Los datos obtenidos de los diferentes sensores del sistema han permitido medir los desplazamientos y deformaciones relativas de las estructuras del hierro de retorno de CMS para los diferentes valores de campo magnético.

Se han observado dos efectos principales. El primero es el cambio de la posición original de las estructuras (la posición antes de comenzar las operaciones con el imán). La compresión de las estructuras en Z, hacia el IP, y la deformación en Rφ, parecen estabilizarse después de alcanzar el campo magnético ~3.5 T por primera vez. Estos desplazamientos y deformaciones son permanentes: no se recuperan en los subsiguientes apagados del imán, y se puede interpretar como el cierre final de las estructuras, eliminando las holguras entre ellas, debido al empuje sufrido por las fuerzas magnéticas que actúan sobre el hierro de retorno. Por tanto estos movimientos del primer encendido, se consideran parte del cierre de CMS, y no son extrapolables a otros escenarios. El segundo efecto es la deformación cuasi-elástica observada entre las situaciones de imán encendido y apagado, después de alcanzar la deformación de compresión permanente. Ambos efectos se pueden observar en las figuras 6.3 y 6.4, en función del tiempo y de la corriente aplicada al imán. Para corrientes entre 4000 y 19014 A, la relación entre el campo magnético en el centro del imán B, en teslas, y la intensidad de la corriente aplicada I, en amperios, sigue la expresión lineal (6.1), con un error menor del 1%.

$$B(T) = 0.00020988 \times I(A) + 0{,}011 \qquad (6.1)$$

La figura 6.3(a), muestra el ciclo de la intensidad suministrada al imán durante la *fase* I. En la figura 6.3(b) se muestra la compresión en Z, entre la nariz del ENDCAP y el TRACKER; mientras que la 6.3(c) muestra el cambio de distancias en Rφ, entre los objetos alineados en el disco YE+1 del ENDCAP. La diferencia de valores mostrados cuando el imán está apagado indica la deformación permanente, que se produce hasta llegar al valor de campo ~3.5 T. A partir de ese punto se observa una compresión cuasi-elástica que sigue perfectamente los ciclos de corriente aplicada al imán.

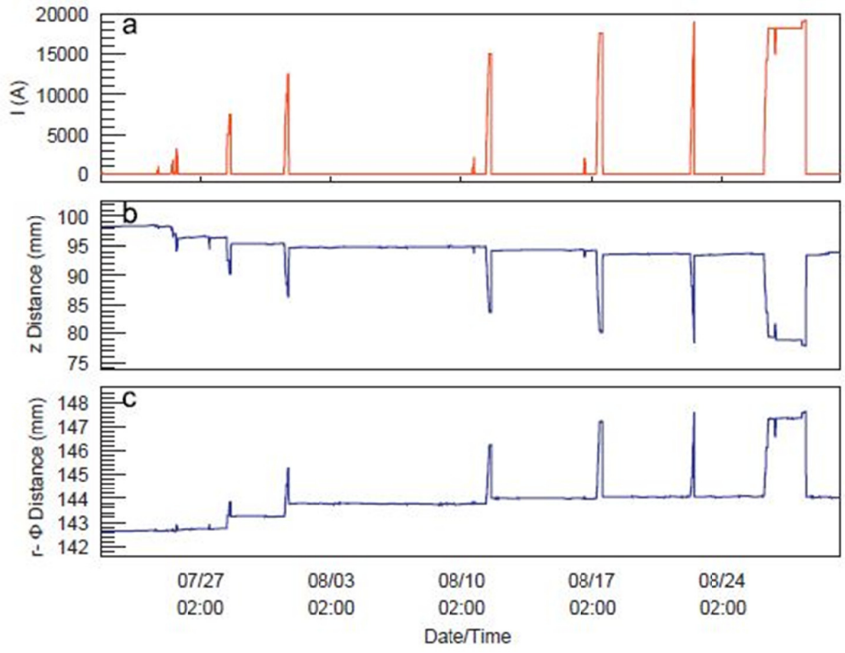


Figura 6.3: *Ilustración del efecto de movimiento permanente y cuasi-elástico durante los ciclos de encendido y apagado del imán de la fase I del MTCC.*

En la figura 6.4 (a) se muestra los ciclos de intensidad que se han llevado a cabo sobre el imán de CMS durante la *fase I* del MTCC. En la figura 6.4 (b) se muestran los cambios observados sobre la distancia Rφ, entre los objetos del sistema de alineación situados en el YE+1. Es de notar que estos valores se corresponden con las movimientos observados en la fase I, en los que el comportamiento cuasi-elástico es similar. Aquí ya no se observa el efecto permanente, puesto que las ruedas de CMS no se han separado entre fases, y por tanto no ha sido necesario eliminar las tolerancia que se producen durante el primer cierre de estas.

La deformación producida por el campo magnético es más relevante en las ruedas del ENDCAP. El movimiento de la primera rueda del ENDCAP (YE1) bajo el campo magnético es bastante complejo. Los Z-stops, son los topes que existen entre ruedas, y es donde se encuentra la holgura existente entre ruedas la primera vez que se cierran. Durante el primer encendido del imán, las 10000 t de fuerza que genera este sobre el hierro de retorno de las ruedas de CMS, hacen que se pongan en contacto todas las ruedas a través de estos topes, eliminando las holguras existentes entre ellos; este es el efecto permanente que se ha observado.

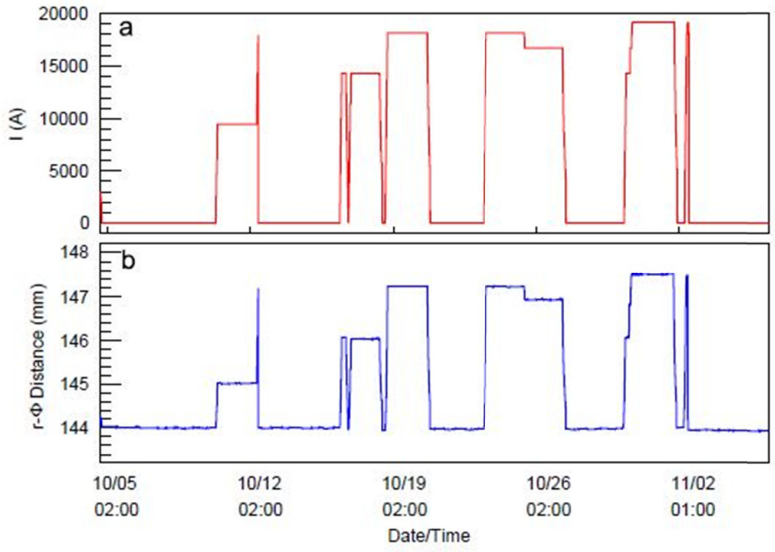


Figura 6.4: *Ilustración del efecto de movimiento cuasi-elástico durante los ciclos de encendido y apagado del imán de la fase II del MTCC.*

Al ir aplicando corriente, unas ruedas de ENDCAP van empujando a las siguientes hasta llegar a las del BARREL, de forma que se llega a producir una deformación de las ruedas según la figura 6.5 (Izq.), donde la flexión producida en la parte interna del YE1, relativo a la vertical, es de ~4 mrad.

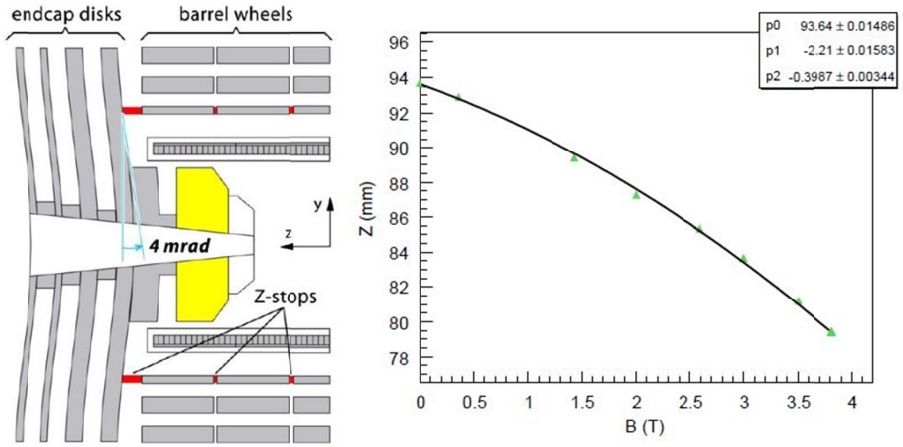


Figura 6.5: *Esquema de la deformación que se produce entre las ruedas de CMS como resultado del campo magnético (Izq.). Resultado del movimiento relativo que se produce entre el YE1 y el TRACKER, en función de la intensidad del campo magnético (Der.).*

Los cambios observados en la distancia Z, en función de la intensidad del campo magnético están dominados por un comportamiento cuadrático. En la figura 6.5 (Der.) se muestra el ajuste realizado a este movimiento, que corresponde a una fracción de los datos mostrados en la figura 6.3 (b).

Utilizando los mismos conjuntos de datos se ha estudiado el comportamiento con campo en diferentes regiones del detector, con objeto de encontrar posibles asimetrías en Rφ, pero el comportamiento observado es muy similar en los tres cuadrantes estudiados.

Aparte de los efectos asociados a cambios de las fuerzas magnéticas, las estructuras del detector son muy estables. Medidas tomadas durante un período de 2 días a campo magnético constante a 3.8 T, con un gradiente de temperatura de unos 2º C, muestran una estabilidad del sistema LINK por debajo de 100 μm.

6.1.3. Conjunto de datos tomados y su calidad.

Durante ambas fases del MTCC se estuvieron leyendo datos de forma continua. En esta sección se analizan estos datos tomados por el sistema realizando comparaciones entre los diferentes tipos de medidas realizadas y entre las dos fases del MTCC y se discute la coherencia de los resultados y la reproducibilidad de las medidas observadas.

Aunque es posible extraer de cada conjunto de datos individual el efecto principal de las fuerzas magnéticas actuando sobre las estructuras, la magnitud exacta del movimiento y deformación producida no pueden ser extraídos directamente de los conjuntos de datos individuales sino que se necesita realizar una reconstrucción completa de la geometría, para lo que se utiliza el software COCOA, que emplea como entrada este conjunto de datos individuales.

6.1.3.1. Información del sistema de láseres y ASPDs.

La información de la posición de la red de láseres distribuida en CMS se obtiene al analizar el punto del haz que incide sobre el área activa de los ASPDs (Figura 6.2). El centroide que corresponde a la posición de la mancha del haz, en cada punto monitoreado en CMS, se reconstruye de los ajustes Gaussianos de los dos perfiles de intensidad de luz (Figura 4.9), con un error de reconstrucción espacial típico de ~5 μm en los ejes x e y del sensor (Figura 4.8).

A modo de ejemplo, en la figura 6.6 se muestra la reconstrucción de la posición de los láseres en función del campo magnético, el ASPD cuyos resultados se muestran, es el que está instalado en la posición inferior de las CSC ME1/2 (Figura 3.23), y siendo el láser monitorizado el haz secundario que se genera en los LBs del LD. La figura 6.6 muestra la reconstrucción de las coordenadas Z y Rφ, monitoreadas los ASPDs en los 3 cuadrantes que se han instrumentado durante el MTCC. En estos datos ya se puede observar el efecto del movimiento cuadrático producido por el campo magnético y que se había observado en la Figura 6.5 (Der.), junto con una respuesta más estable en Rφ. El comportamiento de la mancha reconstruida sobre el sensor no permite en si misma una interpretación simple de lo que ha sucedido, si este punto sufre un desplazamiento, este puede ser debido a un desplazamiento o rotación de la estructura a la que se encuentra fijado el ASPD, a un desplazamiento de la estructura en la que se encuentra el colimador donde se inicia el haz o en la

mayoría de los casos por una combinación de ambos efectos. Durante esta prueba no todos los sensores instalados se pudieron reconstruir, porque algunos ASPDs se dañaron durante las pruebas de cierre de las ruedas y por perdida de información debida al limitado rango dinámico del sistema, unido a las amplias tolerancias de cierre durante esta primera vez y el significante movimiento que se produce en el detector con el campo. Esta pérdida de información implicó una degradación de la precisión final de la medida.

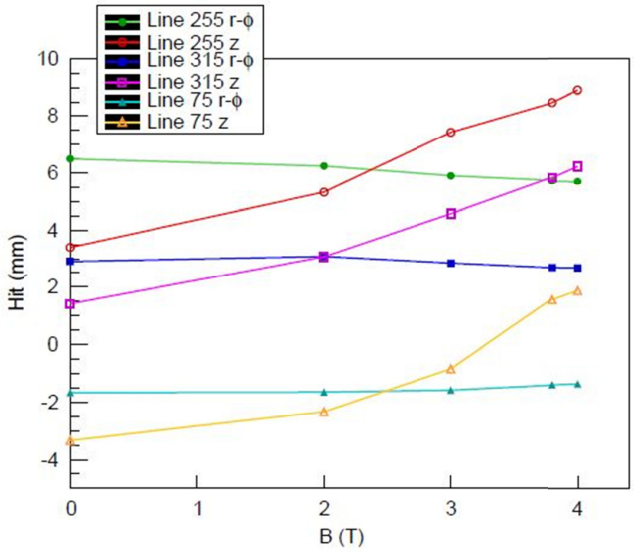


Figura 6.6: *Reconstrucción de la posición de impacto del láser sobre los ASPDs en la coordenada Z y Rφ, en función del campo magnético, en los tres cuadrantes estudiados durante el MTCC.*

6.1.3.2. Monitoreo de los movimientos lineales.

Para poder medir todos los grados de libertad de los elementos monitoreados por el sistema en CMS, se requieren una serie de sensores de desplazamiento que complementen las medidas realizadas por los ASPDs de los láseres. Estas medidas proporcionan información de la coordenada que está en la dirección del haz láser.

6.1.3.2.1. Distancia Axial.

La medida en la coordenada Z de CMS se realiza en la región interna η=3 y en la región de ME1/1, según muestra la figura 6.2. En la tabla 6.1 se muestran los resultados obtenidos con los distanciómetros situados en la región interna durante la primera fase del MTCC, la primera fila muestra la diferencia de valores de Z, a B=0 T, antes y después de una larga subida hasta 4 T seguida de una rápida bajada a 0T. Observando los valores ΔZ (0 T), se verifica el movimiento elástico esperado, con 3 σ en la posición de 75º y 195º. En el otro cuadrante no se recupera la distancia LD-AR inicial por aproximadamente medio milímetro, esto puede ser debido a que el LD es una estructura flotante respecto al YE1, que está colgada de las TPs. En la segunda fila se muestran

las diferencia entre la medida a 4 T y su correspondiente valor a 0T, para cada una de las tres posiciones, con una precisión de 3 σ.

ϕ quarter	75°	195°	315°
$\Delta Z(0T)$ (mm)	-0.165 ± 0.057	-0.052 ± 0.057	-0.571 ± 0.057
ΔZ_{04T} (mm)	-15.741 ± 0.057	-15.540 ± 0.057	-15.599 ± 0.057

Tabla 6.1: *Medida del desplazamiento relativo (mm) de Z entre el AR situado en el TRACKER y el LD situado en la YE1, durante la fase I del MTCC.*

En la tabla 6.2 se muestran los resultados obtenidos con los distanciómetros de la región ME1/1, en esta se computa la distancia entre la TPs situadas sobre el hierro de la YN1 y la parte superior de las CSCs de la posición ME1/1. En las últimas filas se muestra el desplazamiento relativo total entre los datos tomados a 0 T y a 4 T, en ambas fases del MTCC. Obteniendo una reposición y desplazamientos totales por el campo magnético compatibles, dentro de 3 σ, para los tres cuadrantes en ambas fases del MTCC.

ϕ quarter	75°	195°	315°
$\Delta Z(0T)$ Phase I	0.091 ± 0.057	0.070 ± 0.057	0.106 ± 0.057
$\Delta Z(0T)$ Phase II	0.029 ± 0.057	0.258 ± 0.057	0.217 ± 0.057
$\Delta Z(0T)$ [Ph. II–Ph. I]	-0.062 ± 0.080	0.188 ± 0.080	0.111 ± 0.080
ΔZ_{04T} Phase I	2.069 ± 0.057	2.789 ± 0.057	2.674 ± 0.057
ΔZ_{04T} Phase II	1.793 ± 0.057	2.734 ± 0.057	2.650 ± 0.057
ΔZ_{04T} [Ph. II–Ph. I]	-0.276 ± 0.080	-0.055 ± 0.080	-0.024 ± 0.080

Tabla 6.2: *Medida del desplazamiento relativo (mm) de Z entre la TP y las CSCs de la posición ME1/1 de la rueda YE1, durante las dos fases del MTCC.*

6.1.3.2.2. Distancia Radial.

La medida de la distancia radial a lo largo de los caminos de los láseres combina la información de los perfiles radiales, dimensiones de las CSCs y medidas de los distanciómetros. Las sondas de temperatura complementan las medidas a través de estos elementos, compensando la temperatura en cada momento. Los distanciómetros para la medida en R están situados en las posiciones inferior y superior de cada CSC de la ME1/2, como se muestra en la figura 6.2, la parte inferior mide la posición de las CSCs de la ME1/2 respecto a las TPs, mientras que la superior lo hace respecto a las estructuras MABs fijadas sobre las ruedas YB2s del BARREL.

En las tres primeras filas de la tabla 6.3 se muestra el reposicionamiento de las CSC respecto a las TPs, antes y después de cada ciclo de campo B=0, B=4 y vuelta a B=0, medidos en ambas fases del MTCC, para los tres cuadrantes estudiados. Y en las tres siguientes se compara el desplazamiento total sufrido por la CSC respecto a las TPs durante la subida de 0T a 4T, en ambas fases del MTCC. Los valores de reposicionamiento en los tres cuadrantes son compatibles con 0 y los desplazamientos totales por las fuerzas magnéticas son compatibles entre ellos.

ϕ quarter	75°	255°	315°
ΔR(0 T) Phase I	-0.033 ± 0.057	-0.031 ± 0.057	0.019 ± 0.057
ΔR(0 T) Phase II	-0.040 ± 0.057	0.039 ± 0.057	-0.004 ± 0.057
ΔR(0 T) [Ph. II–Ph. I]	-0.007 ± 0.080	0.070 ± 0.080	-0.023 ± 0.080
ΔR_{04T} Phase I	3.504 ± 0.057	3.839 ± 0.057	3.720 ± 0.057
ΔR_{04T} Phase II	3.502 ± 0.057	3.729 ± 0.057	3.641 ± 0.057
ΔR_{04T} [Ph. II–Ph. I]	-0.002 ± 0.080	-0.110 ± 0.080	-0.079 ± 0.080

Tabla 6.3: *Desplazamiento relativo (mm) en R entre las TPs y la parte inferior de las CSC de la ME1/2, medidos durante ambas fases del MTCC.*

Los resultados de las medidas realizadas entre la parte superior de las CSC de la ME1/2 y los MABs, durante el período elástico, se muestran en la tabla 6.4, para ambas fases. Por razones desconocidas no funcionó durante la primera fase del MTCC el distanciómetro de la posición de 75º. En las 3 últimas filas se compara el desplazamiento total medido durante la rampa del imán de 0T a 4T, en ambos MTCC. La comparación de los valores computados de reposicionamiento es compatibles con 0 en ambas fases del MTCC. Los valores de desplazamientos totales debidos a las fuerzas del campo al alcanzar los 4T en 2 regiones son compatibles dentro de 1σ. Los desplazamientos radiales medidos son compatibles con los movimientos esperados en las CSCs de la ME1/2 debidos a los Z-stops.

ϕ quarter	75°	255°	315°
ΔR(0 T) Phase I	–	0.0022 ± 0.057	0.000 ± 0.057
ΔR(0 T) Phase II	-0.0073 ± 0.057	-0.057 ± 0.057	-0.198 ± 0.057
ΔR(0 T) [Ph. II–Ph. I]	–	-0.079 ± 0.080	-0.198 ± 0.080
ΔR_{04T} Phase I	–	-2.757 ± 0.057	-2.820 ± 0.057
ΔR_{04T} Phase II	-3.464 ± 0.057	-2.806 ± 0.057	-2.865 ± 0.057
ΔR_{04T} [Ph. II–Ph. I]	–	-0.049 ± 0.080	-0.045 ± 0.080

Tabla 6.4: *Desplazamiento relativo (mm) en R entre las estructuras MABs y la parte superior de las CSC de la ME1/2, medidos durante ambas fases del MTCC.*

6.1.3.3. Movimientos angulares.

Para realizar la monitorización de los movimientos angulares de algunas de las estructuras utilizadas en el sistema de alineamiento LINK de CMS, se han utilizado inclinómetros. Estos sensores dan una medida del ángulo que forman respecto al vector de la gravedad, referidos siempre al elemento sobre el que están fijados.

Se han utilizado sensores 1D, que miden la gravedad en torno al eje Z, y 2D, que miden respecto al eje Z e Y, durante el MTCC. Los 2D fueron instalados sobre el AR y el LD, monitoreando el angulo φ y θ, y que van a detectar rotaciones o flexiones de estas estructuras o del TRACKER. Y los 1D se han instalado sobre las estructuras MABs monitorizando la componente angular φ.

Las rotaciones en φ observadas por los inclinómetros situados en el AR (Figura 3.5) son compatibles con ausencia de rotación: después del ciclo completo 0T-

4T-0T estos vuelven a su orientación original dentro de 1σ (± μrad). Y la Δφ (0-4T) medida entre la orientación que presenta con B= 0T y B= 4T es -0.3±42.4 μrad para el inclinómetro situado en la parte superior y 60.0±56.6 μrad para el inclinómetro situado en la parte inferior.

Concerniente al LD, se observa un Δφ (0-4T) diferente desde el cero en ambas fases, que indica una aparente rotación en sentido contrario a las agujas del reloj en torno al eje +Z de 120.5±42.46 μrad en la fase I y 108.4±56.6 μrad en la fase II. Esta rotación puede deberse al carácter flotante de la estructura LD y no una rotación real.

Finalmente, los inclinómetros 1D situados sobre los MABs no muestran rotaciones frente a ninguna situación de las ensayadas durante el MTCC.

6.1.4. Reconstrucción de los resultados.

6.1.4.1. Descripción de COCOA.

COCOA es un software en C++ orientado a objetos para estudiar sistemas ópticos a través de una aproximación basada en un ajuste no lineal CHI-cuadrado. Este permite la reconstrucción de la posición y orientación de los objetos del sistema óptico y realiza un cálculo de propagación de errores. Para el sistema de lineación LINK de CMS, COCOA trabaja con unos 30000 grados de libertad.

Adicionalmente a los ficheros descritos de datos tomados que se generan, el sistema tiene que ser descrito previamente al programa. Esto incluye la interconexión de elementos (por ejemplo, que láser llega a que sensores) y su jerarquía (que elementos están fijados mecánicamente a que estructuras), junto con una aproximación de la geometría obtenida de medidas previas realizadas (por ejemplo, las calibraciones realizadas mediante fotogrametría digital). Suministrar una buena estimación de la geometría no es necesario, pero acelera la convergencia, asegura la bondad de los resultados y ayuda a evitar descensos en mínimos locales.

Los parámetros utilizados por el software se clasifican en fijos, calibrados y desconocidos, dependiendo de cómo se utilicen los datos en el ajuste como: fijos constantes, provenientes de calibraciones (con su correspondiente precisión) o como desconocidos y por consiguiente totalmente libres para la minimización. El resultado de COCOA es un conjunto de parámetros que corresponde al '*best fit*' de los datos suministrados.

Siendo P la matriz normalizada de los errores asociados a las medidas reales y D la matriz de desviaciones entre las medidas reales e ideales. COCOA lo que hace es calcular un nuevo vector de parámetros X, corrigiendo sus elementos de forma iterativa, hasta converger a un valor mínimo de la matriz D.

La corrección que tiene que hacerse sobre los parámetros se calcula como

$$dX = (A^t \times P \times A)^{-1} \times (A^t \times P \times D), \qquad siendo\ A_{ij} = \left(\frac{\delta M}{\delta X_j}\right)_i \qquad (6.2)$$

Una vez alcanzada la convergencia, el vector X contiene la descripción geométrica del sistema con el mejor ajuste posible, compatible con las medidas tomadas y las constantes de calibración introducidas. La propagación de errores está contenida en la matriz de covarianza

$$C = n^2 \times (A^t \times P \times A)^{-1} \qquad (6.3)$$

donde n es la constante de normalización de la matriz P. La correlación entre los parámetros se encuentra en los elementos situados fuera de la diagonal.

6.1.4.2. Resultados de la reconstrucción de COCOA.

Para utilizar COCOA, se codificó la geometría utilizada en el MTCC. La geometría utilizada se compone de (Figura 6.2):

Un AR equipado con tres láseres que apuntan hacia el LD.

Un LD equipado con tres LB, que contiene cada uno un prisma que refleja el haz láser que viene del AR y lo dirige hasta los MABs y un colimador que ilumina hacia los mismos sensores situados en los MABs y que al mismo tiempo provee un haz paralelo que llega a los ASPDs situados sobre las CSCs en la ME1/1 y ME1/2.

Tres TP equipadas con 3 ASPDs.

Tres MABs que contienen dos ASPDs cada uno y un colimador láser que dirige su haz hacia las TPs.

Tres CSCs en la región ME1/2, equipada con dos ASPDs cada una.

Tres CSCs en la región ME1/1, equipada con un ASPD cada una.

Aparte de los ficheros de medidas que corresponden a los 24 ASPDs se han incluido para la reconstrucción los datos procedentes de los distanciómetros (15 en total).

La geometría inicial se definió basándose en las posiciones y orientaciones calibradas, de los componentes citados. Para conseguir la mejor descripción posible del sistema instalado, se hizo un exhaustivo uso de la fotogrametría, medidas 2D y 3D en el laboratorio y estas calibraciones fueron incluidas en el fichero de descripción de la geometría de COCOA. La fotogrametría tomada sobre el sistema en el SX5 (se tomó el documento [135] como referencia) permite posicionar las principales estructuras mecánicas que soportan los ASPDs y el resto de dispositivos definidos.

Es necesario posicionar y orientar todos los dispositivos del sistema dentro de esas estructuras, para ello se han utilizado las técnicas y dispositivos que se han descrito en el capítulo 3 y 4. En el caso de los ASPDs se ha llevado a cabo utilizando sistemas de medición 2D de alta precisión (<10 μm) que miden la posición del centro del sensor respecto a las referencias de su soporte mecánico y luego se complementaban con otra medición 3D de alta precisión (<10 μm), para definir relativamente estas referencias respecto a las referencias utilizadas para posicionar este dispositivo sobre las estructuras

MABs, las CSCs y las TPs. Los distanciómetros han sido calibrados realizando una medición 3D, que da la posición del punto sobre el que se produce la medida respecto a las referencias utilizadas para posicionar este dispositivo sobre la estructura a que va fijada.

La calibración y orientación de los haces láser que parten de los colimadores, junto con los dispositivos ópticos que implementas los LB, se realizó en el laboratorio de los ISR en el CERN creado a tal fin como se ha explicado en capítulos anteriores. Otros dispositivos del sistema cómo los pentaprismas no fueron calibrados antes del MTCC, en este caso se realizaron calibración in situ en el SX5, después de tener instalado el sistema en CMS, a través de la comparación directa de los valores obtenidos con el sistema en funcionamiento respecto con los valores obtenidos por fotogrametría.

El método escogido para realizar la reconstrucción consistía en un proceso iterativo de tres pasos: en el primero se situaba el LD dentro del YE+1, a continuación se añadían las estructuras MABs a los resultados obtenidos de primer paso, y finalmente se situaban las ruedas YE+1 y YB+2 en el espacio respecto al AR. Para establecer una estructura de referencia en la descripción del sistema, se ha escogido la rueda YE+1 situadas en el plano XY y orientad en la Z, según las medidas tomadas de esta en el documento [270]. En este documento de partida, la YE+1 estaba situado en las coordenadas CMS (-1.8, -3.6, 7565) mm y (0,0, 0.43) mrad, relacionando el resto de componentes a este (la YB+2 estaba inicialmente en (0, 0, 5352) mm y el AR a (0, 0, 2935) mm ambos con (0, 0, 0) mrad).

En la tabla 6.5 se muestra la diferencia, en posición y orientación de las ruedas YE+1 e YB+2, obtenida del ajuste de los datos tomados antes de encender el imán (primer paso).

$B = 0$T Phase I	Δ_X	Δ_Y	Δ_Z	Δ_{AngX}	Δ_{AngY}	Δ_{AngZ}
YE + 1	-0.06 ± 0.37	-0.07 ± 0.38	6.50 ± 0.17	0.14 ± 0.07	-0.19 ± 0.07	0.03 ± 0.12
YB + 2	-1.48 ± 0.22	-0.61 ± 0.23	2.99 ± 0.20	0.44 ± 0.07	-0.51 ± 0.07	0.98 ± 0.07

Tabla 6.5: *Diferencias en posición (mm) y orientación (mrad) entre los valores ajustados a B=0 al comienzo la fase I del MTCC utilizando COCOA y los valores nominales o medidos para YE+1 y YB+2.*

Para validar los resultados reconstruidos por COCOA, la geometría reconstruida a B=0 T se compara con los datos disponibles obtenidos por la fotogrametría (cuando están disponibles, sino se consideran los nominales de diseño). La comparación preliminar entre los datos ajustados y medidos es muy buena y se muestra en la tabla 6.6, donde se han estudiado las CSCs de las ME1/1 y ME1/2 y los MABs. En este caso, las diferencias en translación están, en la mayoría de los casos, dentro del nivel de precisión que se ha conseguido con la medición de fotogrametría realizada (300 μm). Estos valores están representados en la figura 6.7 (a).

$B = 0$T Phase I	Δ_X	Δ_Y	Δ_Z	Δ_{AngX}	Δ_{AngY}	Δ_{AngZ}
ME11-75	-0.09 ± 0.30	-0.05 ± 0.30	-0.49 ± 0.30	–	–	–
ME11-255	0.09 ± 0.30	0.18 ± 0.30	0.59 ± 0.30	–	–	–
ME11-315	-0.01 ± 0.30	0.06 ± 0.30	0.28 ± 0.30	–	–	–
ME12-75	0.26 ± 0.31	0.33 ± 0.41	-0.16 ± 0.30	–	0.00 ± 0.10	0.24 ± 0.10
ME12-255	0.42 ± 0.31	-0.32 ± 0.41	0.05 ± 0.30	–	0.00 ± 0.10	-0.04 ± 0.10
ME12-315	0.13 ± 0.36	-0.60 ± 0.36	0.06 ± 0.30	–	–	–
MAB-75	-0.63 ± 0.40	0.17 ± 0.42	0.84 ± 0.41	–	-0.11 ± 0.11	0.14 ± 0.10
MAB-255	1.46 ± 0.40	0.21 ± 0.41	-0.81 ± 0.42	–	0.73 ± 0.11	-0.51 ± 0.10
MAB-315	-0.83 ± 0.40	-0.37 ± 0.40	-0.00 ± 0.42	–	0.00 ± 0.14	-0.24 ± 0.13

Tabla 6.6: *Diferencias en posición (mm) y orientación (mrad) entre los valores ajustados a B=0 en la fase I del MTCC utilizando COCOA y los valores obtenidos por fotogrametría para las CSCs de la ME1/1 y ME1/2 y los MABs.*

La bondad del ajuste se obtiene computando la media de los residuos (diferencia entre el valor real medido por el ASPD y el ajustado de la intersección del haz laser con el ASPD) en cada uno de los pasos. De esta forma se ha obtenido un valor medio de 101.6 μm en el paso 1, 50.84 μm en el paso 2 y 111.9 μm en el paso 3. Las figuras 6.7 (b) y (c) muestran los residuos de Rφ y Z del tercer paso.

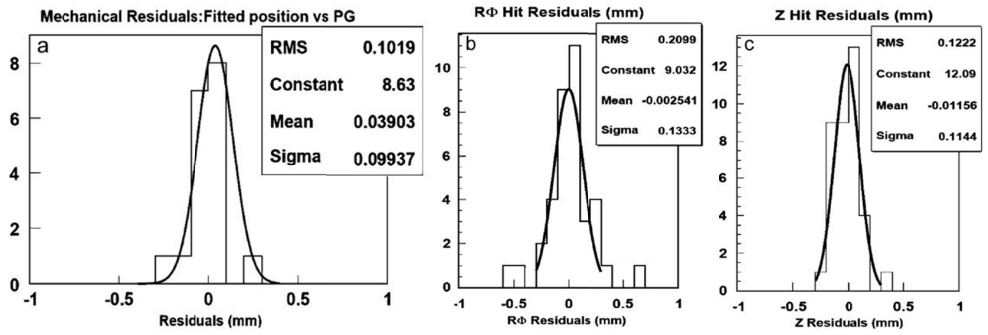


Figura 6.7: *Residuos definidos como diferencia en posición (mm) entre los valores ajustados a B=0T y los valores de fotogrametría (a) y diferencia en Rφ (b) y en Z (c) entre los valores reales medidos por el sensor y los simulados de la intersección de haz laser con éste. Un parámetro importante que se introduce en COCOA es la precisión de los valores medidos.*

En la figura 6.8 se muestra el sistema de coordenadas local utilizado por las CSCs y los MABs respecto a las ruedas donde están situados estos elementos.

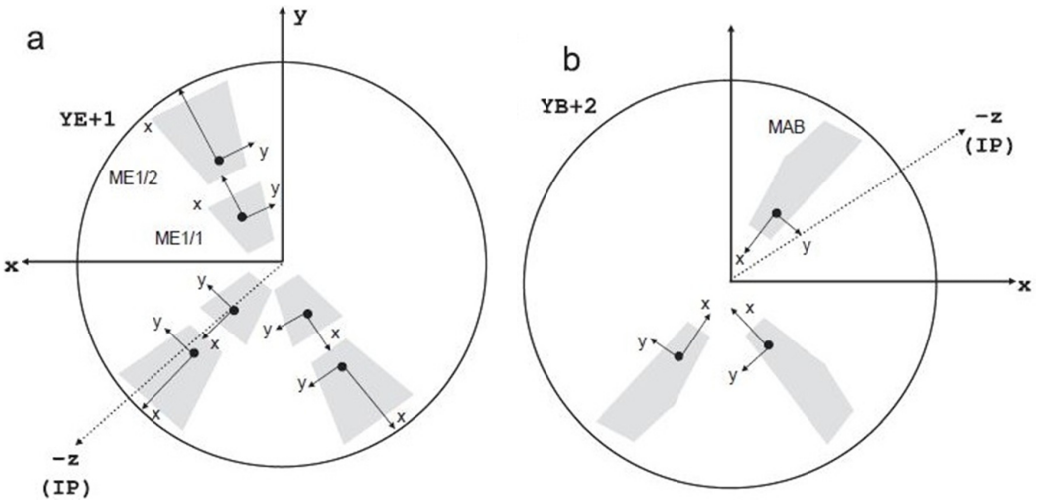


Figura 6.8: *Sistemas de coordenadas locales de las CSCs (a) situadas sobre la YE+1 y de los MABs (b) de la YB+2.*

En la tabla 6.7 se muestra la posición y orientación de YE+1, YB+2, las CSCs, y los MABs con B=0 T al final de la primera fase del MTCC. En estos resultados se observa una diferencia a lo largo del eje Z de 2.58 mm, que se pueden explicar por los ajustes mecánicos que se producen entre las estructuras de las ruedas o una deformación permanente de estas del YE+1 tras los ciclos realizados al imán.

$B = 0$ T Phase I	Δ_X	Δ_Y	Δ_Z	Δ_{AngX}	Δ_{AngY}	Δ_{AngZ}
YE + 1	−0.07 ± 0.21	0.25 ± 0.23	−2.58 ± 0.35	0.24 ± 0.07	0.00 ± 0.07	0.09 ± 0.07
YB + 2	0.18 ± 0.22	−0.42 ± 0.23	0.91 ± 0.37	−0.49 ± 0.07	−0.14 ± 0.07	−0.04 ± 0.07
ME11-75	−0.01 ± 0.41	0.45 ± 0.40	−5.54 ± 0.41	–	–	–
ME11-255	−0.56 ± 0.25	0.60 ± 0.26	1.86 ± 0.27	–	–	–
ME11-315	−0.86 ± 0.23	−0.73 ± 0.25	2.41 ± 0.27	–	–	–
ME12-75	0.88 ± 0.32	1.78 ± 0.62	−2.97 ± 0.29	–	0.31 ± 0.06	−0.11 ± 0.05
ME12-255	−1.48 ± 0.31	−0.64 ± 0.54	1.59 ± 0.41	–	−1.29 ± 0.06	−0.24 ± 0.05
ME12-315	1.13 ± 0.42	−0.65 ± 0.42	2.82 ± 0.27	–	–	–
MAB-75	0.66 ± 0.50	−0.17 ± 0.74	−3.51 ± 0.62	–	0.40 ± 0.08	0.00 ± 0.07
MAB-255	−0.94 ± 0.43	−0.18 ± 0.53	0.76 ± 0.59	–	0.61 ± 0.07	−0.05 ± 0.07
MAB-315	0.98 ± 0.53	−0.62 ± 0.53	2.75 ± 0.65	–	0.30 ± 0.17	0.05 ± 0.16

Tabla 6.7: *Diferencias en posición (mm) y orientación (mrad) entre los valores ajustados a B=0 al final de la fase I del MTCC utilizando COCOA y los valores del comienzo, para las YE+1 e YB+2 (respecto al TRACKER), CSCs de la ME1/1 y ME1/2 y los MABs.*

Durante la segunda fase del MTCC realizada en Octubre del 2006, se retiró el AR junto con la maqueta que representaba al TRACKER. Esta nueva configuración del LINK va a inducir un comportamiento diferente al observado en la fase anterior. De todas formas los ajustes para las ruedas YE+1 e YB+2 se pueden comparar con los de la fase anterior. De esta forma, partiendo de la situación de B=0 T del final de la primera fase, se ejecuta un proceso iterativo en 2 pasos: se coloca el LD dentro del YE+1 en el primer paso y en el segundo paso se añadían los MABs a los resultados obtenidos en el paso anterior.

La diferencia en posición y rotación de la YB+2 (respecto a YE+1) al comienzo de la fase II, muestra una diferencia respecto al cierre en la primera fase de ~1.5 mm de media en todas las coordenadas (hay que tener en cuenta que entre las fases el ENDCAP se abrió y cerró de nuevo). De igual forma se realizó la comprobación de los movimientos y orientaciones de las CSCs y MABs monitoreados, obteniendo unos resultados compatibles con la precisión de 300 μm citada.

En la primera fase se realizaron ajustes de los datos tomados a diferentes niveles de campo magnético, para comparar las variaciones de posición y orientación monitorizadas por el sistema. Los resultados de la reconstrucción con B=0T del final de la fase I se tomaron como entrada del programa de reconstrucción, siendo considerada la mejor estimación de la geometría computada.

La comparación de dos conjuntos de resultados monitoriza el movimiento de los componentes durante el ciclo del MTCC. En este caso la estructura de referencia escogida como fija fue el AR, por resultar un comportamiento más natural con el incremento del campo magnético la aproximación del ENDCAP hacia el centro de CMS. Los resultados obtenidos muestran un buen acuerdo con los mostrados en la sección 6.1.3. Las tablas 6.8 y 6.9 muestran la diferencia en posición y orientación de YE+1 e YB+2 entre los datos ajustados a ciertos niveles de campo B y el ajustado a B=0 T en su correspondiente período de la primera fase.

YE + 1 Phase I	Δ_X	Δ_Y	Δ_Z	Δ_{AngX}	Δ_{AngY}	Δ_{AngZ}
$B = 2$ T	1.54 ± 0.26	-0.71 ± 0.26	-5.18 ± 0.32	0.04 ± 0.07	0.05 ± 0.09	0.22 ± 0.07
$B = 3$ T	1.44 ± 0.26	-0.61 ± 0.26	-8.98 ± 0.32	-0.05 ± 0.07	0.00 ± 0.09	0.23 ± 0.07
$B = 3.8$ T	1.07 ± 0.26	-0.42 ± 0.26	-13.03 ± 0.32	0.04 ± 0.07	0.00 ± 0.09	-0.04 ± 0.07
$B = 4.0$ T	1.22 ± 0.26	-0.39 ± 0.26	-13.69 ± 0.32	0.04 ± 0.07	0.44 ± 0.09	0.07 ± 0.07

Tabla 6.8: *Diferencias en posición (mm) y orientación (mrad) entre los valores ajustados a diferentes valores de B y B=0 T al final de la fase I del MTCC utilizando COCOA, para el YE+1 (respecto al TRACKER).*

YB + 2 Phase I	Δ_X	Δ_Y	Δ_Z	Δ_{AngX}	Δ_{AngY}	Δ_{AngZ}
$B = 2$ T	0.81 ± 0.35	-0.24 ± 0.38	-0.58 ± 0.63	-0.51 ± 0.09	0.23 ± 0.12	0.35 ± 0.08
$B = 3$ T	1.28 ± 0.35	1.26 ± 0.38	-0.14 ± 0.63	-0.30 ± 0.09	0.91 ± 0.12	-0.07 ± 0.08
$B = 3.8$ T	1.00 ± 0.35	1.37 ± 0.38	-0.37 ± 0.63	-0.51 ± 0.09	1.27 ± 0.12	-0.37 ± 0.08
$B = 4.0$ T	1.21 ± 0.35	2.28 ± 0.38	-0.03 ± 0.63	-0.63 ± 0.09	1.71 ± 0.12	-0.33 ± 0.08

Tabla 6.9: *Diferencias en posición (mm) y orientación (mrad) entre los valores ajustados a diferentes valores de B y B=0 T al final de la fase I del MTCC utilizando COCOA, para la YB+2 (respecto al TRACKER).*

La media de los residuos de los valores ajustados es de 221.4, 229.6, 229.3 y 311.7 μm para B=2, 3, 3.8 y 4 T respectivamente, que representan unos valores ligeramente superiores que los obtenidos para los ajustes con B=0.

Como conclusión preliminar se puede obtener de estos valores que la compresión producida en el YE+1respecto al TRACKER (o entre el LD y el AR) puede obtenerse directamente añadiendo los cambios en Z hacia el centro de CMS que ha sufrido el YE+1 y el LD: 13.9 mm (de la tabla 6.8) + 1.83 mm (movimiento del LD a 4T) = 15.52 mm, que se pueden comparar con los valores obtenidos por los 3 distanciómetros colocados entre esas estructuras a 75º, 195º y 315º y que miden unas compresiones de 15.6, 15.5 y 15.1 mm respectivamente.

Como resumen de la situación de algunos componentes monitorizados, en la tabla 6.10 se muestran la diferencia en posición y orientación para las CSCs y los MABs entre los valores ajustados a B=3.8 T utilizando COCOA y los correspondientes a B=0 T. Es de notar que el distanciómetro del MAB situado en la posición de 75º no funcionó correctamente, por lo que no se han podido obtener los valores *x* e *y* a los que es sensible.

$B = 3.8$ T Phase I	Δ_X	Δ_Y	Δ_Z	Δ_{AngX}	Δ_{AngY}	Δ_{AngZ}
ME11-75	1.60 ± 0.34	-0.09 ± 0.27	-2.36 ± 0.39	–	–	–
ME11-255	0.08 ± 0.31	0.97 ± 0.28	-2.67 ± 0.36	–	–	–
ME11-315	-0.36 ± 0.28	-0.51 ± 0.29	-1.22 ± 0.35	–	–	–
ME12-75	2.02 ± 0.38	-1.82 ± 0.78	1.97 ± 0.39	–	-3.87 ± 0.72	-0.38 ± 0.69
ME12-255	-0.84 ± 0.34	-2.00 ± 0.64	1.45 ± 0.36	–	-3.91 ± 0.72	-0.35 ± 0.69
ME12-315	0.21 ± 0.50	-0.80 ± 0.50	3.10 ± 0.35	–	–	–
MAB-75	–	–	1.49 ± 0.76	–	-0.44 ± 0.08	-0.32 ± 0.08
MAB-255	1.25 ± 0.50	-1.18 ± 0.66	-4.16 ± 0.70	–	0.28 ± 0.16	-0.10 ± 0.16
MAB-315	-0.13 ± 0.67	-0.27 ± 0.64	2.67 ± 0.73	–	0.32 ± 0.19	-0.12 ± 0.19

Tabla 6.10: *Diferencias en posición (mm) y orientación (mrad) entre los valores ajustados a diferentes valores de B=3.8 T y B=0 T en la fase I del MTCC utilizando COCOA, para las CSCs de la ME1/1 y ME1/2 y los MABs.*

A modo de ejemplo, en la tabla 6.11 se sigue el movimiento con el campo magnético que experimenta una CSC. En el resto de unidades monitorizadas se ha observado un comportamiento similar.

ME12-255 Phase I	Δ_X	Δ_Y	Δ_Z	Δ_{AngX}	Δ_{AngY}	Δ_{AngZ}
$B = 2$ T	1.10 ± 0.34	-2.15 ± 0.64	-0.31 ± 0.36	–	-1.68 ± 0.07	0.23 ± 0.07
$B = 3$ T	0.10 ± 0.34	-1.68 ± 0.64	0.21 ± 0.36	–	-2.71 ± 0.07	-0.14 ± 0.07
$B = 3.8$ T	-0.84 ± 0.34	-2.00 ± 0.64	1.45 ± 0.36	–	-3.91 ± 0.07	-0.35 ± 0.07
$B = 4.0$ T	-0.75 ± 0.34	-1.73 ± 0.64	1.06 ± 0.36	–	-4.01 ± 0.07	-0.35 ± 0.07

Tabla 6.11: *Diferencias en posición (mm) y orientación (mrad) entre los valores ajustados a diferentes valores de B y B=0 T al final de la fase I del MTCC utilizando COCOA, para la CSC de la ME1/2 situada a 255º (respecto a YE+1).*

De forma similar, se ha ajustado el sistema en diferentes condiciones del campo magnético para la segunda fase. En este caso el AR no estaba instalado y por tanto no era la estructura de referencia, por lo los movimientos obtenidos en esta situación van a ser entre las ruedas YE+1 e YB+2. En este caso se ha escogido la YE+1 como elemento fijo en los ajustes. En la tabla

6.12 se muestran las diferencias de posición y orientación para YB+2 respecto a YE+1, durante los diferentes valores incrementales de campo magnético estudiados, con respecto a la situación de B=0 después del cierre definitivo del detector.

YB + 2 Phase II	Δ_X	Δ_Y	Δ_Z	Δ_{AngX}	Δ_{AngY}	Δ_{AngZ}
$B = 2$ T	0.05 ± 0.36	-0.34 ± 0.38	5.12 ± 0.67	-0.42 ± 0.10	-0.23 ± 0.12	-0.22 ± 0.10
$B = 3$ T	0.06 ± 0.36	-0.26 ± 0.38	8.70 ± 0.67	-0.63 ± 0.10	-0.37 ± 0.12	-0.02 ± 0.10
$B = 3.8$ T	-0.02 ± 0.36	-0.17 ± 0.38	13.30 ± 0.67	-0.72 ± 0.10	-0.31 ± 0.12	0.07 ± 0.10
$B = 4$ T	-0.09 ± 0.36	-0.17 ± 0.38	14.34 ± 0.67	-0.70 ± 0.10	-0.09 ± 0.12	-0.19 ± 0.10

Tabla 6.12: *Diferencias en posición (mm) y orientación (mrad) entre los valores ajustados a diferentes valores de B y B=0 T al final de la fase II del MTCC utilizando COCOA, para el YB+2 (respecto a YE+1).*

El principal desplazamiento (que afecta a la Z) es acorde con los valores obtenidos en la primera fase del MTCC, teniendo en cuenta que en esta fase se ha fijado el YE+1 (a un valor Z=7565 mm). Como ejemplo, la distancia relativa en Z en la segunda fase a B=3.8 entre YB+2 e YB+1 es de 862.86 mm y que en la primera fase fue 862.89 mm. La media de los residuos de los valores ajustados en esta fase son 121.13, 106.01, 108.7 y 121.2 µm para B=2, 3, 3.8 y 4 T respectivamente.

Como último estudio de reproducibilidad de los movimientos con el campo, en la tabla 6.13 se muestra el mismo estudio presentado en la tabla 6.11, para una de las CSC. El comportamiento observado en primera fase se reproduce muy bien con los datos de la segunda.

ME12–255 Phase II	Δ_X	Δ_Y	Δ_Z	Δ_{AngX}	Δ_{AngY}	Δ_{AngZ}
$B = 2$ T	-0.96 ± 0.38	-0.71 ± 0.63	0.27 ± 0.38	–	-1.89 ± 0.08	-0.28 ± 0.07
$B = 3$ T	-0.18 ± 0.38	-1.48 ± 0.63	0.87 ± 0.38	–	-3.12 ± 0.08	0.11 ± 0.07
$B = 3.8$ T	-0.37 ± 0.38	-1.94 ± 0.63	1.74 ± 0.38	–	-4.23 ± 0.08	0.09 ± 0.07
$B = 4.0$ T	-0.71 ± 0.38	-2.01 ± 0.63	1.18 ± 0.38	–	-4.57 ± 0.08	-0.09 ± 0.07

Tabla 6.13: *Diferencias en posición (mm) y orientación (mrad) entre los valores ajustados a diferentes valores de B y B=0 T al final de la fase II del MTCC utilizando COCOA, para la CSC de la ME1/2 situada a 255º (respecto a YE+1).*

6.1.5. Resumen y conclusiones.

Siguiendo los procedimientos descritos se ha conseguido validar la reconstrucción 3D de la geometría estudiada a través de la comparación entre los datos reconstruidos con B=0 frente a los datos obtenidos por medio de mediciones topográficas y de fotogrametría de algunos punto de referencia. Además se analizaron los datos en diferentes situaciones de campo magnético en las dos fases del MTCC, para tener una estimación de los movimientos globales de las diferentes estructuras de detección de CMS, permitiendo una verificación adicional de la validez de los resultados en las diferentes condiciones estudiadas.

Durante la subida del campo magnético la rueda YE+1 ha seguido el movimiento previsto hacia el centro de CMS realizando un desplazamiento máximo de 13.69 mm. Las CSC de ME1/2 situadas en esta rueda, han experimentado un movimiento y rotación global sobre sus ejes locales, según estos las CSCs no siguen exactamente el desplazamiento de la YE+1, puesto que su Z local debería ser cero, pero se han movido de 1 a 4 mm en función de la CSC y de la fase estudiada en el MTCC, las rotaciones que estas experimentan son de hasta 4.3 mrad (con la región externa de estas desplazándose en Z+). Además, estos resultados están en concordancia con los obtenidos por el sistema de alineación óptico del ENDCAP [271 y 272]. Esta primera comparación entre subsistemas y sus similares resultados obtenidos fueron considerados un importante hito durante el ejercicio realizado en el MTCC.

Se puede concluir, tras el estudio realizado durante la prueba del imán solenoidal, que, en concordancia con los requerimientos de diseño, el sistema de alineación LINK permite obtener, en la reconstrucción geométrica de las localizaciones espaciales relativas y orientaciones angulares entre las cámaras de muónes y el TRACKER, una precisión por debajo de 150 μm en distancias y de unos 40 μrad en la reconstrucción angular.

6.2. Estabilidad de CMS entre 2008 y 2010.

En este punto se presenta un estudio enfocado a evaluar el tiempo necesario para que el detector CMS alcance su equilibrio estructural, una vez que el imán ha llegado al nivel de operación a 3.8 T. De forma adicional, se muestran los resultados del seguimiento efectuado durante un período de funcionamiento en condiciones de operación de ocho meses a 3.8 T. Los datos analizados fueron recogidos en el período comprendido entre el año 2008 al 2010 [263, 264 y 265].

Durante los años 2008 y 2009, antes de la puesta en funcionamiento del LHC, el detector CMS estuvo tomando datos de rayos cósmicos con el imán funcionando a 3.8 T, intensidad escogida para trabajar en operación. Las campañas se llamaron CRAFT08 y CRAFT09, cuyo acrónimo corresponde a 'Cosmics Run At Four Tesla' [273, 274 y 275]. El sistema de alineación de CMS monitorizó los desplazamientos, rotaciones y deformaciones de las estructuras más relevantes durante estos períodos, de forma análoga a lo expuesto en el punto anterior para el MTCC, el análisis de estos datos permite confrontarlos con los observados en el CRAFT08 y CRAFT09 y de esa forma obtener la estabilidad mecánica cuando el campo está funcionando de forma constante a B=3.8 T.

En esta fase, el sistema de alineación LINK ya estaba totalmente instrumentado. En la figura 6.9 se muestran gráficamente los elementos que componen un cuadrante del sistema LINK.

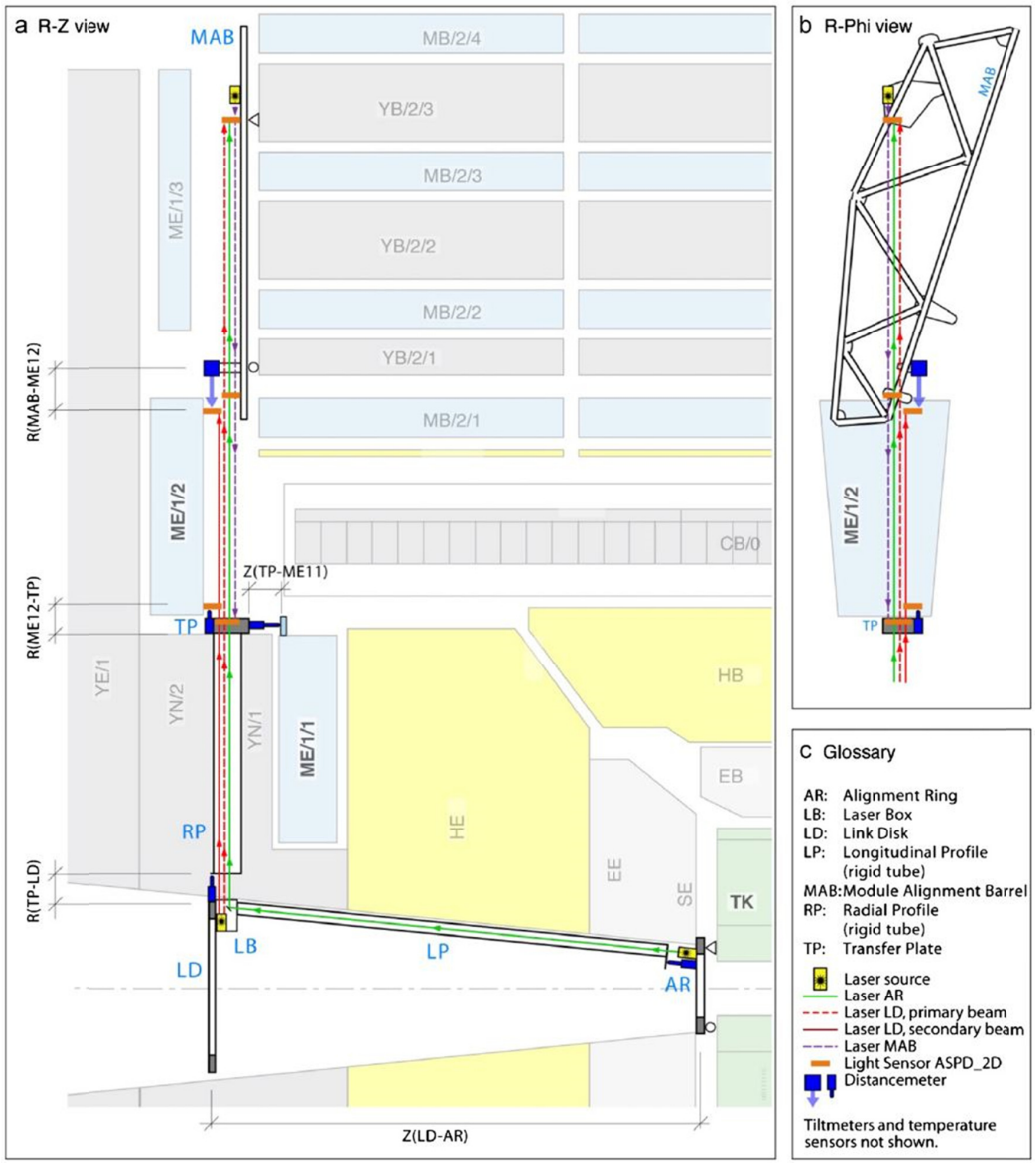


Figura 6.9: *Esquema donde se muestra un cuadrante RZ del sistema de alineación LINK de CMS. Las medidas de distancia que se han utilizado para estudiar la evolución de la deformación han sido R (MAB- CSC ME1/2), Z (TP-CSC ME1/1) y Z (LD-AR).*

6.2.1. Tiempo de estabilización de CMS en condiciones de operación.

El tiempo de estabilización de las estructuras de CMS (T_S) se define, una vez alcanzado el campo magnético de 3.8 T, como el tiempo en el que cualquier movimiento detectado a partir de ese momento es menor que la resolución de los sensores (~40 μm los distanciómetros y ~30 μrad los inclinómetros). Los datos tomados por el sistema de alineación LINK durante un 'RUN' (un ciclo completo con subida, estabilización y bajada de la potencia del imán) del

CRAFT08 y otro del CRAFT09 han servido de base para definir la estabilidad de CMS. Ambos 'RUN' han realizado una rampa desde B=0 T hasta B=3.8 T, seguido por varias horas de funcionamiento estable a 3.8 T. El 'RUN' seleccionado del CRAFT08, comenzó el 27 de Agosto de 2008 a las 09:25 horas y tuvo una duración de ~29.3 horas, durante el que se tomaron 355 eventos, 299 de ellos a 3.8 T. Un evento del sistema de alineación LINK se define como una lectura completa de todos los dispositivos que lo componen. El 'RUN' seleccionado durante el CRAFT09 comenzó el 27 de Octubre de 2009 a las 07:45 horas, con una duración de ~29.5 horas, durante este período se tomaron 354 eventos, 256 tomados a 3.8 T. Los datos se tomaron en ambos 'RUN' con una frecuencia de un evento cada 5 minutos aproximadamente. En la figura 6.10 (a y b) se muestran los valores del campo durante estos dos RUNs.

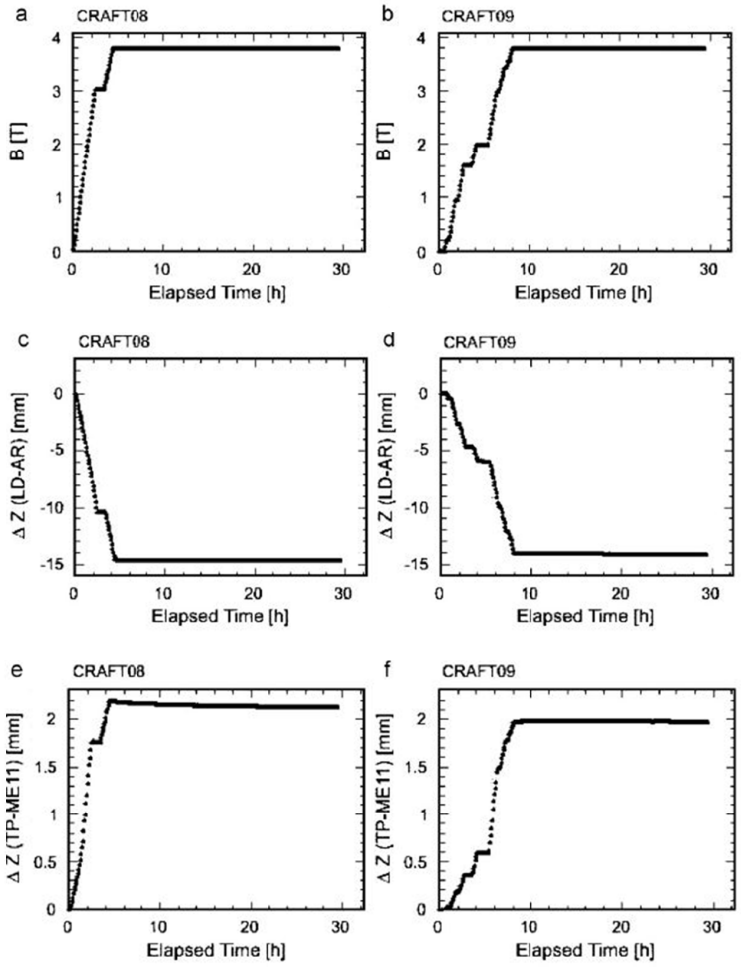


Figura 6.10: *Datos del sistema de alineación LINK tomados durante el CRAFT08 y CRAFT09, en el RUN de datos de estabilización, que muestran: intensidad de campo magnético (a y b); desplazamiento relativo ΔZ (LD-AR) en el cuadrante φ=75º del lado positivo de CMS (c y d); desplazamiento relativo ΔZ (TP-CSC ME1/1) en el cuadrante φ=315º del lado negativo de CMS (e y f).*

Durante estos dos RUNs, no se leyeron los ASPDs, para aumentar la frecuencia de la toma de datos, puesto que la lectura de todos supone unos 27 minutos. La medida de T_S se basó en la información suministrada por el conjunto de datos leídos de los distanciómetros (axiales y radiales) y por los de los inclinómetros (rotación en φ). Los parámetros analizados fueron (Figura 6.9):

La distancia axial relativa ΔZ entre el LD y el AR en las posiciones angulares φ=75º, 195º y 315º (para el lado positivo y negativo de CMS) y entre las TPs y las CSCs ME1/1 en los 12 cuadrantes RZ de CMS.

La distancia radial relativa ΔR entre los MABs y las CSCs ME1/2 y entre las estas CSCs y las TPs en los 12 cuadrantes.

El ángulo relativo Δφ en los 12 MABs externos.

Los movimientos observados durante ambos RUNs son similares, como se observa en la figura 6.10. Los LDs se acercan unos 14 mm a sus correspondiente ARs, debido al movimiento del YN1 donde van fijados, causado por el empuje que realiza la fuerza magnética, sobre ambos ENDCAPs, hacia el centro de CMS (Figura 6.10 (c y d)).

La deformación que se produce por el campo magnético es mucho más relevante sobre los ENDCAP, donde presenta un movimiento bastante complejo, como se mostró en el punto 2.2.6. Los 'Z-stop', que impiden el aplastamiento entre las ruedas de CMS, causan un abombamiento del ENDCAP según se muestra en la figura 6.5 (Izq.). La flexión que esto provoca sobre el YE1 en la posición de las CSCs ME1/2, respecto a la vertical, es de ~4 mrad y como consecuencia se produce un desplazamiento en Z de las CSCs ME1/1 de 1.5 a 2.5 mm alejándose de sus correspondientes TPs (Figura 6.10 (e y f)).

Las CSCs ME1/2, a su vez, realizan un movimiento radial de 2 a 4 mm hacia el exterior, acercándose a sus correspondientes estructuras MABs (6.11 (a y b)) y separándose de sus correspondientes TPs unos 3 mm (Figura 6.11 (c y d)).

Los inclinómetros situados en los MABs indican una rotación Δφ muy pequeña en el sentido de las agujas del reloj, menor de 100 μrad, en torno el eje Z de CMS (Figura 6.11 (e y f)).

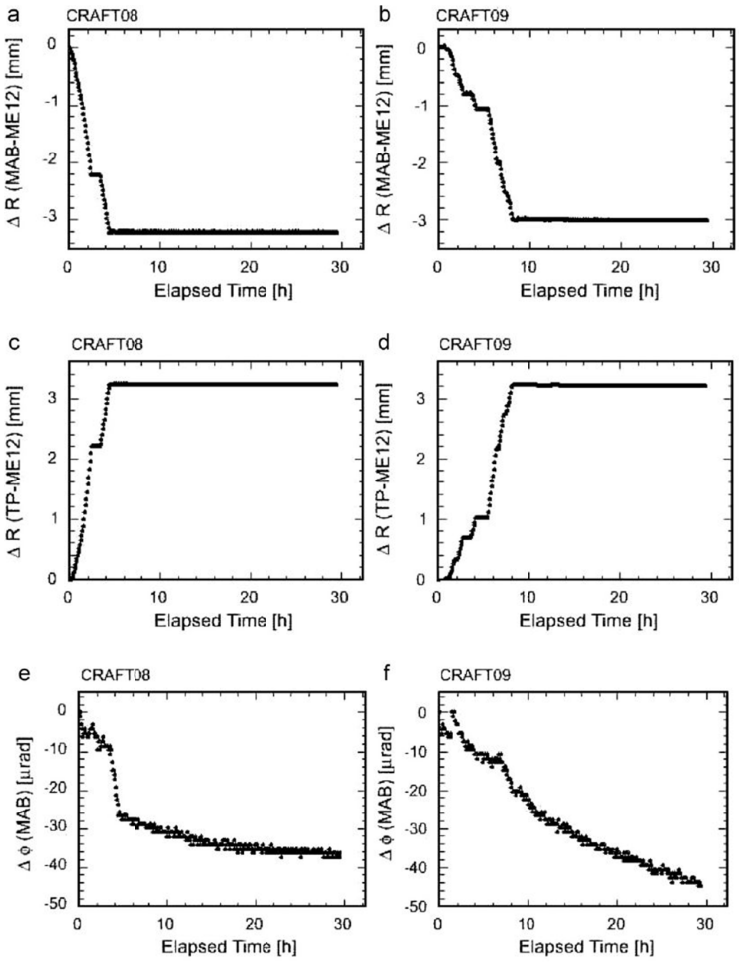


Figura 6.11: *Datos del sistema de alineación LINK tomados durante el CRAFT08 y CRAFT09, en el RUN de datos de estabilización, que muestran: desplazamiento radial relativo ΔR (MAB-CSC ME1/2) en el cuadrante φ=15º del lado positivo de CMS (a y b); desplazamiento radial relativo ΔR (TP-CSC ME1/2) en el cuadrante φ=15º del lado negativo de CMS (c y d); variación angular Δφ (MAB) en el cuadrante φ=15º del lado positivo de CMS (e y f).*

6.2.2. Cálculo de T_S: método y resultados.

Durante el CRAFT08, el campo magnético alcanzó los 3.8 T en el evento 56, al cabo de 4.7 h de comenzar la subida de potencia del imán. En el RUN del CRAFT09, se alcanzó este nivel en el evento 98, tras 8.2 horas de subida de potencia del imán. Este momento, en el que se alcanza el valor de 3.8 T, es el valor t_0= 0h para comenzar a contabilizar el tiempo en el que se alcanza la estabilidad en CMS T_S. Las figuras 6.12 y 6.13 muestran las medidas de los movimientos axiales (Figura 6.12 (a, b, c y d)), radiales (Figura 6.13 (a, b, c y d)) y angulares (Figura 6.13 (e y f)), para los cuadrantes indicados en ambos CRAFTs, en función del tiempo transcurrido tras el t_0.

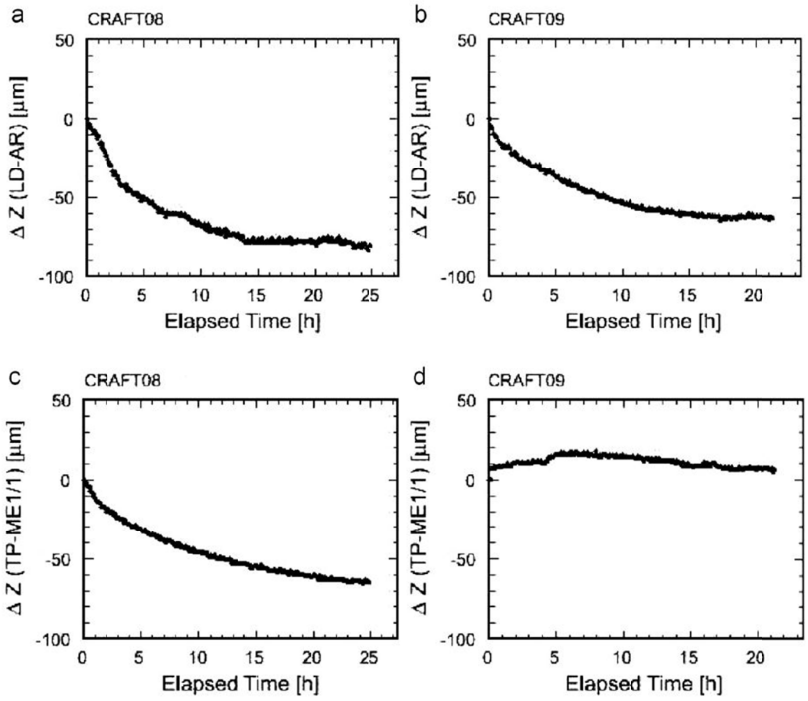


Figura 6.12: *Datos del sistema de alineación LINK tomados durante el CRAFT08 y CRAFT09, en función del tiempo transcurrido una vez alcanzado 3.8T en CMS: desplazamiento relativo ΔZ (LD-AR) en el cuadrante φ=75º del lado positivo de CMS (a y b); desplazamiento relativo ΔZ (TP-CSC ME1/1) en el cuadrante φ=315º del lado negativo de CMS (c y d).*

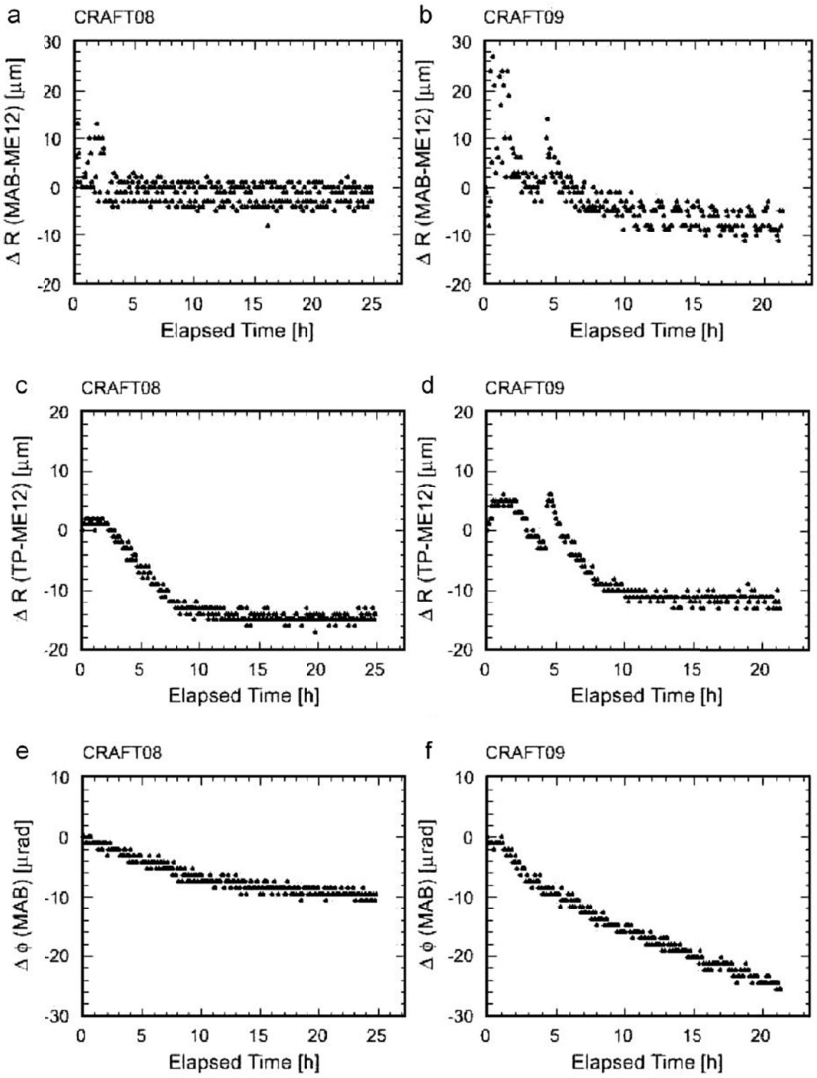


Figura 6.13: *Datos del sistema de alineación LINK tomados durante el CRAFT08 y CRAFT09, en función del tiempo transcurrido una vez alcanzado 3.8T en CMS: desplazamiento radial relativo ΔR (MAB-CSC ME1/2) en el cuadrante φ=15º del lado positivo de CMS (a y b); desplazamiento radial relativo ΔR (TP-CSC ME1/2) en el cuadrante φ=15º del lado negativo de CMS (c y d); variación angular Δφ (MAB) en el cuadrante φ=15º del lado positivo de CMS (e y f).*

Para cada una de las 54 variables estudiadas, se evalúa la distribución de cantidades:

$$\Delta\left(variable_j\right)_i = \left(medida\ variable_j en\ el\ momento\ t = t'_o + i \times \Delta t\ \right) - \left(medida\ variable_j en\ el\ momento\ t = t'_o\right) \qquad (6.4)$$

donde t'_0 toma, secuencialmente, los valores 0, 1, 2, … h después de alcanzar 3.8 T, 'j' se refiere a cada una de las 54 medidas de movimiento relativo, e 'i' hace referencia a todos los eventos leídos desde t= t'_0 en adelante (en

escalones de Δt= 5 minutos, que es el intervalo de tiempo entre dos medidas consecutivas).

Los valores extremos de esas distribuciones Δ_{min} y Δ_{max}, son función de t'_0. T_S se define como el tiempo t'_0 para el que $|\Delta_{min}|$ y $|\Delta_{max}|$ son menor que la resolución de su correspondiente sensor: 40 μm para los distanciómetros y 30 μrad en el caso de los inclinómetros.

A modo de ejemplo, se muestra el estudio de la variable ΔZ (LD-AR) de la posición angular φ=315º del lado positivo de CMS del CRAFT09: en la figura 6.14 se muestra la distribución de la medida relativa respecto a los valores t'_0=0, 2, 3 y 4 h; la tabla 6.14 muestra los valores medios, RMS, Δ_{min} y Δ_{max}, que corresponden a esas distribuciones. El equilibrio estructural en esta variable ocurre en el intervalo de tiempo t'_0=2 a 3 horas. Puesto que este estudio utiliza intervalos de tiempo de 1 h, se ha tomado media hora como el promedio de la incertidumbre de T_S y por consiguiente se ha obtenido T_S=2.5±0.5.

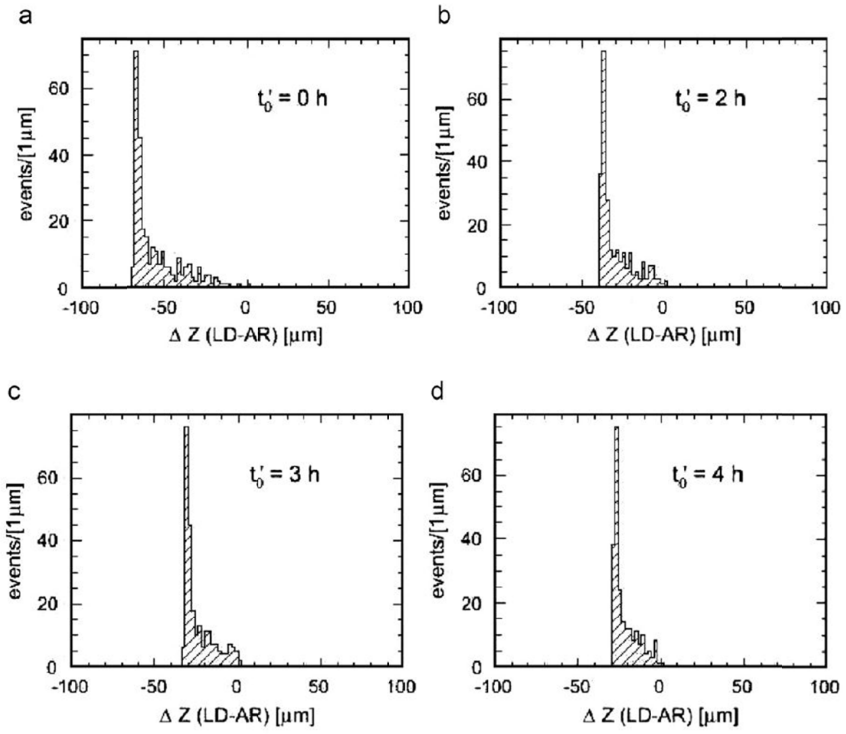


Figura 6.14: *Datos del sistema de alineación LINK del CRAFT09, donde se muestra la distribución ΔZ (LD-AR) después de un tiempo t'_0 tras alcanzar 3.8 T, en el cuadrante φ=315º del lado positivo de CMS: t'_0= 0 h (a), t'_0= 2 h (b); t'_0= 3 h (c); t'_0= 4 h (d). La estabilización de las variaciones por debajo de 40 μm se alcanza al cabo de 2 o 3 h.*

t_0' (h)	Mean (mm)	RMS (mm)	Δ_{min} (mm)	Δ_{max} (mm)
0	−0.054	0.015	−0.068	0.001
2	−0.029	0.011	−0.040	0.001
3	−0.023	0.009	**−0.033**	0.001
4	−0.022	0.008	−0.030	0.000

Tabla 6.14: *Ejemplo de la determinación de T_S para la variable ΔZ (LD-AR) después de un tiempo t'_0 tras alcanzar 3.8 T, en el cuadrante φ=315º, durante el CRAFT09. Las columnas muestran las distribuciones de los valores medios, RMS, Δ_{min} y Δ_{max}. En este ejemplo la variación por debajo de 40 μm se alcanza antes de las 3 h.*

Este ejercicio se ha repetido para las 54 variables y en ambos RUNs considerados, mostrando sus resultados en la tabla 6.15. Cada variable se ha medido en diferentes posiciones angulares de φ. Por ejemplo, para ΔZ (LD-AR) se han tomado 3 del lado positivo y otras 3 del negativo y en el caso de Δφ (MAB) se han tomado 6 del lado positivo y otras 6 del negativo. El valor T_S mostrado en la tabla 6.15 se corresponde a el tiempo de estabilización mayor de todas las posiciones φ leídas. Esta tabla muestra que CMS alcanza su equilibrio estructural unas 13.5 ± 0.5 h después de alcanzar el imán el nivel de campo magnético de B=3.8 T. Este momento corresponde al evento 218 registrado en el CRAFT08 y 260 del CRAFT09 y cuyos valores han sido los utilizados en este análisis. Tomando los valores leídos en esos eventos como nueva referencia, se calcula el máximo movimiento esperado para ΔZ, ΔR y Δφ después del tiempo de estabilización, mostrando el resultado en la tabla 6.16. Una vez que CMS alcanza su equilibrio estructural, los movimientos esperados no van a exceder de ±26 μm en la dirección Z y ±31 μm en la R, mientras que las rotaciones en φ no van a exceder de ±30 μrad.

Variable	CRAFT08 T_s (h)	CRAFT09 T_s (h)
ΔZ (LD–AR)	3.5 ± 0.5	2.5 ± 0.5
ΔZ (TP–ME1/1)	10.5 ± 0.5	0.5 ± 0.5
ΔR (MAB–ME1/2)	2.5 ± 0.5	1.5 ± 0.5
ΔR (TP–ME1/2)	0.5 ± 0.5	0.5 ± 0.5
$\Delta\Phi$ (MAB)	$\mathbf{13.5 \pm 0.5}$	12.5 ± 0.5

Tabla 6.15: *Resultados de los cálculos de estabilización en ambos RUNs del CRAFT08 y CRAFT09 para las 5 variables estudiadas. Se muestran los valores más altos de todas las posiciones angulares estudiadas. La estabilización de todas las variables observadas se alcanza 13.5 h después de llegar el imán al valor de 3.8 T.*

Variable	CRAFT08	CRAFT09
ΔZ (LD–AR)	± 14 μm	± 12 μm
ΔZ (TP–ME1/1)	± 26 μm	± 8 μm
ΔR (MAB–ME1/2)	± 10 μm	± 13 μm
ΔR (TP–ME1/2)	± 31 μm	± 23 μm
$\Delta\Phi$ (MAB)	± 30 μrad	± 26 μrad

Tabla 6.16: *Máximo movimiento esperado para ΔZ, ΔR y Δφ después de transcurrir T_S=13.5 h, calculado de los datos registrados por el sistema de alineación LINK de CMS durante los RUNs del CRAFT08 y CRAFT09.*

6.2.3. Estabilidad de CMS a largo plazo.

CMS comenzó a operar con colisiones en Marzo de 2010, desde ese momento el imán ha sido encendido y apagado en varias ocasiones. En esta sección se muestran los datos recogidos y analizados por el sistema de alineación LINK entre Marzo y Octubre de ese año, para verificar los resultados obtenidos del CRAFT08 y CRAFT09.

6.2.3.1. Períodos y dispositivos del sistema LINK monitorizados.

La toma de datos del sistema de alineación de CMS comenzó inmediatamente después de proceder al cierre de las ruedas de CMS y de que el imán llegara a su potencia nominal de 3.8 T. Esto se produjo a comienzos de Marzo de 2010, con el acelerador funcionando a una energía pp de 7 TeV.

Estos 8 meses se dividieron en varios períodos de operación, los cuales fueron definidos como el tiempo transcurrido entre el comienzo del encendido del imán hasta que este volvía a ser desconectado. Estos períodos fueron dirigidos por las necesidades del LHC y/o CMS y han sido completamente independientes de las actividades del sistema de alineación. Estos períodos se muestran en la tabla 6.17. En los siguientes análisis se han utilizado los datos que han sido recolectados al menos 24 h después de alcanzar el imán los 3.8 T, que según los estudios previos debería ser suficiente tiempo para que CMS alcance la estabilidad mecánica y los movimientos que ocurran deben estar por debajo de la resolución de los dispositivos utilizados para su monitorización.

Label for period	Period last (day/month)	Total number of days	Recorded events
P1	8/3 – 13/4	37	45
P2	16/4 – 22/4	7	8
P3	3/5 – 19/5	17	44
P4	3/6 – 18/6	16	25
P5	9/8 – 14/8	6	12
P6	17/8 – 27/8	11	18
P7	3/9 – 17/10	45	82

Tabla 6.17: *Períodos monitorizados por el sistema de alineación LINK de CMS durante el 2010. Uno o más encendidos y apagados del imán se han realizado entre cada uno de los períodos. Los datos iniciales tomados en cada período comienzan transcurridas unas 24 h con el imán funcionando a 3.8 T.*

Las variables utilizadas por el sistema LINK han sido:

Cambios de distancia axial ΔZ (LD-AR), en las 6 posiciones angulares que tiene el sistema φ=±75º, φ=±195º, y φ=±315º ('+' hace referencia al lado positivo de CMS y '–' al negativo). Y los cambios de distancia axiales ΔZ (TP-CSC ME1/1), en los 12 cuadrantes RZ que dispone el sistema entre ambos lados del detector.

Cambios en la distancia radial relativa ΔR (MAB-CSC ME1/2) y ΔR (TP-CSC ME1/2), en los 12 cuadrantes RZ que dispone el sistema entre ambos lados del detector.

Variaciones angulares relativas Δφ (AR) y Δθ (AR), siendo 8 variables observadas en total para ambos ARs. Variaciones angulares relativas Δφ (LD) y Δθ (LD), siendo 4 variables observadas en total para ambos LDs. Y las variaciones angulares relativas Δφ (MAB), en los 12 cuadrantes RZ que dispone el sistema entre ambos lados del detector.

6.2.3.2. Resultados observados.

En esta sección se ha seguido la misma estrategia seguida para evaluar el tiempo de estabilización de CMS.

Se evalúa la distribución de cantidades, para cada una de las 66 variables estudiadas:

$$\Delta\left(variable_j\right)_i = \left(medida\ variable_j en\ el\ momento\ t_j\right) - \left(medida\ variable_j en\ el\ momento\ t = 0\right) \quad (6.5)$$

'j' se refiere a cada una de los 66 movimientos relativos observados, e 'i' hace referencia a todos los eventos registrados unas 24 horas después de alcanzar los 3.8 T (t=0). Cada período se analiza de forma independiente y se extraen el valor medio de $\Delta(variable_j)$ y la RMS de la distribución. Se pretende buscar, para todos los períodos, las distribuciones de los valores absolutos de $\Delta(variable_j)$ ± RMS en los que estos fueron menores que la resolución del correspondiente sensor leído. El período más inestable fue el primero (P1) que siguió al cierre de CMS. En la tabla 6.18 se muestran los parámetros que presentan una mayor desviación del cero, en este primer período, de entre los 66 analizados. Estos se han comparado con los valores mostrados en los siguientes períodos P2 hasta el P7.

Los datos tomados indican que CMS muestra la esperada estabilidad estructural que se ha obtenido durante los CRAFTs de CMS, en todas las variables relacionadas con distancias radiales y variaciones angulares. A modo de ejemplo, en la figura 6.15 se muestra las variaciones angulares del inclinómetro del MAB situado en el cuadrante φ=15º del lado negativo de CMS. En la figura se muestra el valor de la medida observada por este dispositivo en los períodos P1, P3, P5 y P7, tomando como referencia de cada período el valor del inclinómetro en el primer evento tomado. Se han tomado un máximo de dos eventos por día, pero hubo días en los que no se tomaron datos. En la figura la mayoría de los puntos negros muestran el solapamiento de dos

eventos leídos durante el mismo día. Todas las rotaciones observadas son compatibles con cero, dentro de las 30 μm de resolución del inclinómetro.

Period observable	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
ΔZ(LD-AR)$\|_{+Z,\ \Phi=315^\circ}$ (μm)	-137 ± 62	-40 ± 36	32 ± 41	-51 ± 29	-8 ± 6	-37 ± 15	-42 ± 35
ΔZ(TP-ME11)$\|_{+Z,\ \Phi=135^\circ}$ (μm)	11 ± 6	-2 ± 7	10 ± 7	14 ± 10	1 ± 1	-10 ± 4	12 ± 7
ΔR(TP-ME12)$\|_{-Z,\ \Phi=255^\circ}$ (μm)	10 ± 11	-5 ± 8	-13 ± 13	-10 ± 10	-1 ± 6	-3 ± 7	7 ± 12
ΔR(LD-TP)$\|_{-Z,\ \Phi=195^\circ}$ (μm)	-27 ± 14	-7 ± 4	-8 ± 6	-12 ± 6	-2 ± 1	-8 ± 4	-21 ± 11
$\Delta\Phi$ (AR)$\|_{+Z}$ (μrad)	-11 ± 10	3 ± 15	15 ± 17	-4 ± 13	1 ± 2	-3 ± 2	5 ± 7
$\Delta\Theta$ (AR)$\|_{+Z}$ (μrad)	-24 ± 15	-6 ± 9	-10 ± 8	-5 ± 4	1 ± 2	3 ± 2	-14 ± 5
$\Delta\Phi$ (LD)$\|_{+Z}$ (μrad)	-5 ± 6	0 ± 5	7 ± 5	5 ± 5	-0 ± 1	-1 ± 1	8 ± 8
$\Delta\Theta$ (LD)$\|_{+Z}$ (μrad)	-5 ± 8	3 ± 4	-2 ± 3	-11 ± 6	1 ± 2	-0 ± 2	-14 ± 6
$\Delta\Phi$ (MAB)$\|_{-Z,\ \Phi=15^\circ}$ (μrad)	2 ± 2	1 ± 1	0 ± 1	2 ± 1	-0 ± 1	1 ± 1	3 ± 1

Tabla 6.18: *Comparación entre las observaciones realizadas por el sistema de alineación LINK en los diferentes períodos estudiados durante el año 2010. Los valores mostrados se han tomado una vez transcurridas las primeras 24 h de funcionamiento del imán a 3.8 T. En la tabla se muestran los valores mayores de cada período, siendo P1 el primero después de cerrar las ruedas de CMS.*

Las medidas de distancia relativa entre las TPs y las CSCs ME1/1 que se han tomado durante estos períodos muestran que son estables. Sin embargo las distancias relativas entre los LDs y los ARs exceden ampliamente la precisión del distanciómetro. El movimiento de las estructuras del ENDCAP hacia el TRACKER es ciertamente el más afectado por la variación de potencia del imán durante la rampa de subida de 0T a 3.8 T.

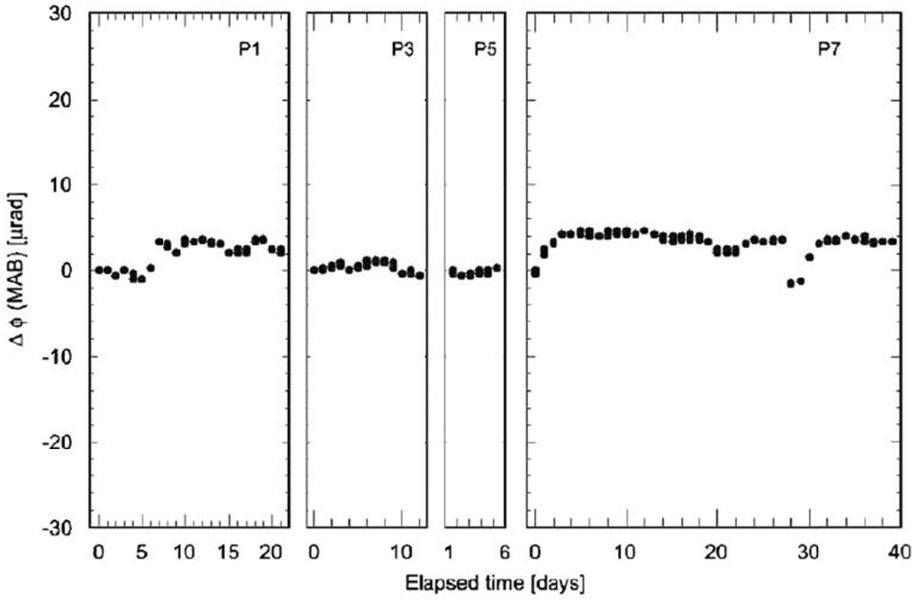


Figura 6.15: *Mediciones tomadas por el inclinómetro del MAB situado en el cuadrante φ=15º del lado positivo de CMS, durante los períodos P1, P3, P5 y P7, en función del tiempo. Los valores límites superior e inferior de la figura representan la resolución del inclinómetro (±30 μrad).*

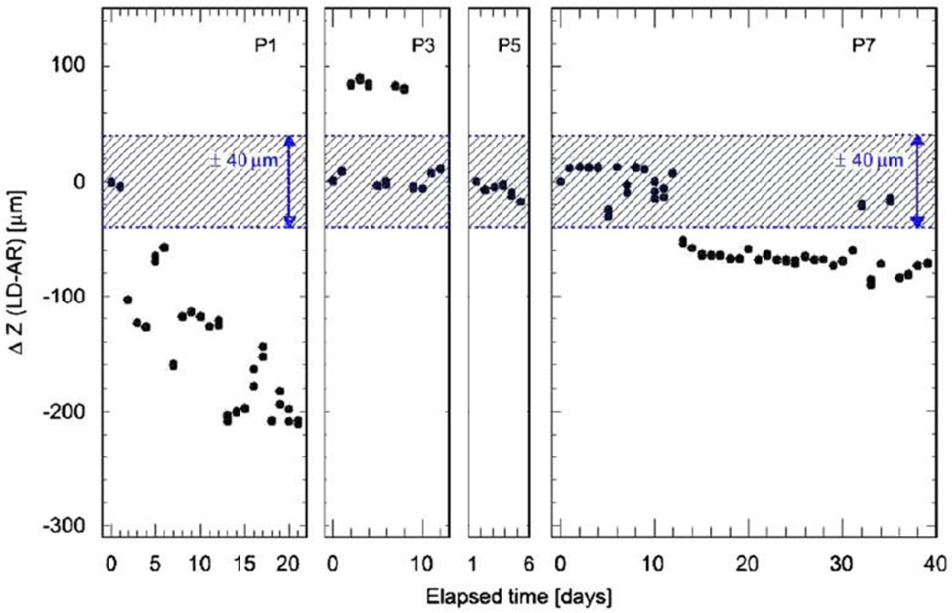


Figura 6.16: *Mediciones ΔZ (LD-AR) tomadas por el distanciómetro situado en la posición angular φ=15º del lado positivo de CMS, durante los períodos P1, P3, P5 y P7, en función del tiempo. El área rayada indica el límite de la resolución del distanciómetro (±40 µm).*

Durante el primer período, la medición ΔZ (LD-AR) de la posición angular φ=15º del lado positivo de CMS, muestra un nivel de movimiento incompatible con los datos de estabilidad, pero en los siguientes períodos P2 al P7, ya si son compatibles con la estabilidad mecánica, al nivel de 2 desviaciones estándar. En la figura 6.16 se muestra esta variable para los períodos P1, P3, P5 y P7, donde se ha tomado como referencia para cada período el valor del distanciómetro en el primer evento tomado en el período en cuestión. Se han tomado un máximo de 2 eventos por día. Hubo días en que no se tomaron datos. En la figura la mayoría de los puntos negros muestran el solapamiento de dos eventos leídos durante el mismo día. De la figura 6.16 se puede extraer que no se observa un comportamiento repetitivo, CMS se comporta de forma diferente en cada período. Aunque los períodos P2, P4 y P6 no se han mostrado en la figura, su comportamiento es también diferente a los mostrados. Durante el primer período el ENDCAP de CMS se acerca muy lentamente al TRACKER sin llegar a alcanzar el equilibrio. Comportándose de forma diversa en los siguientes períodos. El motivo de estas variaciones observadas está desarrollado en el punto 6.3.

6.2.4. Resumen y conclusiones.

El resultado, tras el análisis de los datos tomados durante un RUN CRAFT08 y otro RUN del CRAFT09, sugiere que la estabilidad del detector CMS se alcanza al cabo de 13.5±0.5 horas, después que el campo magnético ha alcanzado el valor de operación B=3.8 T, momento en el que los movimientos observados entre las estructuras mecánicas no exceden la resolución de los dispositivos de observación instrumentados en el sistema.

Las medidas de estabilidad llevadas a cabo durante el año 2010 para evaluar los movimientos que se observan en condiciones de operación con campo magnético constante a 3.8 T, dan como resultado que los parámetros estudiados son compatibles con la estabilidad observada durante el CRAFT08 y CRAFT09, excepto para la variación de distancia axial ΔZ (LD-AR). La aparente inestabilidad observada ΔZ (LD-AR) se debe a que durante el 2010 entró en funcionamiento CMS y el TRACKER de CMS, el cual trabaja en condiciones de operación a unos -20ºC, lo que induce variaciones térmicas de algún grado centígrado en la región de η=3, a pesar de los aislamientos térmicos que posee. En esta región se sitúan el LD, AR y los perfiles longitudinales de aluminio (LP), que trasfieren la medida del AR hasta el LD. Estas variaciones térmicas que se producen en la región dan lugar a cambios longitudinales en los LPs, que están correlacionadas totalmente con la posible inestabilidad observada. Durante las medidas realizadas en el CRAFT08 y CRAFT09 los cambios de temperatura en esta región fueron del orden de décimas de grado, en este período el TRACKER estaba a temperatura ambiente, por ello no se observó esta 'inestabilidad' que induce el LP sobre los datos tomados si no se realiza la compensación de temperatura de las estructuras. Esto se describe en detalle en el punto 6.3.

6.3. Estabilidad y movimiento de las estructuras de CMS observadas por el LINK entre el 2008 y el 2013.

A lo largo del período comprendido entre los años 2008 y 2013, con los datos recopilados por el sistema de alineación LINK, se han estudiado los ciclos realizados por el imán y los períodos de estabilidad del experimento CMS. Se han analizado los movimientos de las estructuras mecánicas inducidos por las fuerzas del campo magnético y se ha verificado la estabilidad mecánica del detector durante el período de toma de datos de física [266, 267 y 268]. Este estudio incluye la influencia que los eventuales cambios de temperatura introducen en el cálculo de la distancia relativa entre las CSCs del ENDCAP y la región del TRACKER, con el objetivo de explicar los movimientos registrados que exceden la resolución de los dispositivos utilizados para la monitorización. Estos movimientos se han mostrado en el punto 6.2, siendo los únicos parámetros que no muestran estabilidad 24 horas después de alcanzar el imán de CMS el nivel de intensidad de campo magnético de 3.8 T.

En esta fase, el sistema de alineación LINK ha estado totalmente instrumentado, con los dispositivos descritos en el punto anterior (Figura 6.9).

6.3.1. Ciclos del imán y períodos de estabilidad.

Un 'ciclo del imán' se define como el tiempo de operación transcurrido entre el encendido y apagado del imán. La desconexión del imán a veces se produce de forma brusca (*fast dump*), en estos casos la corriente en el bobinado del imán pasa de ~18 kA a 0 A en unos segundos. Cuando esto ocurre el imán necesita varios días para volver a estar trabajando en condiciones de operación estables. Los 'períodos de estabilidad' son aquellos en los que las estructuras

mecánicas de CMS están en 'equilibrio estructural', una vez transcurridas las primeras 24 h de funcionamiento constante del imán a 3.8 T. Se considera que se alcanza el 'equilibrio estructural' en CMS cuando los desplazamientos (radiales o axiales) y las rotaciones que monitoriza el sistema de alineación están por debajo de la resolución de los dispositivos instrumentados (~40 μm en desplazamientos y ~30 μrad en rotaciones).

El tiempo de vida del imán de CMS está ligado al número de ciclos realizados, estimado en unos cientos. Las tablas 6.19 a 6.24 muestran los ciclos de vida y los períodos de estabilidad identificados durante los años 2008 al 2013. Esas tablas indican el número de ciclos, la fecha de comienzo y final del ciclo, el valor máximo de intensidad de campo magnético alcanzado, las condiciones de apagado de cada ciclo, tanto si este se ha realizado mediante una lenta rampa de bajada de intensidad de la corriente (*controlled*) como si se ha realizado de forma abrupta (*fast dump*). Las dos últimas columnas muestran el número de períodos de estabilidad (SP), si existen, durante el ciclo del imán y el número de días estables completados.

Los datos del sistema de alineación LINK se registran cada 5 minutos durante las rampas de subida y bajada del imán, durante los cuales los láseres no están en operación, y dos veces por día durante los períodos de funcionamiento estable del imán a 3.8 o 4 T. Ocasionalmente no se han tomado datos durante un día completo dentro de un ciclo.

Cycle nb.	Start date	End date	B_{max} [T]	Switch off cond.	SP nb.	SP days
1	27/8	29/8	2.1	Controlled	None	0
2	29/8	8/9	3.0	Controlled	None	0
3	8/9	9/9	3.0	Controlled	None	0
4	7/10	10/10	3.8	Fast Dump	None	0
5	10/10	21/10	3.8	Controlled	1	4
6	21/10	21/10	3.8	Controlled	None	0
7	21/10	24/10	3.8	Controlled	None	0
8	24/10	6/11	3.8	Fast Dump	2	2
9	6/11	8/11	3.8	Controlled	3	2
10	8/11	12/11	3.8	Controlled	None	0
11	12/11	13/11	3.8	Fast Dump	None	0
12	13/11	14/11	4.0	Fast Dump	None	0
13	14/11	21/11	4.0	Fast Dump	4	1

Tabla 6.19: *Ciclos magnéticos y períodos de estabilidad durante el año 2008. El primer dato considerado durante un SP se toma 24 horas después de alcanzar la intensidad de campo magnético de operación.*

Cycle nb.	Start date	End date	B_{max} [T]	Switch off cond.	SP nb.	SP days
1	17/6	9/7	1.0	Controlled	None	0
2	10/7	15/7	1.5	Controlled	None	0
3	16/7	24/7	2.0	Controlled	None	0
4	24/7	24/7	2.0	Fast Dump	None	0
5	27/7	28/7	2.0	Controlled	None	0
6	28/7	29/7	3.8	Fast Dump	1	1
7	7/8	11/8	3.8	Controlled	2	1
8	11/8	18/8	3.8	Controlled	3	7
9	18/8	18/8	3.8	Fast Dump	None	0
10	18/8	30/8	3.8	Controlled	4	5
11	31/8	31/8	3.8	Fast Dump	None	0
12	31/8	23/10	3.8	Fast Dump	None	0
13	26/10	17/11	3.8	Fast Dump	5	9
14	18/11	16/12	3.8	Controlled	6 - 10	19

Tabla 6.20: *Ciclos magnéticos y períodos de estabilidad durante el año 2009. El primer dato considerado durante un SP se toma 24 horas después de alcanzar la intensidad de campo magnético de operación. Durante el ciclo 14 hubo 5 períodos de estabilidad.*

Cycle nb.	Start date	End date	B_{max} [T]	Switch off cond.	SP nb.	SP days
1	21/1	10/2	1.	Controlled	None	0
2	10/2	15/2	3.8	Controlled	None	0
3	15/2	25/2	3.8	Controlled	None	0
4	25/2	15/4	3.8	Fast Dump	1	37
5	15/4	26/4	3.8	Fast Dump	2	8
6	26/4	31/5	3.8	Fast Dump	3	29
7	31/5	19/7	3.8	Controlled	4	45
8	19/7	3/8	3.8	Controlled	5	9
9	3/8	16/8	3.8	Controlled	6	13
10	16/8	30/8	3.8	Controlled	7	14
11	30/8	2/9	3.8	Fast Dump	None	0
12	2/9	19/10	3.8	Controlled	8	47
13	19/10	8/12	3.8	Fast Dump	9 - 13	40

Tabla 6.21: *Ciclos magnéticos y períodos de estabilidad durante el año 2010. El primer dato considerado durante un SP se toma 24 horas después de alcanzar la intensidad de campo magnético de operación. Durante el ciclo 13 hubo 5 períodos de estabilidad.*

Cycle nb.	Start date	End date	B_{max} [T]	Switch off cond.	SP nb.	SP days
1	25/1	9/2	1.0	Controlled	None	0
2	9/2	28/3	3.8	Controlled	1	46
3	30/3	9/5	3.8	Fast Dump	2	24
4	10/5	29/6	3.8	Controlled	3	47
5	29/6	13/7	3.8	Controlled	None	0
6	14/7	6/10	3.8	Controlled	4	21
7	6/10	10/11	3.8	Controlled	5	25
8	1/11	8/11	3.8	Fast Dump	None	0
9	9/11	8/12	3.8	Controlled	6	26

Tabla 6.22: *Ciclos magnéticos y períodos de estabilidad durante el año 2011. El primer dato considerado durante un SP se toma 24 horas después de alcanzar la intensidad de campo magnético de operación.*

Cycle nb.	Start date	End date	B_{max} [T]	Switch off cond.	SP nb.	SP days
1	31/1	9/3	3.8	Fast Dump	1	2
2	9/3	20/6	3.8	Fast Dump	2 - 3	99
3	20/6	10/8	3.8	Fast Dump	4	41
4	11/8	22/8	3.8	Fast Dump	5	6
5	22/8	17/9	3.8	Controlled	6	33
6	17/9	17/9	3.8	Fast Dump	None	0
7	20/9	26/11	3.8	Controlled	7	64
8	26/11	18/12	3.8	Fast Dump	8	18

Tabla 6.23: *Ciclos magnéticos y períodos de estabilidad durante el año 2012. El primer dato considerado durante un SP se toma 24 horas después de alcanzar la intensidad de campo magnético de operación. Durante el ciclo 2 hubo 2 períodos de estabilidad.*

Cycle nb.	Start date	End date	B_{max} [T]	Switch off cond.	SP nb.	SP days
1	9/1	17/2	3.8	Fast Dump	1	34

Tabla 6.24: *Ciclos magnéticos y períodos de estabilidad durante el año 2013. El primer dato considerado durante un SP se toma 24 horas después de alcanzar la intensidad de campo magnético de operación.*

En la figura 6.17 se muestra un registro de las intensidades de campo magnético en función del número de grupos de datos tomados por el sistema LINK durante la operación de CMS entre los años 2008 y 2013. En total se realizaron 58 ciclos del imán, 30 de los cuales terminaron de forma abrupta. Solamente 2 ciclos llegaron a 4 T, en Noviembre de 2008, y al final de estos se decidió que el nivel de campo magnético de operación, durante la toma de datos de física, se fijaba en 3.8 T. Esta intensidad de campo es suficiente curvar la trayectoria de las partículas cargadas de alto momento y asegurar una mejor estabilidad de la corriente que circula por los bobinados del imán de CMS (~18164 A, en lugar de ~19140 A que se necesitan para 4 T).

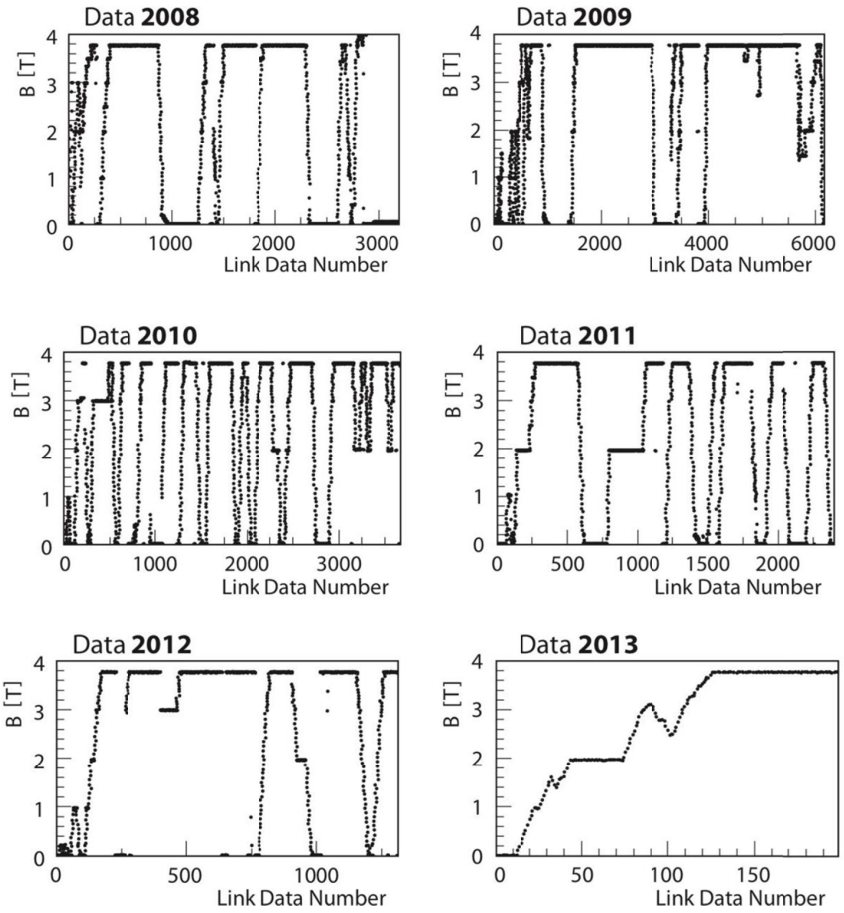


Figura 6.17: *Intensidad de campo magnético de CMS durante el período 2008 al 2013, en función del número de dato tomado por el sistema LINK.*

Se va a utilizar el término 'número de dato LINK' o 'número de evento' para designar el número de dato de la secuencia tomada durante el proceso de toma de datos del sistema LINK, independientemente de que se refiera a año, ciclo magnético o período de estabilidad.

Los datos de física (rayos cósmicos, colisiones protón-protón o iones pesados) se toman durante los períodos en los que el campo magnético es constante a B=3.8 T o 4 T (períodos de estabilidad). Del año 2008 al 2013 hubo 42 períodos de estabilidad durante los que se contabilizaron 771 días estables. No todos los ciclos magnéticos contienen uno o más períodos de estabilidad como se observa en las tablas 6.19 a 6.24.

La relación entre los *días estables* y el número de *días de operación* (aquellos en los que el imán recibe corriente) en cada uno de los años muestra la *eficiencia de operación* anual, esta información se encuentra en la tabla 6.25, para el período de años estudiado en este punto. En general esta ha ido aumentando (excepto en el 2011) con la experiencia ganada a lo largo de los años de operación de CMS, llegando hasta el 85% en el 2013. En total se ha operado el detector durante 1272 días, 771 de los cuales fueron días estables durante los que se tomaron datos de física, esto corresponde a una eficiencia

media durante todo el período de 6 años de 60.6 %. Esta eficiencia no está relacionada con la relación entre luminosidad entregada por LHC y los datos tomados de CMS.

Year	Days of operation	Stability Days	Efficiency (%)
2008	87	9	10.3
2009	183	34	18.6
2010	322	242	75.2
2011	318	189	59.4
2012	322	263	81.7
2013	40	34	85.0
Total	1272	771	60.6

Tabla 6.25: *Eficiencia de operación anual, del procedimiento de toma de datos de física en CMS, durante el período 2008 al 2010.*

6.3.2. Ejemplos de resultados monitorizados de las variables tomadas para estudiar la estabilidad mecánica.

De los resultados de los puntos 6.1 y 6.2, se obtiene que transcurridas las primeras 24 h de funcionamiento del imán en régimen de operación a campo constante, CMS permanece mecánicamente estable dentro de la resolución de los dispositivos de medición utilizados por el sistema LINK. En esta sección se muestra la estabilidad de los resultados registrados durante los 6 años de operación de CMS a través de las siguientes 48 variables registradas (Figura 6.9):

La distancia axial relativa ΔZ (TP-CSC ME1/1).

La distancia radial relativa ΔR (TP-CSC ME1/2).

La distancia radial relativa ΔR (MAB-CSC ME1/2).

La rotación angular Δφ (MAB).

Cada una de estas variables se ha tomado sobre los 6 cuadrantes RZ (φ= 15º, 75º, 135º, 195º, 255º y 315º) de cada lado de CMS.

Se han analizado los 42 períodos de estabilidad que aparecen en las tablas 6.19 a 6.24 y a modo de ejemplo se muestran 6 grupos de datos seleccionados al azar, de los períodos de estabilidad correspondientes a los 6 años estudiados: 2008-SP1, 2009-SP4, 2010-SP1, 2011-SP2, 2012-SP2 y 2013-SP1.

6.3.2.1. Distancia axial relativa ΔZ (TP-CSC ME1/1).

Esta variable obtiene su valor a través de un distanciómetro instalado en la TP que hace contacto sobre una superficie de referencia montada sobre la parte superior de algunas CSCs situadas en la región ME1/1, como se muestra en las figuras 3.23, 3.24 y 6.9.

El movimiento axial observado entre la TP y la CSC cuando el campo sube de 0T a 3.8 T, entre los años 2009 al 2013, indica que las TPs se separan de las CSCs de esta región una media de Z=1262.0±305.8 μm en el lado positivo de CMS y Z=1540.5±244.6 μm en el lado negativo de CMS, el error mostrado es estadístico (la RMS de varias medidas) y da una idea las variaciones de medidas obtenidas entre los ciclos estudiados y entre los diferentes cuadrantes RZ.

El valor de desplazamiento relativo se ha calculado de la forma:

$$\Delta Z(TP - CSC\ ME1/1) = Z(TP - CSC\ ME1/1)_{data-number} - Z(TP - CSC\ ME1/1)_{initial} \quad (6.6)$$

donde el valor Z(TP-CSC ME1/1)$_{initial}$ corresponde al primer dato tomado en cada una de las 12 posiciones estudiadas en CMS, 24 h después de alcanzar el B_{max} en cada uno de los conjuntos de datos año-SP estudiados.

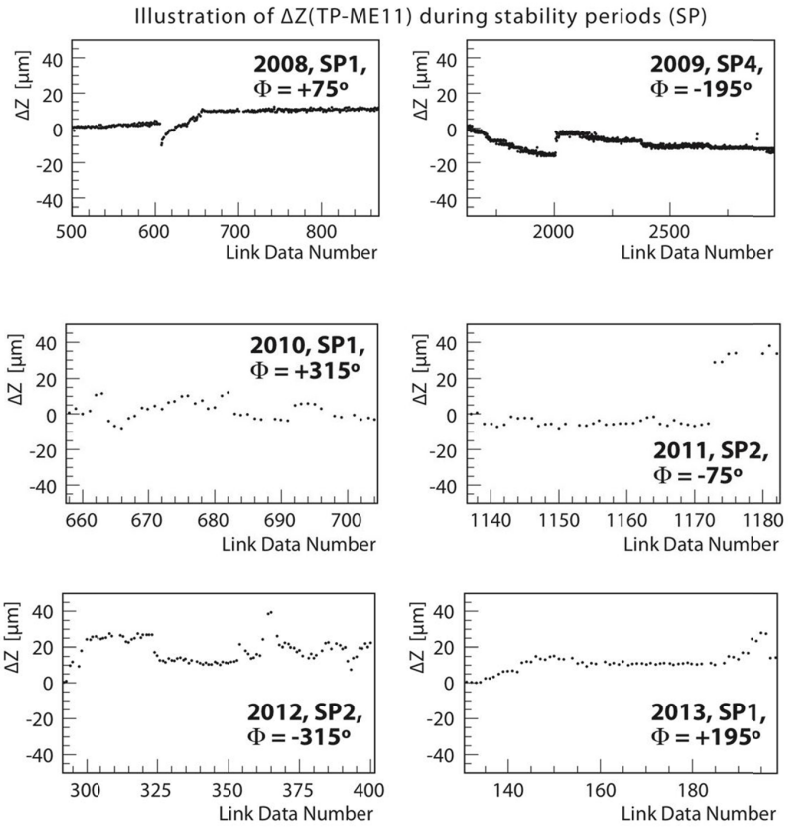


Figura 6.18: *Evolución de la distancia relativa axial ΔZ (TP-CSC ME1/1) en función del número de dato LINK, para los periodos de estabilidad considerados, para diferentes posiciones.*

La evolución de esta variable se muestra en la figura 6.18, en función del número de dato LINK, para varias posiciones diferentes y la tabla 6.26 muestra el valor más alto de la distribución estudiada, de todas las posiciones de los 6

conjuntos año-SP considerados. La indicación OO en la tabla significa que el correspondiente sensor estaba fuera de servicio durante el correspondiente período. El signo negativo en ΔZ corresponde a una aproximación entre la TP y la CSC, mientras que el positivo indica una separación entre ellos. Los movimientos observados están dentro de la resolución de los dispositivos de medida utilizados.

Year/SP	±Φ / ΔZ [º] / [μm]	±Φ / ΔZ [º] / [μm]	±Φ / ΔZ [º] / [μm]	±Φ / ΔZ [º] / [μm]	±Φ / ΔZ [º] / [μm]	±Φ / ΔZ [º] / [μm]
2008/SP1	+15/10.0	+75/12.4	+135/20.0	+195/OO	+255/OO	+315/6.8
	−15/10.0	−75/-15.1	−135/14.1	−195/-10.7	−255/10.0	−315/12.7
2009/SP4	+15/-12.3	+75/-15.1	+135/-15.0	+195/-15.0	+255/-39.7	+315/-11.4
	−15/-17.1	−75/-23.2	−135/-30.5	−195/-16.2	−255/-12.0	−315/-10.7
2010/SP1	+15/10.6	+75/18.0	+135/24.6	+195/16.1	+255/OO	+315/12.0
	−15/-16.1	−75/-30.2	−135/-23.6	−195/21.0	−255/16.7	−315/15.7
2011/SP2	+15/23.8	+75/27.8	+135/20.8	+195/18.7	+255/OO	+315/15.0
	−15/21.9	−75/37.9	−135/26.8	−195/15.0	−255/14.8	−315/25.1
2012/SP2	+15/27.0	+75/35.0	+135/35.2	+195/24.3	+255/OO	+315/26.5
	−15/37.7	−75/OO	−135/OO	−195/27.8	−255/35.8	−315/38.9
2013/SP1	+15/21.5	+75/38.3	+135/30.0	+195/6.5	+255/OO	+315/22.3
	−15/27.4	−75/31.6	−135/33.3	−195/31.6	−255/33.3	−315/23.3

Tabla 6.26: *Períodos de estabilidad utilizados como ejemplo donde se muestra el máximo valor ΔZ (TP-CSC ME1/1) obtenido en μm, para las posiciones analizadas. El signo delante de φ indica el lado Z de CMS. El signo negativo en ΔZ indica una aproximación entre la TP y la CSC, mientras que el positivo una separación. El OO significa sensor fuera de servicio.*

6.3.2.2. Distancia radial relativa ΔR (TP-CSC ME1/2).

Esta variable realiza su medición mediante un distanciómetro instalado en la TP que hace contacto sobre una superficie de referencia situada sobre la parte inferior de algunas CSCs situadas en la región ME1/2, como se muestra en las figuras 3.25 y 6.9.

El movimiento radial observado entre la TP y la CSC cuando el campo sube de 0T a 3.8 T, entre los años 2009 al 2013, indica que las TPs se separan de las CSCs de esta región una media de R=2764.4±236.5 μm en el lado positivo de CMS y R=2883.5±246.3 μm en el lado negativo de CMS, el error mostrado es estadístico (la RMS de varias medidas) y da una idea las variaciones de medidas obtenidas entre los ciclos estudiados y entre los diferentes cuadrantes RZ.

El valor de desplazamiento relativo se ha calculado de la forma:

$$\Delta R(TP - CSC\ ME1/2) = R(TP - CSC\ ME1/2)_{data-number} - R(TP - CSC\ ME1/2)_{initial} \quad (6.7)$$

donde el valor $R(TP\text{-}CSC\ ME1/2)_{initial}$ corresponde al primer dato tomado en cada una de las 12 posiciones estudiadas en CMS, 24 h después de alcanzar el B_{max} en cada uno de los conjuntos de datos año-SP estudiados.

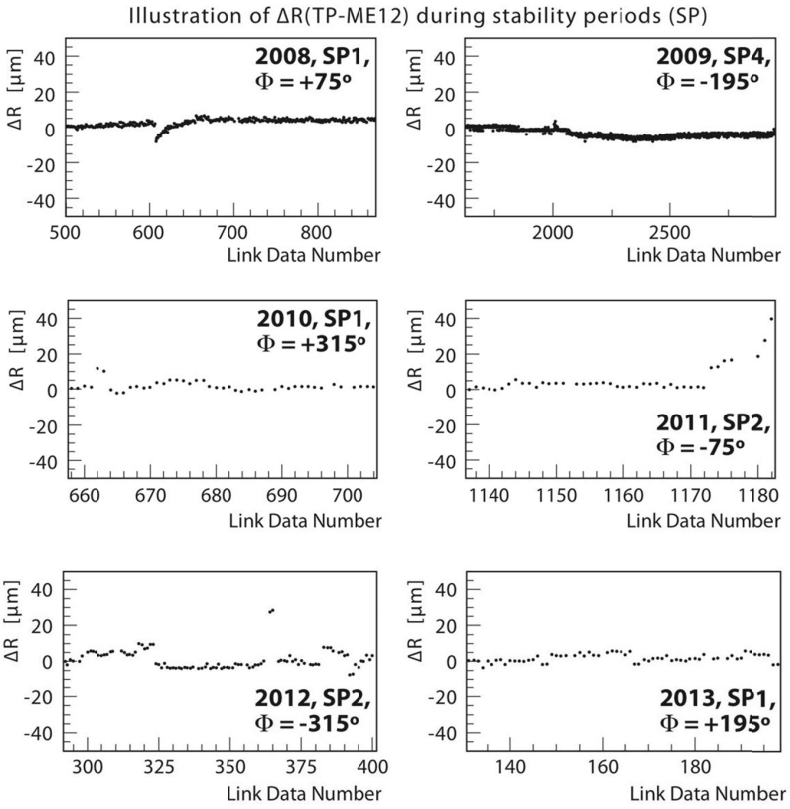


Figura 6.19: *Evolución de la distancia relativa axial ΔR (TP-CSC ME1/2) en función del número de dato LINK, para los periodos de estabilidad considerados, para diferentes posiciones.*

Year/SP	±Φ / ΔR [°] / [μm]	±Φ / ΔR [°] / [μm]	±Φ / ΔR [°] / [μm]	±Φ / ΔR [°] / [μm]	±Φ / ΔR [°] / [μm]	±Φ / ΔR [°] / [μm]
2008/SP1	+15/-10.5	+75/-11.5	+135/-7.9	+195/OO	+255/-15.3	+315/-10.0
	−15/-9.7	−75/-10.0	−135/-7.8	−195/20.0	−255/-12.0	−315/-11.1
2009/SP4	+15/-4.6	+75/-9.1	+135/12.8	+195/-7.7	+255/-6.0	+315/6.4
	−15/8.8	−75/-14.3	−135/-10.1	−195/-8.0	−255/-25.3	−315/-6.6
2010/SP1	+15/20.8	+75/22.9	+135/-13.1	+195/11.9	+255/11.8	+315/11.6
	−15/23.8	−75/-11.0	−135/-14.2	−195/-5.8	−255/29.8	−315/16.1
2011/SP2	+15/34.7	+75/35.2	+135/33.5	+195/22.5	+255/29.6	+315/31.7
	−15/21.5	−75/39.8	−135/34.4	−195/33.5	−255/OO	−315/33.2
2012/SP2	+15/7.0	+75/7.6	+135/24.9	+195/11.6	+255/14.4	+315/7.9
	−15/14.7	−75/20.8	−135/18.4	−195/15.4	−255/27.8	−315/10.2
2013/SP1	+15/6.5	+75/25.5	+135/21.6	+195/5.5	+255/13.6	+315/6.3
	−15/17.6	−75/21.5	−135/24.0	−195/3.9	−255/25.5	−315/16.8

Tabla 6.27: *Períodos de estabilidad utilizados como ejemplo donde se muestra el máximo valor ΔR (TP-CSC ME1/2) obtenido en μm, para las posiciones analizadas. El signo delante de φ indica el lado Z de CMS. El signo negativo en ΔR indica una aproximación entre la TP y la CSC, mientras que el positivo una separación. El OO significa sensor fuera de servicio.*

La evolución de esta variable se muestra en la figura 6.19, en función del número de dato LINK, para varias posiciones diferentes y la tabla 6.27 muestra el valor más alto de la distribución estudiada, de todas las posiciones de los 6 conjuntos año-SP considerados. El signo negativo en ΔR corresponde a una aproximación entre la TP y la CSC, mientras que el positivo indica una separación entre ellos. Los movimientos observados están dentro de la resolución de los dispositivos de medida utilizados.

6.3.2.3. Distancia radial relativa ΔR (MAB-CSC ME1/2).

Esta variable realiza la medida a través de un distanciómetro óptico instalado en la estructura MAB que enfoca sobre una superficie de referencia que se encuentra situada en la parte superior de algunas CSCs de la región ME1/2, como se muestra en la figura 6.9.

El movimiento radial observado entre la estructura MAB y la CSC cuando el campo sube de 0T a 3.8 T, entre los años 2009 al 2013, indica que los MABs se aproximan a sus correspondientes CSCs una media de R=-274.5±34.6 μm en el lado positivo de CMS y R=-262.8±31.8 μm en el lado negativo de CMS, el error mostrado es estadístico (la RMS de varias medidas) y da una idea las variaciones de medidas obtenidas entre los ciclos estudiados y entre los diferentes cuadrantes RZ.

El valor de desplazamiento relativo se ha calculado de la forma:

$$\Delta R(MAB - CSC\ ME1/2) = R(MAB - CSC\ ME1/2)_{data-number} - R(MAB - CSC\ ME1/2)_{initial} \quad (6.8)$$

donde el valor $R(MAB\text{-}CSC\ ME1/2)_{initial}$ corresponde al primer dato tomado en cada una de las 12 posiciones estudiadas en CMS, 24 h después de alcanzar el B_{max} en cada uno de los conjuntos de datos año-SP estudiados.

La evolución de esta variable se muestra en la figura 6.20, en función del número de dato LINK, para las posiciones que muestran los mayores valores de movimiento registrado.

Los sensores de proximidad ópticos muestran que en general las distancias relativas entre los MABs y las CSC de la ME1/2 se incrementan mínimamente con el tiempo. Se aprecian diferencias de 10 a 20 μm entre datos consecutivos en algunas secuencias. No se ha encontrado una explicación para ambos fenómenos. Aunque de todas formas éstos permanecen dentro de los límites de resolución del distanciómetro como se observa en la tabla 6.28, siendo el valor máximo observado 40.9 μm que corresponde a los datos tomados en 2010-SP1 sobre el sector φ=-255º, el signo '–' indica que pertenece al lado Z negativo de CMS.

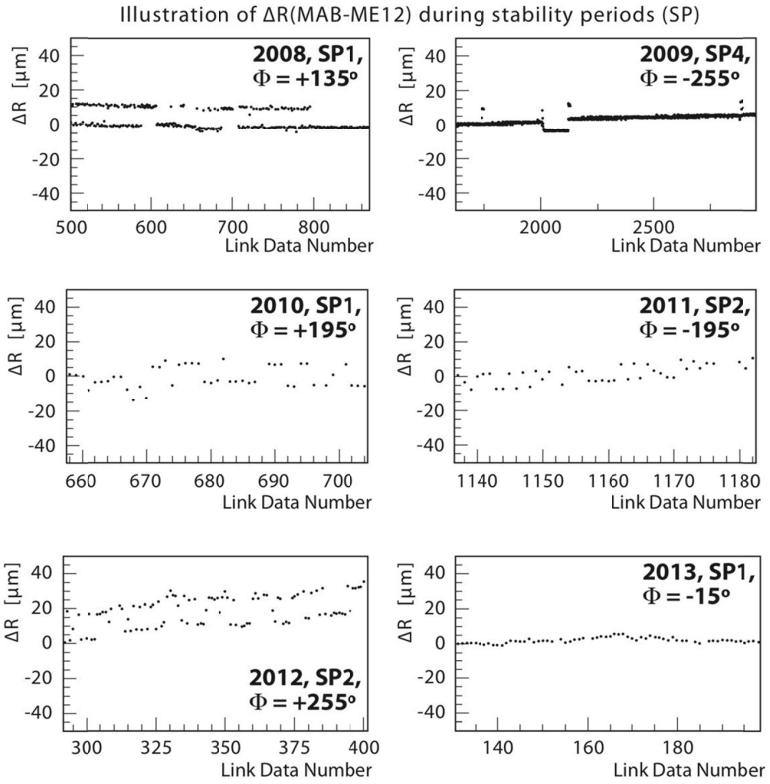


Figura 6.20: *Evolución de la distancia relativa axial ΔR (MAB-CSC ME1/2) en función del número de dato LINK, para los periodos de estabilidad considerados, para diferentes posiciones. Se han escogido las posiciones que muestran los mayores movimientos detectados.*

Year/SP	±Φ / ΔR [°] / [μm]	±Φ / ΔR [°] / [μm]	±Φ / ΔR [°] / [μm]	±Φ / ΔR [°] / [μm]	±Φ / ΔR [°] / [μm]	±Φ / ΔR [°] / [μm]
2008/SP1	+15/1.8	+75/OO	+135/11.8	+195/15.0	+255/13.7	+315/-5.1
	−15/OO	−75/OO	−135/20.0	−195/10.9	−255/20.0	−315/OO
2009/SP4	+15/-2.3	+75/OO	+135/13.2	+195/-13.2	+255/14.3	+315/2.1
	−15/OO	−75/OO	−135/OO	−195/-10.3	−255/15.1	−315/-4.7
2010/SP1	+15/7.1	+75/8.2	+135/-13.1	+195/-14.2	+255/-12.4	+315/4.9
	−15/10.0	−75/OO	−135/OO	−195/20.0	**−255/40.9**	−315/10.9
2011/SP2	+15/OO	+75/6.8	+135/-13.1	+195/-15.3	+255/-15.4	+315/6.8
	−15/10.1	−75/OO	−135/OO	−195/10.9	−255/37.4	−315/OO
2012/SP2	+15/OO	+75/20.5	+135/33.2	+195/33.2	+255/36.7	+315/OO
	−15/4.9	−75/OO	−135/OO	−195/24.9	−255/OO	−315/OO
2013/SP1	+15/OO	+75/15.9	+135/-8.5	+195/14.3	+255/15.3	+315/-4.6
	−15/5.4	−75/OO	−135/OO	−195/9.4	−255/OO	−315/OO

Tabla 6.28: *Períodos de estabilidad utilizados como ejemplo donde se muestra el máximo valor ΔR (MAB-CSC ME1/2) obtenido en μm, para las posiciones analizadas. El signo delante de φ indica el lado Z de CMS. El signo negativo en ΔR indica una aproximación entre el MAB y la CSC, mientras que el positivo una separación. El OO significa sensor fuera de servicio.*

6.3.2.4. Rotación angular Δφ (MAB).

Las eventuales rotaciones en φ que se puedan producir en las DTs de la rueda YB2 se monitorizan a través de las estructuras MABs situadas en los laterales de estas ruedas y que están instrumentadas con inclinómetros instalados sobre el dispositivo 'LASER LEVEL' que llevan sobre su estructura (Figuras 3.6, 3.7 y 3.11). Todos los MABs tienen un inclinómetro 1D situado en su interior, los del lado positivo de CMS muestran un incremento de voltaje positivo cuando se realiza un incremento positivo de Δφ, mientras que los del lado negativo muestran un incremento positivo de voltaje cuando el incremento Δφ es negativo. En general las rotaciones detectadas durante los periodos de estabilidad van a permanecer por debajo de las resoluciones de los inclinómetros y por lo tanto son compatibles con la estabilidad mecánica. Durante la base de subida de potencia del imán de B=0 T hasta las B_{max}, los inclinómetros muestran una clara rotación que mantienen trascurridas las primeras 24 horas de funcionamiento al nivel de operación.

La evolución de la variable Δφ se muestra en la figura 6.21, en función del número de dato LINK, y contiene los períodos de estabilidad investigados, para algunos ciclos magnéticos, en diferentes posiciones. El valor Δφ se muestra respecto a la inclinación inicial del inclinómetro con B=0 T.

El valor de incremento angular se ha calculado de la forma:

$$\Delta\varphi(MAB) = \varphi(MAB)_{data-number} - \varphi(MAB)_{initial} \qquad (6.9)$$

donde el valor $\varphi(MAB)_{initial}$ corresponde al primer dato tomado en cada una de las 12 posiciones estudiadas en CMS, 24 h después de alcanzar el B_{max} en cada uno de los conjuntos de datos año-SP estudiados.

Year/SP	±Φ sect./ max.ΔΦ [°]/[μrad]	±Φ sect./ max.ΔΦ [°]/[μrad]	±Φ sect./ max.ΔΦ [°]/[μrad]	±Φ sect./ max.ΔΦ [°]/[μrad]	±Φ sect./ max.ΔΦ [°]/[μrad]	±Φ sect./ max.ΔΦ [°]/[μrad]
2008/SP1	+15/-1.2	+75/2.7	+135/-11.2	+195/7.9	+255/-7.1	+315/12.4
	–15/15.9	–75/8.6	–135/OO	–195/OO	–255/20.0	–315/-16.7
2009/SP4	+15/-4.2	+75/2.3	+135/-15.3	+195/-3.2	+255/5.1	+315/2.7
	–15/2.8	–75/-4.7	–135/OO	–195/OO	–255/12.8	–315/-5.1
2010/SP1	+15/1.5	+75/-2.2	+135/-3.0	+195/-3.3	+255/-2.3	+315/2.3
	–15/4.5	–75/2.7	–135/OO	–195/OO	–255/-2.3	–315/-4.1
2011/SP2	+15/-5.0	+75/-3.1	+135/3.6	+195/-5.6	+255/6.5	+315/-5.8
	–15/4.7	–75/4.7	–135/-37.3	–195/OO	–255/-9.2	–315/OO
2012/SP2	+15/1.8	+75/-2.2	+135/-2.8	+195/2.8	+255/-5.0	+315/-31.1
	–15/7.9	–75/3.9	–135/-19.1	–195/-2.2	–255/2.3	–315/OO
2013/SP1	+15/3.4	+75/3.9	+135/-4.9	+195/4.9	+255/4.3	+315/5.8
	–15/-5.8	–75/-3.9	–135/-6.5	–195/-4.3	–255/-6.2	–315/OO

Tabla 6.29: *Períodos de estabilidad utilizados como ejemplo donde se muestra el máximo valor Δφ (MAB) obtenido en μrad, en las posiciones analizadas. El signo delante de φ indica el lado Z de CMS. El signo positivo en Δφ indica un giro en torno al eje Z con un sentido del eje X hacia el Y. El OO significa sensor fuera de servicio.*

En la figura 6.22 se muestra Δφ, en función del número de dato LINK, para los conjuntos de datos año-SP considerados. Y en la tabla 6.29 se muestran los valores máximos Δφ observados durante los períodos de estabilidad estudiados. En todos estos casos los valores están por debajo de la resolución de los inclinómetros.

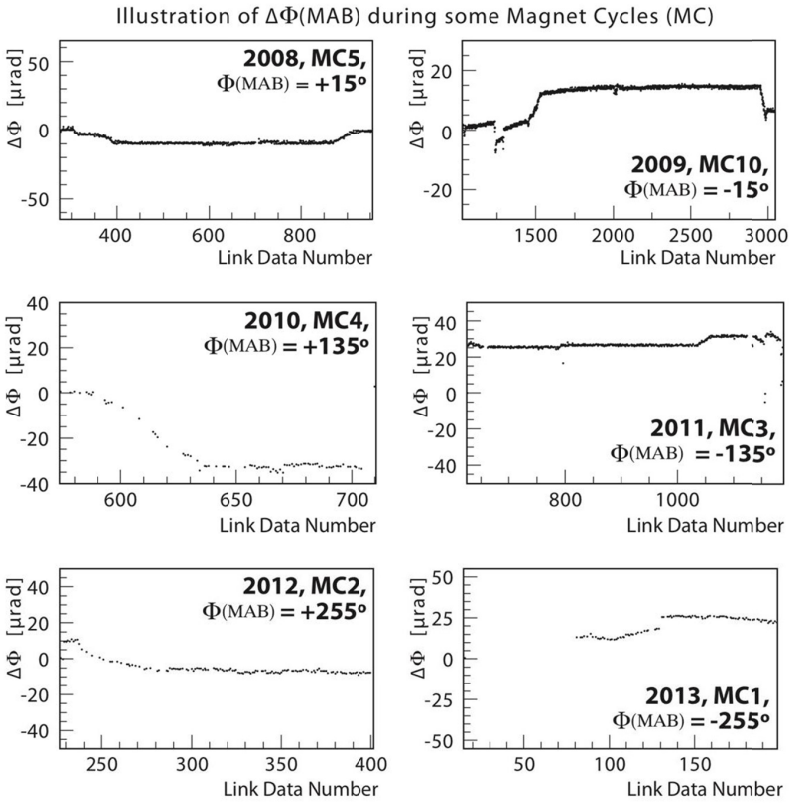


Figura 6.21: *Evolución de la rotación Δφ (MAB) en función del número de dato LINK, en los periodos de estabilidad considerados, para algunos ciclos magnéticos, en diferentes posiciones. Δφ se muestra respecto a la inclinación inicial del inclinómetro con B=0 T.*

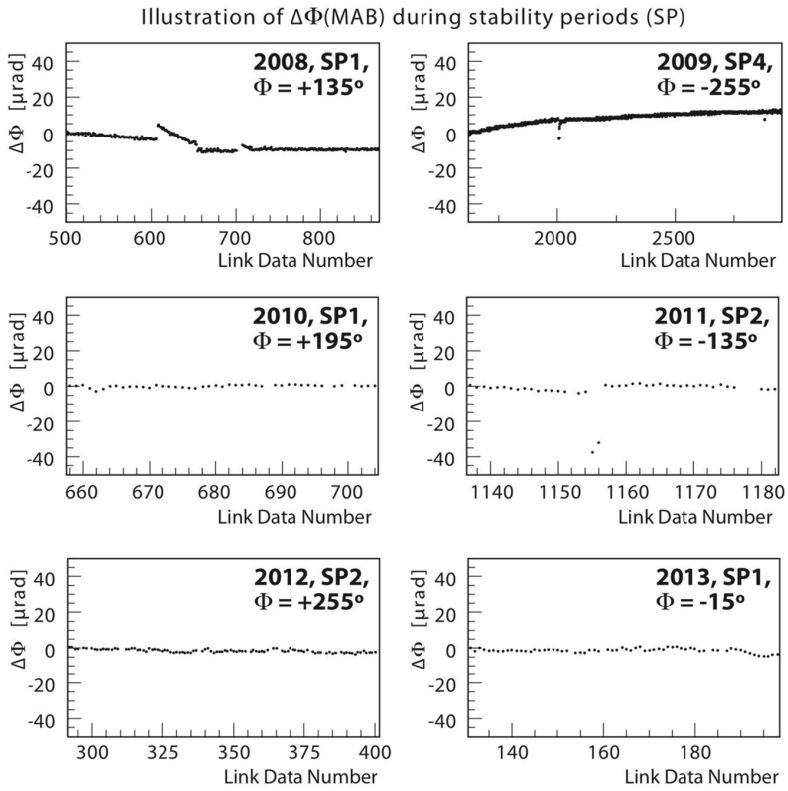


Figura 6.22: *Evolución de la rotación Δφ (MAB) en función del número de dato LINK, para los periodos de estabilidad considerados, en diferentes posiciones.*

6.3.3. Resultados de la distancia axial Z (LD-AR) en los ciclos magnéticos durante los años de operación de CMS.

La medición de la distancia axial Z entre los LDs y ARs se realiza a través del perfil longitudinal (LP) (Figura 6.9), que en el extremo junto al TRACKER tiene una pantalla de referencia, sobre la que hace contacto un distanciómetro que está instalado sobre el AR en TRACKER. Se considera Z, la distancia entre la pantalla situada sobre el LP y el AR. Hay 3 LPs en cada uno de los lados Z de CMS, que conectan el LD con el AR. Los valores leídos por el sistema de alineación LINK son proporcionales a la posición que ocupa el LP. Cuando el LD se mueve, por la acción del campo magnético, hacia su correspondiente AR, al pasar de 0T a B_{max}, las pantallas empujan sobre el vástago retráctil del distanciómetro, registrando el movimiento relativo que se realiza entre ambos. Cuando el imán comienza la rampa de descenso de potencia, la pantalla se separa del distanciómetro.

A modo de ilustración, se muestra en la figura 6.23 la variable Z observada durante los períodos de operación de CMS en el año 2011, en los 9 ciclos magnéticos realizados ese año. Se observa que se produce una aproximación del LD al AR, al pasar el imán de 0T a B_{max}, de unos 15 mm, produciéndose un

movimiento contrario durante el apagado del imán, recuperando la posición de partida.

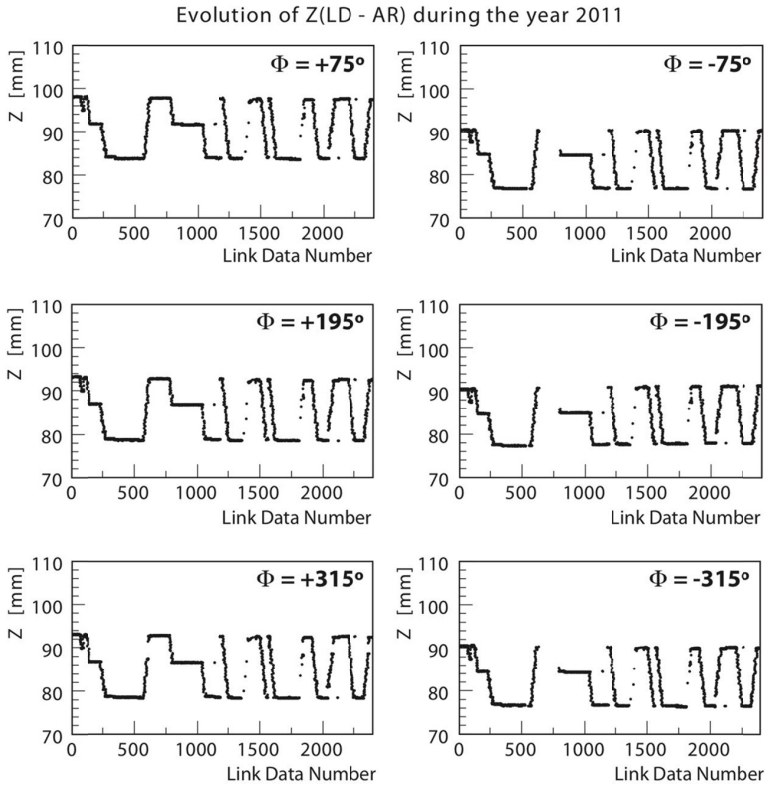


Figura 6.23: *Movimiento Z (LD-AR) observado durante el año 2011, en todas las posiciones instrumentadas de CMS, en función del número de dato LINK.*

El valor de desplazamiento axial relativo se ha calculado de la forma:

$$\Delta Z(LD-AR) = Z(LD-AR)_{data-number} - Z(LD-AR)_{initial} \qquad (6.10)$$

donde el valor $Z(LD\text{-}AR)_{initial}$ corresponde al primer dato tomado en cada una de las 6 posiciones estudiadas en CMS, antes de comenzar la subida de potencia con campo B=0 T, en cada uno de los ciclos magnéticos estudiados. En la figura 6.24, se muestra como ejemplo, la variable ΔZ para la posición φ=75º del lado Z positivo de CMS, durante el primer ciclo magnético del 2012 (Tabla 6.23), donde la figura superior muestra el histograma de los 228 puntos tomados, que muestra un valor máximo de desplazamiento de 14.99 mm; la figura central muestra ΔZ en función del número de evento LINK; y en la figura inferior aparece ΔZ en función de la intensidad de campo magnético.

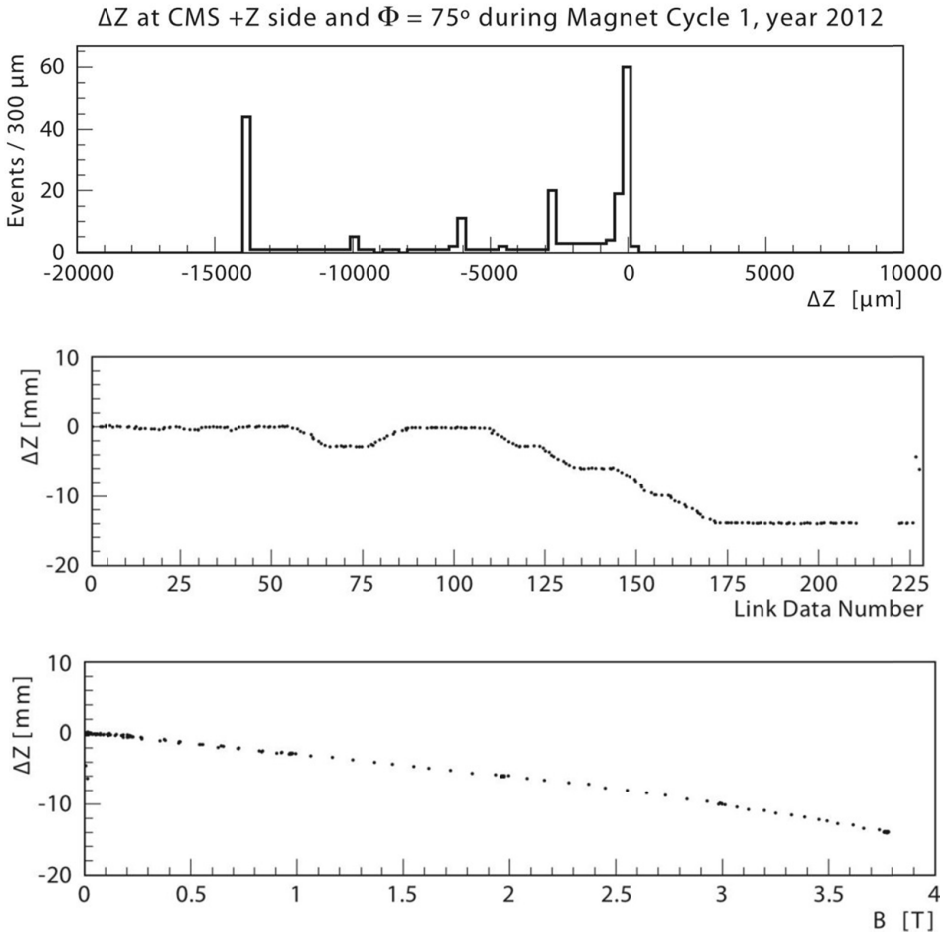


Figura 6.24: *Movimiento relativo ΔZ (LD-AR), para el cuadrante φ=75º del lado positivo de CMS, durante el primer ciclo magnético del 2012. Histograma de eventos tomados (Superior). Evolución de ΔZ en función del número de evento LINK (Centro). Evolución de ΔZ en función de la intensidad de campo magnético (Inferior).*

En la tabla 6.30 se muestran los movimientos relativos medios observados durante los diferentes ciclos magnéticos realizados a lo largo de los años de operación de CMS, estos son bastante similares entre los diferentes ciclos. Los errores mostrados corresponden a una desviación estándar. El movimiento máximo registrado, con la misma intensidad de campo magnético, no ha de ser igual en todas las medidas realizadas a lo largo de los años, ya que aparte de estar influenciado por la temperatura a la que se encuentra el LP en cada momento, el valor Z de inicio es diferente con cada cierre del detector donde la aproximación de las ruedas durante esta operación se realiza con milímetros de precisión. Además el mismo campo magnético produce diferente movimientos LD-AR, en esta tabla se incluyen también errores sistemáticos del sistema como es el caso de que los valores observados en el lado positivo de CMS son alrededor del 4.8% mayores que los del negativo en todos los años estudiados.

Year	#Cycles at 3.8 T	ΔZ [mm] at Φ = +75º	ΔZ [mm] at Φ =+195º	ΔZ [mm] at Φ =+315º	ΔZ [mm] at Φ =-75º	ΔZ [mm] at Φ = -195º	ΔZ [mm] at Φ = -315º
2008	8	14.85± 0.11	15.15±0.11	15.25±0.23	OO	13.52±0.15	14.34±0.20
2009	8	14.28±0.10	14.58±0.10	14.60±0.15	13.90±0.18	13.35±0.05	14.03±0.14
2010	12	14.25±0.12	14.50±0.12	14.55±0.15	13.96±0.14	13.57±0.09	14.26±0.09
2011	8	14.25±0.10	14.53±0.11	14.54±0.11	13.73±0.09	13.34±0.03	13.77±0.16
2012	8	13.85±0.14	14.02±0.24	14.12±0.14	13.68±0.07	13.47±0.13	13.71±0.12
2013	1	11.30±0.04	OO	14.23±0.04	13.66±0.04	13.66±0.04	13.95±0.04

Tabla 6.30: *Valores medios de ΔZ (LD-AR) durante la operación a 3.8 T en las distintas posiciones monitorizadas de CMS, de los ciclos magnéticos considerados. El error mostrado es la desviación estándar de la media. Cuando solamente se ha considerado un ciclo magnético el error es la resolución del sensor. El OO significa sensor fuera de servicio.*

6.3.4. Estudio de las distancias ΔZ (LD-AR) observadas durante los períodos de estabilidad estudiados en los años de operación de CMS.

Entre los años 2008 y 2013 CMS tubo 42 períodos de estabilidad a B_{max}, y en ellos la estabilidad mecánica estaba garantizada por las observaciones del sistema LINK excepto en la variable ΔZ (LD-AR), que es la más afectada por las fuerzas del campo magnético.

El valor de desplazamiento axial relativo se ha calculado de la forma:

$$\Delta Z(LD-AR) = Z(LD-AR)_{data-number} - Z(LD-AR)_{initial} \qquad (6.11)$$

donde el valor $Z(LD\text{-}AR)_{initial}$ corresponde al primer dato tomado en cada una de las 6 posiciones estudiadas en CMS, 24 h después de alcanzar el B_{max} en cada uno de los 42 conjuntos de datos año-SP estudiados.

En la figura 6.25 se muestra la variación de la distancia relativa ΔZ (LD-AR) durante los 42 períodos de estabilidad estudiados entre los años 2008 al 2013. En esta figura se muestran los valores extremos observados en cada uno de los períodos de operación estudiados: los puntos negros representan el valor de máxima aproximación entre el LD y el AR (valores negativos), mientras que los círculos representan la separación máxima (valores positivos).

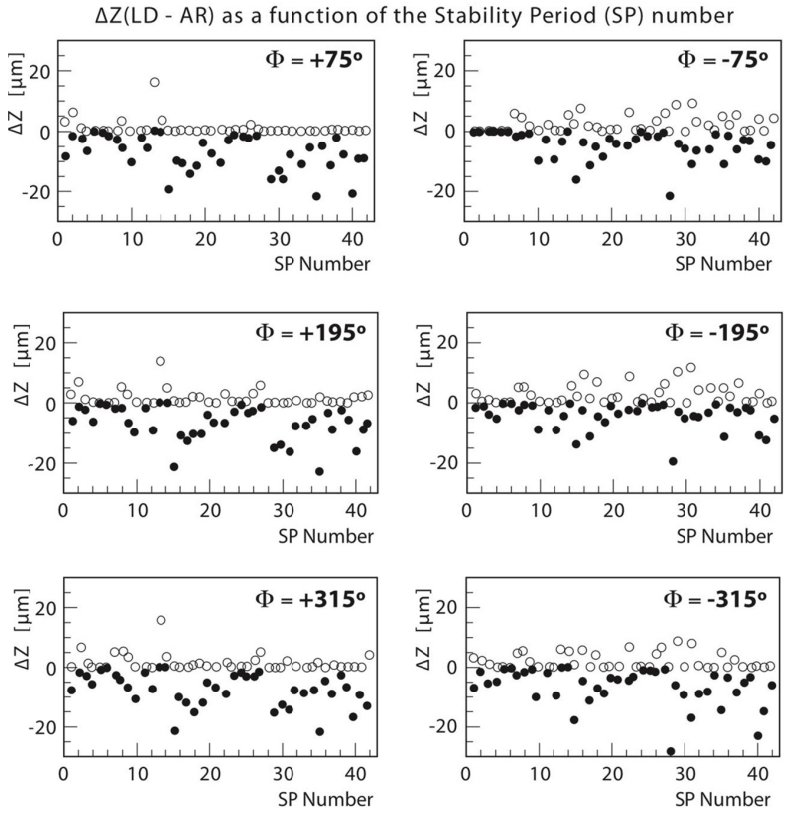


Figura 6.25: *Valores medios de ΔZ (LD-AR) monitorizados durante los 42 períodos de estabilidad considerados. Se muestran los dos valores extremos observados en cada período de operación estudiado: los puntos negros representan el valor de máxima aproximación entre el LD y el AR (valores negativos), mientras que los círculos representan la separación máxima (valores positivos).*

La figura 6.26 es un ejemplo de los ΔZ (LD-AR) monitorizados, durante algunos SPs escogidos arbitrariamente entre los años de operación estudiados, en función del número de dato LINK. Durante los años 2008 y 2009 las medidas se tomaban cada 5 minutos, en el resto se tomaba un máximo de 2 medidas en cada uno de los días del período de operación estudiado. Las distribuciones mostradas no parecen ser constantes, ni suaves a lo largo del tiempo y los movimientos observados sobrepasan ampliamente las resoluciones de los distanciómetros. Esta variaciones, como se desarrolla a continuación, tienen una perfecta correlación con la temperatura a la que se encuentra la región η=3.

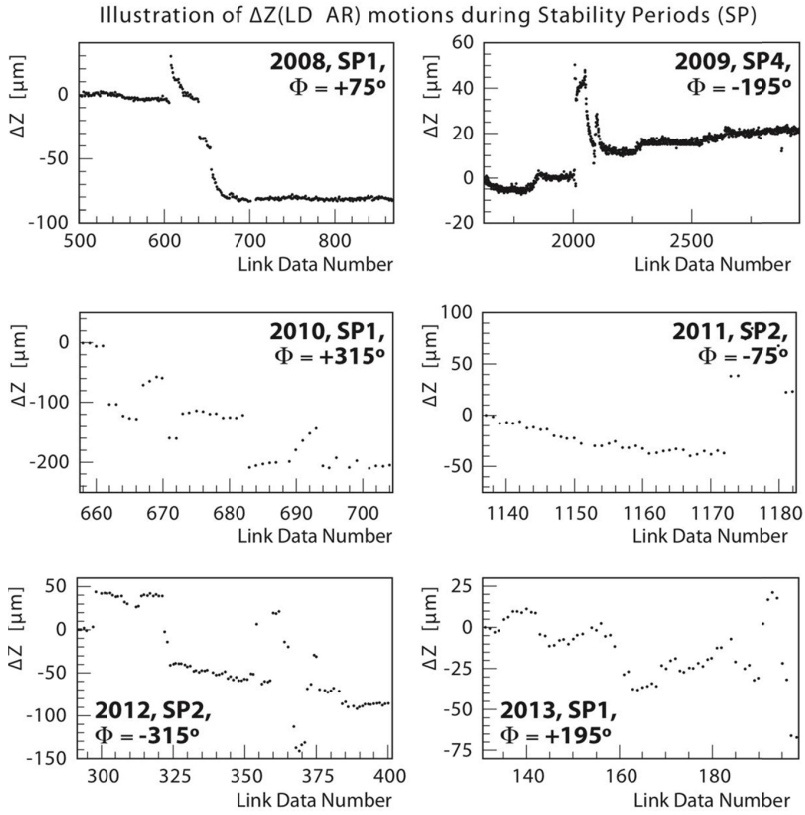


Figura 6.26: *ΔZ (LD-AR) monitorizados para las posiciones indicadas en función del número de dato LINK durante el SP mostrado.*

Cuando el imán esta en funcionando en régimen estable, como es el caso de los períodos de estabilidad, no se deberían observar movimientos mecánicos inducidos por las fuerzas magnéticas sobre las estructuras del hierro de retorno del campo magnético de CMS. En estas circunstancias los movimientos mostrados en las figuras 6.25 y 6.26 deberían corresponder a cambios desconocidos pero reales inestabilidades mecánicas (en el ENDCAP o el TRACKER) u otros efectos como son los movimientos que puede inducir sobre la mecánica los gradientes de temperatura.

La longitud del LP, podría explicar estos movimientos. Los LPs fueron medidos en el laboratorio de los ISR [111 y 112] antes de ser instalados en CMS, resultado un valor medio de longitud de L=3609.691±0.033 mm, entre los agujeros de referencia que poseen, referido a 20ºC. Estos perfiles son de aluminio EN AW 6061/6063, con un coeficiente de dilatación térmica de unos 24 μm/(m×ºC), por lo que se puede obtener una variación de longitud con la temperatura de la forma:

$$\Delta L(\mu m) = 24\left(\frac{\mu m}{m \times ℃}\right) \times 3.609691(m) \times \left(T_{measured}(℃) - 20(℃)\right) \qquad (6.12)$$

A continuación se estudia el efecto que el cambio de temperatura puede inducir sobre la medida relativa ΔZ (LD-AR).

6.3.4.1. Temperaturas observadas en el volumen de CMS comprendido entre el LD y AR.

Para realizar la monitorización de la temperatura en la región de η=3 (Figura 3.16), se ha instrumentado el sistema con 6 sensores PT100 sobre la superficie del LD (Figura 3.18) y 2 sobre el AR situados sobre los inclinómetros (Figura 3.17). Estas temperaturas registradas se asocian a un número de dato LINK, donde se guarda la media de los 6 sensores situados sobre el LD (TLD+ o TLD-, según sea en el lado positivo o negativo de CMS) y la media de los dos situados en el AR (TAR+ o TAR-, según sea el lado positivo o negativo de CMS). La temperatura en el volumen de la región η=3 comprendido entre el LD y el AR se obtiene realizando la media entre TLD y TAR, para cada uno de los lados Z de CMS considerados (representados como T+ y T-) y este valor se asocia al número de dato LINK registrado.

La temperatura media calculada en el volumen η=3 se ha considerado como la que tiene el perfil de aluminio que hace la transferencia de la medida entre el AR y el LD para cada SPs de datos registrados. En la figura 6.27 se muestra la temperatura registrada correspondiente a la monitorización de la variable ΔZ (LD-AR) mostrada en la figura 6.26. Entre ambas figuras se aprecia una cierta correlación entre las variaciones observadas en los distanciómetros y los cambios térmicos registrados en esta región.

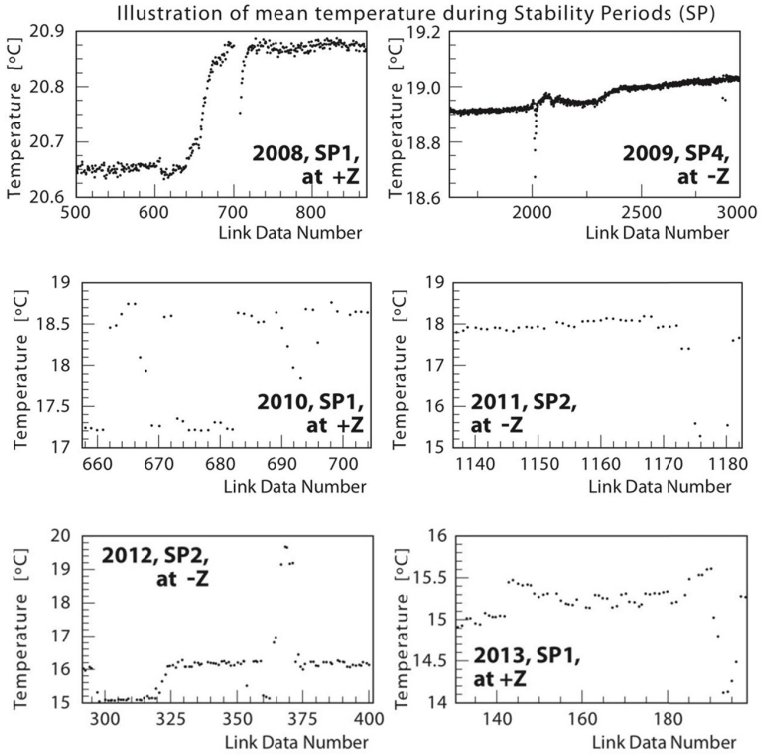


Figura 6.27: *Temperatura media en el volumen situado entre el LD y el AR en la región η=3 de CMS, en función del número de dato LINK, para las mismas posiciones mostradas en la figura 6.26.*

En la tabla 6.31 se muestran los valores numéricos medios monitorizados en el volumen comprendido entre el LD y el AR para los períodos de estabilidad-año mostrados en la figura 6.27. Los valores se muestran en grados y el error asociado es la RMS de la correspondiente distribución de valores. En estas sondas se ha ajustado el valor de voltaje de salida para obtener una precisión de ±0.1ºC, con una resolución de medida de 0.01ºC.

Year/SP	Temp. [ºC] at TLD +	Temp. [ºC] at TAR +	Temp. [ºC] at T +	Temp. [ºC] at TLD –	Temp. [ºC] at TAR –	Temp. [ºC] at T –
2008/SP1	21.69±0.16	19.85±0.06	20.77±0.11	21.62±0.13	20.46±0.04	21.04±0.08
2009/SP4	20.10±0.13	16.58±0.06	18.34±0.05	20.20±0.12	17.74±0.05	18.97±0.04
2010/SP1	20.76±0.05	15.33±1.25	18.04±0.63	20.81±0.04	18.25±1.16	19.53±0.59
2011/SP2	19.35±0.06	14.98±1.49	17.17±0.76	19.43±0.06	16.09±1.28	17.76±0.66
2012/SP2	19.22±0.14	11.55±1.97	15.38±1.00	19.21±0.13	12.91±1.78	16.06±0.90
2013/SP1	19.20±0.30	11.10±0.50	15.20±0.30	19.30±0.40	12.50±0.50	15.90±0.30

Tabla 6.31: *Valores de temperatura medios monitorizados en el volumen comprendido entre el LD y el AR para los períodos de estabilidad-año mostrados en la figura 6.27.*

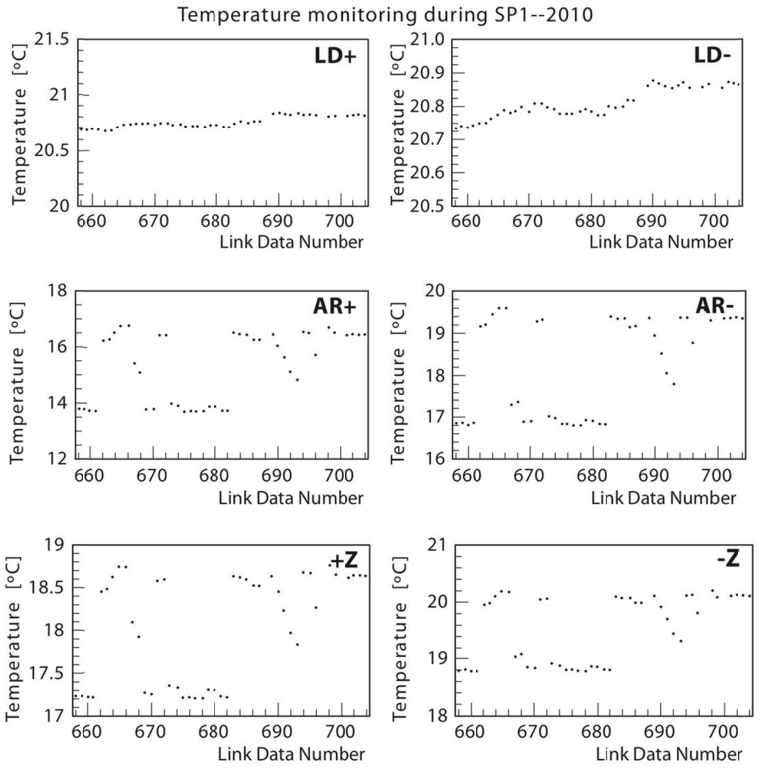


Figura 6.28: *Monitorizado de la temperatura durante el SP1 del año 2010 en función del número de dato LINK. Se han tomado dos datos diarios por lo que la mayoría de puntos representan dos medidas superpuestas. Las figuras 'LD' muestran el valor medio de las 6 sondas de temperatura situadas sobre este, las figuras 'AR' muestran el valor medio de las dos sondas que se encuentran sobre esta estructura y las que tienen 'Z' se refieren al valor medio entre los valores LD y AR.*

De la tabla 6.31 se obtiene que los valores de temperatura monitorizados sobre los LDs suelen ser mayores que los de sus correspondientes ARs, probablemente por la influencia de las temperaturas bajo cero que hay en el interior del TRACKER. Además se observa que la temperatura media del volumen entre el LD y el AR es ligeramente superior (~1ºC) en el lado negativo de CMS.

A modo de ejemplo, en la figura 6.28 se ha realizado una representación detallada de los valores correspondientes al 2010-SP1 de la tabla 6.31 en función del número de dato LINK. Las figuras de la izquierda se refieren a los valores del lado +Z de CMS y la de la derecha el negativo. De estas figuras se observa que mientras que LD está sometido a suaves cambios de temperatura, su correspondiente AR sufre cambios bruscos sin un patrón definido. Esto último puede ser debido a la influencia de las temperaturas bajo cero existentes en el interior del TRACKER y a los flujos térmicos que esto puede inducir.

Observando la figura 6.27 se aprecia que mientras que en los datos 2008-SP1 y 2009-SP4 los cambios de temperatura eran de décimas de grado, en los 2010-SP1, 2011-SP2 y 2012-SP2 los cambios son de algunos grados. Estos cambios bruscos cercanos a los ARs muestran una tendencia que sugiere flujos de aire (caliente o frio) en esta zona, que coincide con la puesta en funcionamiento del TRACKER a temperatura bajo cero en el año 2010.

Puesto que un cambio de temperatura de ±1ºC sobre los LPs genera sobre estos una variación longitudinal de ±86.6 μm, los estudios de los conjuntos de datos de la temperatura en los seis año-SP, conducen a la suposición que la variable ΔZ (LD-AR) debería estar afectada, en su correspondiente conjunto de datos, por un error sistemático del orden $(T_i-T_{initial})\times 86.6$ μm/ºC, siendo T_i la temperatura leída al computar el valor de distancia Z (LD-AR) en el número de dato LINK 'i' y la $T_{initial}$ es la temperatura del primer dato in ese SP. Por consiguiente las correlaciones entre ΔZ (LD-AR) y ΔT, deberían explicar el movimiento observado en esta región.

6.3.4.2. Correlación de ΔZ (LD-AR) con la temperatura.

En la figura 6.29 se muestra la ΔZ (LD-AR) en las 6 posiciones distintas de CMS monitorizadas, versus la temperatura media correspondiente a cada lado Z, en el mismo momento. Los datos muestran los mismos seis año-SP conjunto de datos utilizado como ejemplo anteriormente. Los huecos no son debidos a falta de datos sino a cambios térmicos como los de la figura 6.28.

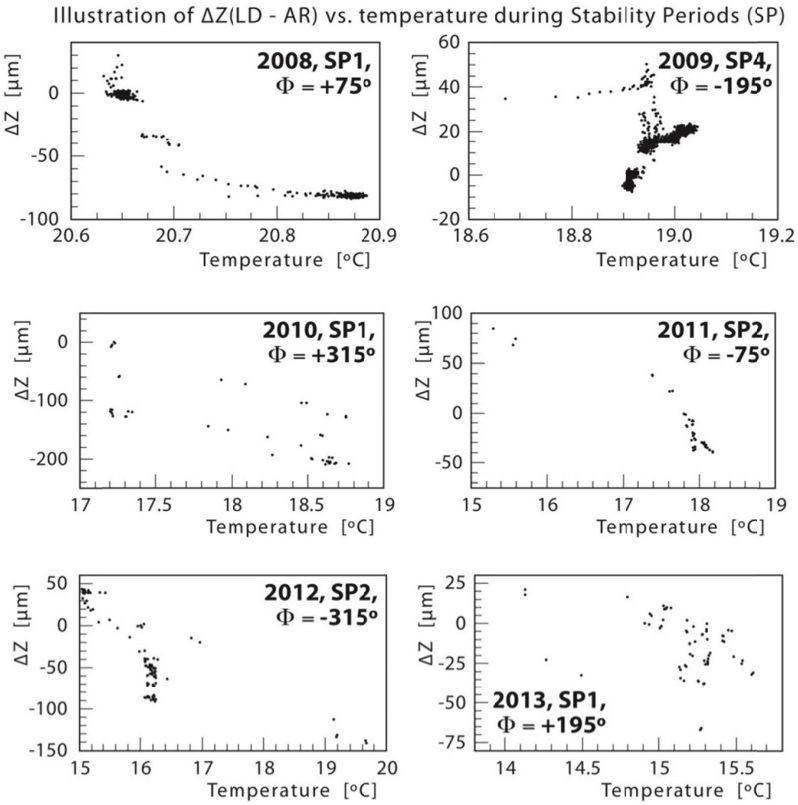


Figura 6.29: *ΔZ (LD-AR) en las 6 posiciones distintas de CMS monitorizadas, en función de la temperatura media correspondiente a cada lado Z, durante SP para el año en cuestión.*

Aunque existe una correlación de ΔZ con la temperatura de los LPs, su parametrización no parece ser simple y única. Para ilustrar esto, en la figura 6.30 se muestra para el conjunto de datos 2010-SP1 las siguientes medidas monitorizadas simultáneamente: ΔZ (LD-AR) en función de número de dato LINK (gráfica superior); temperatura medida en el volumen situado entre el LD y el AR en función de número de dato LINK (gráfica central); y ΔZ (LD-AR) en función de la temperatura $\Delta T = (T_{data\text{-}number} - T_{initial})$ (gráfica inferior). La línea recta que aparece sobre los puntos corresponde al ajuste de los datos realizado. Los valores iniciales Z (LD-AR) y T corresponden al primer dato tomado en la posición indicada, 24 horas después de alcanzar el B_{max}.

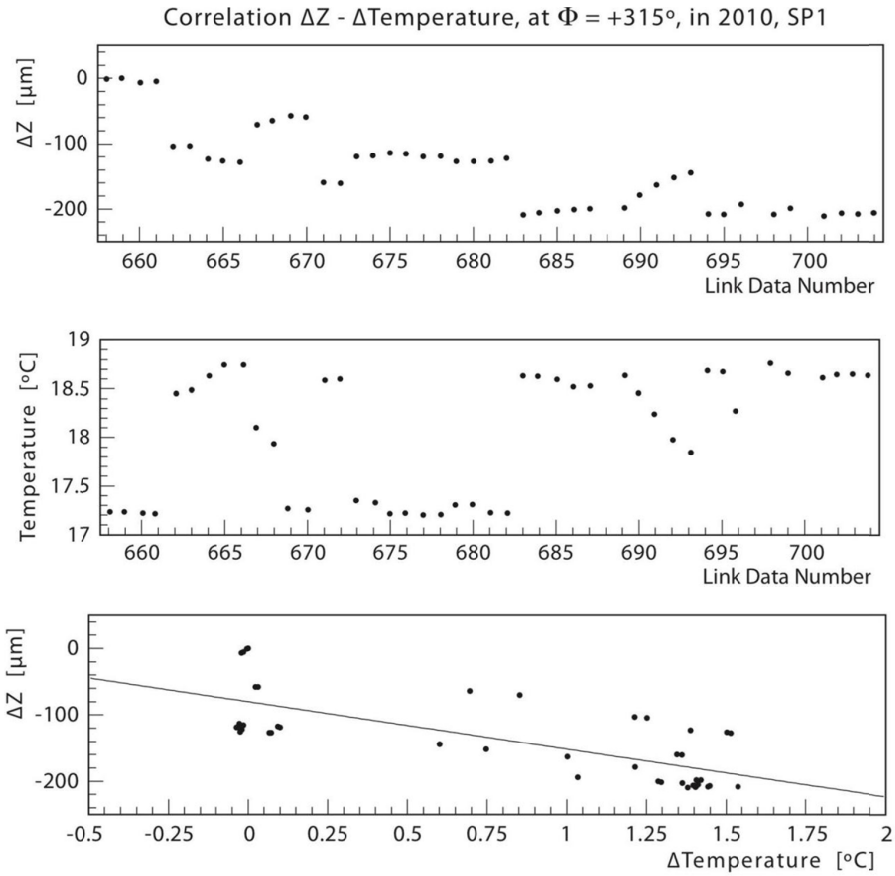


Figura 6.30: *Correlación de la medida ΔZ (LD-AR) con los cambios de temperatura, en la posición dada, durante el SP estudiado.*

La correlación se corresponde a una función lineal ajustada del tipo:

$$\Delta Z(\mu m) = Constant\left(\frac{\mu m}{^{\circ}\mathrm{C}}\right) \times \Delta T(^{\circ}\mathrm{C}) + Offset\,(\mu m) \qquad (6.13)$$

Que en el caso de la figura 6.30 es:

$$\Delta Z(\mu m) = -71.6 \pm 9.5\left(\frac{\mu m}{^{\circ}\mathrm{C}}\right) \times \Delta T(^{\circ}\mathrm{C})$$; siendo $\frac{x^2}{NDF} = \frac{50}{42}$ y $\Delta T = T_{data}(^{\circ}\mathrm{C}) - 17.24(^{\circ}\mathrm{C})$

El Offset del valor ajustado se considera irrelevante para la correlación buscada.

La correlación ΔZ-ΔT es muy evidente: cuando la temperatura se incrementa con respecto al primer valor del SP, la longitud del LP afectado por ese incremento aumenta, los distanciómetros se comprimen y por consiguiente la variable ΔZ (LD-AR) decrece como si el LD se aproximara al AR.

En la tabla 6.32 se muestran los parámetros de la correlación (6.13) para los datos tomados como ejemplo en los 6 años estudiados. En todos los casos se omite el offset. La constante ajustada se tiene que comparar con la teórica esperada ±86.6 μm/ºC.

Year/SP	(Zside) Φ [º]	C_{fitted} [μm/ºC]	χ^2/NDF	$T_{initial}$ [ºC]
2008/SP1	+ 75	–360.7 ± 20.0	20/359	20.64
2008/SP1	+ 195	–253.7 ± 20.0	11/359	20.64
2009/SP4	– 195	–129.2 ± 23.3	68/1309	17.88
2009/SP4	+ 195	–25.6 ± 21.7	23/1309	18.27
2010/SP1	+ 315	–71.6 ± 9.5	50/42	17.24
2010/SP1	+ 195	–73.7 ± 9.5	53/42	17.24
2011/SP2	– 75	–43.2 ± 9.4	5/40	17.80
2011/SP2	+ 195	–18.7 ± 8.1	40/40	17.23
2012/SP2	– 315	–43.1 ± 4.5	59/96	16.00
2012/SP2	+ 195	–46.3 ± 4.1	157/96	15.03
2013/SP1	– 75	–55.8 ± 19.3	4/62	15.78
2013/SP1	+ 195	–24.6 ± 17.1	11/62	14.91

Tabla 6.32: *Parámetros de la correlación (6.13) para los datos tomados como ejemplo, en los 6 años estudiados.*

Los resultados explican en cierto modo el efecto 'acordeón' observado: los LPs se estiran o encogen en función del signo y de la cuantía de $\Delta T = (T_i - T_{initial})$ cuando se lee el número de dato LINK 'i'. El centro de CMS no se mueve durante los períodos de estabilidad y los LDs y ARs tampoco se mueven entre sí. En consecuencia se pude concluir que CMS es perfectamente estable, incluso para esta variable, durante la toma de datos a lo largo de los seis años de operación estudiados [268].

6.3.5. Resumen y conclusiones.

En este punto se ha mostrado la colección de datos recolectados por el sistema de alineación LINK durante los 6 años de operación de CMS, con una mayor estadística sobre los datos analizados de movimiento y estabilidad de CMS tratados en los puntos anteriores.

Los análisis de los datos tomados durante los CRAFT08 y CRAFT09 sugieren que la estabilidad se alcanza a las 24 h siguientes de llegar al valor de intensidad de campo magnético nominal B=3.8 T, dado que los desplazamientos observados entre las estructuras mecánicas a partir de ese momento no exceden la resolución instrumental de los dispositivos de monitorización.

Los estudios llevados a cabo durante el 2010 en siete períodos diferentes sobre ocho meses para medir los movimientos durante el campo nominal indican que la estabilidad mecánica ya no se vuelve a observar, con la variable ΔZ (LD-AR) en la mayoría de los períodos observados cuestionando la idea de la estabilidad estructural observada previamente.

Con el presente análisis, se extienden los resultados observados al período 2008-2013 concluyendo:

> El estudio de las 48 variables observadas: La distancia axial relativa ΔZ (TP-CSC ME1/1); distancia radial relativa ΔR (TP-CSC ME1/2); distancia radial relativa ΔR (MAB-CSC ME1/2); y la rotación angular Δφ (MAB). Presume que todas permanecen estables durante los períodos de

estabilidad y muestra las esperadas ausencias de desplazamientos y rotaciones, dentro de la resolución de los dispositivos utilizados.

El estudio de la correlación ΔZ (LD-AR) – ΔT observada en todos los datos recolectados a lo largo de los 6 años de operación, permite determinar que las no estabilidades detectadas sobre esta variables no son movimientos reales, sino la consecuencia de un efecto sistemático que afecta al cálculo de la distancia relativa entre el LD y el AR inducido por los cambios de temperatura en esa región que afectan principalmente al LP que realiza la trasferencia de medida entre el LD y el AR.

Este estudio resume el comportamiento de las estructuras que componen el detector CMS durante el período de funcionamiento comprendido entre el año 2008 y el 2013. El principal resultado es la aseveración de que CMS ha permanecido estable durante los períodos de tiempo en los que el campo magnético se encontraba en régimen estable de operación, lo que ha permitido que el sistema del espectrómetro de muones trabaje en unas condiciones de operación excelentes y en consecuencia se haya podido realizar una buena reconstrucción de las trazas de los muones.

Capítulo 7: Conclusiones.

Seguidamente se resumen las conclusiones extraídas en el desarrollo de esta tesis. También se exponen las posibles líneas de investigación que pueden desarrollarse a partir de los resultados de este trabajo.

El sistema de alineación LINK de CMS permite la reconstrucción geométrica de las localizaciones espaciales y orientaciones angulares relativas entre las cámaras de muones y el TRACKER, con una precisión por debajo de 150 μm en distancias y de unos 40 μrad en la reconstrucción angular y con resoluciones en medidas relativas de ~40 μm y ~30 μrad, para rangos de movimientos de hasta centímetros (distancias) y miliradianes (rotaciones), según la posición. Los componentes del sistema pueden operar en ambientes altamente radiactivos. Las dosis de radiación previstas tras 10 años de funcionamiento son del orden de 10^5 Gy, 2×10^{14} neutrones/cm^2 y 2×10^{14} protones/cm^2 (CMS recomienda aplicar un coeficiente de seguridad 3 sobre esos valores). Además pueden funcionar dentro de campos magnéticos, que en el caso de los componentes situados en la región del TRACKER serán próximos a 4 T.

Para la generación de las líneas ópticas del sistema LINK se han seleccionado los diodos láser modelo 58FCM de la casa Schäfter&Kirchhoff con una potencia máxima de salida de 30 mW (clase IIIB) que pueden ser modulados en potencia (<1 %) y que son muy estables en períodos largos de tiempo. Los módulos láser se encuentran situados en el exterior de la caverna para evitar los efectos de campo magnético y radiación. El guiado de la luz hasta los colimadores situados en el detector se realiza mediante fibras ópticas monomodo S630 de Nufern, seleccionadas tras haber sido estudiadas experimentalmente a los niveles de radiación esperados con los coeficientes de seguridad recomendados, que presentan atenuaciones inferiores a 1dB/m para la longitud de onda utilizada por el sistema (681 nm). La óptica colimadora escogida ha sido el modelo FC5-TiFS-NIR de la firma Micro Laser. De los dispositivos estudiados ha sido el único que capaz de proporcionar un haz gaussiano sin distorsión ni efectos de difracción en los rangos de uso en CMS. Dentro del detector y en la medida de lo posible, los caminos del haz se han protegido y anodizado en negro para evitar, o minimizar, reflexiones.

Se han realizado rigurosos estudios para seleccionar los diferentes tipos de detectores utilizados por el sistema. Tras su selección, todos ellos han sido sometidos a procesos de caracterización y estudio de comportamiento en las condiciones de trabajo en CMS:

> Se ha dedicado un gran esfuerzo al desarrollo de los fotodetectores utilizados por el sistema. Durante varios años los grupos del IFCA y CIEMAT, junto con el Steinbeis-Transferzentrum für Angewandte Photovoltaik und Dünnschichttechnik (STW) han seguido un programa de I+D+i conjunto para desarrollar una nueva generación de sensores semitransparente de silicio amorfo de detección de posición 2D (ASPDs) para ser utilizados en sistemas de alineación multipunto.

Se han desarrollado y caracterizado 122 ASPDs (Amorphous Silicon Position Detectors), con un área activa de ~30 × 30 mm^2, midiéndose una resolución intrínseca de 1.5 ±1 μm en ambas direcciones de su superficie, una sensibilidad de 16.3±7.6 mA/W, un valor medio de resolución para todos los sensores de σ(X)=5.2±2.6 μm en la coordenada X y σ(Y)=5.1±2.4 μm para la Y, una distribución de los ángulos de deflexión medios para todas las muestras de θ_x=-1.1±5.1 μrad y θ_y=0.8±3.8 μrad y una transmitancia media de T= 84.8±2.9%. Se han realizado estudios con configuraciones multipunto, colocando varios sensores ASPDs en la línea del haz, resultando que para las situaciones de CMS con un caminos del haz entre sensores <3 m y <4 ASPDs en línea, la resolución de la reconstrucción calculada en el sensor más alejado está por debajo de 10 μm. Se han probado también configuraciones más complejas como es una disposición en L para un camino de luz de 20 m, con 12 ASPDs alineados. Para esta configuración se ha conseguido detectar desplazamientos en el sensor más alejado, con una resolución por encima de 100 μm. Los ASPDs han sido estudiados bajo radiación, no apreciando cambios significativos en sus propiedades, siendo los cambios observados compatibles con la incertidumbre de la medida. El envejecimiento observado por la aplicación de luz puntual, para los años de operación, está por debajo del 3%. Ensayos realizados con luz difusa blanca durante 2800 horas sobre toda la superficie del ASPD indican, que aparece tanto el efecto directo de Staebler-Wronski (SWE) como inverso, que podría llegar a producir un 20% de degradación en la transmisión durante el directo SWE, recuperándose parcialmente por el inverso SWE.

Se han utilizado 3 tipos diferentes de sensores de inclinación electrolíticos, el uniaxial M756–1172, el biaxial M756–1150 y el biaxial 900-H de la firma Applied Geomechanics Inc. Se han calibrado en un rango de ± 35 mrad, que engloba los movimientos previstos en CMS, resultando unos valores de precisión para los sensores M756-1172 entre 10.6 μrad y 45.5 μrad, para los M756-1150 entre 12.2 μrad y 41.5 μrad y para los 900-H entre 15 μrad y 91 μrad. Se han estudiado los efectos inducidos por los cambios esperados de temperatura y por radiación concluyendo que son despreciables. Respecto a los estudios realizados en campo magnético, se observó que cuando el gradiente de campo se mantiene por debajo de 2 mT entre los dos polos del inclinómetro, no se aprecian cambios en el voltaje de salida de los sensores que se encuentran perpendiculares al campo magnético. Cuando la orientación varía se aplica una correlación obtenida con parámetros que son específicos para cada configuración. En CMS los inclinómetros que realizan la medida de φ, cumplen los requisitos para no estar afectados por el campo, pero no así para los que miden la componente θ en la región del TRACKER.

Para realizar las medidas de distancia se han utilizado dos tipos de distanciómetros, ópticos: OMRON Z4M–W100 de la firma 'OMRON Corporation' y potenciómetricos: 18FLPA50 de la firma Sakae y SLS095-10 de la firma Penny & Giles. Todos ellos se han sometido a una serie de estudios, y como resultado se ha obtenido que los OMRON Z4M–W100 tienen una precisión final de medida de entre 30 μm y 40 μm, con una

resolución calibrada de 22 μm, su principal fuente de incertidumbre se ha observado que proviene de la colocación angular de la pantalla sobre la que incide el sensor, que con variaciones de ±10º podrían alcanzarse desviaciones de 200 μm. Estos sensores fueron sometidos a una irradiación de hasta 4 Gy con gammas y 10^{11} neutrones/cm^2, con estos valores no se observa un cambio apreciable en la linealidad o residuos del distanciómetro. Frente a los valores del campo magnético correspondientes a su localización en CMS (de 0.75 T, con gradientes de campo <0.024 T/cm) tampoco se observó variación en la señal de voltaje obtenido. Los potenciométricos se han calibrado obteniendo una precisión de 30 μm a 40 μm, y una resolución por debajo de 10 μm, siendo insensibles a los efectos térmicos, magnéticos o de radiación esperados en CMS.

Los componentes opto-mecánicos son los formados por una combinación de dispositivos mecánicos, ópticos y de detección, en el mismo elemento: Laser Box (LB), Detector Box (DB), Laser Level (LL), Alignment Ring (AR) y LINK Disc (LD). Estos han sido desarrollados en base a los requerimientos del sistema LINK y se han ajustado, calibrado y estudiado, utilizando complejos bancos ópticos en el laboratorio de metrología del IFCA y en el CERN en la zona denominada 'I4 ISR Hall'. El banco de calibración del LINK en el CERN consiste en una red de 'puntos geodésicos' referidos al centro de la esfera de Taylor-Hobson (THS), situados con una precisión relativa de 70 μm, una estabilidad de 100 μm en dos años, y que ocupa un área de unos 20×10 m^2. Cada uno de estos puntos se instrumenta con sensores 'ASPDs' que han sido especialmente diseñados para este fin.

Se puede destacar cómo hechos más relevantes, realizados con estos dispositivos de calibración que:

Se han conseguido ajustar los haces laser del AR con precisiones <300 μm respecto a las nominales, contando además con el apoyo de estaciones totales y fotogrametría digital. Mediante la utilización del programa de reconstrucción geométrica COCOA, utilizando los datos de calibración y la geometría del AR y sus componentes, se consiguió obtener la posición relativa y absoluta de los rayos y su diferencia respecto con los valores nominales, obteniéndose una precisión en las translaciones (origen del haz) del orden de 112 μm (RMS ~12 μm) y en rotaciones (dirección de la propagación del haz) de ~84 μm (RMS ~44 μm).

Las TPs se han calibrado con una precisión de 30 μm, mediante fotogrametría digital. Los diferentes componentes de las TPs han sido referenciadas internamente con la ayuda de MMCs (máquinas de medición de coordenadas) de visión y contacto, con precisiones de <10 μm.

El dispositivo LD es una estructura de sándwich de fibra de carbono realizado por moldeo en caliente, con unos insertos mecanizados tras el pegado que proporcionan precisiones de posicionamiento en la colocación de las LBs por debajo de 20 μm. La precisión media en la determinación de los parámetros por COCOA fue de ~115 μm para los rayos primario y secundario, mientras que la precisión en la determinación de los ángulos del haz reflejado en el divisor de haz ha sido de 85 μrad (RMS 43 μrad).

Este dispositivo es el más importante del sistema LINK, y durante su fase de diseño se sometió a un profundo estudio de simulación MEF, para optimizar su estabilidad frente a deformaciones por gravedad y temperatura cuyo límite se ha fijado en 50 µm con un gradiente de 6ºC, bajo el peso propio y de sus componentes.

El apoyo de la sección Large Scale Metrology (EN/MEF-SU) del CERN, ha sido fundamental en la calibración de los dispositivos opto-mecánicos, así como en la obtención de los parámetros de partida de los diferentes componentes del sistema LINK una vez instalados sobre el detector CMS, y que son las posiciones iniciales suministradas a COCOA, para realizar la reconstrucción geométrica de las posiciones que ocupan los componentes en CMS en todo momento. Las precisiones proporcionadas por la sección de metrología del CERN durante las diferentes medidas realizadas son: ~300 µm con la estación total; 30-100 µm mediante fotogrametría digital en los ISR; mientras que con el Láser Tracker se consiguieron ±30 µm de precisión en los posicionamientos relativos y ±500 µm en los absolutos, para aquellas medidas realizadas sobre componentes ya instalados en CMS.

En esta tesis doctoral, un punto fundamental de la misma ha sido el estudio de los pegamentos utilizados por el sistema de alineación LINK. Para que el sistema funcione correctamente y no falsee los valores obtenidos, necesita que los componentes que lo forman sean estables dimensionalmente en las condiciones de operación del sistema, y para que esto se cumpla deben cumplirlo las uniones adhesivas que fijan los diferentes componentes sobre las estructuras de alineación, manteniendo sus propiedades resistivas dentro de un límite. Para ello se han llevado a cabo varios estudios de donde se extrajeron las conclusiones que se presentan a continuación:

-Se desarrolló un estudio encaminado a comprobar la estabilidad de las uniones de vidrios pegados con adhesivos ópticos, así como de sus propiedades ópticas (Transmitancia (T) y Reflectancia (R)) en función de la longitud de onda y la radiación recibida; para garantizar que los rayos láser de referencia, que el sistema de alineación LINK de CMS proyecta dentro del detector, no se distorsionan, o degradan con el tiempo, por los efectos que la irradiación pueda provocar sobre los vidrios, recubrimientos anti-reflejantes (ARC) o reflejantes, o sobre el adhesivo. Se concluyó que de los diferentes vidrios ópticos probados, solamente el Silicio Fundido de grado óptico (Cuarzo Sintético) y el BK7-G18 con triple tratamiento anti-reflejante estándar, no sufren apenas perdida de T y R tras una irradiación de 100 KGy con γ. Además el BK7-G18 se ha irradiado a esos niveles con dos tipos de recubrimiento reflejantes (plata y aluminio), con resultado de una pérdida del ~6% con aluminio, mientras que con plata no se aprecia degradación.

Se ha estudiado la estabilidad de la unión en función de las dosis recibidas mediante la realización de un control dimensional (utilizando una MMC) sobre muestras de vidrio pegadas con adhesivos ópticos: para irradiaciones de hasta 100 KGy, las pruebas realizadas sobre BK7, pegado con LOCTITE 350 daban unas variaciones angulares de 46 µrad de media, mientras que las realizadas con el adhesivo EPOTECNY NOA61

mostraban ~56 μrad. Estas muestras se volvieron a irradiar otros 100 KGy adicionales, observando que la de LOCTITE no cambiaba, mientras que la de EPOTECNY se modificaba otros 30 μrad. Aunque los valores observados son del mismo orden del error de la medida, el hecho de que el BK7 se volviera completamente negro no permitía descartar eventuales deformaciones.

Para mejorar los resultados del estudio y discernir el error, se realizó una medida con los dos vidrios que sí habían pasado las pruebas de radiación (Cuarzo Sintético y BK7-G18), utilizando cómo adhesivos el LOCTITE 350, EPOTECNY NOA61, MELTMOUNT y una técnica de adhesión molecular en vacío. Para realizar esta investigación se utilizó un 'gonio-espectrómetro VIS'. El resultado mostró que con dosis de 150 KGy, el BK7-G18 pegado con NOA61, LOCTITE y adhesión molecular no presentaba cambios angulares, con una desviación estándar de las medidas de unos 2.5 μrad. Por otra parte, utilizando el adhesivo MELMOUNT se observó un giro de 35 μrad tras los primeros 50 KGy recibidos. Utilizando el Cuarzo Sintético se apreció pequeños cambios compatibles con las incertidumbres de medida, salvo en el caso del adhesivo NOA61, con el que se observaron cambios de 19 μrad durante los primeros 50 KGy recibidos. En el caso de la adhesión molecular se despegó una muestra durante la manipulación, descartando este proceso. Por último se ha estudiado la T bajo el efecto de la irradiación γ y de los neutrones en función de la longitud de onda: en todos los casos la T está por encima del 90 %, con variaciones del 1% en sus propiedades para dosis de 150 KGy; mientras que se aprecia una variación menor al 2 % en la T, en el rango de longitud de onda de 500 a 800 nm, para el caso de irradiación combinada de 15 MRad con γ y una fluencia total de neutrones de $5 \times 10^{14} \pm 37\%$ cm^{-2}.

En base a los estudios realizados se seleccionó el Cuarzo Sintético pegado con el adhesivo EPTECNY NOA61 y la longitud de onda de 681 nm para el sistema de alineación LINK de CMS.

-El apartado central de la tesis ha sido el enfocado al estudio del adhesivo estructural utilizado para la fijación de los diferentes componentes del sistema LINK sobre las estructuras donde van fijados, así como para el sellado de los dispositivos susceptibles de aflojarse por algún tipo de solicitación. Se ha seleccionado el Araldit 2011 por ser un adhesivo de amplio espectro de materiales, curado a temperatura ambiente, con prestaciones mecánicas muy altas y por poseer una buena resistencia y estabilidad frente a la radiación.

Por lo general y en el caso de los componentes de aluminio, que son la mayoría de los que se han fijado mediante adhesivo, se ha utilizado un tratamiento superficial previo para mejorar la adhesión. Cuando los componentes están junto a elementos ópticos y de paso del haz, el tratamiento seleccionado ha sido un anodizado teñido de negro, en el resto de casos se ha utilizado un tratamiento de ataque con ácido sulfúrico y dicromato potásico.

Se han usado dos combinaciones de ataque con ácido, observando un apreciable aumento de la resistencia a impacto (~20%), la fuerza aplicada en el momento de la rotura (~6%) y de su deformación en rotura (~29%), en las probetas no irradiadas, con el tratamiento más agresivo, y que ha generado unos valores medios de rugosidad medidas en los dos ejes de la superficie de las probetas, de R_a (µm) desde 0.6 a 0.9, R_{sm} (µm) de 60 a 100 y valores de R_{sk} de hasta -2.50. Con el nivel de agresión inducido a las superficies de las probetas utilizadas, se observa un aumento correlacionado con esta agresión, de los parámetros R_a, R_q, R_z, R_{max}, R_t y la realación R_v/R_p al igual que se aprecia un aumento del valor absoluto de R_{sk} y R_{ku}. Estos valores indican que con la agresión aumenta el número de picos de la superficie y su altura, así como un ligero desplazamiento y ensanchamiento de la curva de distribución de amplitud (CDA). Lo que implica un aumento de superficie que puede ser utilizada por el adhesivo para realizar la adhesión mediante los mecanismos de anclaje mecánico y absorción que son los principales utilizados por los adhesivos sobre adherentes metálicos.

Para realizar este estudio se han preparado 2 tipos de probetas P_I (con una superficie pegada de 15×15 mm^2) y P_{II} (con una superficie pegada de 45×15 mm^2), estas han sido pegadas con el adhesivo Araldit 2011, depositando una capa de adhesivo de espesor 0.05 a 0.1 mm. Para realizar la irradiación con γ de la forma más homogénea y rápida posible en la instalación Náyade del CIEMAT, se ha desarrollado un proceso que permite conseguir una tasa de dosis media sobre el adhesivo de las probetas de 2.2 KGy/h, con una uniformidad máxima del 7% entre la posición que ocupan las probetas dentro del dispositivo de irradiación. Han sido irradiado grupos de probetas hasta unos niveles de 10, 50, 100, 263, 303, 2020 y 2071 KGy, empleando, para los mayores niveles, 39 días para alcanzar la dosis necesaria sobre las probetas. Entre 50 y 100 KGy ya se aprecia un cambio de color sobre la capa de adhesivo.

Para realizar el estudio de la estabilidad dimensional se han evaluado dos parámetros: el ángulo que forman dos caras de las dos piezas que componen las probetas y la distancia entre caras, utilizando para ello las probetas del ensayo de impacto (P_{II}) y las probetas especialmente diseñadas para optimizar este estudio (P_I). Obteniendo que para las probetas P_I, se puede apreciar cierta tendencia a una ligera reducción del espesor medio de la capa de adhesivo de ~ 1 µm, así como una pequeña variación en su ángulo de unos 20 µrad con dosis media sobre el adhesivo de ~252 KGy. En las probetas P_{II}, irradiadas hasta 303 KGy, no se aprecia la misma tendencia de forma clara, aunque si es compatible con esos resultados, e incluso son compatibles con ausencia de movimientos. Estas probetas han sido sometidas a un proceso de humectación posterior a 26ºC y 90% RH para comprobar los cambios que puede provocar la humedad sobre el adhesivo, observando en las P_I una expansión de ~1 a 2 µm en la junta adhesiva que es compatible con los observado en las P_{II}, no apreciando diferencias entre las probetas irradiadas y sin irradiar. Las P_I, han sido sometidas a un posterior proceso de irradiación con una dosis de 1938 KGy, observando una reducción de espesor de 2 µm, que se

corrobora con los resultados de las probetas de referencia, que no han sido sometidas a este proceso de irradiación, las cuales no han cambiado. Finalmente se ha realizado un estudio temporal con los ensayos realizados sobre las probetas a lo largo de unos 5 meses, para de esa forma evaluar la estabilidad de la unión con la combinación de cambios ambientales de humedad, temperatura y niveles de radiación, observando un cambio de espesor medio de 1 μm y de ángulo de 35 μrad, que podría considerarse el límite de la estabilidad de las uniones adhesivas utilizadas por el sistema LINK en CMS, pero estos valores obtenidos también son compatibles con ausencia de movimientos, puesto que están dentro de la incertidumbre de la medida realizada. Si son reales, ese cambio de espesor no va a inducir degradación en la medida, puesto que está muy por debajo de la resolución del sistema y la variación angular está dentro de la resolución de medida del sistema.

El estudio de resistencia frente a impacto se ha realizado mediante dos campañas de ensayos complementarios, utilizando las probetas P_{II} (con un tratamiento superficial 'suave') y las P_{II}' (con un tratamiento 'más agresivo'):

En la primera campaña se han ensayado probetas P_{II} con una máquina INSTRON Impact II, que dispone de un péndulo instrumentado Charpy de 5J, utilizando un útil desarrollado para ensayar estas probetas siguiendo en lo posible la norma UNE-EN ISO 9653 (ensayo Izod para adhesivos), equivalente a la ASTM D950, observando que no se aprecia cambio significativo en la energía sin instrumentar necesaria para romper una probeta hasta un nivel de dosis de 303 KGy, ni en la deformación producida en el momento de la rotura; incluso puede considerarse una ligera tendencia de aumento de estos valores con el nivel de radiación recibida. Se ha obtenido una correlación lineal entre el % de adhesivo que queda pegado en la pieza 'base' de la probeta y la deformación en rotura.

Durante la segunda campaña de ensayos, se ha utilizado un péndulo de 50 J, que dispone de una célula de carga con un límite de carga varias veces el del anterior. En esta campaña se han ensayado probetas P_{II} y P_{II}', para así poder comparar los resultados de ambas campañas de ensayos y comparar entre los tratamientos superficiales aplicados sobre ambas probetas. Durante los ensayos se ha observado una desviación estándar el doble a la observada con el péndulo de 5J en la valoración de la energía sin instrumentar, que podría ser debido a los errores sistemáticos que introduce esta nueva disposición; de igual forma se observan mayores errores sistemáticos en la valoración de la deformación en rotura con el péndulo de 50 J. Además se observa un ligero aumento del valor de la energía y la deformación en rotura de las P_{II} respecto a los resultados de la primera campaña. También se aprecia un aumento del valor de la energía y la deformación en rotura de las P_{II}', respecto a los resultados de las probetas P_{II} en la primera y segunda campaña de ensayos, que estaría relacionada con la mejora de las propiedades adhesivas del sustrato de las probetas P_{II}', que le ha proporcionado el segundo tratamiento superficial que ha sido aplicado sobre éstas.

Por ello, tal y como dice la norma, los valores aquí obtenidos solamente pueden ser comparados respecto a otros ensayos que se realizan en las mismas condiciones. Así que, los valores de este estudio son de utilidad para estudiar la degradación relativa que se produce sobre la junta adhesiva con las dosis aplicadas a las probetas.

Con los resultados de la segunda campaña de ensayos tampoco se aprecia un cambio significativo en la energía absorbida para romper las probetas P_{II} y P_{II}', hasta la dosis de 303 KGy; ni se aprecian cambios relevantes de deformación o fuerza en el momento de la rotura. Sí se aprecia una degradación de las propiedades de resistencia frente a impacto al llegar a los 2071 KGys, en las P_{II}', con una reducción de resistencia frente a impacto significativa: la energía para romper la probeta se reduce un 14 %, la fuerza en rotura desciende más del 20 % y la deformación en rotura disminuye un 24%, respecto a los valores sin irradiar.

De estos resultados se puede concluir que no se aprecia degradación en las propiedades resistivas evaluadas de la unión adhesiva, hasta los niveles máximos esperados durante los años de operación de CMS (300 KGy), e incluso estas propiedades van a seguir trabajando en buenas condiciones hasta los 2000 KGy, con lo que se garantiza su correcta operación después de realizar las operaciones de actualización y mejora previstas tanto en el colisionador LHC como en el experimento CMS tras el final de la vida útil de este último.

Finalmente, se ha estudiado y presentado el funcionamiento del sistema de alineación LINK, en condiciones reales de operación desde el año 2008 hasta su parada de mantenimiento y mejora en Febrero del año 2013, a través de los datos proporcionados por el sistema:

Se han validado los resultados de reconstrucción 3D obtenidos durante las pruebas del imán, frente a mediciones topográficas y fotogramétricas. En este período, durante la subida del campo magnético hasta 4 T se observó un desplazamiento máximo de 13.69 mm de la rueda YE+1 hacia el centro de CMS, y de las CSCs situadas sobre la ME1/2 de esta rueda de 1 a 4 mm en Z, con rotaciones de hasta 4.3 mrad. Estos resultados están en concordancia con los obtenidos por el sub-sistema de alineación del ENDCAP.

Se ha estudiado la estabilidad del detector CMS durante varios años, observando que los movimientos que se producen en la estructura del detector en el transcurso del encendido del imán se estabilizan al cabo de unas 13.5±0.5 horas de funcionamiento (en condiciones de operación, a la intensidad nominal de funcionamiento del campo magnético, 3.8 T), momento en el que los movimientos observados entre las estructuras que componen CMS no superan la resolución de medida del sistema LINK.

Durante los períodos de toma de datos del detector se han monitorizado una serie de variables para estudiar su estabilidad temporal, observando, tras el período de estabilización, únicamente variaciones por encima de la resolución del sistema en una de las variables (la variable ‘distancia Z’ del

AR respecto al LD). Estas variaciones están correlacionadas perfectamente con las variaciones térmicas observadas en la región η=3. Para su correcto funcionamiento el TRACKER debe operar a temperaturas de -20ºC. Se ha observado que este cambio de temperatura induce una serie de flujos térmicos en esta región interna que su vez motivan variaciones dimensionales sobre el perfil longitudinal que relaciona el LD y el AR (de ~200 μm) que están correlacionados con la temperatura. Se concluye por tanto que las variaciones observadas no son movimientos reales de las estructuras monitoreadas.

Con estos resultados se asevera que CMS ha permanecido estable durante los períodos de tiempo en los que el campo magnético se encontraba en régimen estable de operación, lo que ha permitido que el espectrómetro de muones (Cámaras y Tracker) trabajen en unas condiciones de operación excelentes y en consecuencia se haya podido realizar una buena reconstrucción de las trazas de los muones.

7.1. Líneas de investigación futura.

A partir de los estudios realizados durante el desarrollo de esta tesis se podrían sugerir cómo líneas de desarrollo futuro:

Estudiar el envejecimiento real que se ha producido sobre sobre los diferentes dispositivos detectores del sistema, una vez se desmantele el sistema de alineación LINK de CMS, para corroborar los estudios previos realizados y reajustar los errores sistemáticos de los componentes debido al envejecimiento real.

El estudio de la degradación de las uniones estructurales de Araldit 2011 estudiando su estabilidad dimensional y resistencia a impacto, con las dosis de neutrones recibidas. Según la bibliografía el principal tipo de enlace químico de un polímero es el covalente, que es muy sensible a las radiaciones ionizantes, cómo es el caso de la radiación γ, por lo que a priori se ha considerado que el adhesivo en cuestión va a ser estable frente la irradiación con neutrones, puesto que los datos obtenidos frente a γ son buenos; adicionalmente, en el CERN, se han realizado ensayos en los que se muestra que la variación de su resistencia a cortadura frente a neutrones no es significativa, con dosis 100 veces superiores a las esperadas en los componentes del LINK situados en la parte más interna de CMS.

Investigar sobre la influencia del desalineamiento lateral del péndulo de impacto, en los resultados obtenidos. Correlacionando estos resultados con simulaciones de elementos finitos y estudios analíticos. Lo que permitiría acotar los errores sistemáticos del ensayo y estudiar la influencia que tiene la radiación sobre estos resultados.

Analizar la influencia que tiene el espesor de adhesivo en la estabilidad estructural y la resistencia frente impacto de la junta adhesiva. Correlacionando estos resultados con simulaciones de elementos finitos y relacionándolo con la dosis de radiación a la que se someten las probetas.

Estudiar la influencia del chaflán de adhesivo en el borde de unión entre ambas partes de las probetas de impacto frente a su resistencia. Correlacionando estos resultados con simulaciones de elementos finitos y estudios analíticos y relacionarlo con la dosis de radiación a la que se someten las probetas.

Profundizar en el estudio de la resistencia frente a impacto de la junta adhesiva, en función del pre-tratamiento superficial al que se somete el adherente y del nivel de irradiación que recibe la junta. Así como investigar sobre la relación que tiene el pre-tratamiento del sustrato con la sección de adhesivo que queda adherido sobre la superficie de la pieza 'base' de la probeta, la deformación en rotura de las probetas de impacto, y la radiación recibida por la junta.

Capítulo 8: Conclusions.

In what follows the conclusions drawn from this document are presented. In addition, some possible lines of research that can be developed from the results of this work are outlined.

The CMS LINK Alignment System enables the reconstruction of the geometric space locations and angular orientations relating the muon chambers with the TRACKER, with a precision below 150 μm for distances and about 40 μrad for angular reconstruction with resolutions, for relative measurements, of ~40 μm and ~30 μrad for ranges of motions up to centimeters (distances) and milliradians (rotations), depending on the position. The components of the system can operate in high irradiation environments. The expected doses after 10 years of operation are the order of 10^5 Gy, 2×10^{14} neutrons/cm^2 and 2×10^{14} protons/cm^2 (CMS recommends to apply a safety factor of 3 on these values). In addition, the LINK System can operate within magnetic fields, which in the case of the components located in the region of the TRACKER approaches the 4 T.

For the generation of the optical lines the LINK system have been selected the laser diodes 58FCM model of the firm Shäfter&Kirchhoff with a maximum power output of 30 mW (class IIIB) that can be modulated in power (<1 %) and are very stable over long time periods. The diode laser modules are located on the outside of the experimental cavern to avoid the effects of magnetic field and irradiation. The guidance of the light until the collimators located in detector is carried out using single-mode optical fibres S630 of Nufern, that were selected after experimental study of their behaviour face to the radiation levels expected with the recommended safety coefficient, that lead to presume that they will present attenuations below 1dB/m for the wavelength used by the system (681 nm). The collimators chosen belong the model FC5-tifs-NIR from Micro Laser. Among the tested devices were the only ones capable of provide a gaussian beam without distortion or effects of diffraction in the distance ranges planned to use in CMS. It should be noticed that the paths of the laser beams have been protected and anodized in black to prevent, or minimise, reflections.

There have been rigorous studies to select the different types of detectors used by the LINK:

> A particularly great effort was dedicated to the photodetectors to be used. In fact, for several years groups at IFCA and CIEMAT, together with the Steinbeis-Transferzentrum für Angewandte Photovoltaik und Dünnschichttechnik (STW) were carrying a joint R&D effort to develop a new generation of semitransparent Amorphous silicon 2D Position Detecting sensors (ASPDs) for multipoint alignment purposes.
>
> As a result, 122 ASPDs have been developed and characterized. The photodetectors have an active area of ~30 × 30 mm^2, with an intrinsic resolution of 1.5 ±1 μm in both directions of its surface, a sensitivity of 16.3±7.6 mA/W, an average resolution (the minimum displacement of the laser spot on its sensitive surface that the sensor can detect) of

σ(X)=5.2±2.6 μm and σ(Y)=5.1±2.4 μm in the X- and the Y-coordinate, respectively. The measured averaged deflection angles were θx=-1.1±5.1 μrad and θy= 0.8±3.8 μrad, in the X and Y directions respectively. The average transmittance is T= 84.8±2.9%. Studies undertaken in multipoint layouts, placing several ASPDs sensors in the light path, proved that for the CMS configurations with light paths between sensors smaller than 3 m and a maximum of 3 ASPDs on the same light line, the resolution of the reconstruction calculated in the farthest sensor is below 10 μm.

For the shake of testing the sensor´s capabilities, more complex configurations were tested as for instance a L path of light of 20 m, with 12 ASPDs aligned. In this configuration the last sensor in the line was capable to detect displacements with a resolution in the order of 100 μm.

Moreover, the ASPDs have been studied under irradiation, without any significant change in their properties. Concerning aging it has been calculated that a punctual light will cause a loss of transmission below 3 % at the end of the CMS operation.

In the same direction, a study of the photo-response behaviour of a set of four ASPDs units along 2800 hours of continuous illumination with diffuse white light showed that both direct and inverse Staebler-Wronski effects (SWE) appeared, producing up to a 20% degradation in transmission during the direct SWE, partially recovered by the inverse SWE.

To monitor rotations three different types of electrolytic tilt sensors are used in the LINK Alignment System: the uniaxial M756-1172, the biaxial M756-1150, and the biaxial 900-H all of them from the firm Applied Geomechanics Inc. The sensors have been calibrated in the range of ± 35 mrad, limits larger than the expected rotations of elements in CMS. The measured precision for the sensors M756-1172 units range between 10.6 μrad and 45.5 μrad, for the M756-1150 the range was 12.2 μrad and 41.5 μrad and for the 900-H units the found precision ranged between 15 μrad and 91 μrad.

We have, in addition, studied the effects induced by the expected changes of temperature and the absorbed irradiation doses and conclude that will be negligible. With respect to the studies in magnetic field, it was found that, when the gradient of the field between the two poles of the tilt sensor is smaller than 2 mT, there is no appreciable change in the output voltage if the magnetic field lines are perpendicular to the largest sensor dimension. Otherwise there will be a correlation that will depend on the specific to configuration. In CMS we have taken care that the inclinometers carrying out the measure the angle φ of the monitored elements are not affected by the field. This is not the case for the measurement of tilts in θ in the region of the Tracker. Fortunately, this information that is not relevant for the geometrical software reconstruction of the detector.

Concerning the measurement of distances between CMS mechanical elements two types of distancemeters have been used: the non-contact (optical) OMRON Z4M-W100 of the firm 'OMRON Corporation' and the

potentiometers 18FLPA50, from Sakae, and the SLS095-10 from Penny & Giles. All of them have been subject of a series of studies and, as a result, it was concluded that the OMRON Z4M-W100 have measurement accuracy between 30 μm and 40 μm, calibrated with a resolution of 22 μm. The main source of uncertainty comes from the angular positioning of the target on which the sensor is focused: variations of ± 10º could result in deviations of about 200 μm. Tested for irradiation effects, the sensors were submitted up to 4 Gy with gammas and 10^{11} neutrons/cm^2, and there was not a noticeable change in the linearity of the distancemeters. With respect to the magnetic field, tested to the values that would correspond to their location on CMS (0.75 T, with field gradients <0,024 T/cm) they show no variation in the output voltage signal. The potentiometers were calibrated and showed a precision of 30 μm to 40 μm, with a resolution below 10 μm. Furthermore, they show to be insensitive to the temperature, radiation or magnetic effects expected in CMS.

The so-called opto-mechanical assemblies are formed by a combination of mechanical, optical and detecting devices, in the same element, named: Laser Box (LB), Detector Box (DB), Transfer Plate (TP), Laser Level (LL), Alignment Ring (AR) and LINK Disc (LD). All of them have been developed on the basis of the LINK system requirements and have been adjusted, calibrated and studied, using complex optical benches in the metrology laboratory of the IFCA and at CERN in the area known as the "I4 ISR Hall'. The calibration bench for the LINK System at CERN consisted of a network of geodetic 'points' referred to the centre of Taylor-Hobson spheres (THS), placed with a relative accuracy of 70 μm, a stability of 100 μm in two years. The whole complex occupies an area of about 20 ×10 m^2. Each of the THS points is instrumented with 'ASPDs' sensors which have been specially designed for this purpose.

It can be noted as most relevant facts, made with these calibration devices that:

The laser beams of the AR have been adjusted with precision <300 μm with respect to the nominal, also relying on the support of theodolite and digital photogrammetry. Through the use of the COCOA geometric reconstruction program, using the calibration data and the geometry of the AR and its components, it was able to obtain the relative and absolute position of the x-rays and its difference with the nominal values, obtaining a precision in the translations (origin of the beam) of the order of 112 μm (RMS ~12 μm) and rotations (propagation direction of the beam) of ~84 μm (RMS ~44 μm).

The TPs have been calibrated with an accuracy of 30 μm, using digital photogrammetry. The different components of the TPs have been referenced internally with the help of CMMs (Coordinate Measuring Machines) of vision and contact having precisions of <10 μm.

The LD device is a structure of a sandwich of carbon fibre made by moulding in warm, with a few mechanized inserts after bonding that provide positioning accuracy in the placement of the LBs below 20 μm. The median accuracy in the determination of the parameters by COCOA was ~115 μm for the primary and secondary rays, while the accuracy in the determination of the angles of the reflected beam in the beam splitter has

been of 85 μrad (RMS 43 μrad). This device is the most important of the LINK System and during its design phase was subject to a complete study by FEM simulation, to optimize its stability respect to the deformation caused by gravity and temperature. The limit has been set at 50 μm with a gradient of 6 ºC, under the own weight and the one from its components.

The support of the Large Scale Metrology section (IN/MEF-ITS) of CERN, has been essential in the calibration of the devices opto-mechanical, as well as in the acquisition of the starting parameters of the different components of the LINK system once installed on the CMS detector, which are the initial input positions supplied to COCOA, to perform the geometric reconstruction of the positions of the components in CMS at any time. The precisions provided by the section of metrology of CERN during the different measurements were: ~300 μm with the theodolite; 30-100 μm using digital photogrammetry in the ISR; while with the Laser Tracker were ±30 μm in accuracy in the relative positions and ±500 μm in the absolute, for those measures realized on components already installed in CMS.

Let us point out that a fundamental aspect of the present document has been the study of the adhesives used for the alignment LINK Alignment System. To work correctly and to not introduce distortions, the system requires that its components are dimensionally stable in the conditions of operation and for that the adhesive joints that fix the different components on the alignment of structures must be stable and maintaining their resistive properties within a boundary conditions. To do this we have carried out several studies allowing to extract the following conclusions:

-It has been developed a study allowing to check the stability of the connections of optical glass bonded with optical adhesives, as well as their optical properties (Transmittance (T) and Reflectance (R)) as a function of the wavelength and the radiation received; to ensure that the reference laser beams, that the LINK alignment system of CMS projected within the detector, will not distort or degrade over time, due to the effects that the radiation can cause on the glass, anti-reflective coatings (ARC) or reflective coatings, or on the adhesive. It was concluded that from the different optical glasses tested, only the optical grade fused silica (Synthetic Quartz) and the BK7-G18 triple treatment with anti-reflective standard coating, do not suffer loss of T and R after a 100 KGy irradiation with γ. In addition the BK7-G18 has been irradiated to those levels with two types of reflective coating (silver and aluminium), resulting in a loss of ~ 6% with aluminium, while none with silver.

It has been studied the stability of the union as a function of the dose received by the realization of a dimensional control (using a MMC) on samples of glass glued together with optical adhesives. For irradiations of up to 100 KGy, the tests carried out on BK7, bonding with LOCTITE 350 gave angular variations of 46 μrad on average, whereas those using EPOTECNY NOA61 showed ~56 μrad. These samples were back to radiate with an additional 100 KGy, noting that the LOCTITE did not change, while that of EPOTECNY change by another 30 μrad. Although the observed values are of the same order than the measurement error, the fact

that the BK7 is again completely black did not enable it to exclude any deformation.

To improve the results of the study and to discern the error, it was performed a measurement with the two glasses that had passed the tests of radiation (Synthetic Quartz and BK7-G18), using as adhesives LOCTITE 350, EPOTECNY NOA61, MELTMOUNT and a technique of molecular adhesion in vacuum. To perform this research we used a 'gonio-spectrometer VIS'. The result of the test was that with a dose of 150 KGy, the BK7-G18, glued with NOA61, LOCTITE and molecular adhesion showed no angular changes, with a standard deviation in the measurements of 2.5 μrad. On the other hand, using the MELMOUNT adhesive we have observed a rotation of 35 μrad after the first 50 KGy dose. Using the Synthetic quartz we have appreciated small changes compatible with the uncertainties of measurement, except in the case of the adhesive NOA61, where changes of 19 μrad were observed during the first 50 KGy received. In the case of the molecular adhesion a sample get dissembled during the handling and was discarded. Finally, it has been studied the transmission (T) under the effect of γ and neutron irradiation in function of the wavelength: in all cases the T remains above 90 %, with a variation of 1% on their properties in doses of 150 KGy, while there is a variation of less than 2 % in the T, in the wavelength range of 500 to 800 nm, in the case of the combined irradiation of 15 Mrad with γ and a total neutron fluence of $5 \times 10^{14} \pm 37\%$ cm^{-2}.

On the basis of the above studies the Synthetic quartz bonding with the adhesive EPTECNY NOA61 and a wavelength diode laser light of 681 nm were selected for the LINK alignment system of CMS.

-In fact, the central section of the thesis has been the focused on the study of the structural adhesive used for fixing the different components of the LINK system on the structures where they are attached, as well as for the sealing of the devices that are likely to come deteriorated by any type of solicitation. The Araldit 2011 has been selected as the adhesive because good for a broad spectrum of materials, cured at room temperature, with very high mechanical properties and good resistance to hits and stability respect to the radiation.

As a general rule and in the case of aluminium components, which are the majority of those who have been fix through adhesive, has been used a surface treatment prior to improve adherence. When components are next to optical elements and beam paths, the selected treatment has been a black hard anodised, in the rest of the cases has been used an etching treatment with sulphuric acid and potassium dichromate.

For surface treatment two combinations of acid etching have been used, noting a significant increase in the resistance to impact (~ 20 %), the applied force at the time of the break (~ 6 %) and of its failure strain (~ 29 %), in the non-irradiated specimens, with the most aggressive treatment. This treatment has generated an average values of roughness measures on the two axis of the surface of the specimens, of R_a (μm) from 0.6 to 0.9,

R_{SM} (μm) from 60 to 100 and values of R_{SK} of up to -2.50. With the level of aggression led to the surfaces of the pieces used, there is an increase correlated with the aggression for the parameters R_a, R_q, R_z, R_{max}, R_t and the ratio R_v/R_p like there has been an increase of the absolute value of R_{SK} and R_{ku}. These values indicate that with the aggression increases the number of peaks of the surface and your height, as well as a slight displacement and widening of the distribution curve of amplitude (CDA). This implies an increase in surface area that can be used by the adhesive to make the adhesion by the mechanisms of mechanical interlocking and absorption which are the principal use of adhesives on metallic adherent.

For the purpose of this study have been prepared 2 types of specimens P_I (with a glued surface of 15 ×15 mm^2) and P_{II} (glued with a surface of 45 ×15 mm^2), these have been glued with the adhesive Araldit 2011, depositing a layer of adhesive thickness of 0.05 to 0.1 mm. To perform the irradiation with γ of the more uniformly and quickly possible in the Náyade installation of the CIEMAT, has developed a process that allows you to achieve an average dose rate on the adhesive of the specimens of 2.2 KGy/h, with a maximum uniformity of 7% between the position of the pieces inside the irradiation device. They have been irradiated groups of pieces to levels of 10, 50, 100, 263, 303, 2020 and 2071 KGy, using, for the higher levels, 39 days to reach the required dose on the specimens test. Between 50 and 100 KGy is already appreciated a colour change on the adhesive.

For the study of dimensional stability have been evaluated two parameters: the angle formed between two sides of the two parts that make up the specimens and the distance between sides, using the pieces of the impact test (P_{II}) and the specimens specially designed to optimize this study (P_I). Getting to the test pieces P_I, we can see a tendency to a slight reduction in the average thickness of the layer of adhesive of ~ 1 μm, as well as a small variation in the angle of approximately 20 μrad with an average dose on the adhesive of ~252 KGy. In the specimens P_{II}, irradiated up to 303 KGy, is not clear the same trend, even it is compatible with these results, and are even compatible with absence of movements. These specimens have been subjected to a process of wetting to 26 ºC and 90% RH to check the changes that may cause the moisture on the adhesive, noting in the P_I an expansion of ~1 to 2 μm in the adhesive joint that is compatible with the observed in the P_{II}, not appreciating differences between the test specimens irradiated and unirradiated. The P_I, have been subjected to a subsequent process of irradiation with a dose of 1938 KGy, noting a reduction in thickness of 2 μm, which is corroborated by the results of the test pieces of reference, that have not been subjected to this process of irradiation, which have not changed. Finally, it has been carried out a temporary study with the tests carried out on the specimens test over a period of about 5 months so that evaluate the stability of the union with the combination of environmental changes in humidity, temperature, and radiation levels, noting a change in average thickness of 1 μm and angle of 35 μrad, which could be considered the limit of the stability of the adhesive joints used by the LINK system at CMS, but these values are also compatible with the

absence of movements, since they are within the uncertainty of the measurement being made. If they are real, that change in thickness will not induce degradation in the measure, since it is below the resolution of the system and the angular variation is within the measurement resolution of the system.

The study of resistance to impacts has been carried out through two complementary testing campaigns, using the test pieces P_{II} (with a surface treatment 'soft') and the P_{II}' (with a 'more aggressive treatment'):

In the first campaign the specimens P_{II} have been tested with a machine INSTRON Impact II, which has an instrumented Charpy pendulum of 5J, using a tool developed to test these samples following as far as possible the standard UNE-EN ISO 9653 (Izod test for adhesives), equivalent to the ASTM D950. One should notice that there was no apparent significant change in the un-instrumented energy required to break a specimen, up to a dose level of 303 KGy, nor in the deformation produced at the time of the break; you can even be considered a slight trend of increase of these values with the level of radiation received. We have found a linear correlation between the % of adhesive that remains glued in the piece 'base' of the specimen test and the failure strain.

During the second round of testing, it has been used a pendulum of 50 J, which has a load cell with a load limit several times greater than the previous round. In this campaign the units P_{II} and P_{II}' were tested so as to be able to compare the results of both test campaigns and compare between the surface treatments applied on both specimen pieces. During the tests it has been observed a standard deviation twice the observed with the pendulum of 5J in the valuation of un-instrumented energy, that could be due to the systematic errors that are introduced by this new setup; similarly we have observed higher systematic errors in the evaluation of the failure strain with the pendulum 50 J. It was also shown a slight increase in the value of the energy and the failure strain of the P_{II} in relation to the results of the first campaign. There is also an increase in the value of the energy and the failure strain of the P_{II}', with respect to the results of the specimen test P_{II} in the first and second campaign tests, that would be related to the improvement of the adhesive properties of the substrate in the pieces P_{II}'.

For this reason, the values obtained here can only be compared to other tests that are carried out under the same conditions. So, the values in this study can only be used to study the relative degradation that occurs on the adhesive joint with the dose applied to the probes.

The final results of the second campaign of testing do not show any significant change in the energy absorbed to break the probes P_{II} and P_{II}', up to a dose of 303 KGy; nor relevant deformation or forces changes are apparent at the time of the break. However, there is a degradation of the properties of resistance to impact when arriving to the 2071 KGys, in the P_{II}', with a reduction in resistance to impact significant: the energy to break the specimen test is reduced by 14 %, the

force in breaking drops more than 20 % and the failure strain decreases a 24 %, compared to the values without irradiation.

From these results, it can be concluded that degradation is not appreciated in the resistive properties assessed in the adhesive union, up to the maximum levels expected during the years of operation of CMS (300 KGy). Moreover, these properties will stay up to 2000 KGy, thus ensuring a proper operation beyond the end of the expected CMS's life.

In the last part of the document it is offered a study of the operation of the LINK Alignment System in real conditions of operation for the years 2008 to 2013, through the data monitored by the system:

In this study we have validated the results of the 3D reconstruction obtained during testing of the magnet, compared to the topographic measurements and photogrammetric surveys. In this period, during the rise of the magnetic field up to 4 T is observed a maximum displacement of 13.69 mm of the wheel YE+1 towards the centre of CMS, and a displacement, in Z as well, of the CSCs located on the ME1/2 of the order of 1 to 4 mm, with, in addition, a rotation of up to 4.3 mrad. These results are in agreement with those obtained by the ENDCAP alignment sub-system.

The mechanical stability of the CMS detector has been also investigated along almost six years. It was found that the motions of the detector structures during the rising of the current in the coils, due to the magnetic forces, stop after 13.5±0.5 hours of operation at the 3.8 T working field. As from that moment, the monitored motions among the CMS mechanical structures do not exceed the measurement resolutions of the different sensors of the LINK System.

All along the data taking periods the Link Alignment System has monitored a number of variables to study its temporal stability, observing, after the stabilization period, only variations over the resolution of the system in one of the variables (variable ' Z distance' of the AR respect to the LD). These variations correlate perfectly with the thermal variations observed in the η=3 region. The reason for the temperature variation is that for a correct operation the Tracker should operate at about -20ºC, it was found that the temperature changes induces a series of heat flows in this region, that motivate dimensional variations on the longitudinal profile that relates the LD and the AR (of ~200 μm). It is concluded therefore that the observed variations are not real movements of the monitored structures.

These results insure that the CMS Experiment has remained stable during the time periods in which the magnetic field was in stable regime of operation, which has made possible to the muon spectrometer (Chambers and Tracker) to work in excellent operation conditions and in consequence has been able to make a good reconstruction of the muons tracks.

8.1. Future research lines.

The studies carried out during the development of this thesis might suggest some lines for future development:

The study of the real aging that has been produced on the different detector devices of the system, once the LINK alignment system will be dismantled, to corroborate the previous studies and readjust the systematic errors of the components due to the real aging.

The study of the degradation of the structural joint with Araldit 2011, by studying its dimensional stability and resistance to impact, respect to the neutron doses. According to the bibliography the main type of chemical bond of a polymer is the covalent bond, which is very sensitive to ionizing radiation, as is the case for radiation γ, by which a priori has been considered that the adhesive in question is going to be stable against the irradiation with neutrons, since the data obtained in front of γ are good; in addition, at CERN , tests have been carried out in which it is shown that the variation of its shear resistance respect to neutrons is not significant, with dose 100 times higher than the expected by the components of the LINK located in the more internal region of CMS.

Investigate the influence of the misalignment of the pendulum on the impact side, in the results obtained, correlating these results with finite element simulations and analytical studies. This will allow refining the systematic errors of the test and studying the influence of the radiation on the results.

Analyse the influence of the adhesive thickness in the structural stability and the impact resistance of the adhesive joint. Correlating these results with simulations of finite elements analysis and studying the influence of the radiation.

Study the influence of the adhesive fillet on the union edge between the two pieces of the impact specimen respect to his impact resistance. Correlating these results with finite element simulations and analytical studies and relate it to the dose of radiation that the specimens test have received.

An in-depth study of the adhesive joint impact resistance, depending on the surface treatment of the adherent and the radiation dose received. As well as research on the relationship that has the pre-treatment of the substrate with the section of adhesive that remains attached on the surface of the piece ‘base’ of the specimen, the failure strain of the impact specimen, and the radiation received by the joint.

Referencias.

[1] Ministerio de Economía y Competitividad.
www.mineco.es

[2] Laboratorio Europeo de Física de Partículas (CERN).
www.cern.ch

[3] The tevatron.
http://www.fnal.gov/pub/tevatron/

[4] The CDF Detector:An Overview, Nuclear Instruments and Methods in Physic Research A271 (1988) 387-403.

[5] The DZero Detector.
Methods in Physic Research A338, 185 (1994).

[6] LHC, Conceptual Design, CERN/AC/95-05.

[7] ALICE, Technical Proposal, CERN/LHCC/95–71.

[8] ATLAS, Technical Proposal, CERN/LHCC/94-43.

[9] CMS, Technical Proposal, CERN/LHCC/94-38.

[10] LHCb, Technical Proposal, CERN/LHCC/98-4.

[11] The Linear Collider Collaboration.
www.linearcollider.org

[12] THE INTERNATIONAL LINEAR COLLIDER, Technical Design Report | Volume 1: Executive Summary, June 2013.

[13] A MULTI-TEV LINEAR COLLIDER BASED ON CLIC TECHNOLOGY, CLIC CONCEPTUAL DESIGN REPORT, CERN-2012-007.

[14] Future Circular Collider.
http://tlep.web.cern.ch/

[15] Página web oficial de los premios NOBEL.
www.nobelprize.org

[16] CMS, Tracker Technical Design Report, CERN/LHCC/98-6.

[17] CMS, The Muon Project Technical Design Report, CERN/LHCC/97-32.

[18] M.J. Price, Alignment of experiments. CERN Accelerator School: Measurement and Alignment of Accelerators and Detector

Magnets. April 1997, CERN 98-05.

[19] LHCf. http://home.web.cern.ch/about/experiments/lhcf

[20] L. Evans and P. Bryant, LHC Machine, 2008 JINST 3 S08001.

[21] The ALICE Collaboration, The ALICE experiment at the CERN LHC, 2008 JINST 3 S08002.

[22] The ATLAS Collaboration, The ATLAS experiment at the CERN LHC, 2008 JINST 3 S08003.

[23] The CMS Collaboration, The CMS experiment at the CERN LHC, 2008 JINST 3 S08004

[24] The LHCb Collaboration, The LHCb Detector at the LHC, 2008 JINST 3 S08005.

[25] The TOTEM Collaboration, The TOTEM Experiment at the CERN Large Hadron Collider, 2008 JINST 3 S08007.

[26] The LHCf Collaboration, The LHCf detector at the CERN Large Hadron Collider, 2008 JINST 3 S08006.

[27] CMS, Addendum to the CMS Tracker TDR, CERN/LHCC 2000-016.

[28] J. P. Ernenwein, Overview of the CMS electromagnetic calorimeter, CMS CR 1999/006, February 1999.

[29] FERMILAB. http://www.fnal.gov/

[30] Premio NOBEL 2013. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2013/

[31] TOTEM. http://home.web.cern.ch/about/experiments/totem

[32] J. Bensinger y T. Rodrigo, Alignment systems in LHC general purpose detectors, NIMA V666, pag 173-196, February 2012 http://www.sciencedirect.com/science/journal/01689002/666.

[33] Compilation of radiation damage test data : cable insulating materials, CERN-79-04.

[34] Compilation of radiation damage test data : thermosetting and thermoplastic resins, CERN-1979-008.

[35] Compilation of radiation damage test data : materials used

around high-energy accelerators, CERN-1982-010.

[36] Compilation of radiation damage test data, Pt.3: Ageing of organic materials in ionizing radiation environments of high energy particle accelerators, CERN-TIS-CFM-89-11.

[37] Compilation of radiation damage test data, Pt.1, 2nd edition.: Halogen-free cable-insulating materials, CERN-1989-012.

[38] Radiation-damage studies, irradiations and high-dose dosimetry for LHC detectors, CERN-DRDC-91-06.

[39] Compilation of radiation damage test data, pt.2: Thermoset and thermoplastic resins, composite materials, CERN-1998-001.

[40] Compilation of radiation damage test data, Pt.4: Adhesives, CERN-2001-006.

[41] Action des radiations sur les résines époxydes, CERN-1970-010.

[42] CMS, The Electromagnectic Calorimeter Technical Design Report, CERN/LHCC/97–33.

[43] CMS, The Hadron Calorimeter Technical Design Report, CERN/LHCC/97-31.

[44] V. Hagopian, "The Compact Muon Solenoid (CMS) Hadron Calorimeter", CMS CR 1999/001, January 1999.

[45] P. De Barbaro, "Design and Construction of CMS Central Hadron Calorimeter", CMS CR 2000/015, November 2000.

[46] Sección de Large Scale Metrology (EN/MEF-SU) del CERN. https://espace.cern.ch/SU/default.aspx

[47] CMS, The Magnet Project, Technical Design Report, CERN/LHCC/97–10.

[48] CMS, A Review of the Magnetic Forces in the CMS Magnet Yoke, CMS NOTE 1998/048.

[49] V. I. Klyukhin, et all, Measurement of the CMS Magnetic Field, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 18, NO. 2, JUNE 2008.

[50] V. I. Klyukhin, et all, The CMS Magnetic Field Map Performance, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 20, NO. 3, JUNE 2010.

[51] CMS, Precise mapping of the magnetic field in the CMS

barrel yoke using cosmic rays, JINST 5 T03021, 2010.

[52] V. I. Klyukhin, et all, Validation of the CMS Magnetic Field Map, J Supercond. Nov. Magn. (2015) 28:701–704.

[53] CMS Survey Documents, EDMS: Proj. Id: CMS-0000008380 v.0.
https://edms5.cern.ch/nav/P:CMS-0000000001:V0/P:CMS-0000008380:V0/TAB3

[54] FLUKA.
http://www.fluka.org

[55] F. Faccio, COTS for the LHC radiation environment: the rules of the game, CERN 2000-010, CERN/LHCC/2000-041.

[56] M. Huhtinen, “Displacement damage – what is it”, CMS COTS Workshop: 16-17 Nov. 1999.
http://cmsdoc.cern.ch/~huu/tut2.pdf

[57] Angela Vasilescu, Notes on the fluence normalisation based on the NIEL scaling Hypothesis, ROSE/TN/2000–02.

[58] C. Burgos, An alignment system for the CMS. CMS TN/94-198.

[59] F. Matorras, T. Rodrigo, Measurement of muon P_T in CMS and alignment errors in the barrel region. CMS TN/94-210.

[60] F. Matorras, T. Rodrigo, I. Vila, Influence of intrinsic and alignment errors of MS on muon P_T measurement. CMS-TN/1994-249.

[61] F. Matorras, A. Meneguzzo, Requirements on the alignment errors of MS based on muon P_T resolutions. CMS TN/95-069.

[62] F. Matorras et al., Offine muon station alignment using the inclusive μ LHC production. CMS Internal Note, CMS TN/96-005.

[63] B. Wittmer et all, The laser alignment system for the CMS silicon microstrip tracker, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 581 (2007) 351–355.

[64] B. Caponeri, The alignment of the CMS Silicon Tracker, CMS CR -2010/077.

[65] E.Aguiló, The Alignment of the CMS Silicon Tracker, Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) 215 (2011) 104–106.

[66] G. Székely, Muon Barrel Alignment system based on a net

of PC/104 board computers, 9th Workshop on Electronics for LHC Experiments, Amsterdam 2003.

[67] C. Carneiro, R. Goudard and C. Humbertclaude, CMS MAB prototype, Deformation test. CMS-MA-UR-0001.

[68] T. Gleisberg, Gy. L. Bencze, Z. Szillási, A Method to process multiple images for the CMS muon barrel position monitoring system, CMS IN 2000/057.

[69] CMS – MAB: Calibration Bench LTD measurement, (EDMS id: 822462) CMS-MA-UR-0078.

[70] CMS - ISR - Muon Barrel: Chamber Calibration bench, EDMS id: 583717, April 2005.

[71] Manual Muon Chamber Calibration, (EDMS id: 394559) CMS-M-UR-0002.

[72] Design and Performance of the Alignment System for the CMS Muon Endcaps, CMS CR-2008/016.

[73] CMS Muon YE1 EDR-08, Diciembre de 2002. https://indico.cern.ch/event/a022064/

[74] M. Sobrón and P. Martinez. CMS muon alignment: System description and first results. NIMA 598 (2009) 187-191.

[75] CMS Muon Alignment EDR-3, Noviembre de 2000. http://cmsdoc.cern.ch/cms/MUON/alignment/edr_doc/edr2000/

[76] CMS Muon Alignment EDR-06, Febrero de 2002. http://cmsdoc.cern.ch/cms/MUON/alignment/edr_doc/edr2002/

[77] MEASUREMENT OF THE TEC+ IN VERTICAL AND HORIZONTAL POSITION, (EDMS id:616538) CMS–TEC+ – TRACKER.

[78] MEASUREMENT OF THE TEC+ AFTER TRANSPORT IN VERTICAL AND HORIZONTAL POSITION INCLUDING ENVELOPE, (EDMS id:798312) CMS – TRACKER – TEC+.

[79] MEASUREMENT OF THE TEC+ BEFORE INSERTION IN HORIZONTAL POSITION, INCLUDING ENVELOPE, (EDMS id: 822256) CMS-TK-UR-0021.

[80] MEASUREMENTOF THE TEC- IN VERTICAL ANDHORIZONTAL POSITION, (EDMS id:655690) CMS – TEC- – TRACKER.

[81] MEASUREMENT OF THE TEC- IN VERTICAL AND

HORIZONTAL POSITION, (EDMS id:808001) CMS–TEC- – TRACKER.

[82] MEASUREMENT OF TEC- BEFORE INSERTION, (EDMS id: 830101) CMS-TK-UR-0026.

[83] CENTRAL TRACKER POSITION, (EDMS id: 996489) CMS-TK-UR-0058 version3.

[84] CMS - ISR: Linkbench Calibration LTD measurement (EDMS id: 583131) CMS – ISR –Linkbench Calibration LTD Measurement. (April 2005).

[85] CMS - ISR: Linkbench Calibration LTD measurement, (EDMS id: 782781) CMS – ISR –Linkbench Calibration LTD Measurement. (Oct. 2006).

[86] CMS - ISR Linkbench: Calibration of Alignment Ring Photogrammetric measurements, (EDMS id: 584852) CMS-DIALA-UR-0009 v.1 (April/May 2005).

[87] CMS - ISR Linkbench: Calibration of Link Disc+ Photogrammetric measurement, (EDMS id: 606756) CMS – ISR Linkbench: Calibration of Link Disc Photogrammetric Measurement (June 2005).

[88] CMS – LINK DISK POSITIONING OF THE LINK DISK PHOTOGRAMMETRIC MEASUREMENTS, (EDMS id: 608797) CMS –Link Disk (July 2005).

[89] CMS – LINK DISK POSITIONING OF THE LINK DISK SECOND PHOTOGRAMMETRIC MEASUREMENT, (EDMS id: 626898) CMS –Link Disk (August 2005).

[90] CMS - ISR Linkbench: Photogrammetric measurements of Alignment Ring October 2005: Connection of the 2 faces, (EDMS id: 676062) CMS – ISR Linkbench: Calibration of Alignment Ring Photogrammetric Measurement (October 2005).

[91] CMS - ISR Linkbench: Positioning of the Alignment Ring in Central Position Theodolite Measurement, (EDMS id: 677049) CMS – ISR Linkbench: Positioning of the Alignment Ring (Oct. 2005).

[92] CMS - ISR Linkbench: Positioning of AR+ and LD+ in vertical position, Photogrammetric measurement, (EDMS id: 683668) CMS – ISR Linkbench: Positioning of AR+ and LD+ in vertical position (Nov. 2005).

[93] CMS – LINKBENCH POSITIONING OF THE AR+ AND THE LD+ IN VERTICAL POSITION PHOTOGRAMMETRIC

MEASUREMENT, (EDMS id: 691849) CMS – ISR Linkbench Positioning of AR+ and LD+ in vertical position (Dec. 2005).

[94] CMS – LIINKBENCH POSIITIIONIING OF THE AR+ AND THE LD+ IIN VERTIICAL POSIITIION PHOTOGRAMMETRIIC MEASUREMENT, (EDMS id: 702893 version 2) CMS – ISR Link bench Positioning of AR+ and LD+ in vertical position (February 2006).

[95] CMS – Alignment – LD Position of the Link Disk w.r.t. the YE+1 - First Measurement –, (EDMS id: 721531 v.1) CMS-MA-UR-0050 (April 2006).

[96] CMS – ALIGNMENT – AR POSITION OF THE ALIGNMENT RING W.R.T THE YE+1 - First Measurement -, (EDMS: 721802) CMS-MA-UR-0051 (April 2006).

[97] CMS – TRACKER – ALIGNMENT POSITION OF THE ALIGNMENT RING AND THE TRACKER WITH RESPECT TO YB0, (EDMS id: 765516) CMS-MA-UR-0060 (July 2006).

[98] CMS – ALIGNMENT – AR Position of the Alignment Ring in the LinkBench System, (EDMS id: 785666) CMS-MA-UR-0062 (Oct. 2006).

[99] CMS – ALIGNMENT – AR PHOTOGRAMMETRY OF THE ALIGNMENT RING, (EDMS id: 789408) CMS-MA-UR-0063 (Oct. 2006).

[100] CMS – ALIGNMENT – AR+1 PHOTOGRAMMETRY OF THE ALIGNMENT RING, (EDMS id: 807472) CMS-MA-UR-0064 Dec. 2006).

[101] CMS – ALIGNMENT – LD+1 PHOTOGRAMMETRY OF THE LINK DISK, (EDMS: 810087) CMS-MA-UR-0065 (Dec. 2006).

[102] CMS – ALIGNMENT – AR+1 PHOTOGRAMMETRY OF THE ALIGNMENT RING, (EDMS : 811746) CMS-MA-UR-0066 (Jan. 2007).

[103] CMS – ALIGNMENT – LD+1 PHOTOGRAMMETRY OF THE LINK DISK, (EDMS: 811768) CMS-MA-UR-0067 (Jan. 2007).

[104] CMS – ALIGNMENT – AR+1 PHOTOGRAMMETRY OF THE ALIGNMENT RING, (EDMS : 812311) CMS-MA-UR-0068 (Jan. 2007).

[105] CMS – ALIGNMENT – LD+1 PHOTOGRAMMETRY OF THE LINK DISK, (EDMS: 812319) CMS-MA-UR-0069 (Jan. 2007).

[106] CMS – ALIGNMENT – AR+1 PHOTOGRAMMETRY OF THE

ALIGNMENT RING, (EDMS : 812522) CMS-MA-UR-0070 (Jan. 2007).

[107] CMS – ALIGNMENT – LD+1 PHOTOGRAMMETRY OF THE LINK DISK, (EDMS: 812525) CMS-MA-UR-0071 (Jan. 2007).

[108] CMS – ALIGNMENT – AR+ and LD+ PHOTOGRAMMETRY OF THE ALIGNMENT RING AND OF THE LINK DISK, (EDMS: 813636) CMS-MA-UR-0072 (Jan. 2007).

[109] CMS – ALIGNMENT Position of the LD+ and AR+ w.r.t. the YE+1, (EDMS : 816920) CMS-MA-UR-0073 (Jan. 2007).

[110] CMS – ALIGNMENT Position of the LD+ w.r.t. the YE+1, (EDMS : 819270) CMS-MA-UR-0074 (Feb. 2007).

[111] CMS – ALIGNMENT Calibration of the 3 Longitudinal Profiles (Side +), (EDMS: 819475) CMS-MA-UR-0076 (Jan. 2007).

[112] CMS – ALIGNMENT Calibration of the 3 Longitudinal Profiles (Side -), (EDMS: 840700) CMS-MA-UR-0092 (May 2007).

[113] CMS – ALIGNMENT CALIBRATION OF THE 6 TRANSFER PLATES, (EDMS: 819319) CMS-MA-UR-0075 (Jan. 2007).

[114] CMS – ALIGNMENT CALIBRATION OF SIX TRANSFER PLATES TP-, (EDMS: 841924) CMS-TK-UR-0093 (April 2007).

[115] CMS – LINK ALIGNMENT SYSTEM MEASUREMENT OF THE RADIAL PROFILES, (EDMS: 699375).

[116] CMS – ALIGNMENT – LD- PHOTOGRAMMETRY OF THE LINK DISK, (EDMS: 821185) CMS-MA-UR-0077 (Feb. 2007).

[117] CMS – ALIGNMENT – LD- PHOTOGRAMMETRY OF THE LINK DISK, (EDMS: 823418) CMS-MA-UR-0081 (Feb. 2007).

[118] CMS – ALIGNMENT – LD- PHOTOGRAMMETRY OF THE LINK DISK, (EDMS: 828037) CMS-MA-UR-0082 (Mar. 2007).

[119] CMS – ALIGNMENT – AR- PHOTOGRAMMETRY OF THE ALIGNMENT RING, (EDMS : 832246) CMS-MA-UR-0083 (Mar. 2007).

[120] CMS – ALIGNMENT – LD- PHOTOGRAMMETRY OF THE LINK DISK, (EDMS: 832247) CMS-MA-UR-0084 (Mar. 2007).

[121] CMS – ALIGNMENT – AR- PHOTOGRAMMETRY OF THE ALIGNMENT RING, (EDMS : 833342) CMS-MA-UR-0085 (April 2007).

[122] CMS – ALIGNMENT – LD- PHOTOGRAMMETRY OF THE LINK

DISK, (EDMS: 834901) CMS-MA-UR-0087 (April 2007).

[123] CMS – ALIGNMENT – LD- PHOTOGRAMMETRY OF THE LINK DISK, (EDMS: 836855) CMS-MA-UR-0088 (April 2007).

[124] CMS – ALIGNMENT MEASUREMENT OF BOTH AR- AND LD-, (EDMS: 839411) CMS-MA-UR-0089 (April 2007).

[125] CMS – ALIGNMENT MEASUREMENT OF LD- IN HORIZONTAL POSITION, (EDMS: 840309) CMS-MA-UR-0091 (April 2007).

[126] CMS – ALIGNMENT – AR- PHOTOGRAMMETRY OF THE ALIGNMENT RING, (EDMS : 845398) CMS-MA-UR-0094 (May 2007).

[127] CMS – YE-1 – ALIGNMENT MEASUREMENT OF THE LD AND AR ON YE-1, (EDMS : 849637) CMS-SG-UR-0098 (Jun. 2007).

[128] CMS – ALIGNMENT – AR+ PHOTOGRAMMETRY OF THE ALIGNMENT RING – AR +, (EDMS: 890078) CMS-MA-UR-0101 (Jan. 2008).

[129] CMS – ALIGNMENT – ARPHOTOGRAMMETRY OF THE ALIGNMENT RING AR minus, (EDMS: 884997) CMS-MA-UR-0100 (Dec. 2007).

[130] CMS – TK / ARPOSITION OF THE ALIGNMENT RING Z- TRACKER ADDITIONAL REFERENCE POINTS, (EDMS: 907261) CMS-MA-UR-0102 (April 2008).

[131] CMS – TK / AR+ POSITION OF THE ALIGNMENT RING Z+ TRACKER ADDITIONAL REFERENCE POINTS, (EDMS: 916553) CMS-MA-UR-0103 (May 2008).

[132] CMS – TK / AR+ POSITION OF THE ALIGNMENT RING Z+, (EDMS: 996394) CMS-MA-UR-0106 (April 2009).

[133] CMS – TK / AR- POSITION OF THE ALIGNMENT RING Z-, (EDMS: 996402) CMS-MA-UR-0107 (April 2009).

[134] CMS – TK / ARPOSITION OF THE ALIGNMENT RING Z-, (EDMS: 997335) CMS-MA-UR-0108 (April 2009).

[135] CMS – YE+1 PHOTOGRAMMETRY OF THE YE+1 FACE Z- , ME+1 LAYER, (EDMS: 768246 VERSION 3) CMS-SG-UR-0058 (July 2006).

[136] CMS – YE-1 PHOTOGRAMMETRY OF THE YE-1 FACE Z+, ME-1 LAYER, (EDMS: 860315 VERSION 2) CMS-SG-UR-0083 (Jun. 2007).

[137] CMS – YE+1 PHOTOGRAMMETRY OF THE ME11 ALIGNMENT SYSTEM, (EDMS: 905917) CMS-SG-UR-0103 (Mar. 2008).

[138] CMS BARREL YOKE YB+2 (Z- Side and Z+ side) Muon chambers and MAB coordinates Geometrical check after descending in cavern. (EDMS: 817650) CMS-SG-UR-0074 version 3 (Feb. 2008).

[139] CMS BARREL YOKE YB-2 (Z- Side and Z+ side) Muon chambers and MAB coordinates Geometrical check after descending in cavern (EDMS: 926005) CMS-SG-UR-0109 version 2 (Jan. 2008).

[140] CMS BARREL YOKE YB+2 (Z- Side and Z+ side) Muon chambers and MAB coordinates, (EDMS: 1013327) CMS-SG-UR-0146 version2 (May 2009).

[141] CMS BARREL YOKE YB-2 (Z- Side and Z+ side) Muon chambers and MAB coordinates, (EDMS: 1013766) CMS-SG-UR-0148 version 2 (Jun. 2009).

[142] A. Molinero et all, Link Readout and Control System, CMS Muon Alignment EDR-06, Febrero de 2002. http://cmsdoc.cern.ch/cms/MUON/alignment/edr_doc/edr2002/

[143] Schäfter & Kirchhoff GMBH.
www.sukhamburg.com

[144] Nufern Inc.
http://www.nufern.com/

[145] Micro Laser Systems Inc.
www.microlaser.com

[146] M.G. Fernandez, **E. Calvo**, et all, Semitransparent amorphous silicon sensors for the CMS alignment: an in-depth study, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 440 (2000) 372-387.

[147] A. Calderón, **E. Calvo**, et all, Large-size high-performance transparent amorphous silicon sensors for laser beam position detection, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 565 (2006) 603–611.

[148] Institut für Physikalische Electronik, Universidad de Stuttgart, Alemania.
www.ipe.uni-stuttgart.de

[149] J. Berdugo, **E. Calvo**, et all, First test of tiltmeters for the

alignment system of CMS, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 431 (1999) 437-445.

[150] Applied Geomechanics Inc. (actualmente cerrada).
www.geomechanics.com

[151] OMRON Corporation.
www.omron.com

[152] Accuratus Ceramic Corporation.
www.accuratus.com

[153] Sakae Tsushin Kogyo Co., Ltd.
http://sakae-tsushin.co.jp/

[154] Penny & Giles Controls Limited (actualmente perteneciente a Curtiss-Wright Industrial Group).
www.pennyandgiles.com/

[155] MINCO Products, Inc.
www.minco.com

[156] Sentron AG.
www.sentron.ch

[157] ELMB Hardware Information.
http://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/DAQTRIG/DCS/ELMB/elmb.html

[158] Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (Ciemat).
www.ciemat.es

[159] National Instruments Corporation.
http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/1336

[160] CAEN S.p.A.
http://www.caen.it/csite/ProductList.jsp?parent=7&Type=Product

[161] PVSSII.
http://www.pvss.com

[162] ROOT.
https://root.cern.ch/

[163] P. Arce et A.L. Virto., CMS Object Oriented Code for Optical Alignment (COCOA), CERN-CMS-IN-2002-060, CMS IN-2002/060, Noviembre 2000.

[164] P. Arce, Object oriented software for simulation and reconstruction of big alignment systems, Nucl. Inst. and Meth. A 502 (2003) 696-698.

[165] TIERs.
http://home.web.cern.ch/about/computing/grid-system-tiers

[166] Huntsman Corporation, Araldit® 2011.
http://aralditeadhesives.com/

[167] A.Calderón, **E. Calvo**, et all, 'Effects of the gamma-ray irradiation on the optical absorption of pure silica core single-mode fibres in the visible and NIR range', Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 538 (2005) 810–813.

[168] A.Calderón, **E. Calvo**, et all, 'Effects of *γ* and neutron irradiation on the optical absorption of pure silica core single-mode optical fibres from Nufern', Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 565 (2006) 599–602.

[169] I. Dumanoglu et all. 'Radiation-hardness studies of high OH^- content quartz fibres irradiated with 500 MeV electrons' Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 490 (2002) 444–455.

[170] J. Alberdi, **E. Calvo**, et all, 'Results from multipoint alignment monitoring using the new generation of amorphous silicon position detectors', Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 593 (2008) 608– 615.

[171] J. Alberdi, **E. Calvo**, et all, 'Multipoint alignment monitoring with amorphous silicon position detectors in a complex light path', Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 624 (2010) 73–77.

[172] Y. Morita et al., 'Dose rate effect on radiation induced attenuation of pure silica core optical fibres', IEEE Trans. on Nucl. Sci., Vol. 36, No. 1, pp584-90, 1989.

[173] S. Girard et al. 'Gamma-rays and pulsed X-ray radiation responses of nitrogen-germanium-doped and pure silica core optical fibers', Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 215 (2004) 187–195.

[174] 3M.
www.3m.com

[175] OFS Fitel, LLC.
www.ofsoptics.com

[176] Corning Incorporated.
www.corning.com

[177] Monocrom, SL.

www.monocrom.com

[178] Ophir Optronics Inc.
www.ophiropt.com

[179] Institute for Nuclear Research (ATOMKI).
www.atomki.hu

[180] J.Berdugo, **E. Calvo**, et all, 'First test results of semitransparent amorphous silicon sensors for the link system of the CMS alignment', Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 425 (1999) 469-479.

[181] M.G. Fernández, **E. Calvo**, et all, 'An In-depth Study on Semitransparent Amorphous Silicon Sensors', Informes Técnicos Ciemat 890, abril 1999.

[182] M.G.Fernández, **E. Calvo**, et all, 'Gamma irradiation of semitransparent amorphous silicon sensors', Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 439 (2000) 111-116.

[183] J.Cárabe, **E. Calvo**, et all, 'Results on photon and neutron irradiation of semitransparent amorphous-silicon sensors', Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 455 (2000) 361-368.

[184] J. Cárabe, **E. Calvo**, et all, 'Gamma and Neutron Irradiation of Semitransparent Amorphous Silicon Sensors, Informes Técnicos Ciemat 908, diciembre 1999.

[185] C. Köhler, **E. Calvo**, et all, 'Construction process and read-out electronics of amorphous silicon position detectors for multipoint alignment monitoring', Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A608 (2009) 55–67.

[186] A. Calderón, **E. Calvo**, et all, Amorphous Silicon Position Detectors for the Link Alignment System of the CMS Detector: Users Handbook', Informes Técnicos Ciemat 1126, Diciembre 2007.

[187] A. Calderón, **E. Calvo**, et all, 'First Measurements of the Performance of New Semitransparent Amorphous Silicon Sensor Prototypes', Informes Técnicos Ciemat 1042, Mayo 2004.

[188] A. Calderón, **E. Calvo**, et all, 'Large Size High Performance Transparent Amorphous Silicon Sensors for Laser Beam Position Detection and Monitoring', Informes Técnicos Ciemat 1069, Marzo 2006.

[189] The ROSE Collaboration.
http://rd48.web.cern.ch/RD48/

[190] P. Danesh et all, 'Electron irradiation of a-Si:H films prepared from hydrogen-diluted silane', Vacuum 69 (2003) 79–82.

[191] D.L. Staebler and C.R. Wronski., 'Reversible conductivity changes in discharge-produced amorphous Si', Applied Physics Letter 31,292 (1977).

[192] P. Arce, **E. Calvo**, et all, 'Direct and inverse Staebler–Wronski effects observed in carbon-doped hydrogenated amorphous silicon photo-detectors', Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 632 (2011) 164–166.

[193] P. Arce, **E. Calvo**, et all, 'Effects of prolonged illumination with white light on the photo-response of carbon-doped hydrogenated amorphous silicon photo-detectors', Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A693 (2012) 253–260.

[194] Dialight-Lumidrives Ltd.
www.dialight.com

[195] A.L.Virto, **E. Calvo**, et all, 'Testing Tiltmeters for the Alignment System of the CMS Expenment' Informes Técnicos Ciemat 930, Mayo 2000.

[196] A. Calderon, **E. Calvo**, et all, 'Tiltmeters and Laser Levels for the alignment system of the CMS Experiment', CMS IN 2003/015.

[197] J. Alberdi, **E. Calvo**, et all, 'Tiltmeters for the Alignment System of the CMS Experiment: Users Handbook', Informes Técnicos Ciemat 1107, Mayo 2007.

[198] A. Calderón, **E. Calvo**, et all, 'Results on Neutron and Gamma Irradiation of Electrolytic Tiltmeters', Informes Técnicos Ciemat 1032, Enero 2004.

[199] A. Calderón, **E. Calvo**, et all, 'Results on neutron and gamma-ray irradiation of electrolytic tiltmeters', Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 532 (2004) 631–638.

[200] J. Alverdi, **E. Calvo**, et all, 'Electrolytic tiltmeters inside magnetic fields: Some observations', Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 574 (2007) 199–201.

[201] DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH.
www.heidenhain.com

[202] Mitutoyo Corporation.

www.mitutoyo.com

[203] Optics Laboratories, Al-Technique Corporation of Pakistan (ATCOP), Dodhy Plaza, Jinnah Avenue, P.O. Box 1878, Islamabad, (Pakistan).

[204] J.M.Barcala, **E. Calvo**, et All, 'Glasses, Coatings, Glues and Gamma-ray Irradiation', Informes Técnicos Ciemat 967, Junio 2001.

[205] J.M. Beigveder, **E. Calvo**, et All, 'Effect of neutron and gamma-ray irradiation on the transmittance power of glasses and glues', Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 493 (2002) 208–210.

[206] PerkinElmer Inc.
www.perkinelmer.com

[207] CMS - ISR: MAB Calibration Photogrammetric measurements Campaign 1: MAB_001 – MAB_012 (EDMS: 732397), May 2006.

[208] Norland Products Inc.
www.norlandprod.com/

[209] CMS – ALIGNMENT ALIGNMENT RING Z-, (EDMS: 1476470) CMS-MA-UR-0115, (January 2015).

[210] CMS – ALIGNMENT ALIGNMENT RING Z+, (EDMS: 1476487) CMS-MA-UR-0116, (January 2015).

[211] P. Arce, **E. Calvo,** et all, 'First test of Tiltmeters for the Link System of CMS', CMS NOTE 1998/066.

[212] P. Arce, **E. Calvo,** et all, 'Preliminary full size test of a simplified version of the CMS Link Alignment System at the ISR hall'. CMS IN 2000/012.

[213] P. Arce, **E. Calvo,** et all, 'Performance test of the CMS link alignment system', Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 492 (2002) 365–375.

[214] P. Arce, **E. Calvo,** et all, 'Link System Performance at the First Global Test of the CMS Alignment System', Informes Técnicos Ciemat 968, Septiembre 2001.

[215] P. Arce, **E. Calvo,** et all, 'Link system performance at the first global test of the CMS Alignment System', CMS IN 2001/051.

[216] P. Antequera et all, 'Los materiales compuestos de fibra de vidrio' ISBN: 84-7733-264-9.

[217] Dominick V. Rosato 'Designming with Reinforced Composites' ISBM 3-446-18254-3.

[218] **E. Calvo**, 'TRABAJO DE INVESTIGACIÓN: Análisis de estabilidad estructural de la rueda de alineación del subsistema de alineación LINK, para el detector de partículas de altas energías CMS', Universidad de Cantabria, Departamento de Ingeniería Estructural y Mecánica, Junio 2002.

[219] **E. Calvo**, 'Prueba para el reconocimiento de la Suficiencia Investigadora', Universidad de Cantabria, Departamento de Ingeniería Estructural y Mecánica, Octubre 2003.

[220] M. Van de Voorde, 'Radiation Damage Tests on Epoxy Resins', CERN ISR-MAG/67-3, January 1967.

[221] G. Pluym et all, 'Radiation Resistence of Glass Reinforced Epoxy-Resins', CERN ISR-MAG/67-19, March 1967.

[222] M. Van de Voorde, 'The Effect of the Nuclear Radiation on the Electrical Properties of the Epoxy Resins', CERN 68-13, Abril 1968.

[223] M. Van de Voorde, 'Effects of Radiation on Materials and Components', CERN 70-5, February 1970.

[224] M. Van de Voorde et C. Restar, 'Selection Guide to Organic Materials for Nuclear Engineering', CERN 72-7, May 1972.

[225] H. Schönbacher, 'Ageins of Organic Materials in Ionizing Radiation Environments of High Energy Particle Accelerators', CERN-TIS-CFM-89-11, part1, Oct. 1989.

[226] H. Schönbacher et M. Tavlet, 'Experience with IEC Standard 544 to Assess Radiation Damage of Organic Insulations Materials', CERN-TIS-CFM-89-11, part2.

[227] Lyn Wadley et all, 'Implications for complex cognition from the hafting of tools with compound adhesives in the Middle Stone Age, South Africa' Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, (9590–9594, PNAS June 16, 2009, vol. 106, no. 24).

[228] Von Garrach, H.G. and Chapman, B.N. 'Charge effects in thin film adhesion', Thin Solid Films, Volume 13, Issue 1, pages 157-161, November 1972.

[229] Engineered Material Handbook, volume 3, 'Adhesives and Sealants', ASM International, December 1990.

[230] M. Madrid, 'Tecnología de la Adhesión' Editorial Loctite España, Oct. 2000.

[231] Lucas F.M. da Silva et all, 'Handbook of Adhesion Technology', Springer, 2011.

[232] Robert D. Adams and William C. Wake 'Structural Adhesive Joints in Engineering', Elsevier Applied Sciences Publishers, 1984.

[233] D.J. Arrowsmith, 'Adhesion of electroformed copper and nickel to plastic laminates', Trans. Inst. Metal Finishing, 1970.

[234] M.V. Arriandiaga, 'NTP266: Adhesivos sintéticos: riesgo higiénico de resinas y otros componentes', 1990.

[235] J.J. Narbón et all. 'Influencia de las características superficiales de un sustrato en la resistencia de una unión adhesiva.', XV Congreso de Adhesión y Adhesivos, 2014.

[236] A.J. Kinloch, 'Adhesion and Adhesives: SCIENCE AND TECHNOLOGY', KLUWER THE LANGUAGE OF SCIENCE, 1987.

[237] HANDBOOK of ADHESIVES, Third Edition, Edited by Irving Skeist, Thomson Corporation, 1990.

[238] Zhang Yongkang et all, 'Investigation of the surface qualities of laser shock-processed zones and the effect on fatigue life of aluminum alloy.' Surface and Coatings Technology 92 (1997) 104-109.

[239] R. A. Everett et all, 'The Effects of Shot and Laser Peening on Fatigue Life and Crack Growth in 2024 Aluminum Alloy and 4340 Steel', NASA/TM-2001-210843.

[240] Y.B. Guo and R. Caslaru 'Fabrication and characterization of micro dent arrays produced by laser shock peening on titanium Ti–6Al–4V surfaces' Journal of Materials Processing Technology 211 (2011) 729–736.

[241] ANESDUR.
www.anesdur.com/

[242] X. Zhao, R.D. Adams and L.F.M da Silva 'Single lap joints with rounded adherent corners: experimental results and strength prediction.' Journal of Adhesion Science and Technology Volume 25, Issue 8, 2011.

[243] R. García-Ledesma et all, 'Influencia del espesor de adhesivo de

poliuretano en la resistencia de uniones sometidas a cortadura.', Revista de Metalurgia, Nota Técnica, Madrid 41 (2005) 60-65.

[244] J.A. Harris and R.D. Adams, 'The Impact Strength of Adhesive Lap Joints', Adhesive Joints, Plenum Press, New York, 1984.

[245] Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). www.aenor.es

[246] O. Volkersen, 'Die niektraftverteilung in zugbeanspruchten mit konstanten laschenquerschritten.' Luftfahrtforschung, vol. 15 (1938) 41–47.

[247] M. Goland and E. Reissner, 'The Stresses in Cemented Joints.' Journal of Applied Mechanics, vol. 11, (1944).

[248] Murlidhar H. Pahoja, 'STRESS ANALYSIS OF AN ADHESIVE LAP JOINT SUBJECTED TO TENSION, SHEAR FORCE AND BENDING MOMENTS', AD 753469, National Technical Information Service U.S. DEPARTAMENT OF COMMERCE, August 1972.

[249] I.Sneedon, 'The distribution on Stress in Adhesive Join', Adhesives, (D. Eley, Ed.) Oxford University Press, London, 1961.

[250] Z.J. Wu, A. Romeijn, et J. Wardenier, 'Stress expressions of single-lap adhesive joints of dissimilar adherents' Composite Structures Vol. 38, No. 1-4 (1997) 273-280.

[251] Adams, R. D. and Peppiatt, N. A. 'Stress Analysis of Adhesive Bonded Lap Joints' J. Strain Analysis. 9, (1974) 185-196.

[252] Adams, R. D. and Peppiatt, N. A. 'Effect of Poisson's ratio strains in adherents on stresses of an idealized lap joint' J. Strain Analysis. 8, (1973) 134-139.

[253] R.D. Adams and J.A. Harris, 'A critical assessment of the block impact test for measuring the impact strength of adhesive bonds', INT. J. ADHESION AND ADHESIVES Volume 16 Number 2 (1996) 61-71.

[253] Universidad de Cantabria.
www.unican.es

[254] Instron.
www.instron.com

[255] Millipore Ibérica.
www.merckmillipore.com

[256] J.M. Arenas Reina et all, 'Influence of the surface finish on the shear strength of Structural Adhesives Joints and Application Criteria in Manufacturing Processes', The Journal of Adhesion, 85, (2009) 324-340.

[257] Grupo Mahr.
www.mahr.com

[258] Publicación de los resultados mostrados en el capítulo 5 de la tesis. Está en fase de preparación, para su envío a publicación.

[259] L.A. García-Moral, **E. Calvo,** et all, 'Motions of CMS detector structures due to the magnetic field forces as observed by the Link alignment system during the test of the 4 T magnet solenoid', Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 606 (2009) 344–361.

[260] A. Calderón, **E. Calvo,** et all, 'Link Alignment System MTCC Results', CMS IN 2007-050.

[261] A. Calderón, **E. Calvo,** et all, 'Motions of CMS Detector structures due to the magnetic field forces as observed by the Link Alignment System during the Test of the 4 Tesla Magnet Solenoid', CMS NOTE -2009-004.

[262] A. Calderón, **E. Calvo,** et all, 'Motions of CMS Detector Structures as Observed by the Link Alignment System during the Test of the 4 Tesla Magnet Solenoid', Informes Técnicos Ciemat 1152, Noviembre 2008.

[263] P. Arce, **E. Calvo,** et all, 'CMS structural equilibrium at constant magnetic field as observed by the link alignment system' Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 675 (2012) 84–96.

[264] P. Arce, **E. Calvo,** et all, 'CMS structural equilibrium at constant magnetic field as observed by the Link Alignment System', CMS NOTE -2011-003.

[265] J. Alberdi, **E. Calvo,** et all, 'The CMS Experiment: on and underground motions of structures due to the magnetic field forces as observed by the Link Alignment System', Informes Técnicos Ciemat 1203, Marzo 2010.

[266] P. Arce, **E. Calvo,** et all, 'Magnet Cycles and Stability Periods of the CMS Structures from 2008 to 2013 as Observed by the Link Alignment System', Informes Técnicos Ciemat 1358, Abril 2015.

[267] P. Arce, **E. Calvo,** et all, 'Motion and Rest of CMS structures during Magnet Cycles and Stability Periods from 2008 to 2013

as observed by the Link Alignment System', CMS DN -2015-016.

[268] P. Arce, **E. Calvo,** et all, 'Motion of CMS detector and mechanical structures during Magnet Cycles and Stability Periods from 2008 to 2013 as observed by the Link Alignment System', enviado para su publicación el 10 de Noviembre de 2015 a Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, con número de referencia NIMA-D-15-01129.

[269] J. Alberdi, **E. Calvo,** et all, 'Direct measurement of the magnetic field intensity using Hall probes installed in the Link Alignment System', CMS IN -2010/023.

[270] CMS – SUMMARY, YBS AND YES POSITION W.R.T. YB0 IN SX5 POSITION FOR THE MAGNETIC TEST, (EDMS : 762426) CMS-SG-UR-0049, July 2006.

[271] M. Hohlmann, et al., 'Design and performance of the alignment system for the CMS muon endcaps', Proceedings of the IEEE Nuclear Science Symposium, San Diego, V.1, 27 October 2006, pp. 489–495; CMS CR 2008/016, 16 May 2008.

[272] M. Hohlmann et al., 'Aligning the CMS muon endcap detector with a system of optical sensors', Proceedings of the IEEE Nuclear Science Symposium, Honolulu, V.1, 3 November 2007, pp. 657–662 and CMS CR 2008/015.

[273] The CMS Collaboration, 'Commissioning of the CMS experiment and the cosmic run at four tesla', (2010) JINST 5 T03001.

[274] The CMS Collaboration, 'The CMS Collaboration, Aligning the CMS muon chambers with the muon alignment system during an extended cosmic ray run', (2010) JINST 5 T03019.

[275] The CMS Collaboration, Alignment of the CMS muon system with cosmic-ray and beam-halo muons, (2010) JINST 5 T03020.

Apéndice A.

Preparación superficial de los sustratos de juntas adhesivas.

En las siguientes tablas, obtenidas del HANDBOOK of ADHESIVES [237], se esquematizan una serie de tratamientos superficiales comunes, aplicados en función del tipo de sustrato que se utilice para la junta adhesiva:

Surface Treatment—Metals.

Adherend Material	*Cleaning*	*Abrasion or Chemical Treatment*	*Method*
Aluminum and alloys	Degrease in vapor bath of trichloroethane. (See ASTM D2651 for general information.)	(A) Chromic acid etch: DI water 1 liter H_2SO_4 (conc.) 300 g $Na_2Cr_2O_7 \cdot 2H_2O$ 60 g 2024 bare aluminum 1.5 g Dissolve the 20 mil aluminum sheet to "seed" the bath. (B) Phosphoric acid anodizing (Boeing Co. patent appl.) (for improved environmental resistance) (ASTM D3933-80): Prepare anodizing bath: H_3PO_4 (75% conc.) 454 g DI water 3.7 l Add acid to water with stirring. Use titanium racks and a stainless steel cathode.	(A) • Etch metal in bath for 12–15 min at 150–160°F (66–71°C). • *Do not delay rinse*! Spray in tap water for 5 min. Follow with DI water soak rinse. • Dry thoroughly at 120–140°F max. (49–60°C). • Do not touch bonding surface. • Prime or bond within 16 hr. (B) • Prepare etched metal as above in (A). • Anodize at 65–85°F (18–30°C). • Slowly raise voltage to 10–11 V for 20–25 min. • Disconnect current, immediately remove parts and rinse in running water (DI or < 150 ppm solids tapwater) for 10–15 min. • Dry at 160°F (71°C) max. • Do not touch surface. • Prime or bond within 16 hr.
Aluminum honeycomb core	Degrease in vapor bath of trichloroethane.	Not used.	• After degreasing, let stand 2 hr at room temp or 15 min at 200°F (93°C).
Beryllium (highly toxic)	Degrease in vapor bath of trichloroethane.	Dissolve NaOH in equal weight of DI water, then add water to reduce concentration to 20%w.	• Immerse in conc. (20%w) NaOH soln. 3 min at 180°F (82°C). • Rinse thoroughly in cold running DI water. • Finally, dry in oven for 10–15 min at 300–350°F (149–177°C).
Cadmium	Degrease.	Abrade with emery paper. Preferably electroplate with silver or nickel for bonding.	• Repeat degreasing step.
Copper and alloys brass, bronze	Degrease in vapor bath of trichloroethane. (Also see ASTM D2651-79.)	(A) For medium strength bonds, abrade with emery paper. (B) *For high bond strengths etch metal surface in*: 42% Aqueous $FeCl_2$ soln. 15 pbw Conc. HNO_3 (s.g. 1.41) 30 pbw DI water 197 pbw	(A) • Repeat degreasing step. (B) • Immerse for 1–2 min at 77°F (25°C). • Rinse in cold running DI water. • Dry immediately with pressurized air at room temp. (77°F, 25°C).
Gold	Degrease with vapor bath or clean rag and solvent.	None.	• Degreasing only treatment
Iron: Cast iron (alloys under steel)	Degrease in vapor bath of trichloroethane.	Grit blast or abrade with emery paper.	• Repeat degreasing step.
Lead and alloys, pewter	Degrease in vapor bath of trichloroethane.	Abrade with medium grit emery paper.	• Repeat degreasing step.
Magnesium and alloys	Wash with liquid trichloroethane, then—*Caution*—30 seconds only in trichloroethane vapor bath. (See ASTM D2651-79.)	(A) For medium strength bond, abrade with medium-grit emery paper. (B) For high strength bonds, use etch procedure. (ASTM D2651, Method A) *Bath 1*: Sodium metasilicate 2.5 pbw Tetrasodium pyrophosphate 1.1 pbw Sodium hydroxide 1.1 pbw Nacconol® NR (Allied Chem. Corp.) 0.3 pbw DI water 95 pbw *Bath 2*: Chromium trioxide 1 pbw DI water 4 pbw	(A) • Repeat degreasing step. • Dry in forced draft oven at 150–200°F (66–93°C). (B) • Immerse metal for 10 min in Bath 1 at 140–160°F (60–71°C). • Rinse thoroughly in water. • Immerse metal for 10 min in Bath 2 kept at 140–190°F (71–88°C). • Wash in cold running DI water. • Dry in a forced-draft oven at < 140°F (60°C). • When cool, immediately apply adhesive.

Surface Treatment—Metals (*Continued*).

Adherend Material	*Cleaning*	*Abrasion or Chemical Treatment*	*Method*
Nickel	Degrease.	(A) For medium strength bond, abrade with medium-grit emery paper. (B) For higher bond strengths, conc. HNO_3 (s.g. 1.41).[12]	(A) • Repeat degreasing step. (B) • For stronger bond, immerse metal for 5 seconds in conc. HNO_3 solution at room temp. (77°F, 25°C). • Rinse etched metal thoroughly in cold running DI water. • Air dry at 104°F (40°C).
Platinum	Degrease.	No other treatment needed.	
Silver	Degrease.	Using fine-grit emery paper, remove any tarnish from bonding area.	• Repeat degreasing step.
Steel and iron alloys (except stainless steel)	Degrease in vapor bath of trichloroethane.	(A) Sandblast or abrade with medium-grit emery paper. (B) If cannot sandblast or abrade: *Acid Bath 1*: Conc. orthophosphoric acid (s.g. 1.73) 1 pbw Ethyl alcohol (denatured) 1 pbw or *Acid Bath 2*: Conc. HCl 1 pbw DI water 1 pbw	(A) • Repeat degreasing step. (B) • Immerse for 10 min in Acid Bath 1 at 140°F (60°C) or 5–10 min in Bath 2 at 68°F (20°C). • Remove black residue with stiff brush under running DI water. • Dry at 250°F for 1 hour. If cannot be stored at less than 30% Relative Humidity, bond prepared surfaces in short time.
Steel, ferrous alloys	Degrease in vapor	(A) Gritblast if possible. (B) If cannot abrade: Conc. HCl 1 pt/wt DI water 1 pt/wt	(A) • Repeat degreasing step. (B) • If cannot abrade immerse for 3–10 min at 77°F (25°C) in HCl bath. • Rinse thoroughly in cold running DI water. • Oven dry at 150°F (66°C) for 10 min.
Stainless steel	Degrease by washing in trichloroethane. (See ASTM D2651.)	Remove surface deposits with nonmetallic agent—alumina grit paper. (A) General Purpose Treatment: *Bath 1*: See under Magnesium and alloys.	(A) • Immerse in Bath 1 for 10 min. at 160–180°F (71–82°C). • Rinse thoroughly in running tapwater then cold DI water. • Oven dry at 200°F (93°C) for 10 min. • Bond as soon as possible.
		(B) For high temperature use, further treat the metal:[12] *Bath 2*: Oxalic acid 1 pbw Conc. H_2SO_4 (s.g. 1.86) 1 pbw DI water 8 pbw Dissolve oxalic acid before stirring in the H_2SO_4.	(B) • Immerse metal for 10 min in Bath 2 at 185–195°F (85–90°C). • Under cold running water, scrub away any black residue with clean, stiff bristle brush. • Rinse in DI water. • Dry in oven at 200°F (93°C) for 10–15 min.
		(C) For resistance to high peel stresses, further treat metal from (A). [Do not combine (B) and (C) treatments.] *Bath 3*: $Na_2Cr_2O_7 \cdot 2H_2O$ 3.5 pbw DI water 3.5 pbw Conc. H_2SO_4 (s.g. 1.86) 200 pbw	(C) • Immerse in Bath 3 at 140–160°F (60–71°C) for 15 min. • Scrub under cold running water with stiff bristle brush. • Rinse in DI water. • Dry in oven at 200°F (93°C) for 10–15 min.
Tungsten and alloys	Degrease in vapor bath of trichloroethane.	(A) Abrade using medium-grit emery paper. (B) For maximum strength, also use a chemical etch: Conc. HCl 30 pbw DI water 15 pbw HF 5 pbw Conc. H_2SO_4 50 pbw Hydrogen peroxide few drops Add HCl and HF to the water, stir in the H_2SO_4 then add the hydrogen peroxide.	(A) • Repeat degreasing step. (B) • Immerse for 1–5 min at 77°F (25°C). • Rinse thoroughly in cold, running DI water. • Dry for 10–15 min in a 160–180°F (71–82°C) oven.
Tin	Degrease.	Abrade with medium-grit emery paper.	• Repeat degreasing.

Surface Treatment—Metals (*Continued*).

Adherend Material	*Cleaning*	*Abrasion or Chemical Treatment*	*Method*
Titanium and alloys (Many procedures in literature. Also see ASTM D2651.)	Vapor degrease with trichloroethane. Remove surface deposits with nonmetallic abrasive.	(A) *Bath 1*: Sodium metasilicate soln. (see Magnesium). (B) For stronger bonds: *Bath 2 (polyethylene vessel)*: Sodium fluoride 10 pbw Chromium trioxide 5 pbw DI water 250 pbw Conc. H_2SO_4 (add last with stirring) 50 pbw (C) Alternate Treatment (ASTM D2651): *Bath 3 (alkaline-clean)*: Oakite HD 126 1.5 oz DI water to 1 gal *Bath 4 (acid pickle)*: HF (70%) 2–3 oz (fl) Na_2SO_4 (anhyd.) 3.0 oz HNO_3 (70%) 40–50 oz DI water to 1 gal *Bath 5 (etch bath)*: Trisodium phosphate 6.5–7 oz Potassium fluoride 2.5 oz HF (70%) 2.2–2.5 oz DI water to 1 gal (D) Surface treatments with Pasa Jell 107 can also be used (SemCo Div., PRC).	(A) • Immerse at 160–180°F (71–82°C) for 10 min. • Rinse in cold, running DI water. • Dry in oven at 150–200°F (66–93°C) for 10–15 min. (B) • Immerse in Bath 2 at room temp. for 5–10 min. • Rinse in cold, running DI water. • Dry in oven at 160–180°F (71–82°C) for 10–15 min. (C) • Immerse in Bath 3 for 5 min at 150°F (66°C). • Rinse in running tapwater at 105°F (40°C) for 2 min. • Immerse in Bath 4 for 2 min at room temp. • Rinse in cold water. • Immerse in Bath 5 for 2 min at room temp. • Rinse in DI water at 150°F (66°C) for 15 min. • Repeat rinse. • Dry at 140°F (60°C) for 30 min in air circulating oven. • Wrap in clean kraft paper.
Zinc, alloys, galvanized metals	Degrease in vapor bath of trichloroethane.	(A) Abrade using medium-grit emery paper. (B) For maximum strength: Conc. HCl 20 pbw DI water 80 pbw	(A) • Repeat degreasing step. (B) • Immerse for 2–4 min with the solution at 77°F (25°C). • Rinse thoroughly in cold, running DI water. • Dry for 20–30 min. in a 150–160°F (66–71°C) oven. • Apply adhesive as soon as possible.

Surface Treatment—Engineering Thermoplastics (Examples of Representative Commercial Materials).

Adherend Material	*Cleaning*	*Abrasion or Chemical Treatment*	*Method*
Polyarylate (Ardel®, U.C.)[12] or polyaryl sulfone (Astrel® 360, 3M)[12]	(A) Ultrasonic clean in alkaline-etching solution.	(A) Using alkaline-etching solution, sandblast with 150 mesh silica sand. (B) Acid etch solution: $Na_2Cr_2O_7 \cdot 2H_2O$ 3.4%W Conc. H_2SO_4 96.6%W (C) Corona or Plazma treatment	(A) • Water wash. • Alcohol wash. • Dry with dry nitrogen. (B) • Immerse 15 min at 150–160°F (66–71°C) • Cold water wash. • Dry at 150°F (66°C) in an air circulating oven.
Polyether-ether-ketone (PEEK®, ICI)[12]	Degrease with trichloroethane or isopropyl alcohol.	(A) Abrade (B) Flame treatment: blue oxidizing flame. (C) Chromic acid etch (bath composition not given in Ref. 12). (D) Corona or Plazma treatment.	(A) • Repeat degrease. (B) • Abrade. • Degrease. • Flame treat (blue oxidizing flame). (C) • Abrade. • Degrease. • Chromic acid etch. • Water wash.
Polyphenylene sulfide Ryton®, Phillips)[12]	(A) Degrease with acetone. (B) Wipe surface with ethyl alcohol soaked paper.	(A) Sandblast. (B) Sand with 120-grit sandpaper. (C) Corona or plazma treatment.	(A) • Repeat degreasing. (B) • Clean off dust with stiff bristled brush.
Polysulfone (Udel® U.C.)[12]	Degrease in alcohol.	(A) Grit-blast with 27–50 μm aluminum oxide. (B) Etch in sodium dichromate-sulfuric acid soln. (C) Corona or plazma treatment	(A) • Clean in ultrasonic cleaner in Neutra-Clean (Shipley Co., Inc.) • Rinse in tap and then DI water. • Rinse in IPA for 30 seconds. • Flush with dry N2. • Dry in air at 150°F (66°C). (B) See Polyaryl sulfone treatment.

Surface Treatment—Thermosets.

Adherend Material	*Cleaning*	*Abrasion or Chemical Treatment*	*Method*
Epoxy, epoxide resins	Degrease with acetone or MEK.	Abrade using medium-grit emery paper.	• Repeat degreasing step.
Furane resins	Degrease with acetone or MEK.	Abrade using medium-grit emery paper.	• Repeat degreasing step.
Melamine formaldehyde plastics (Formica)	Degrease with acetone or MEK.	Abrade using medium-grit emery paper.	• Repeat degreasing step.
Phenolics, polyester polyurethane resins	Degrease with acetone or MEK.	Abrade using medium-grit emery paper.	• Repeat degreasing step.
Polyimide (Vespel® DuPont)[12]	(A) Degrease in trichloroethane (B) Degrease in acetone.	(A) Abrade with dry or wet abrasive blast. (B) Etch solution: Sodium hydroxide 5 pbw Water 95 pbw	(A) • Repeat degreasing. • Dry. (B) • Etch for 1 min at 140–194°F (60–90°C). • Rinse in cold water. • Dry in hot air.

Surface Treatment—Rubbers.

Adherend Material	*Cleaning*	*Abrasion or Chemical Treatment*	*Method*
Rubber—natural and synthetic chloroprene, neoprene	Degrease with methyl alcohol.	For maximum strength use: Chemical etch: Bath 1, concentrated sulfuric acid. Neutralizing solution: Bath 2, 0.2% solution of caustic.	• Immerse for 5–10 min in conc. • sulfuric acid at 77°F (25°C) (Bath 1). • Wash thoroughly in cold DI water. • Neutralize by immersing for 5–10 min. at room temp. (Bath 2). • Rinse with cold, running DI water. • Dry.

Surface Treatment—Carbon and Carbon Fiber and Glass Fiber Composites.

Adherend Material	*Cleaning*	*Abrasion or Chemical Treatment*	*Method*
Carbon	Degrease with acetone or MEK.	Abrade using fine-grit emery paper.	• Repeat degreasing step. • Allow solvent to evaporate.
Glass reinforced laminates	Degrease with acetone or MEK.	Abrade using medium-grit emery paper.	• Repeat degreasing step.
Graphite	Degrease with acetone or MEK.	Abrade using fine-grit emery paper.	• Repeat degreasing step. • Allow solvent to evaporate.
Carbon fiber-epoxy composites[12]	(A) Solvent wipe (MEK, toluene, trichloroethylene, etc.) (B) Use peel ply during initial curing. (C) See Ref. 15 for the effect of abrasion procedures. See also Refs. 16 and 17.	(A) Lightly abrade with medium-grit emery paper. Avoid exposing the reinforcing fibers.	(A) • Wipe with solvent. • Check surface by water break test. Retreat, if necessary.
Carbon fiber–polyether ether-ketone (PEEK®)	Solvent wipe with MEK.	Abrade lightly with Scotch-brite-Bon Ami. Good strengths require (A) or (B) treatment: (A) Chromic acid etch: Exact composition of etch solution not defined in Ref. 18. (B) Plasma treatment gave good bond strengths also.	• Rinse in tap water and DI water. • Air dry. (A) • Immerse for 15 min at room temp. • Rinse in tap and then DI water. • Dry at 200°F (93°C) for 30 min.

Surface Treatment—Ceramics, Glass, etc.

Adherend Material	*Cleaning*	*Abrasion or Chemical Treatment*	*Method*
Ceramics, porcelain, glazed china	Degrease with MEK.	Abrade using emery paper or sandblasting.	• Repeat degreasing step. • Evaporate the solvent.
Glass, quartz—nonoptical	Degrease with MEK.	(A) Abrade using carborundum powder and water or fine-grit paper. (B) For maximum strength, continue abrading and use chemical etch: Chromium trioxide 1 pbw DI water 4 pbw	(A) • Repeat degreasing step. • Dry for 30 min at 210°F (100°C). (B) • Immerse for 10–15 min at 77°F (25°C). Wash well in running water • Dry for 30 min at 210°F (100°C). • Apply adhesive while still hot.
Glass—optical	Degrease in an ultrasonically agitated detergent bath.		• Rinse thoroughly. • Dry < 100°F (38°C).
Jewels	Degrease with MEK.		• Dry at room temp.

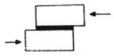
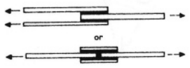
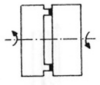
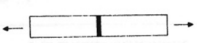
Surface Treatment—Construction Materials.

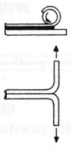
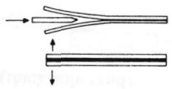
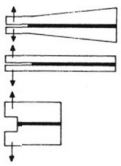
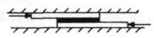
Adherend Material	*Cleaning*	*Abrasion or Chemical Treatment*	*Method*
Bricks: Fired, nonglazed building materials	Degrease in acetone or MEK.	Abrade using a wire brush.	• Remove all contaminants.
Concrete	Decontaminate with a detergent solution.	Clean by one of these procedures: (A) Sandblast about 1/16" from bonding surface. (B) Remove ¼ by mechanical scarification. (C) Chemical etch, hydrochloric acid solution (15% by wt.).	• Wash thoroughly with water. • Remove all dust. (C) • Spread solution with a stiff bristled broom. • Remove sludge with water from high pressure hose. • Check with litmus paper for residual acid. • If present, rinse with 1% ammonia. • Flush with water. • Allow to dry.
Stonework	Dry thoroughly.	Abrade using a wire brush.	• Remove all contaminants.
Wood	Dry thoroughly.	Decontaminate with a sander, plane, smooth with sandpaper.	• Remove all contaminants.

Apéndice B.

Ensayos normalizados de aplicación a las juntas adhesivas.

En las siguientes tablas, obtenidas de los libros *STRUCTURAL ADHESIVE JOINTS IN ENGINEERING* [232] y TECNOLOGÍA DE LA ADHESIVÓN [230] y de AENOR [245], se esquematizan una serie de normas que son de común aplicación a las juntas adhesivas:

Parameter/schematic	*Title*	*Materials*	*ASTM*	*BS*
Definitions	Standard definitions of terms relating to adhesives	All	D 907–82	
Static tension lap shear strength	STM strength properties of adhesives in shear by tension loading (metal-to-metal)	M	D 1002–72	
	Bond strength in longitudinal shear	MP		5350 : C5
	STM strength properties of adhesives in shear by tension loading at elevated temperatures (metal-to-metal)	M	D 2295–72	
	STM strength properties of adhesives in shear by tension loading in the temperature range of −267·8 to −55°C (−450 to −67°F)	M	D 2557–72	
	SRP determining the strength of adhesively-bonded rigid plastic lap-shear joints in shear by tension loading	P	D 3163–73	
	SRP determining the strength of adhesively bonded plastic lap-shear sandwich joints in shear by tension loading	P	D 3164–73	
Static tension lap-shear strength and modulus (thick adherend)	SP measuring strength and shear modulus of non-rigid adhesives by the thick adherend tensile lap specimen	MW	D 3983–81	
				
Static compression lap shear strength	STM strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading	W	D 905–49	
				
Static tension double-lap shear strength	STM strength properties of double-lap shear adhesive joints by tension loading	M	D 3528–76	
	Bond strength in longitudinal shear	MP		5350 : C5
				
Static tension lap shear strength	STM strength properties of adhesives in two-ply wood construction in shear by tension loading	W	D 2339–70	
	STM strength properties of adhesives in shear by tension loading of laminated assemblies	M	D 3165–73	
Static shear	STM shear strength and shear modulus of structural adhesives (napkin ring)	M	E 229–70	
				
Tensile butt	STM tensile properties of adhesive bonds (π test)	M, W	D 897–78	
	STM tensile strength of adhesives by means of bar and rod specimens	M	D 2095–72	
	Determination of bond strength in direct tension	M		5350 : C3
	Determination of bond strength in direct tension in sandwich panels	foam plastic, honeycomb		5350 : C6

Parameter/schematic	*Title*	*Materials*	*ASTM*	*BS*
Peel	STM peel or stripping strength of adhesive bonds (180° peel)	M, P, W others	D 903–49	
	180° peel test for a flexible-to-rigid assembly	M, P		5350:C11
	STM cross-lap specimens for tensile properties of adhesives	G, M, W	D 1344–78	
	STM climbing drum peel test for adhesives	M, honeycomb	D 1781–76	
	Climbing drum peel test	M, honeycomb		5350:C13
	STM peel resistance of adhesives (T-peel test)	M or any flexible material	D 1876–72	
	180° T-peel test for flexible-to-flexible assembly	M or any flexible material		5350:C12
	SP determining durability of adhesive joints stressed in peel	All	D 2918–71	
	STM floating roller peel resistance of adhesives	M	D 3167–76	
	Floating roller peel test	M or any flexible material		5350:C9
	90° peel test for a flexible-to-rigid assembly	Any		5350:C10
	90° peel test for a rigid-to-rigid assembly	M		5350:C14
	STM adhesive bonded surface durability of aluminium (wedge test)	M	D 3762–79	
	STM strength properties of adhesives in cleavage peel by tension loading (engineering plastics to engineering plastics)	P	D 3807–79	
Cleavage	SP fracture strength in cleavage of adhesives in bonded joints	M	D 3433–75	
	Strength properties of adhesives in cleavage peel by tension loading (engineering plastics-to-engineering plastics)	Various engineering plastics materials	D 3807–79	
	STM cleavage strength of metal-to-metal adhesive bonds	M	D 1062–78	
Creep	RP conducting creep tests of metal-to-metal adhesives	M	D 1780–72	
	STM creep properties of adhesives in shear by tension loading (metal-to-metal)	M	D 2294–69	
	Creep and resistance to sustained application of force	M, P		5350:C7
	STM creep properties of adhesives in shear by compression loading (metal-to-metal)	M	D 2293–69	
Fatigue	STM fatigue properties of adhesives in shear by tension loading (metal/metal)	M	D 3166–73	
				
Impact	STM impact strength of adhesive bonds	M, W	D 950–78	
				
Environment	STM resistance of adhesive bonds to chemical reagents	All	D 896–66	
	STM effect of moisture and temperature on adhesive bonds	All	D 1151–72	
	STM resistance of adhesives to cyclic laboratory aging conditions	All	D 1183–70	
	SP atmospheric exposure of adhesive bonded joints and structures	All	D 1828–70	

Normas ISO	
ISO 4578:1997 Adhesives — Determination of peel resistance of high-strength adhesive bonds — Floating-roller method (ED. 3; 6 P; C)	**ISO 10354:1992 Adhesives** — Characterisation of durability of structural-adhesive-bonded assemblies —Wedge rupture test (ED. 1; 4 P; B)
ISO 4587:1995 Adhesives — Determination of tensile lap-shear strength of rigid-to-rigid bonded assemblies (ED. 2; 4 P; B)	**ISO 10363:1992 Hot-Melt Adhesives** — Determination of thermal stability (ED. 1; 3 P; B)
ISO 4588:1995 Adhesives — Guidelines for the surface preparation of metals (ED. 2; 7 P; D)	**ISO 10364:1993 Adhesives** — Determination of working life (pot life) of multi-component adhesives (ED. 1; 3 P; B)
ISO 6237:1987 Adhesives — Wood-to-wood adhesive bonds — determination of shear strength by tensile loading (ED. 1; 8 P; D)	**ISO 10365:1992 Adhesives** — Designation of main failure patterns (ED. 1; 3 P; B)
ISO 6238:1987 Adhesives — Wood-to-wood adhesive bonds — determination of shear strength by compression loading (ED. 1; 8 P; D)	**ISO 10964:1993 Adhesives** — Determination of torque strength of anaerobic adhesives on threaded fasteners (ED. 1; 4 P; B)
ISO 6922:1987 Adhesives — Determination of tensile strength of butt joints (ED. 1; 3 P; B)	**ISO 11003-1:1993 Adhesives** — Determination of shear behaviour of structural bonds — Part 1: Torsion test method using butt-bonded hollow cylinders (ED. 1; 7 P; D)
ISO 7387-1:1983 Adhesive — With solvents for assembly of PVC-U pipe elements — characterisation — Part 1: Basic test methods (ED. 1; 10 P; E)	**ISO 11003-2:1993 Adhesives** — Determination of shear behaviour of structural bonds — Part 2: Thick-adherend tensile-test method (ED. 1; 12 P; F)
ISO 8510-1:1990 Adhesives — Peel test for a flexible-bonded-to-rigid test specimen assembly — Part 1: 90 degree peel (ED. 1; 5 P; C)	**ISO 11339:1993 Adhesives** — 180 degree peel test for flexible-to-flexible bonded assemblies (T-peel test) (ED. 1; 3 P; B)
ISO 8510-2:1990 Adhesives — Peel test for a flexible-bonded-to-rigid test specimen assembly — Part 2: 180 degree peel (ED. 1; 5 P; C)	**ISO 11343:1993 Adhesives** — Determination of dynamic resistance to cleavage of high strength adhesive bonds under impact conditions — Wedge impact method (ED. 1; 6 P; C)
ISO 9142:1990 Adhesives — Guide to the selection of standard laboratory ageing conditions for testing bonded joints (ED. 1; 20 P; K)	**ISO 13445:1995 Adhesives** — Determination of shear strength of adhesive bonds between rigid substrates by the block-shear method (ED. 1; 4 P; B)
ISO 9142:1990/COR 1:1995 (ED. 1; 1 P; *)	**ISO 13895:1996 Adhesives** — Guidelines for the surface preparation of plastics (ED. 1; 7 P; D)
ISO 9653:1998 Adhesives — Test method for shear impact strength of adhesive bonds (ED. 2; 6 P; C)	**ISO 14615:1997 Adhesives** — Durability of structural adhesive joints — Exposure to humidity and temperature under load (ED. 1; 8 P; D)
ISO 9664:1993 Adhesives — Test methods for fatigue properties of structural adhesives in tensile shear (ED. 1; 10 P; E)	**ISO 14676:1997 Adhesives** — Evaluation of the effectiveness of surface treatment techniques for aluminium — Wet-peel test by floating-roller method (ED. 1; 4 P; B)
ISO 9665:1998 Adhesives — Animal glues — Methods of sampling and testing (ED. 2; 23 P; L)	**ISO 14679:1997 Adhesives** — Measurement of adhesion characteristics by a three-point bending method (ED. 1; 11 P; F)
ISO 10123:1990 Adhesives — Determination of shear strength of anaerobic adhesives using pin-and-collar specimens (ED. 1; 4 P; B)	**ISO 15107:1998 Adhesives** — Determination of cleavage strength of bonded joints (ED. 1; 5 P; C)

ISO 15108:1998 Adhesives — Determination of strength of bonded joints using a bending-shear method (ED. 1; 4 P; B) **ISO 15109:1998 Adhesives** — Determination of the time to rupture of bonded joints under static load (ED. 1; 4 P; B)	**ISO 15166-1:1998 Adhesives** — Methods of preparing bulk specimens — Part 1: Two-part systems (ED. 1; 5 P; C)

NORMAS UNE: CTN: AEN/CTN 143 - ADHESIVOS Y SELLANTES	
UNE-EN 15425:2008	Adhesivos. Adhesivos de poliuretano de un componente para estructuras de madera bajo carga. Clasificación y requisitos de comportamiento.
UNE-EN 924:2003	Adhesivos. Adhesivos en base disolvente y adhesivos libres de disolvente. Determinación del punto de inflamación
UNE-EN 14293:2007	Adhesivos. Adhesivos para la unión de parquet al suelo. Métodos de ensayo y requisitos mínimos.
UNE-EN 205:2003	Adhesivos. Adhesivos para madera de uso no estructural. Determinación de la resistencia a la cizalladura por tracción de juntas solapadas.
UNE-EN 14257:2007	Adhesivos. Adhesivos para madera. Determinación de la fuerza tensora de las juntas solapadas a temperatura elevada (WATT´91).
UNE-EN 14292:2005	Adhesivos. Adhesivos para madera. Determinación de la resistencia a la carga estática a temperatura creciente.
UNE-CR 14376:2002	Adhesivos. Adhesivos para papel y cartón, embalajes y productos sanitarios desechables. Descripción y evaluación del proceso de fraguado.
UNE-EN 14713:2006	Adhesivos. Adhesivos para papel y cartón, envases y embalajes y productos higiénicos desechables. Determinación de las propiedades de fricción de películas potencialmente adecuadas para el pegado.
UNE-EN ISO 9665:2001	Adhesivos. Colas animales. Métodos de toma de muestras y ensayo. (ISO 9665:1998).
UNE-EN 15274:2008	Adhesivos de uso general para uniones estructurales. Requisitos y métodos de ensayo.
UNE-EN ISO 10365:1996	Adhesivos. Designación de los principales modelos de rotura. (ISO 10365:1992).
UNE-EN 542:2003	Adhesivos. Determinación de la densidad.
UNE-EN 543:2003	Adhesivos. Determinación de la densidad aparente de adhesivos en polvo y en granza.
UNE-EN 15337:2008	Adhesivos. Determinación de la resistencia a cizalla de los adhesivos anaeróbicos en probetas pasador-anillo (ISO 10123:1990 modificada)
UNE-EN ISO	Adhesivos. Determinación de la resistencia a la cizalla de uniones adhesivas

13445:2007	entre sustratos rígidos mediante el método de cizalla en bloque (ISO 13445:2003)
UNE-EN 1465:2009	Adhesivos. Determinación de la resistencia a la cizalla por tracción de montajes pegados solapados.
UNE-EN ISO 14678:2006	Adhesivos. Determinación de la resistencia a la fluencia (descuelgue). (ISO 14678: 2005).
UNE-EN 15870:2009	Adhesivos. Determinación de la resistencia a la tracción de uniones a tope. (ISO 6922:1987 modificada)
UNE-EN 1464:2010	Adhesivos. Determinación de la resistencia al pelado de uniones adhesivas. Método del rodillo móvil.
UNE-EN ISO 11343:2005	Adhesivos. Determinación de la resistencia dinámica al agrietamiento de uniones adhesivas de alta resistencia bajo condiciones de impacto. Método de impacto en cuña. (ISO 11343:2003)
UNE-EN 1238:2011	Adhesivos. Determinación de la temperatura de reblandecimiento de adhesivos termoplásticos (anillo y bola).
UNE-EN 12092:2002	Adhesivos. Determinación de la viscosidad.
UNE-EN 1244:1999	Adhesivos. Determinación del color y/o cambios de color de revestimientos adhesivos bajo la influencia de la luz.
UNE-EN 12962:2011	Adhesivos. Determinación del comportamiento elástico de adhesivos líquidos (Índice de elasticidad).
UNE-EN 1246:1999	Adhesivos. Determinación del contenido de cenizas total y del contenido de cenizas sulfatadas.
UNE-EN 1242:2013	Adhesivos. Determinación del contenido de isocianato.
UNE-EN 12963:2001	Adhesivos. Determinación del contenido de monómero libre en adhesivos basados en polímeros sintéticos.
UNE-EN 827:2006	Adhesivos. Determinación del contenido en sólidos convencional y del contenido en sólidos a masa constante.
UNE-EN 1243:2011	Adhesivos. Determinación del formaldehido libre en los condensados de amino y amidoformaldehido.
UNE-EN 1241:1999	Adhesivos. Determinación del índice de acidez.
UNE-EN 15865:2009	Adhesivos. Determinación del par de desmontaje en elementos de fijación roscados encolados con adhesivos anaeróbicos. (ISO 10964:1993 modificada).
UNE-EN	Adhesivos. Determinación del pH.

1245:2011	
UNE-EN 16556:2015	Adhesivos. Determinación del tiempo abierto máximo de los adhesivos termoplásticos para madera de uso no estructural.
UNE-EN 15336:2007	Adhesivos. Determinación del tiempo de rotura de las juntas pegadas bajo carga estática (ISO 15109:1998 modificada)
UNE-EN 1240:2011	Adhesivos. Determinación del valor hidroxilo y/o del contenido de ión hidroxilo.
UNE-EN ISO 11339:2010	Adhesivos. Ensayo de pelado en T para uniones encoladas flexible sobre flexible. (ISO 11339:2010)
UNE-EN 28510-1:2014	Adhesivos. Ensayo de pelado para una unión encolada de adherente flexible sobre rígido. Parte 1: Pelado a 90 º.
UNE-EN ISO 8510-2:2011	Adhesivos. Ensayo de pelado para una unión encolada de adherente flexible sobre rígido. Parte 2: pelado a 180 º. (ISO 8510-2:2006).
UNE-EN 1239:2011	Adhesivos. Estabilidad congelación-descongelación.
UNE-EN 12701:2002	Adhesivos estructurales. Almacenamiento. Determinación de vocablos y frases relativas al tiempo de vida de los adhesivos estructurales y materiales relacionados.
UNE-EN 15275:2008/ AC:2010	Adhesivos estructurales. Caracterización de adhesivos anaeróbicos para uniones metálicas coaxiales en edificación y estructuras de ingeniería civil.
UNE-EN 15275:2008	Adhesivos estructurales. Caracterización de adhesivos anaeróbicos para uniones metálicas coaxiales en edificación y estructuras de ingeniería civil.
UNE-EN 1966:2009	Adhesivos estructurales. Caracterización de una superficie mediante la medida de la adhesión por el método de flexión en tres puntos.
UNE-EN 14258:2005	Adhesivos estructurales. Comportamiento mecánico de las juntas pegadas sometidas a condiciones especificadas de temperatura durante periodos de exposición cortos y largos.
UNE-EN 1965-1:2011	Adhesivos estructurales. Corrosión. Parte 1: Determinación y clasificación de la corrosión de un substrato de cobre.
UNE-EN 1965-2:2011	Adhesivos estructurales. Corrosión. Parte 2: Determinación y clasificación de la corrosión de un substrato de latón.
UNE-EN 14022:2010	Adhesivos estructurales. Determinación de la vida útil (vida de trabajo) de adhesivos multicomponentes.
UNE-EN 14869-1:2011	Adhesivos estructurales. Determinación del comportamiento en cizalla de adhesivos estructurales. Parte 1: Método de ensayo en torsión de cilindros huecos pegados a tope. (ISO 11003-1:2001, modificada)

UNE-EN 14869-2:2011	Adhesivos estructurales. Determinación del comportamiento en cizalla de adhesivos estructurales. Parte 2: Método de ensayo de tracción en probetas gruesas. (ISO 11003-2:2001, modificada)
UNE-EN 14444:2006/ AC:2008	Adhesivos estructurales. Evaluación cualitativa de la durabilidad de las uniones encoladas. Ensayo de rotura en cuña. (ISO 10354:1992 modificada)
UNE-EN 14444:2006	Adhesivos estructurales. Evaluación cualitativa de la durabilidad de las uniones encoladas. Ensayo de rotura en cuña. (ISO 10354:1992 modificada)
UNE-EN 13887:2004	Adhesivos estructurales. Guía para la preparación de superficies de metales y de plásticos previamente al encolado con adhesivos.
UNE-EN 15190:2007	Adhesivos estructurales. Métodos de ensayo para evaluar la durabilidad a largo plazo de las estructuras metálicas pegadas.
UNE-EN 1067:2006	Adhesivos. Evaluación y preparación de las muestras para ensayo.
UNE-EN 301:2014	Adhesivos fenólicos y aminoplásticos para estructuras de madera bajo carga. Clasificación y requisitos de comportamiento.
UNE-EN ISO 9142:2004	Adhesivos. Guía para la selección de condiciones de envejecimiento normalizadas de laboratorio para someter a ensayo juntas pegadas. (ISO 9142:2003)
UNE-EN 16254:2014	Adhesivos. Isocianato polimerizado en emulsión (EPI) para madera de uso estructural. Clasificación y requisitos de comportamiento.
UNE-EN 13999-1:2014	Adhesivos. Método corto para la medición de las propiedades de emisión de adhesivos con bajo contenido de disolventes o libres de disolventes tras su aplicación. Parte 1: Procedimiento general.
UNE-EN 13999-2:2014	Adhesivos. Método corto para la medición de las propiedades de emisión de adhesivos con bajo contenido de disolventes o libres de disolventes tras su aplicación. Parte 2: Determinación de los compuestos orgánicos volátiles.
UNE-EN 13999-3:2007+A1:2009	Adhesivos. Método corto para la medición de las propiedades de emisión de adhesivos con bajo contenido de disolventes o libres de disolventes tras su aplicación. Parte 3: Determinación de aldehídos volátiles.
UNE-EN 13999-4:2007+A1:2009	Adhesivos. Método corto para la medición de las propiedades de emisión de adhesivos con bajo contenido de disolventes o libres de disolventes tras su aplicación. Parte 4: Determinación de los diisocianatos volátiles.
UNE-EN 1373:2000	Adhesivos. Método de ensayo de adhesivos para revestimientos de paredes y suelos. Ensayo de cizallamiento.
UNE-EN 1372:2000	Adhesivos. Método de ensayo de adhesivos para revestimientos de paredes y suelos. Ensayo de pelado.

UNE-EN ISO 9653:2001	Adhesivos. Método de ensayo de la resistencia a la cizalladura por impacto en juntas pegadas. (ISO 9653:1998).
UNE-EN 1903:2008	Adhesivos. Métodos de ensayo de adhesivos para revestimientos de pared o de suelo, de plástico o de caucho. Determinación de las variaciones dimensionales tras un ensayo de envejecimiento acelerado.
UNE-EN 1841:2000	Adhesivos. Métodos de ensayo de adhesivos para revestimientos de suelos y paredes. Determinación de las variaciones dimensionales de un revestimiento de linóleo en contacto con un adhesivo.
UNE-EN 1902:2000	Adhesivos. Métodos de ensayo de adhesivos para revestimientos de suelos y paredes. Ensayo de deformación progresiva por tensión de cizallamiento.
UNE-EN 12706:2000	Adhesivos. Métodos de ensayo de morteros para igualado y/o nivelado de suelos de fraguado hidráulico. Determinación de las características de flujo.
UNE-EN ISO 9664:1996	Adhesivos. Métodos de ensayo para la resistencia a la fatiga por esfuerzo de cizalla de adhesivos estructurales. (ISO 9664:1993).
UNE-EN 828:2013	Adhesivos. Mojabilidad. Determinación por medida del ángulo de contacto y de la tensión superficial crítica de la superficie sólida.
UNE-EN 14510:2005	Adhesivos para cuero y materiales para calzado. Adhesivos en base disolvente y en dispersión. Determinación de la pegajosidad para el posicionamiento de pisos (pegajosidad localizada)
UNE-EN 12964:2001	Adhesivos para cuero y materiales para calzado. Adhesivos para montado. Ensayo de resistencia al calor de las uniones a temperatura creciente.
UNE-EN 12705:2011	Adhesivos para cuero y materiales para calzado. Determinación del cambio de color de superficies de cuero blanco o de colores claros por migración.
UNE-EN 15416-2:2008	Adhesivos para estructuras de madera bajo carga distintos a los del tipo fenólico y aminoplástico. Métodos de ensayo. Parte 2: Ensayo de carga estática de probetas con línea de pegado múltiple en cizalla por compresión.
UNE-EN 15416-3:2008+A1:2010	Adhesivos para estructuras de madera bajo carga distintos a los del tipo fenólico y aminoplástico. Métodos de ensayo. Parte 3: Ensayo de deformación en fluencia bajo condiciones climáticas cíclicas con probetas cargadas en cizalla por flexión.
UNE-EN 15416-4:2007	Adhesivos para estructuras de madera bajo carga distintos a los del tipo fenólico y aminoplástico. Métodos de ensayo. Parte 4: Determinación del tiempo de ensamblado abierto para adhesivos de poliuretano de un componente.
UNE-EN 15416-5:2007	Adhesivos para estructuras de madera bajo carga distintos a los del tipo fenólico y aminoplástico. Métodos de ensayo. Parte 5: Determinación del tiempo convencional de presión.
UNE-EN 12436:2002	Adhesivos para madera de uso estructural. Adhesivos de caseína. Clasificación y requisitos de aptitud a la función.

UNE-EN 302-1:2013	Adhesivos para madera de uso estructural. Métodos de ensayo. Parte 1: Determinación de la resistencia al cizallamiento por tracción longitudinal.
UNE-EN 302-2:2013	Adhesivos para madera de uso estructural. Métodos de ensayo. Parte 2: Determinación de la resistencia a la delaminación.
UNE-EN 302-3:2013	Adhesivos para madera de uso estructural. Métodos de ensayo. Parte 3: Determinación del efecto del ataque ácido a las fibras de madera debido a los tratamientos cíclicos de temperatura y humedad sobre la resistencia a la tracción transversal.
UNE-EN 302-4:2013	Adhesivos para madera de uso estructural. Métodos de ensayo. Parte 4: Determinación de la influencia de la contracción de la madera sobre la resistencia al cizallamiento.
UNE-EN 302-5:2013	Adhesivos para madera de uso estructural. Métodos de ensayo. Parte 5: Determinación del tiempo de ensamblado convencional en condiciones de referencia.
UNE-EN 302-6:2013	Adhesivos para madera de uso estructural. Métodos de ensayo. Parte 6: Determinación del tiempo mínimo de prensado en condiciones de referencia.
UNE-EN 302-7:2013	Adhesivos para madera de uso estructural. Métodos de ensayo. Parte 7: Determinación de la vida útil en condiciones de referencia.
UNE-EN 14256:2007	Adhesivos para madera de uso no estructural. Método de ensayo y requisitos para la resistencia a la carga estática.
UNE-EN 12960:2001/ AC:2007	Adhesivos para papel y cartón, embalaje y productos sanitarios desechables. Determinación de la resistencia a la cizalla.
UNE-EN 12960:2001	Adhesivos para papel y cartón, embalaje y productos sanitarios desechables. Determinación de la resistencia a la cizalla.
UNE-EN 12703:2012	Adhesivos para papel y cartón, embalajes y productos higiénicos desechables. Determinación de la flexibilidad a baja temperatura o de la temperatura de fisura en frío.
UNE-EN 12704:2012	Adhesivos para papel y cartón, embalajes y productos higiénicos desechables. Determinación de la formación de espuma en adhesivos acuosos.
UNE-EN 1720:2000	Adhesivos para papel y cartón, embalajes y productos sanitarios desechables. Determinación de la capacidad de dispersión
UNE-EN 1896:2001	Adhesivos para papel y cartón, embalajes y productos sanitarios desechables. Determinación de la resistencia a la tracción y del alargamiento.
UNE-EN 12702:2000	Adhesivos para papel y cartón, embalajes y productos sanitarios desechables. Determinación del comportamiento de bloqueo de capas potencialmente adhesivas.
UNE-EN 1721:2000	Adhesivos para papel y cartón, embalajes y productos sanitarios desechables. Medida de la pegajosidad de adhesivos sensibles a la presión. Determinación

	de la pegajosidad de una esfera.
UNE-EN 1895:2002/AC:2007	Adhesivos para papel y cartón, envases y embalajes y productos sanitarios desechables. Ensayo de pelado en "T" a 180º para una unión encolada de adherente flexible sobre flexible.
UNE-EN 1895:2002	Adhesivos para papel y cartón, envases y embalajes y productos sanitarios desechables. Ensayo de pelado en "T" a 180º para una unión encolada de adherente flexible sobre flexible.
UNE-EN 1719:2000	Adhesivos para papel y cartón, envases y productos sanitarios desechables. Medida de la pegajosidad de los productos adhesivos sensibles a la presión. Determinación de la pegajosidad de un bucle.
UNE-EN 15062:2007	Adhesivos para piel y materiales para calzado. Adhesivos en base disolvente y en dispersión. Ensayos de envejecimiento de las uniones en condiciones especificadas.
UNE-EN 1392:2007	Adhesivos para piel y materiales para calzado. Adhesivos en base disolvente y en dispersión. Métodos de ensayo para medir la resistencia de la unión en condiciones específicas.
UNE-EN 12961:2001	Adhesivos para piel y materiales para calzado. Determinación de las temperaturas óptimas de activación y de la vida útil hasta activación de los adhesivos en base disolvente y en dispersión.
UNE-EN 12961:2001/A1:2005	Adhesivos para piel y materiales para calzado. Determinación de las temperaturas óptimas de activación y de la vida útil hasta activación de los adhesivos en base disolvente y en dispersión.
UNE-EN 14294:2010	Adhesivos para piel y materiales para calzado. Preparación de probetas unidas mediante procesos de moldeo directo.
UNE-EN 15307:2015	Adhesivos para piel y materiales para calzado. Uniones corte-piso. Requisitos mínimos de resistencia.
UNE-EN 14259:2004	Adhesivos para revestimientos de suelos. Requisitos mecánicos y eléctricos de aptitud al uso.
UNE-EN 14814:2007	Adhesivos para sistemas de canalización de materiales termoplásticos para fluidos líquidos a presión. Especificaciones.
UNE-CEN/TS 14999:2006 EX	Adhesivos para sistemas de canalización en materiales termoplásticos. Ensayo de envejecimiento acelerado de adhesivos.
UNE-EN ISO 15908:2003	Adhesivos para sistemas de canalización en materiales termoplásticos. Método de ensayo para determinar la estabilidad térmica de los adhesivos. (ISO 15908:2002)
UNE-EN ISO 9311-1:2006	Adhesivos para sistemas de canalización en materiales termoplásticos. Parte 1: Determinación de las propiedades de película (ISO 9311-1:2005)
UNE-EN ISO	Adhesivos para sistemas de canalización en materiales termoplásticos. Parte

9311-2:2011	2: Determinación de la resistencia al cizallamiento. (ISO 9311-2:2011)
UNE-EN ISO 9311-3:2005	Adhesivos para sistemas de canalización en materiales termoplásticos. Parte 3: Métodos de ensayo para la determinación de la resistencia a la presión interna. (ISO 9311-3: 2005)
UNE-EN 14680:2007	Adhesivos para sistemas de canalización en materiales termoplásticos sin presión. Especificaciones.
UNE-EN 923:2006+A1 :2008	Adhesivos. Términos y definiciones.
UNE-EN ISO 10363:1996	Adhesivos termofusibles. Determinación de la estabilidad térmica. (ISO 10363:1992).
UNE-EN ISO 15605:2004	Adhesivos. Toma de muestras. (ISO 15605:2000)
UNE-EN 12765:2002	Clasificación de adhesivos termoendurecibles para madera de uso no estructural.
UNE-EN 204:2002	Clasificación de adhesivos termoplásticos para madera de uso no estructural.
UNE-EN ISO 11600:2005	Edificación. Productos para juntas. Clasificación y requisitos para sellantes. (ISO 11600: 2002)
UNE-EN ISO 11600:2005/ A1:2011	Edificación. Productos para juntas. Clasificación y requisitos para sellantes. (ISO 11600: 2002/Amd 1:2011)
UNE-EN ISO 8394-1:2011	Edificación. Productos para juntas. Parte 1: Determinación de la extrusionabilidad de los sellantes. (ISO 8394-1:2010)
UNE-EN ISO 8394- 2:2011/AC:2 011	Edificación. Productos para juntas. Parte 2: Determinación de la extrusionabilidad de los sellantes usando aparatos normalizados. (ISO 8394-2:2010)
UNE-EN ISO 8394-2:2011	Edificación. Productos para juntas. Parte 2: Determinación de la extrusionabilidad de los sellantes usando aparatos normalizados. (ISO 8394-2:2010)
UNE-EN ISO 10563:2006	Edificación. Sellantes. Determinación de la variación de masa y volumen. (ISO 10563:2005).
UNE-EN 13415:2010	Ensayos de adhesivos para revestimientos de suelo. Determinación de la resistencia eléctrica de películas y compuestos adhesivos.
UNE-CEN/TR 15990:2011 IN	Fichas técnicas. Materiales y adhesivos de referencia para ensayos en calzado.

UNE-EN 2243-1:2006	Material aeroespacial. Materiales no metálicos. Adhesivos estructurales. Métodos de ensayo. Parte 1: Ensayos de cizalla de una junta solapada simple.
UNE-EN 2243-2:2006	Material aeroespacial. Materiales no metálicos. Adhesivos estructurales. Métodos de ensayo. Parte 2: Pelado de metal-metal
UNE-EN 2243-3:2006	Material aeroespacial. Materiales no metálicos. Adhesivos estructurales. Métodos de ensayo. Parte 3: Ensayo de pelado metal-núcleo de nido de abeja.
UNE-EN 2243-4:2006	Material aeroespacial. Materiales no metálicos. Adhesivos estructurales. Métodos de ensayo. Parte 4: Ensayo de tracción perpendicular para metal-núcleo de nido de abeja.
UNE-EN 2243-5:2006	Material aeroespacial. Materiales no metálicos. Adhesivos estructurales. Métodos de ensayo. Parte 5: Ensayos de envejecimiento.
UNE-EN 2243-6:2006	Material aeroespacial. Materiales no metálicos. Adhesivos estructurales. Métodos de ensayo. Parte 6: Determinación del tensado y de la deformación de *cizallamiento.*
UNE-EN 13408:2002	Métodos de ensayo de morteros para igualado y/o nivelado de suelos de fraguado hidráulico. Determinación de la resistencia de la unión.
UNE-EN 13409:2002	Métodos de ensayo de morteros para igualado y/o nivelado de suelos de fraguado hidráulico. Determinación del tiempo de fraguado.
UNE-EN 1937:2000	Métodos de ensayo de morteros para igualado y/o nivelado de suelos de fraguado hidráulico. Procedimientos de preparación de las mezclas.
UNE-EN 13872:2004	Métodos de ensayo de morteros para igualado y/o nivelado. Determinación de la contracción.
UNE-EN 15651-1:2012	Sellantes para uso no estructural en juntas en edificios y zonas peatonales. Parte 1: Sellantes para elementos de fachada.
UNE-EN 15651-2:2012	Sellantes para uso no estructural en juntas en edificios y zonas peatonales. Parte 2: Sellantes para acristalamiento.
UNE-EN 15651-3:2012	Sellantes para uso no estructural en juntas en edificios y zonas peatonales. Parte 3: Sellantes para juntas sanitarias.
UNE-EN 15651-4:2012	Sellantes para uso no estructural en juntas en edificios y zonas peatonales. Parte 4: Sellantes para zonas peatonales.
UNE-EN 15651-5:2012	Sellantes para uso no estructural en juntas en edificios y zonas peatonales. Parte 5: Evaluación de la conformidad y marcado.
UNE-EN 15434:2007+ A1:2010	Vidrio para la edificación. Norma de producto para sellante estructural y/o resistente a rayos ultravioletas (para uso con acristalamiento con sellante estructural y/o unidades de vidrio aislante con sellados expuestos).