

Proyecto Fin de Carrera

Grado en Ingeniería Aeroespacial

Diseño Preliminar de la parte Electromagnética del Calorímetro del CMS

Autor: Pablo Reguera Durán

Tutor: Sergio Esteban Roncero

Tutor: Hubert Gerwig

Dpto. Vehículos Aeroespaciales
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



Proyecto Fin de Carrera
Grado en Ingeniería Aeroespacial

Diseño Preliminar de la parte Electromagnética del Calorímetro del CMS

Autor:
Pablo Reguera Durán

Tutor:
Sergio Esteban Roncero
Profesor titular

Tutor:
Hubert Gerwig
CERN

Dpto. de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2018

Proyecto Fin de Carrera: Diseño Preliminar de la parte Electromagnética del Calorímetro del CMS

Autor: Pablo Reguera Durán

Tutor: Sergio Esteban Roncero

Tutor: Hubert Gerwig

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2013

El Secretario del Tribunal

*A mi madre Lola
y a mi padre Manuel*

Agradecimientos

Este proyecto no hubiera sido posible sin el apoyo de mis tutores. Siempre estaré agradecido a Sergio Esteban por mantener su confianza en mí durante estos años. Agradezco a mi tutor en el CERN Hubert Gerwig, por enseñarme cómo funciona la ingeniería y por su espíritu de positivismo. Junto a él, al equipo de trabajo del edificio 505 del que he aprendido y con el que he crecido profesionalmente este año.

En especial, agradecer a mi madre su apoyo incondicional durante estos años, ya que este proyecto es fruto también de su esfuerzo y su amor. A mi padre, por enseñarme el camino de la ingeniería y a entender la vida. Y a mi abuela, por hacerme ver con su naturalidad de donde vengo, haciéndome sentir hacia donde quiero ir.

Agradezco a mis profesores y compañeros de la Escuela Superior de Ingeniería de Sevilla, donde me he formado como ingeniero y como persona durante todos estos años.

Para finalizar, a mi familia, de Utrera y Sevilla, por siempre hacerme sentir en casa, mencionar a Cristina Vázquez por enseñarme con su actitud a enfrentarme a los nuevos retos, a Sara Benítez, por enseñarme a pensar con otros puntos de vista y en especial, a la familia que se elige, los Rangers.

Pablo Reguera Durán

Sevilla, 2018

Resumen

Mediante el presente proyecto se ha mostrado el enfoque del estudio preliminar de la parte electromagnética del Calorímetro situado dentro del detector CMS o “Compact Muon Solenoid” centrandose en el análisis mecánico y sirviendose de las herramientas de diseño y simulación asistidos por ordenador como son CATIA V5 y ANSYS workbench 18.2.

Se abarcará la totalidad del texto mediante su división en tres secciones.

En el primer capítulo, como base introductoria, se explica donde está situado este proyecto y en qué fase del producto se encuentra. Así, se aborda este primer capítulo yendo desde el proyecto High Luminosity como desencadenante hasta llegar al centro del CMS, donde se encuentra la parte del calorímetro en la que se centra este trabajo.

En el segundo capítulo se resaltan los principales componentes del Calorímetro, focalizando en los detalles mecánicos. Así, se razona las nuevas decisiones de diseño en base a las características intrínsecas del calorímetro: Temperatura de operación, radiación ambiente, etc. Además, se adopta la fase inicial del ensamblado entre las diferentes partes de este, valorando diferentes tipos de uniones. Se iniciarán los estudios preliminares mecánico-térmicos mediante simulaciones a través de software para cálculos FEA.

En el último capítulo en la que se divide el cuerpo del trabajo se detalla la evolución del diseño CAD del CE-E. A través del modelo dinámico se dimensiona el CE-E gracias a las conjeturas adoptadas en el capítulo anterior. Finalmente, se obtendrá el modelo 3D del CE-E.

Se finalizará con los siguientes pasos a realizar sobre el diseño del CE-E, abandonando un diseño preliminar para adentrarse en uno avanzado.

Prefacio

A través de la inquietud y motivación personal en busca de nuevos conocimientos que ampliaran la base de mis estudios de grado en el ámbito del diseño gráfico y del cálculo y simulaciones, se encuentra la oportunidad de contribuir en un proyecto el cuál permitiría el desarrollo y aprendizaje de estas herramientas computacionales.

Se produce el desplazamiento, con la colaboración de la Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla, a uno de los centros tecnológicos punteros punteros por excelencia a nivel mundial: CERN. Un complejo científico situado entre las Montañas del Jura (Francia) y el Lago Léman (Suiza), comúnmente situado en Ginebra, capital Suiza, donde trabajan más de 15.000 personas a nivel mundial.

Desde su formación en 1954 gracias a la unión de diferentes estados europeos y con el objetivo del estudio nuclear con fines científicos, numerosos estudios y avances tecnológicos, así como descubrimientos han tenido lugar en estas instalaciones, desde herramientas como el primer sitio web hasta el descubrimiento del Bosón de Higgs, partícula con la que a través del Modelo estandar de partículas podemos entender cómo se compone la materia.

Estos avances han sido posibles debido a los diferentes experimentos desarrollados durante los años, partiendo desde el primer acelerador de partículas, el «Synchrocyclotron» allá por 1957 hasta la estrella insignia actualmente, el LHC. Un conducto de 27 km de perímetro, de forma circular, compuesto por más de 1300 imanes, enterrado a 100 metros de profundidad, donde se aceleran partículas subatómicas hasta valores próximos a la velocidad de la luz para luego hacerlos colisionar en determinados puntos donde están colocados experimentos los cuales captan el resultado de dichas colisiones.

Aquí se llega al CMS, uno de los cuatro experimentos situados actualmente en uno de los puntos de colisión del LHC y donde discurrirá el trabajo realizado en este proyecto.

Índice

Agradecimientos	9
Resumen	10
Prefacio	11
Índice	12
Índice de Tablas	14
Índice de Figuras	15
1 Introducción	18
1.1 Contexto	18
1.2 Actualización	22
1.2.1 High Luminosity LHC	22
1.2.2 Proyecto: HGAL	23
1.2.3 CE-E y objetivos	24
2 Electromagnetic calorimeter CE-E	25
2.1 Características del CE-E	26
2.2 Elementos estructurales que forman el CE-E	27
2.2.1 Módulo Hexagonal	27
2.2.2 Copper Plate	33
2.2.3 Absorbentes	45
2.2.4 Cono Soporte	50
2.3 Ensamblado	53
2.3.1 Módulo Hexagonal – Placa de cobre	53
2.3.2 Absorbente – Placa de cobre	56
2.3.3 Casete - Cone	57
3 Modelo Catia	61
3.1 Introducción	61
3.2 Modelo Esqueleto	62
3.2.1 Parametrización	62
3.2.2 Publicaciones	64
3.2.3 Modo caché	65
3.3 Diseño CE-E	66
3.3.1 Modelo Dinámico Del Casete	67
3.3.3 placa de cobre	71
3.3.4 Incorporación de elementos al Casete.	74
3.3.5 Absorbentes	75
3.3.6 Modelo Casete ensamblado	77
3.4 Ensamblaje Elementos CE-E	78
4 Futuros Pasos	81

5 Conclusiones	83
Bibliografía	85
Glosario	86
Anexos	87

ÍNDICE DE TABLAS

Table 1: Propiedades del Módulo hexagonal (Material)	28
Table 2: Variación de temperaturas máximas dependiendo del tiempo para 3 casos de espacio entre tubería y placa de cobre: a) No gap, b) 0.2 mm gap, c) 0.1mm gap	42
Table 3: Máxima temperatura en disco soporte durante el enfriamiento	43
Table 4: Propiedades físicas materiales tuberías	44
Table 5: Propiedades físicas Absorbente	47
Table 6: Dimensiones de los casetes desde el eje del cono soporte.	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figure 1 : Distribución de aceleradores y detectores	19
Figure 2: Imagen 3D CAD del CMS, situado en el interior de la caverna	20
Figure 3: Trazas de colisiones en el interior del CMS	21
Figure 4: Imagen de uno de los dos Calorímetros del CMS (derecha). Tubo haz de partículas (izquierda)	21
Figure 5: Sección longitudinal del HGCAL (conceptual). CE-E parte Electromagnética. CE-H parte Hadrónica.	23
Figure 6: Diagrama de un módulo hexagonal	26
Figure 7: Módulo Hexagonal CuW75 o Baseplate	27
Figure 8: Contracción producto de la temperatura en el disco.	29
Figure 9: Agujero con holgura	30
Figure 10: Agujero normal	30
Figure 11 : Imagen con pin insertado con la placa de cobre de fondo. Agujero con holgura (izq.), normal (der.)	30
Figure 12: Desplazamiento relativo entre baseplates en la dirección normal a su movimiento	31
Figure 13: Simulación de dos módulos mediante el sistema de fijación Long-Normal hole sobre la placa de cobre	32
Figure 14: Imagen la placa de cobre desprovista de todos los elementos adjuntos	33
Figure 15 : Diferentes cortes de la placa de cobre acorde al módulo hexagonal	34
Figure 16: Concepto “sliding” de unión de casetes	35
Figure 17: visualización de módulos hexagonales sobre los casetes	35
Figure 18: Acceso de tuberías al interior de la placa de cobre	36
Figure 19: Placa prototipo unida por FSW (iqz). Soldadura (der.)	37
Figure 20: Diferentes operaciones de fresado sobre la placa de cobre tras las soldadura por vacuum brazing	38
Figure 21: Imagen general de un sector del calorímetro, incluyendo ambas partes CE-E (inferior) y CE-H (superior).	39
Figure 22: Parte del serpentín refrigerante en el interior de la placa de cobre.	40
Figure 23: mitad del modelo simplificado de una placa de cobre	41
Figure 24: detalle tubería	42
Figure 25: prototipo absorbente, Longitud = 1200mm, Anchura= 400mm	46
Figure 26: Descripción inserción en el prototipo	46
Figure 27: Medición prototipo de absorbente sobre máquina de 3 ejes	46
Figure 28: Modelo de barra.	47
Figure 29 : Simulación deflexión sándwich absorbente	49

Figure 30: Cono soporte versión anillo interior, vista 3D (izq.) y vista perfil (der.)	50
Figure 31: Cono soporte versión integrada, vista 3D (izq) y vista perfil (der.)	50
Figure 32: Distribución de deformaciones en el cono soporte	52
Figure 33: Distribución de tensiones en el cono soporte	52
Figure 34: Diagrama de partes del sistema de fijación ódulo hexagonal-Copperplate.	53
Figure 35: Anillo de tolerancia	54
Figure 36: Insección como parte del sistema de sujección	54
Figure 37: Sección arandela elástica	55
Figure 38: Circlip para ejes DIN471	55
Figure 39: Montaje final sistema de fijación Módulo hexagonal-Coperplate	55
Figure 40: Diagrama de partes del sistema de fijación Absorbente-Placa de cobre.	56
Figure 41: Sección casete	57
Figure 42: Zona de fijación casete – cono soporte	57
Figure 43: Factor de seguridad simulación pines	58
Figure 44: Centro de gravedad del casete	59
Figure 45: Sistema antirotación casetes	60
Figure 46: Knowledge módulo barra de herramientas	62
Figure 47: : Menú fórmula para la edición de parámetros	63
Figure 48: : Ejemplo aplicación parámetros y localización en el árbol	63
Figure 49: Menú Publication. A base de ejemplo hemos publicado Sketch.1.	64
Figure 50: Cómo vincular elementos	64
Figure 51: Relación entre Skelletion y part asociado	65
Figure 52: Sección del casete	67
Figure 53: Sketch basepleplate	68
Figure 54: Agujero con Holgura	68
Figure 55: Agujero Normal	68
Figure 56: Rectangular Pattern centro de los Baseplates	70
Figure 57: Sketch Centro Baseplates	70
Figure 58: Paso 4	71
Figure 59: Punto 5	71
Figure 60: Punto 6	72
Figure 61: Detalle agujero soporte	72
Figure 62: Operaciones de agujeros sobre la placa de cobre	72
Figure 63: Distribución sobre la placa de cobre.	73
Figure 64: Tuberías de refrigeración, incluidas en distintos Bodies al de la placa de cobre.	73
Figure 65: Fijación soporte antirrotación	74
Figure 66: Fijación para el cono	74
Figure 67: filtrado de Módulos hexagonales	74

Figure 68: Baseplates Pattern	74
Figure 69: Fijación baseplates	75
Figure 70: Absorbente	76
Figure 71: Absorbente Sketches	76
Figure 72: Absorbente pre perforación	76
Figure 73: Modelo de casete	77
Figure 74: Ejemplo capa del CE-E	78
Figure 76: Sección ensamblaje final CE-E	79
Figure 75:Detalle de dos capas de casetes	79
Figure 77: Diseño final del CE-E	80

1 INTRODUCCIÓN

Origen, Respeto y Valor

- Pablo Reguera -

A Punto de cumplirse diez años desde el primer arranque del LHC (Large Hadron Collider) ya tiene sentadas las bases para recibir una gran actualización para la segunda década del Siglo XXI la cual permitirá aumentar tanto su vida operacional como mejorar la generación de información de las colisiones: “High Luminosity LHC (HL-LHC)”, así es como se llamará al experimento una vez concluyan las actualizaciones realizadas en él durante el parón de colisiones en el acelerador, LS3 (Long Shutdown 3).

1.1 Contexto

Situado al oeste de la ciudad de Ginebra (Suiza) se encuentra el “Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire” o como dicta su acrónimo, CERN. Fundado en 1954 por 12 estados europeos, es el centro de investigación de partículas más grande de Europa, contando con más de 15.000 trabajadores a nivel mundial. Concebido para estudiar fenómenos físicos, por aquél entonces, entender qué había en el interior de un átomo, hoy se trabaja en búsquedas de respuestas a preguntas como: ¿Por qué las partículas tienen masa? ¿De qué está constituida la materia oscura? ¿En qué estado estaba la materia instantes antes del “Big Bang”? ¿Por cuántas dimensiones está compuesto nuestro universo? Entre otras.

Con motivo de las sucesivas preguntas que se iban formulando a lo largo de la historia, nuevos experimentos iban emergiendo en las instalaciones del CERN. Desde el primer acelerador de partículas, el “Synchrocyclotron” en 1957, pasando por el “Super Proton Synchrotron” allá por el 1976 (con un perímetro de 7 km en forma de circunferencia), hasta llegar a la estrella insígena: el LHC.

El LHC se convierte el 10 de septiembre de 2008 en el acelerador de partículas más grande y potente jamás creado. Consiste en un anillo de 27 kilómetros de longitud, formado por más de 1300 dipolos magnéticos por donde se aceleran haces de partículas a velocidades cercanas a la velocidad de la luz. Esta circulación es posible mediante imanes superconductores, enfriados a una temperatura cercana al cero absoluto. Estos haces de partículas circularan en direcciones opuestas a través de dos tubos cerrados al vacío por el interior de los dipolos para que, una vez han alcanzado aproximadamente la velocidad de la luz, enfrenarlos en cuatro puntos estratégicos a lo largo del túnel denominados experimentos o detectores.

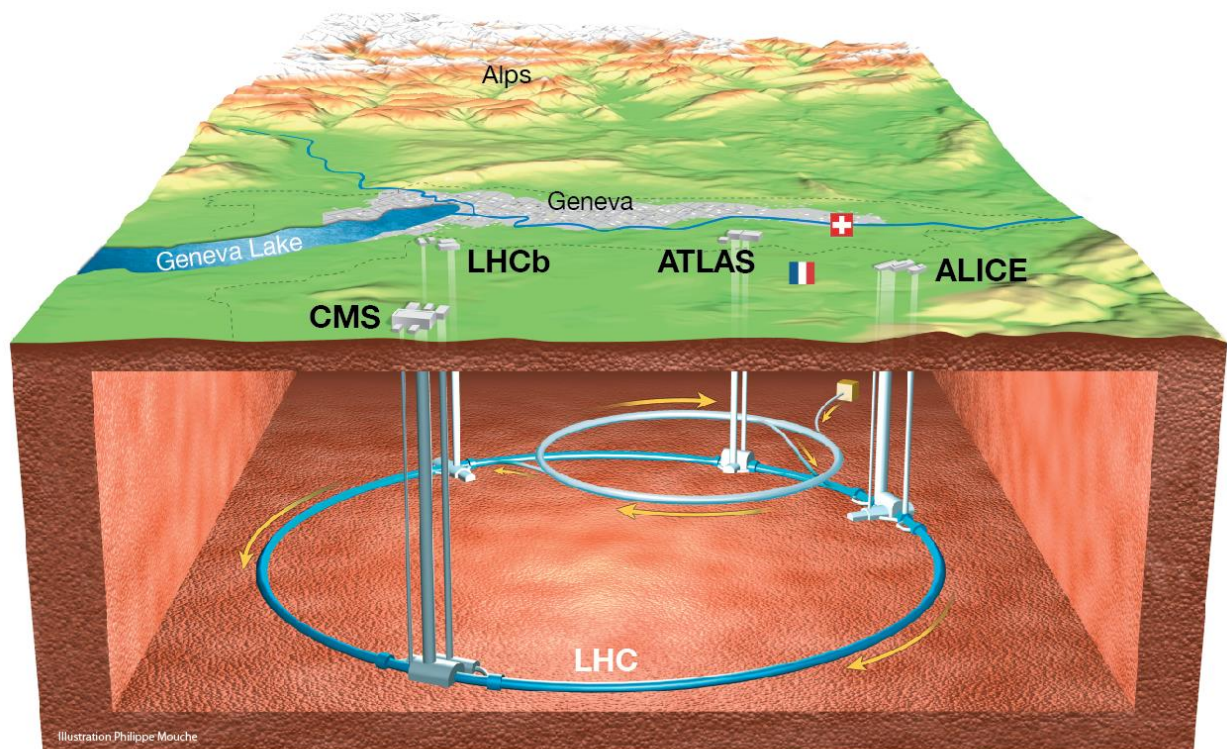


Figure 1 : Distribución de aceleradores y detectores

Estos cuatro grandes detectores son: ATLAS, LHCb, ALICE y CMS. Actúan como si de una cámara de fotografías se tratase, realizando unos 40 millones de fotografías por segundo en el momento de colisión de haces de partículas, discriminando de entre todas las partículas sólo aquellas que interesan debido a diferentes análisis energéticos con los que podemos filtrar el número total de partículas que colisionan. Toda esta información quedará almacenada a través de los más de 100 millones de GB de almacenamiento de memoria para su posterior análisis. Son ATLAS (“A Toroidal LHC ApparatuS”), 7000 toneladas de detector y 46 metros de largo, y CMS (“Compact Muon Solenoid”), 12500 toneladas de detector y 21.6 metros de largo, los más grandes instalados en el LHC. Ambos se encargan de investigar un amplio rango de fenómenos físicos, pudiendo contrastar la información obtenida de ambos detectores. Teniendo estos detectores la misma finalidad, usan diferentes configuraciones de sistemas de imanes: ATLAS está diseñado con un sistema toroidal y como solenoide central, permitiendo a las partículas cargadas desviarse en 3 Direcciones. CMS, tiene un gran solenoide superconductor, desviando las partículas sólo en el plano transversal al superconductor y no en la dirección longitudinal simplificando el rastreo de las mismas.

En el punto más alejado a nuestras oficinas, cerca del pueblo Cessy (Francia), se sitúa la entrada al complejo donde se sitúa la entrada al ascensor que lleva a la caverna, a unos 100 metros bajo la superficie, donde se sitúa el CMS. Este detector, en forma cilíndrica (21.5 metros de largo y 7.5 metros de radio) está diseñado para crear un campo magnético de 4 Tesla (aproximadamente cien mil veces el campo magnético terrestre).

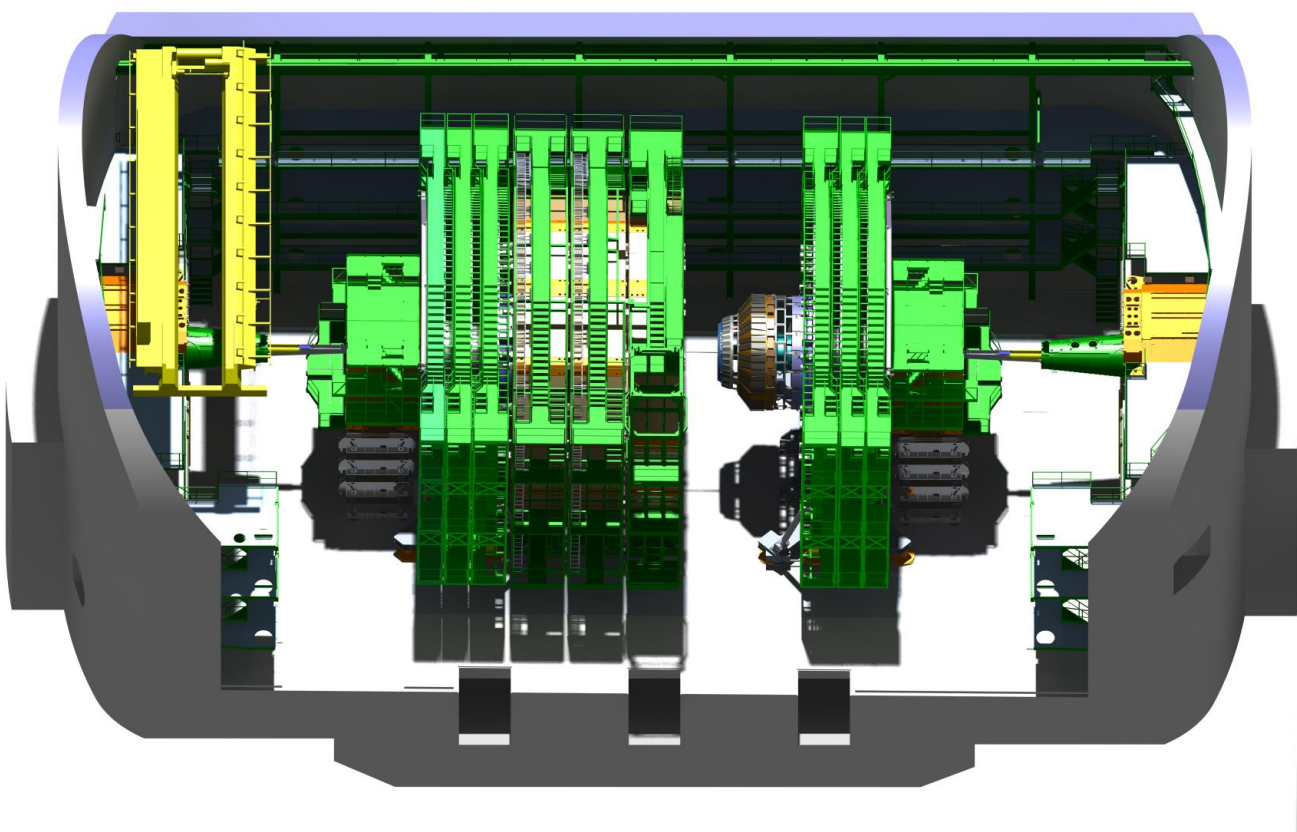


Figure 2: Imagen 3D CAD del CMS, situado en el interior de la caverna

Con este campo magnético se persigue curvar las trayectorias de las partículas una vez han colisionado, siendo aquellas partículas¹ con menos momento las que más se desvían de su trayectoria recta. Para reconocer y estudiar estas trayectorias encontramos distintos mecanismos y sistemas dentro de los detectores como son: sistemas de rastreo, de identificadores de partículas y calorímetros. Los primeros revelan las trayectorias de las partículas eléctricamente cargadas, dejando señales a su paso por distintos sensores para luego ser reconstruidas. Para identificar las diferentes partículas y saber qué está ocurriendo dentro del detector se recurre al análisis de radiación emitida por dichas partículas cuando atraviesan diferentes medios y también dependiendo de la radiación que emiten dependiendo de la velocidad a la que se desplazan. Luego se contrastará toda la información con las diferentes teorías para así conocer qué partículas están siendo estudiadas o descubrimiento de nuevas de las que aún no se ha teorizado. Ya en el centro del detector, en una de las partes más cercana a los tubos por donde circulan los haces de partículas, encontramos los Calorímetros.

Cada calorímetro está formado por una serie de discos transversales a la dirección del haz de partícula, con el propósito de frenar y/o parar el avance de estas. Por duplicado, a cada lado de la zona de colisión de las partículas, estos detectores miden la pérdida de energía de éstas, una vez han colisionado, a su paso por sus distintas capas. El tamaño del solenoide superconductor ha sido elegido para permitir que ambos calorímetros quepan en su interior, como puede intuirse en la imagen mostrada a continuación.

¹ Una partícula queda caracterizada por su masa y su momento.



Figure 4: Imagen de uno de los dos Calorímetros del CMS (derecha). Tubo haz de partículas (izquierda)

Atendiendo qué tipo de partícula se va a observar, se divide el Calorímetro en dos partes: “Electromagnetic Calorimeter” o ECAL y “Hadronic Calorimeter” o HCAL. En el ECAL se estudian los electrones y fotones (partículas que interactúan con otras partículas cargadas eléctricamente en la materia) mientras que en el HCAL se estudia la energía de los Hadrones (compuesto por partículas unidas por la fuerza Fuerte, como son los Neutrones y Protones) y cómo interactúan con los núcleos de otros átomos.

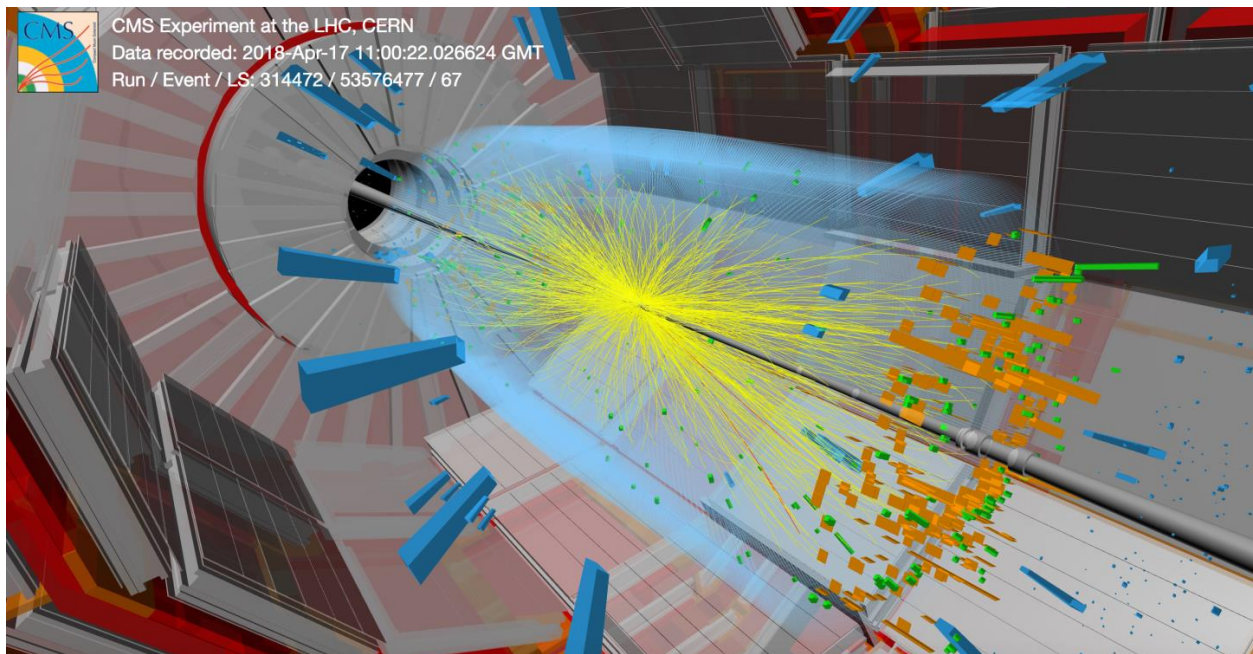


Figure 3: Trazas de colisiones en el interior del CMS

En el ECAL, al ser la parte del calorímetro que se encuentra más cerca de la zona de colisiones, se producen los efectos más nocivos en forma de radiación, el cual es un factor primordial a la hora de elegir los materiales de los que estarán hechos los sensores que estén ahí alojados. Esta limitación, en conjunto con el avance tecnológico, serán los iniciadores de este proyecto.

1.2 Actualización

Para saber el número aproximado de colisiones se apoya en el concepto de Luminosidad: número de eventos por superficie cuadrada por unidad de tiempo. En este caso, se refiere como eventos a colisiones de partículas. Sin embargo, el número de colisiones vendrá determinado dependiendo el tamaño de superficie al que se refiera. Cuánto más pequeña sea la partícula que se quiera impactar, menor área de superficie se busque. A esa superficie la llamamos “Cross Section”. Otra forma de dar esta medida será en eV (“Electron Voltio”). Por lo tanto, el número total de colisiones vendrá dado por el área total de Cross Sections por la Luminosidad. Todo ello referido a una unidad de tiempo. La unidad para referirse a la Luminosidad integrada será la inversa del Barn.

$$1 \text{ BARN} = 10^{-32} \text{ cm}^2$$

El concepto de luminosidad integrada vendrá dado por el número de eventos por superficie de área, integrado en un periodo de tiempo t . Por ello, cuanto más Luminosidad se quiera tener, mayor energía se tendrá que aportar (mayor campo magnético para la desviación de partículas implica una mayor corriente en amperios) así aumentando el número de probabilidad de colisiones protón-protón al focalizar las partículas en secciones más pequeñas.

Desde que se pusiera en marcha el LHC, el aumento de energía, y con ello, el aumento de Luminosidad ha ido aumentando paulatinamente. Desde los 900 GeV allá por 2009 hasta los 14 TeV que se han planeado alcanzarse para 2024, doblando la Luminosidad inicial, pasando de $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ a $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, aumentando el número de colisiones. Estas colisiones protón-protón generan un ambiente de radiación hostil, degradando los distintos sistemas instalados en el detector. Por ello, en la fase de diseño, es un factor clave para calcular la vida operacional del detector.

Los materiales instalados en el calorímetro, tanto en la parte electromagnética como en la hadrónica fueron diseñados para alcanzar una luminosidad acumulada de 500 fb^{-1} , cumpliendo la vida operacional para 2024, donde empezará el LS3 (“Long Shutdown 3”), periodo para instalar las nuevas actualizaciones.

1.2.1 High Luminosity LHC

Tras la parada técnica prevista entre 2024-2026 donde se realizarán las operaciones de evolución de los diferentes sistemas del LHC comenzará la nueva fase: HL-LHC o «High Luminosity Large Hadron Collider».

Se espera alcanzar con esta evolución una luminosidad integrada de 3000 fb^{-1} para 2030, aumentando 5 veces la Luminosidad inicial manteniendo la energía en 14 TeV. Este aumento implica una mayor dosis de radiación recibida en las zonas cercanas al punto de colisión. Siendo Grays (1 Gray equivale a 1 Julio de energía por radiación ionizante por kilogramo de masa) la unidad en el sistema internacional para medir la dosis absorbida procedente de radiaciones ionizantes, pasaremos de cerca de los 200 kGy hasta unos 2 MGy.

Todos estos nuevos condicionantes, junto a nuevos avances para los sistemas de seguimiento de partículas, serán los propulsores para la creación y diseño de un nuevo Calorímetro, que reemplace al actual y que forme parte de la nueva fase HL LHC.

1.2.2 Proyecto: HGICAL

HGICAL o “High Granularity Calorimeter”. Recibe este nombre debido al alto número de celdas que incorporará en sus sensores para la reconstrucción de las trayectorias de partículas. El nuevo calorímetro estará formado en sus dos grandes bloques por 28 capas de sensores en la parte electromagnética y por 24 en la Hadrónica.

Protegido en su parte exterior por una pantalla térmica, en su interior estará abastecido por un sistema de refrigeración para mantener su temperatura óptima de trabajo de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Así, se alargará la vida de sus componentes y se reducirá la señal de ruido de los aparatos electrónicos que incorpora.

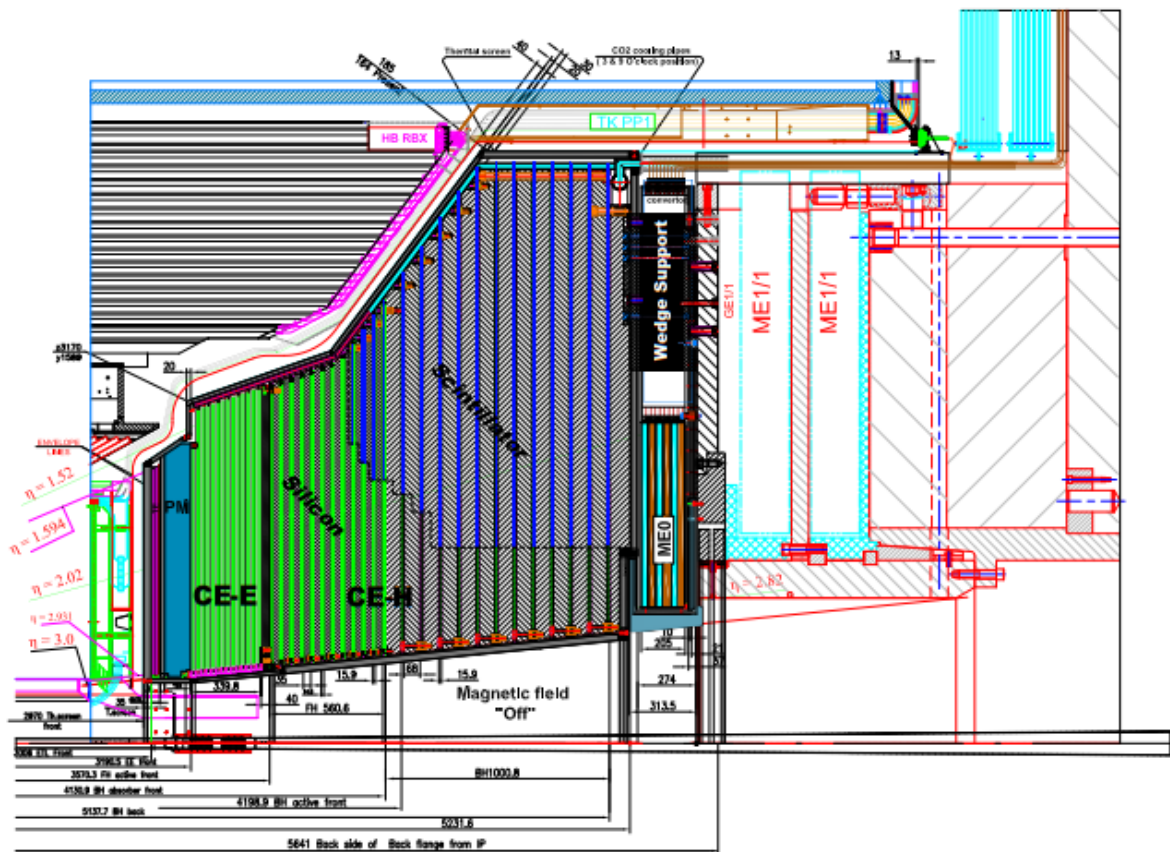


Figure 5: Sección longitudinal del HGICAL (conceptual). CE-E parte Electromagnética. CE-H parte Hadrónica.

En la Figure 5 se observa las distintas partes de las que se forma el calorímetro. A grandes rasgos, de derecha a izquierda, aparecen los grandes subconjuntos de los que se hablará en este trabajo: CE-H, parte Hadrónica del calorímetro (formado por dos tipos de sensores, Silicio y Centelleadores², ambos situados sólo en un lado de la placa refrigeradora), CE-E, parte electromagnética del Calorímetro (formado por un solo tipo de sensores, Silicio, situados a ambas partes de la placa refrigeradora), Moderador de Neutrones³ (se encarga de reducir la velocidad de los neutrones a conforme lo atraviesa). Todos ellos rodeados por una pantalla térmica para controlar la atmosfera interior y proteger los detectores de agentes externos.

² Se ilumina cuando pasa por él radiación ionizante.

³ Afectará al diseño en cuanto al peso, en torno a 60 kg. Para los cálculos usados en este trabajo utilizamos valores de toneladas por lo que va implícito.

1.2.3 CE-E y objetivos

Formo parte de la sección EP (“Experimental Physics Department”) – CMX (“CMS Experiment System Group”) – EI (“Engineering & Integration Section”). Aquí, se tomarán las decisiones adecuadas en cuanto a diseño y simulación del Calorímetro, en base a las necesidades dictadas a la hora de desarrollar los elementos de rastreo y seguimiento de partículas.

Este periodo de diseño, construcción y testado finalizará para 2023, fecha en la deben de estar todos los preparativos finalizados para la instalación en el detector.

Este proyecto se basará en el estudio preliminar y nuevas ideas de la parte electromagnética del Calorímetro: Modelización 3D con software CAD y simulación por componentes y estudio global mediante estudios FEA.

Para la obtención de los modelos 3D se trabaja con el programa informático CATIA V5 (“Computer Aided Three Dimensional Interactive Application”). Gracias a una amplia gama de licencias para esta herramienta, no encontraremos prácticamente ningún obstáculo a la hora de trabajar en cualquiera de sus módulos. Esto permitirá usar conceptos avanzados como diseños parametrizados, uso de publicaciones, el concepto de “Skeleton” (que permitirá a través de un part modificar todos aquellos relacionados con él) y grandes conjuntos ensamblados, con la necesidad de abrir modelos en su versión cgr. También, se hará uso de Smarteam. Base de dato donde se alojan todos los diseños y planos de modelos realizados en el CERN. Será útil a la hora de comprender y situarse en la caverna de CMS, obtener piezas estándares como tornillos, muelles, etc.

Como se verá en el capítulo 3, un objetivo de este proyecto será la realización de un modelo CAD dinámico que permita rápidas modificaciones sobre el diseño para así obtener un modelo 3D de la parte Electromagnética del calorímetro permitiendo así obtener diferentes masas, momentos de inercia, cdg, así como el ensamblaje con otras partes del calorímetro obteniendo una visión global del mismo. Así, se procederá al ensamblado de los grandes conjuntos detallados en el capítulo 2 junto al estudio de su creación en CATIA.

A la hora de realizar simulaciones mecánicas se apoya en el otro gran software usado para este propósito en esta comunidad: ANSYS en su versión 18.2, a través de workbench. Esta nueva versión y forma de interactuar con ansys evitará la necesidad de aprender el lenguaje APDL para realizar simulaciones sencillas y para obtener resultados orientativos acordes con las necesidades del diseño. Como ocurriera con el programa de diseño, un amplio abanico de licencias, como Academic Research, permitirá realizar simulaciones con un alto número de elementos sin problema alguno. Aparte, se accederá a diferentes módulos como cálculos estáticos o térmicos, o dependientes del tiempo. También se tendrá acceso a la herramienta de diseño SpaceClaim, muy útil a la hora de simplificar los modelos que usaremos en estas simulaciones. Más allá de cálculo de deformaciones y tensiones, se probará a realizar análisis topológicos para refinar el diseño de algunos modelos, repartiendo la estructura y la cantidad de material que lo constituye.

Así mismo, en el capítulo 2, Elementos estructurales que forman el CE-E, se tiene como objetivo la realización de los modelos de las distintas partes que conforman el Calorímetro y su simulación bajo determinadas condiciones de contorno que reproduzcan efectos reales sobre estas estructuras. Además, para obtener valores orientativos, se incluyen cálculos a mano que ayude a dimensionar y comparar los resultados obtenidos en las simulaciones FEA.

Todos los conocimientos utilizados para poder realizar estos modelos tienen su base en asignaturas impartidas en la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla, en el grado de Ingeniería Aeroespacial. Además, la realización de cursos en las instalaciones del CERN de ambos programas informáticos, así como de otros conceptos externos a la escuela específicos de estas instalaciones, aportará ese plus de conocimientos capaces de comprender el conjunto de las operaciones que se han realizado. Además, junto al apoyo del profesorado de la Escuela Superior de Ingenieros se ha contado con el respaldo de personal de soporte experto de dichos programas informáticos, junto a estudios de doble comprobación de compañeros situados en institutos colaboradores en París, y cómo no, al equipo de trabajo de la sección aquí en las instalaciones del CERN.

2 ELECTROMAGNETIC CALORIMETER CE-E

*“Chiedete a un bambino di disegnare una macchina,
sicuramente la farà rossa”*

*“Pidele a un niño que dibuje un coche de carreras,
seguro que lo hará rojo”.*

-Enzo Ferrari -

EN forma de tronco de cono aparece la parte electromagnética del calorímetro. Con su base colindando con la parte hadrónica y su parte superior con el “Moderador de Neutrones⁴”, este conglomerado de 23 toneladas pende del resto del calorímetro rodeando al haz de partículas. Todo el volumen estará cerrado bajo una pantalla térmica, creando una atmósfera controlada y refrigerada a -30°C con un sistema de tuberías por donde circula CO_2 en forma bifásica.

El CE-E dimensionado en forma de tronco de cono, **Error! Reference source not found.** (h, r_1, r_2^5) , prácticamente cilíndrico (debido a que el radio exterior de la base difiere en 10 centímetros aproximadamente al de la tapa), siendo $h \cong 400$ mm, $r_1 \cong 320$ mm y $r_2 \cong 1600$ mm, ofrece una visión de planicidad y compactación. Esto es así ya que en su volumen se encuentran más de 14 capas en forma de disco y un número por duplicado de éstas de capas de detectores. Estas catorce capas estarán refrigeradas individualmente por un sistema de tuberías insertadas en su interior y por conductividad térmica se refrigerará el resto del sistema.

Todo el peso del CE-E estará soportado por una estructura en forma de cono con espacio libre en su interior por donde pasa el haz de partículas. Además, servirá como parte fundamental de la fijación de la estructura con la parte hadrónica a través de un disco de separación.

Además, un aspecto a considerar es la elección de materiales a la hora de diseñar la estructura. La elección de las aleaciones en el diseño vendrá limitada por dos factores: el Comportamiento magnético y la activación⁶ del material por absorción de neutrones. Debido al alto campo magnético generado en el solenoide (4 tesla) se evitará todo material ferromagnético en el ensamblaje. En referencia al segundo aspecto, la radiación ionizante debido a la absorción de neutrones provoca la activación de los átomos de los materiales situados en el calorímetro y con ello la emisión de radiación, dañando el resto de componentes. Por ello, se elegirán elementos en las aleaciones con menor actividad posible.

⁴ Moderador de Neutrones: Capa de polietileno situada tras el CE-E, situándose entre el electrocalorímetro y la zona de colisión con el objetivo de reducir el flujo de haces de neutrones ocasionado en la colisión de partículas los cuales perjudicarían la adquisición de datos.

⁵ Tronco de Cono: h (altura), r_1 (radio interior), r_2 (radio exterior)

⁶ Activación: Se refiere a este fenómeno cuando el núcleo de un átomo se vuelve inestable debido a la absorción de otras partículas, en este caso, neutrones. Para volver a un estado estable, liberará energía en forma de masa liberando partículas (radiación). Dependiendo la velocidad con la que se produce este fenómeno, se reconocerá que un material tiene más actividad.

2.1 Características del CE-E

La estructura de la parte electromagnética del calorímetro estará asentada en la aplicación de 14 capas de detectores sobre una estructura de soporte en forma de cono. Cada capa estará subdividida en secciones de 60° o “Cassettes”, Figure 73, para formar el disco final de 360°.

Cada casete estará compuesto por una serie de componentes básicos, esenciales para garantizar la estructura donde irán montados los diferentes sensores. La base del casete estará formada por una placa de cobre o “Copper Plate”. A través de este elemento fijaremos cada casete al cono de soporte garantizando la estabilidad de cada capa. Esta placa de cobre es a su vez la fuente de refrigeración del sistema ya que por su interior la recorrerán pequeñas tuberías de Acero Inoxidable de un diámetro inferior a medio centímetro por el que circulará CO_2 en forma bifásica a una temperatura cercana a los -35°C.

Fijados sobre la placa de cobre encontraremos los módulos de detector de Silicio, ver Figure 67. Como se observa en la imagen (derecha) lo forman cuatro capas. La primera capa, Cu/W Base plate (Aleación tungsteno/ Cobre) sirve de soporte y es a través de la cual podremos fijar el módulo a la placa de cobre. La segunda, Kapton-Gold⁷, con la que garantizaremos aislamiento eléctrico del sensor a bajas temperaturas. Esta capa irá pegada al módulo hexagonal con epoxy. La tercera capa es el sensor: un cristal de silicio⁸ que contiene en tre 125 y 400 sensores. La cuarta capa será la PCB (“Printed Circuit Board”), donde están incorporados el conjunto de chips de lectura de datos. En el CE-E estos módulos irán ensamblados a cada lado del copperplate, teniendo al final el doble de capas de sensores que de copperplate, 28 y 14 respectivamente.

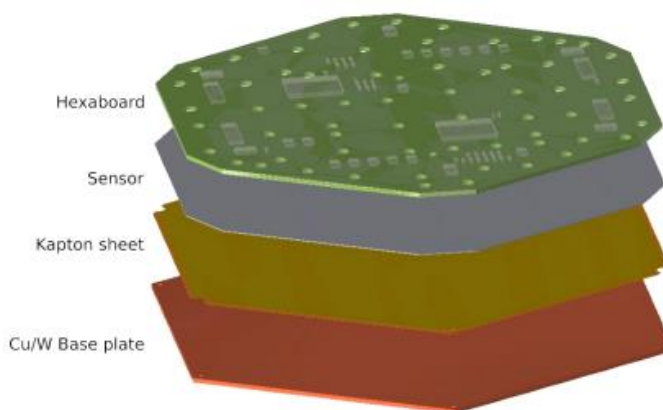


Figure 6: Diagrama de un módulo hexagonal

Anclados a cada lado de la placa de cobre se encuentran los “Absorbers”. Con dimensiones similares a la placa de cobre, cada absorbente estará formado por un sándwich de Acero Inoxidable y Plomo y, en la parte que da cara a los sensores hexagonales, otra capa de PCB (“Motherboard”) con controladores de los lectores situados en los módulos hexagonales. Estos absorbentes llevarán en determinados puntos unas inserciones de acero inoxidable para fijarlos a la placa de cobre (ver Figure 40).

Así, placa de cobre, el conjunto de módulos hexagonales, los dos absorbentes formarían un casete. El conjunto de seis cassetes formaría una capa, de la que se tendrán 14 en el CE-E. Un total de 84 cassetes, de diferente dimensionamiento y con un número distinto de módulos para así maximizar el número de partículas rastreadas.

Todo el peso de estos 84 cassetes, conjuntamente con los distintos servicios (electrónica, cooling...) quedará soportado por una estructura tipo tronco de cono (ver Figure 31). Este cono estará soportando a su vez la capa que separa el CE-E del CE-H o “Backplate” y quedará anclado a la estructura hadrónica del calorímetro.

Una vez caracterizada la estructura de la parte electromagnética del calorímetro se pasará a estudiar el diseño y las propiedades de cada una de ellas, así como características específicas de cada una de ellas.

⁷ Kapton: Es un tipo de polímero el cual se usa para garantizar el aislamiento eléctrico en circuitos.

⁸ El proceso de fabricación de los sensores de silicio es a través de la creación de un monocristal, dimensionado de forma cilíndrica de diámetro el número de pulgadas que se designe. Luego, se corta en pequeñas secciones, obteniendo las distintas rodajas de Silicio.

2.2 Elementos estructurales que forman el CE-E

2.2.1 Módulo Hexagonal

De forma hexagonal para maximizar el apilamiento en unas de las caras de la placa de cobre, las dimensiones del módulo hexagonal vendrán determinadas por las del sensor de silicio. Los investigadores en este campo de partículas determinarán que tamaño es más óptimo, decidiendo entre un diámetro de 6'' u 8'' pulgadas, que equivale a 152,4 o 203.2 milímetros respectivamente. En las esquinas del módulo hexagonal se realizará un «MouseBite» o recorte, para facilitar el sistema de fijación a la placa de cobre.

Siendo uno de los sistemas más críticos del calorímetro, los módulos hexagonales desde su fabricación hasta la zona de ensamblaje han de tener un total seguimiento para evitar cualquier tipo de daño. Para aumentar la rigidez del sistema y para garantizar una buena conductividad térmica entre la placa de cobre y los sensores se introduce una estructura de dimensiones similares al sensor de Silicio, a la que llamaremos “Baseplate” o Módulo Hexagonal.

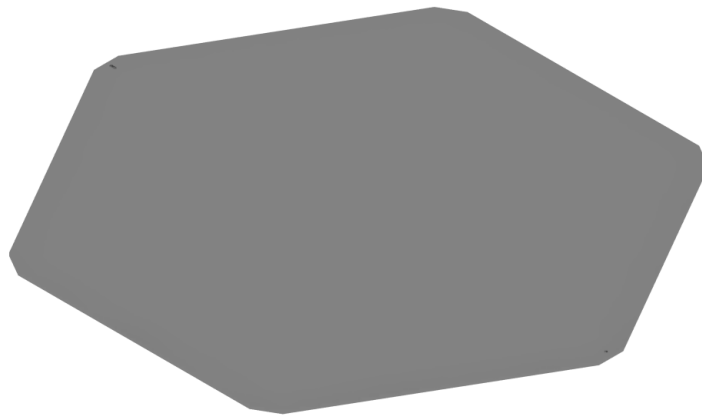


Figure 7: Modulo Hexagonal CuW75 o Baseplate

El criterio para elegir esta aleación está basado en dos principios: Conductividad Térmica y Dilatación Térmica. Conductividad térmica es la capacidad que tiene un material para transferir calor, midiéndose en $W/(m \cdot K)$. Por otro lado, la Dilatación Térmica mide el cambio de tamaño de un material acorde a un incremento de temperatura, midiéndose en $1/^\circ C$.

Eligiendo el material de los módulos hexagonales de cobre como la placa de cobre garantizaría una transmisión de calor eficiente, sin embargo, la dilatación térmica del cobre es 5 veces mayor que la del Silicio, por lo que se puede correr el riesgo de dañar los módulos de silicio debido a una mayor contracción del cobre. Al querer garantizar el menor desplazamiento relativo entre el módulo hexagonal y el módulo de Silicio, pero a su vez garantizar buena conductividad térmica se introduce Tungsteno (Wolframio) para obtener la aleación CuW75: 25% Cu–75% W.

Table 1: Propiedades del Módulo hexagonal (Material)

Material	Conductividad Térmica		Dilatación Térmica
Cu	401	W/(m · K) ⁹	16,5 · 10 ⁻⁶ 1/°C
CuW75	180	W/(m · K)	8,5 · 10 ⁻⁶ 1/°C
Si	105	W/(m · K)	2,49 · 10 ⁻⁶ 1/°C

Ahora, la dilatación térmica prácticamente no supondrá un problema entre la base y el sensor de Silicio, pero sí entre el módulo hexagonal y la placa de cobre a la hora de fijarlos. Por tanto, si no permitimos cierta holgidez para permitir el desplazamiento relativo entre módulo hexagonal y la placa de cobre se encuentran puntos donde las tensiones provocarían fallos en el sistema de fijación.

Esta decisión se basa en las ecuaciones de la termoelasticidad termoelasticidad (ver Bibliografía libro: *Teoría de la Elasticidad*) junto a su correspondiente comprobación en el módulo mecánico de ansys. Por ello, se aplicará sobre un modelo simplificado de una capa de casetes: un disco de cobre (ver Figure 8)¹⁰.

Primero se muestra el cálculo a mano realizado:

Se parte de la ecuación de comportamiento:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1 + \nu}{E} \cdot \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} \cdot \sigma_{kk} + \alpha \cdot T \cdot \delta_{ij} \quad (1)$$

Siendo ε_{ij} el campo de deformaciones, ν coeficiente de poisson¹¹, E el módulo de Young¹², σ_{ij} el campo de tensiones, α el coeficiente de dilatación térmica, T el campo de temperaturas y δ_{ij} la función de Dirichlet. Se realiza un análisis en 2 dimensiones por lo que se define el campo de deformaciones y tensiones en los ejes x e y, donde i y j tomarán esos valores.

En este análisis se busca la menor incidencia externa, sólo el efecto de la contracción térmica. Así, no se tienen en cuenta cargas externas ni el efecto gravitatorio. Además, se permitirá el total desplazamiento en el plano xy por lo que el campo de tensiones será nulo:

$$\sigma_{ij} = 0 \quad (2)$$

Sustituyendo la ecuación $\sigma_{ij} = 0$ (2) en $\varepsilon_{ij} = \frac{1+\nu}{E} \cdot \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} \cdot \sigma_{kk} + \alpha \cdot T \cdot \delta_{ij}$ (1) se obtiene que el campo de deformaciones es:

$$\varepsilon_{ij} = \alpha \cdot T \cdot \delta_{ij} \rightarrow \varepsilon_{ij} = \begin{pmatrix} \alpha T & 0 \\ 0 & \alpha T \end{pmatrix} \quad (3)$$

Para obtener los desplazamientos en cualquier punto (x, y) del disco se recurre a la relación Deformación – Desplazamientos:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \cdot (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (4)$$

Se introduce el campo de deformaciones (3) en la relación (4):

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x} = \alpha T ; \varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y} = \alpha T \quad (5)$$

⁹ Valores obtenidos a temperatura ambiente, 25°C

¹⁰ Se observa solo un cuarto de disco para la simulación (Simetría respecto a los dos ejes, tanto vertical como horizontal)

¹¹ Coeficiente de Poisson: mide el estrechamiento de la sección de un material cuando es estirado longitudinalmente.

¹² Módulo de Young: Caracteriza el comportamiento de un material elástico dependiendo en la dirección que se aplica la fuerza.

A través de la integración de la ecuación 5 para cualquier valor de x o y se obtiene que :

$$u = \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha \cdot T \cdot x \\ \alpha \cdot T \cdot y \end{pmatrix}$$

Se comprueba que todos los puntos del disco a la misma altura x tendrá el mismo desplazamiento en x, sólo variará en y. Este concepto garantiza que fijando los módulos hexagonales en dos puntos en la línea vertical no se tendrá rotación de algún modo de los módulos hexagonales. Al tener diferentes dilataciones térmicas entre los módulos hexagonales y la placa de cobre, sólo se tendrá que fijar uno de los puntos y permitir el desplazamiento vertical en el otro, permitiendo el movimiento relativo (ver Figure 9y Figure 10).

Para contrastar el cálculo a mano se simula el disco de cobre en ansys. Para esta simulación, primero se crea en catia un modelo de disco de cobre, dimensionando de forma aproximada el radio interior como 300mm y el radio exterior como 1600 para obtener un valor orientativo de la contracción del disco. Se carga esta simetría en el módulo de diseño de ansys Design modeler para obtener su plano medio, así poder calcular los desplazamientos en los ejes x e y. Una vez cargada la geometría se abre el módulo mecánico donde se introducen las condiciones de contorno y propiedades. Para esta simulación se introduce una temperatura sobre todo el disco de -35°C. Además, para permitir el libre desplazamiento del disco tanto en el eje x como y se introduce una restricción en el desplazamiento remoto del anillo interior del disco, desde la posición de origen (0,0,0). Junto a esta condición, aplicaremos “frictionless supports” a ambas caras del disco, finalizando las condiciones de contorno.

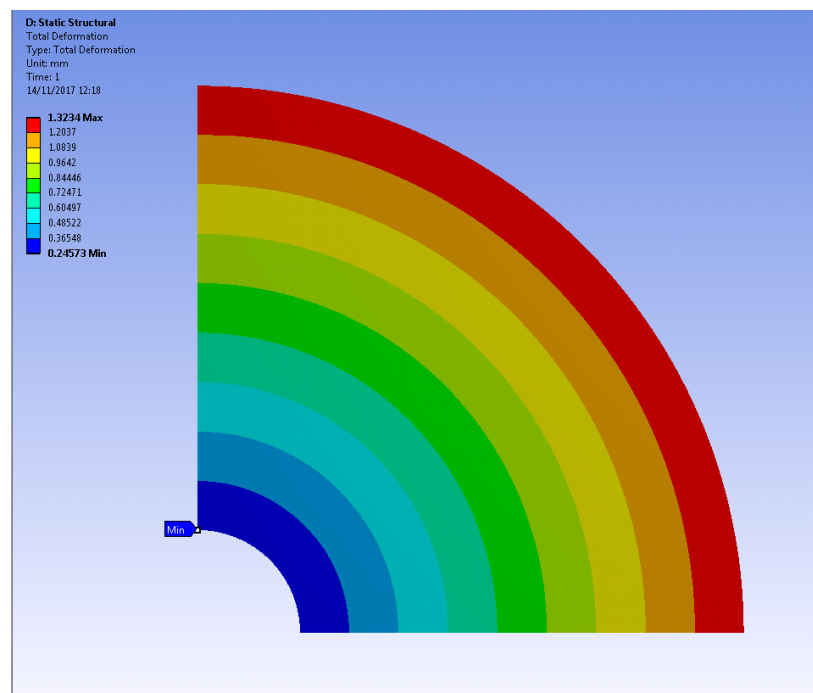


Figure 8: Contracción producto de la temperatura en el disco.

Como se puede observar en la Figure 8 (desplazamientos), al fijar el disco en su posición central, este se contraerá tal y como se observa en la imagen, obteniendo mayores desplazamientos (rojo) en las zonas más alejadas de la fijación. Aquí se encontrará las posiciones más críticas a la hora de calcular el desplazamiento relativo entre módulos hexagonales (ver Figure 12).

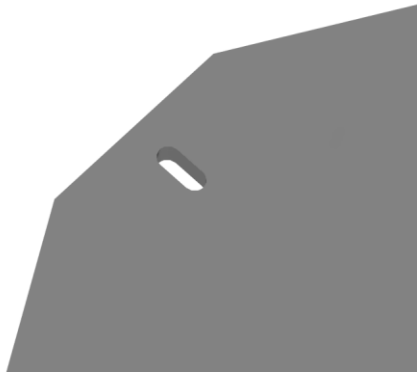


Figure 9: Agujero con holgura

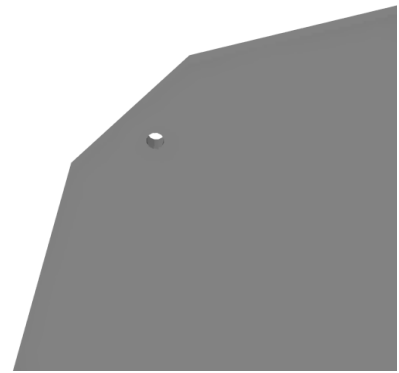


Figure 10: Agujero normal

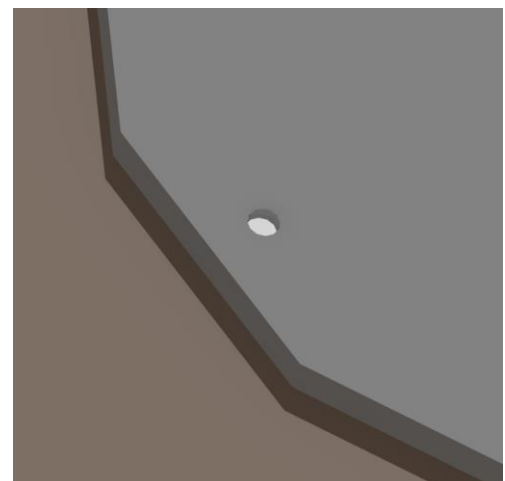
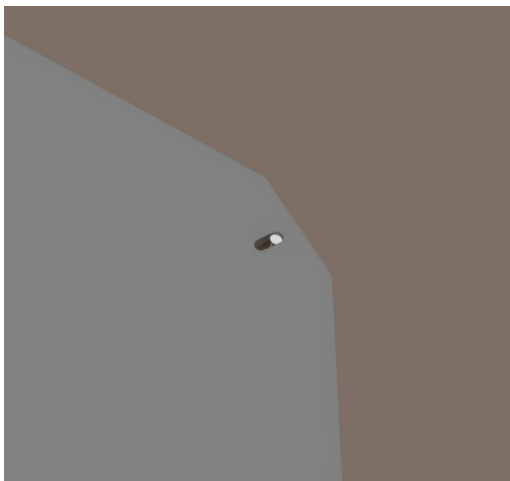


Figure 11 : Imagen con pin insertado con la placa de cobre de fondo. Agujero con holgura (izq.), normal (der.)

Con este sistema de fijación se garantiza el desplazamiento relativo debido a la contracción térmica evitando aumento de tensiones. Existen otras ideas como fijar el módulo hexagonal en el centro y en un extremo. Facilitaría a la hora de tener un punto de referencia para colocar los módulos hexagonales en el copperplate. Sin embargo, significaría colocar un punto de fijación en la parte donde se quiere mejor contacto térmico entre elementos, aparte de cualquier interferencia con el módulo de Silicio, por lo que se descarta dicho diseño.

Debido a la diferencia en el eje vertical del posicionamiento del agujero sin holgura de diferentes módulos hexagonales, existirá un movimiento relativo entre estos al estar situados en distintas alturas en el casete (eje vertical). Como se ve en el modelo CAD (ver Anexos: planos: Insert_Copper_Detail) este aspecto desembocará en permitir cierta tolerancia entre los módulos, garantizando que no se produzca ningún tipo de contacto entre ellos. Este efecto se puede observar a través de la siguiente simulación en ANSYS (ver Figure 11 y Figure 12).

En esta simulación se muestran dos módulos hexagonales fijados sobre una placa de cobre la cual ha sido enfriada a -35°C . Esta vez se hace lo que se llama “coupled analysis”: se transfiere la solución de un módulo de ansys, en este caso, módulo transient thermal a otro, transient mechanical, para así poder aplicar diferentes condiciones de contorno bajo un campo de temperaturas determinado.

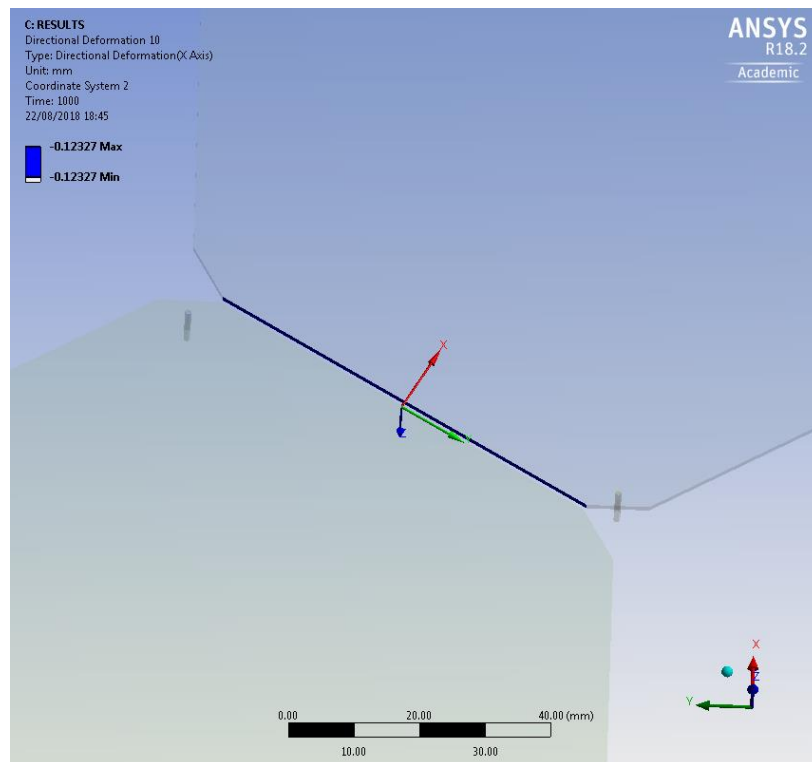


Figure 12: Desplazamiento relativo entre baseplates en la dirección normal a su movimiento

Se quiere determinar un valor orientativo del desplazamiento relativo entre módulos hexagonales para poder estimar el espacio que deberá haber entre módulos¹³.

Como se hiciera con el modelo del disco, se crea la geometría en catia. Como se quiere demostrar la existencia del desplazamiento entre módulos para tener un orden de magnitud, no importa las dimensiones de la placa refrigeradora. Por ello, se crea el modelo mostrado en la Figure 13. Este engloba: dos módulos hexagonales, placa de cobre de refrigeración y cuatro pines de fijación de los módulos hexagonales.

Una vez creada, se importa al módulo transient thermal de ansys donde se simulará el descenso de temperaturas hasta los -30°C del sistema. Cuando haya finalizado, se importarán las temperaturas en función del tiempo al módulo transient mechanical, donde se le aplicarán las condiciones de contorno.

Un aspecto clave de esta simulación serán los contactos. En sta simulación se necesitan tres tipos de contactos:

- No separation: entre los módulos hexagonales y la placa de cobre. Este contacto permite el desplazamiento relativo debido a la contracción térmica entre módulos y placa de cobre y a la vez garantiza el contacto térmico entre ambos, evitando la separación entre ellos.
- Bonded: Ancla los pines a la placa de cobre evitando el desplazamiento entre ambos.
- Frictionless: el contacto correcto sería Frictional, pero para esta simulación será suficiente debido a que la fricción entre pin y módulo es irrelevante. Mediante este contacto se permite el desplazamiento pin-módulo co n límites en el desplazamiento.

¹³ Este parámetro se llamará Ease en nuestro modelo dinámico: Capítulo 3

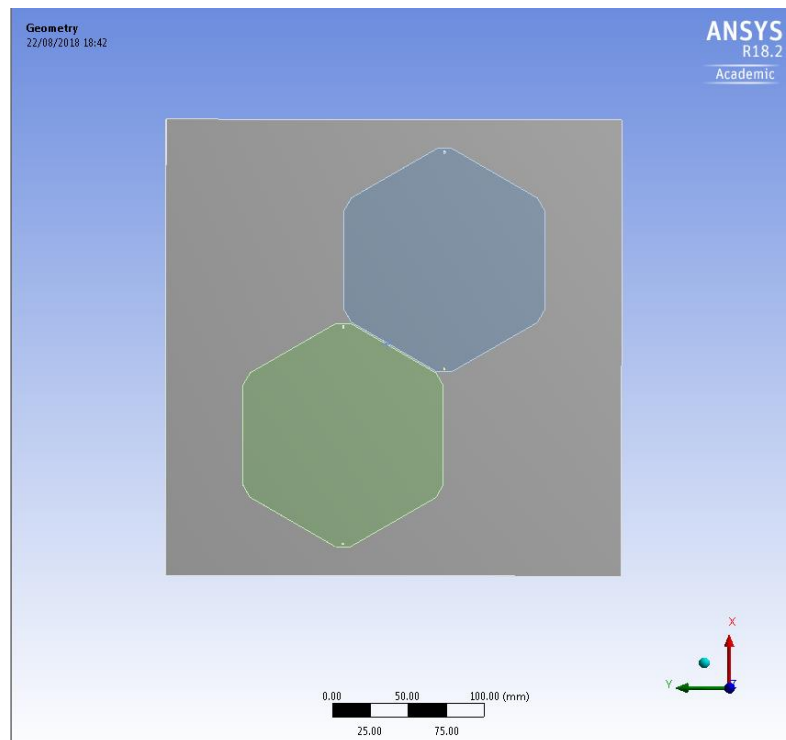


Figure 13: Simulación de dos módulos mediante el sistema de fijación Long-Normal hole sobre la placa de cobre

Finalmente se obtiene el desplazamiento normal entre hexágonos de los resultados. Se observa que en este caso está en torno a la décima de milímetro. No obstante, este no será la simulación más crítica ya que como se ha observado, existirán desplazamientos en el disco en torno al milímetro en los puntos más críticos (externos). Sin embargo, esta simulación ha servido para demostrar la existencia del movimiento relativo entre módulos hexagonales.

Así, cierta holgidez entre módulos habrá de ser considerada. Por lo tanto, un margen de holgura entre 0.4 y 0.6 mm será considerado para el diseño CAD. Un estudio más avanzado, además de ensayos con prototipos definirán la holgura final entre módulos.

Una vez se tienen colocados los módulos hexagonales en la placa de cobre, salta a la vista que se necesitará un sistema de fijación que presione los módulos hexagonales contra esta. También, para evitar cualquier desplazamiento no permitido a la hora de mover el calorímetro. Se verá en el capítulo Ensamblado 2.3.

2.2.2 Copper Plate

Esta Placa de cobre o «Copper Plate» sustenta el peso de todos los elementos del casete, a su vez soportado por el «cone support» central (ver Figure 30 y Figure 31 en la sección 2.2.4).

Aparece en ambas partes, tanto en la Electromagnética como en la Hadrónica. Si bien en ambas cumple la función de sistema refrigerante, en la Electrónica se diseñará para que cumpla también la función de soporte. La principal diferencia entre ambas partes será el dimensionamiento de los casetes. La parte Hadrónica lo conformarán sectores de 30° mientras que la Electromagnética lo formarán casetes de 60° . Por otro lado, como ya se ha mencionado anteriormente, en la parte electromagnética se encontrarán módulos hexagonales a ambos lados de la placa de cobre, a diferencia de la hadrónica, donde son capas simples.

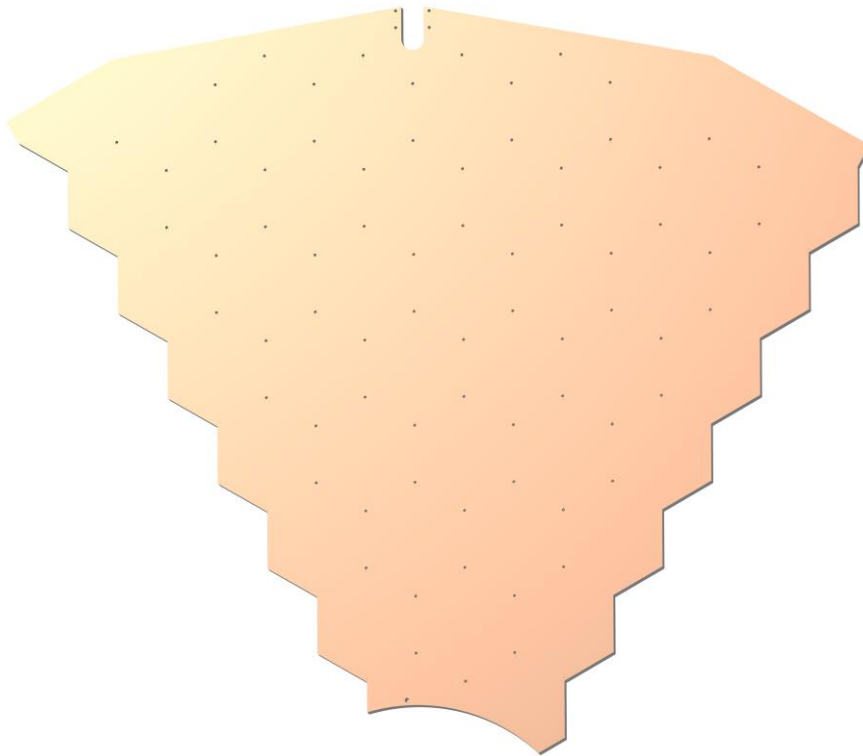


Figure 14: Imagen la placa de cobre desprovista de todos los elementos adjuntos

Son tres los aspectos críticos que determinarán la forma y características de las placas de cobre: Dimensiones del Calorímetro, Geometría de los módulos hexagonales y el Sistema de refrigeración.

En este capítulo se detallan las razones por las que la placa de cobre adquiere la geometría mostrada en la Figure 14 indicando los límites geométricos alrededor de su perímetro. También, se inicia el estudio de las posibles formas de fabricación de la misma, teniendo en cuenta el diseño de las tuberías de refrigeración que circulan por ella. Para finalizar, una vez elegida la geometría de la placa de cobre se diseña el serpentín de las tuberías de refrigeración, atendiendo a factores de fabricación y de potencia requerida para el refrigerante, más la geometría y situación de los módulos hexagonales. Así, se realizará una simulación en ansys para comparar el tiempo de enfriamiento de la placa dependiendo de diferentes configuraciones de las tuberías, además de una estimación a mano del tiempo de enfriamiento del CE-E¹⁴.

¹⁴ Todos los cálculos servirán para tener una estimación de los valores preliminares. Un estudio más profundo será el siguiente paso, como se indica en la sección de pasos a seguir.

2.2.2.1 Geometría de la placa de cobre

La placa de cobre vendrá limitada por sus laterales bajo la premisa de que cada sector ha de ser de 60 grados. Una vez hecha dicha consideración, obtendremos dos posibles geometrías dependiendo de la forma en que coloquemos los módulos hexagonales y cómo coloquemos el casete sobre el cono soporte.

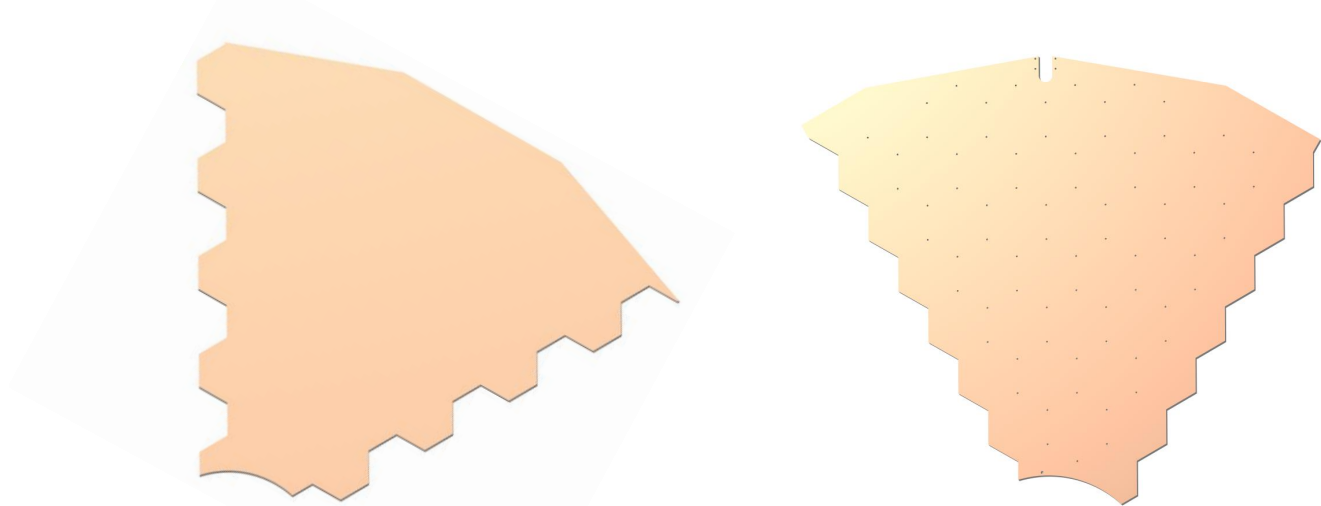


Figure 15 : Diferentes cortes de la placa de cobre acorde al módulo hexagonal

Antes de filtrar qué modelo sería más razonable por cuestiones de complejidad para la fabricación o tolerancias entre casetes, existe otro factor aún no mencionado que determinará la elección: Espacio. Un factor determinante más aún cuando se habla del reducido y optimizado poco espacio que se dispondrá para realizar el ensamblaje del electrocalorímetro abajo en la caverna de CMS. Como si de trozos de pizzas se tratase (ver Figure 16), así se realizará el proceso para formar el disco unido al cono soporte. Este concepto culinario, ejemplifica y deja entrever que una de las dos configuraciones necesitará mayor espacio para realizar esta operación¹⁵.

Por ello, de las configuraciones mostradas en la Figure 15 elegiremos la de la derecha para la realización del diseño.

Atendiendo a la distribución de partes dentro de la parte electromagnética del calorímetro encontramos las siguientes limitaciones en su geometría:

En su parte inferior vendrá limitada por la superficie del cono soporte. Veremos que en nuestra opción de diseño esto significará tener dos tipos de casetes en cuanto a su radio interior.

En su parte superior vendrá limitado por la altura de diseño respecto a la tubería de haces de partículas. Por encima de los casetes circularán las válvulas y distribuidores de refrigerante (ver Figure 21) además de cables de fibras ópticas de los sensores. Nuevas corrientes de desarrollo valoran una división externa de los casetes de 60° en lugar de 20° de 10°. Esto se debe a cómo quieras optimizar el volumen que encierras bajo la pantalla térmica que recubre todo el espacio del calorímetro. Con una segmentación de mayor grado optienes menor volumen de placa de cobre aumentando el espacio libre para servicios. El estudio del volumen de servicio necesario determinará la correcta segmentación¹⁶.

¹⁵ En este documento no se adelanta en el proceso operacional de ensablaje. Aún no está decidido cómo se procederá a llevar esta operación a cabo si bien algunos conceptos como el de "sliding" parecen claros.

¹⁶ El estudio del volumen necesario para servicios está en desarrollo y no será detallado en este trabajo.

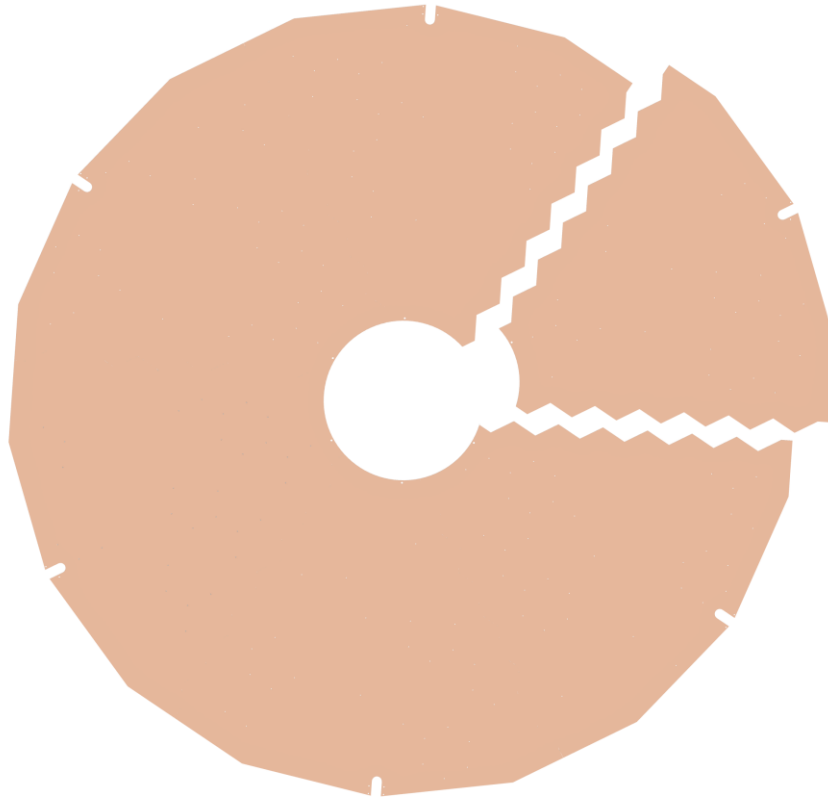


Figure 16: Concepto “sliding” de unión de casetes



Figure 17: visualización de módulos hexagonales sobre los casetes

2.2.2.2 Sistema de refrigeración en el interior de la placa de cobre.

Constituye uno de los principales requisitos a la hora de determinar qué proceso de fabricación se lleva a cabo con la placa de cobre. Como ya se ha mencionado, será a través de este componente por donde circulará el CO_2 bifásico a -35° recorriendo tuberías de diámetro inferior a 4mm.

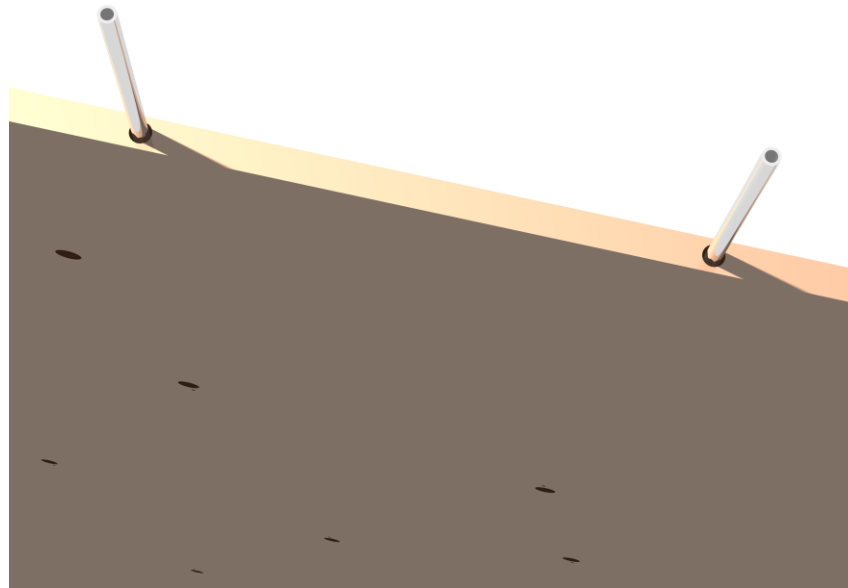


Figure 18: Acceso de tuberías al interior de la placa de cobre

Siendo el espesor orientativo de la placa de cobre 6 mm, hay dos formas de hacer pasar las tuberías a través de la placa de cobre: o bien haciendo el surco sobre una cara de la placa o bien pasarla por el plano medio de la misma. En una operación utilizaremos solo una placa de cobre mientras que en la otra serán dos, de 3 mm de espesor. Ambas opciones serán valoradas a la hora de realizar el diseño comparándolas en términos de coste, propiedades del material y geométricas.

Según lo descrito en el párrafo anterior, se define a continuación diferentes posibles procesos de fabricación de la placa de cobre atendiendo al número de placas del que está compuesto.

Mecanizado sobre una cara:

Consiste en realizar el surco del serpentín de las tuberías de refrigeración sobre una cara de la placa de cobre de 6 mm. Se encuentran los siguientes puntos a favor y en contra:

A favor:

- Se trabaja sobre la placa tal y como sale del proceso de laminación, manteniendo sus propiedades físicas.
- Se reduce el número de operaciones a la mitad, reduciendo costes.

En contra:

- Aniquilaría la simetría de la placa, en términos de masa y de transmisión de calor.
- Se necesitaría un sistema de fijación de la tubería a la placa de cobre suficiente como para evitar posibles daños a los módulos hexagonales.

Tubería en el interior de la placa.

El inconveniente principal de este proceso consiste en la unificación de dos placas de cobre de 3 mm insertando la tubería en su interior. Se detallan a continuación dos procesos de fabricación por los que es viable esta opción: “Friction Stir Welding” y “Vacuum Brazing”.

Friction Stir Welding o Soldadura por fricción

Es un proceso de soldadura de material en estado sólido y sin aporte de material. Es necesario que ambas piezas a soldar estén unidas y haber limpiado cualquier tipo de suciedad entre ellas. Una pieza de revolución girará sobre ambas placas y mientras rota, generará la cantidad de calor por rozamiento necesaria para alcanzar la temperatura de soldadura del material. En este punto, desplazaremos la herramienta sobre la placa realizando la soldadura. Este proceso se repetirá en varios puntos como puede verse en la imagen:

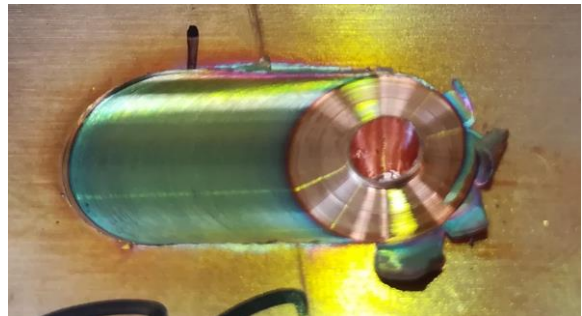
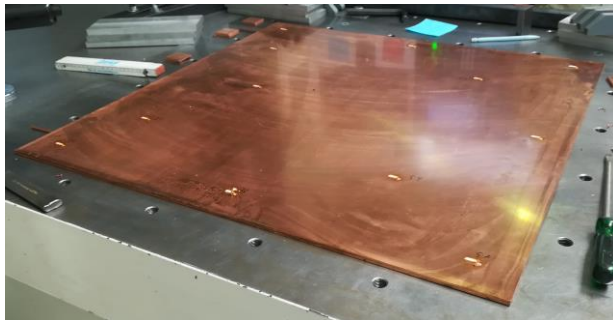


Figure 19: Placa prototipo unida por FSW (iqz). Soldadura (der.)

Se encuentran los siguientes procesos a favor y en contra:

A favor:

- Al igual que en el mecanizado de una cara, se mantienen las propiedades producto de laminar el cobre.
- Simetría en la placa tanto geométrica como térmica.

En contra:

- Estudio de un prototipo a escala real es necesario para testear como trabajaría este modelo de soldaduras.
- Doble operaciones de mecanizado sobre la placa (ambos lados interiores)
- Operaciones de rectificado en las zonas de soldadura para garantizar la homogeneidad de la placa en cuanto a tolerancias (existencia de rebordes)

Vacuum Brazing

Utiliza el concepto de soldadura en frío junto a la soldadura en vacío. Interponiendo una lámina de metal con un punto de fusión inferior al del cobre y de espesor mínimo, se mete el sándwich en un horno al vacío donde se aumenta la temperatura alcanzando el punto de fusión del metal intermedio. Este por capilaridad soldará con los de cobre componiendo una estructura rígida. Al estar en vacío evitamos cualquier agente externo intrusivo que dañase la soldadura.

Se encuentran los siguientes puntos a favor y en contra de este proceso:

A favor:

- No deja lugar a ningún hueco entre las placas como en el caso del FSW¹⁷.

¹⁷ Como se explica en pasos futuros, esta cualidad del FSW podría tenerse en cuenta a la hora del control de atmósfera en el interior del calorímetro, para hacer circular el aire seco por su interior.

- Se consigue una máxima compactación.
- Proceso fácil de manufacturar debido al rápido proceso de introducción en el horno con cámara de vacío.
- Se garantiza la simetría en la placa de cobre.

En contra:

- Se pierden las propiedades físicas de laminado de cobre, ya que al aumentar la temperatura en el horno se actúa como si de un proceso de recocido se tratase, eliminando las tensiones internas y obteniendo un cobre más dúctil.
- Conlleva un duplicado de operaciones de mecanizado sobre la placa (ambos lados interiores) para la realización del serpentín de refrigeración.

Para este proceso se ha podido, a través de un prototipo, realizar algunas operaciones de mecanizado aquí en las instalaciones del CERN comprobando la posibilidad de taladrado o el fresado, bajo diferentes condiciones de velocidad de giro, a favor o en contra del avance y diferentes velocidades de avance. También, comprobando diferentes acabados conseguidos, por ejemplo, añadiendo alcohol como lubricante como puede observarse en la imagen Figure 20.

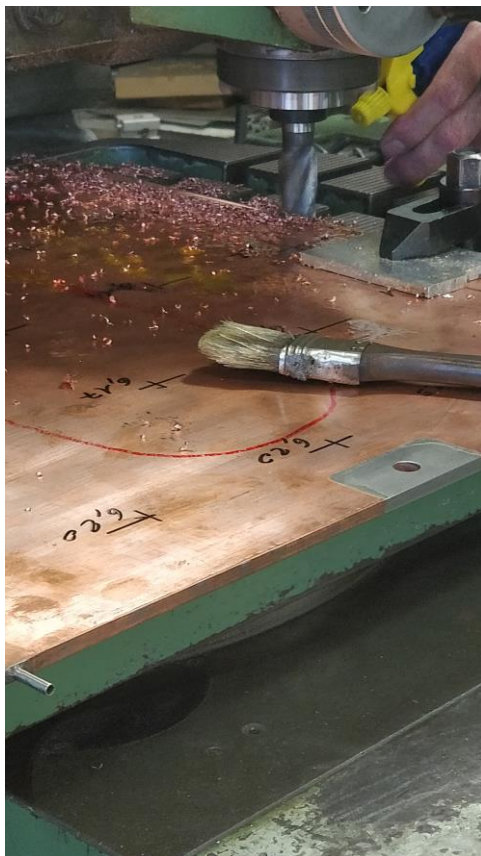


Figure 20: Diferentes operaciones de fresado sobre la placa de cobre tras las soldadura por vacuum brazing

Para nuestro modelo de diseño se elegirá la introducción de las tuberías por el interior de la placa de cobre, en búsqueda de la homogeneidad del sistema y simetría térmica. Pruebas con diferentes prototipados serán necesarias para elegir qué proceso utilizar para la fabricación de las placas de cobre.

2.2.2.3 Trazado de las tuberías de refrigeración

Para el trazado de los conductos de refrigeración dentro de la placa de cobre se atiende a una serie de limitaciones de diferente índole: decisiones del equipo de refrigeración, geometría de los módulos hexagonales y capacidad de manufacturación.

Así, en esta sección se tiene como objetivo el diseño del serpentín insertado en la placa de cobre. Para ello se obtiene respuesta del equipo de refrigeración el cual aporta datos de potencia y de propiedades del refrigerante. Además, se tiene en cuenta la geometría de los módulos hexagonales. Esto es debido a que las perforaciones en la placa de cobre para insertar los soportes de los absorbentes y los módulos hexagonales no deben estar cerca de las tuberías de refrigeración, evitando posibles daños de la misma. Este serpentín vendrá determinado por las posibilidades del mercado para la fabricación de tuberías de acero inoxidable de pequeño espesor.

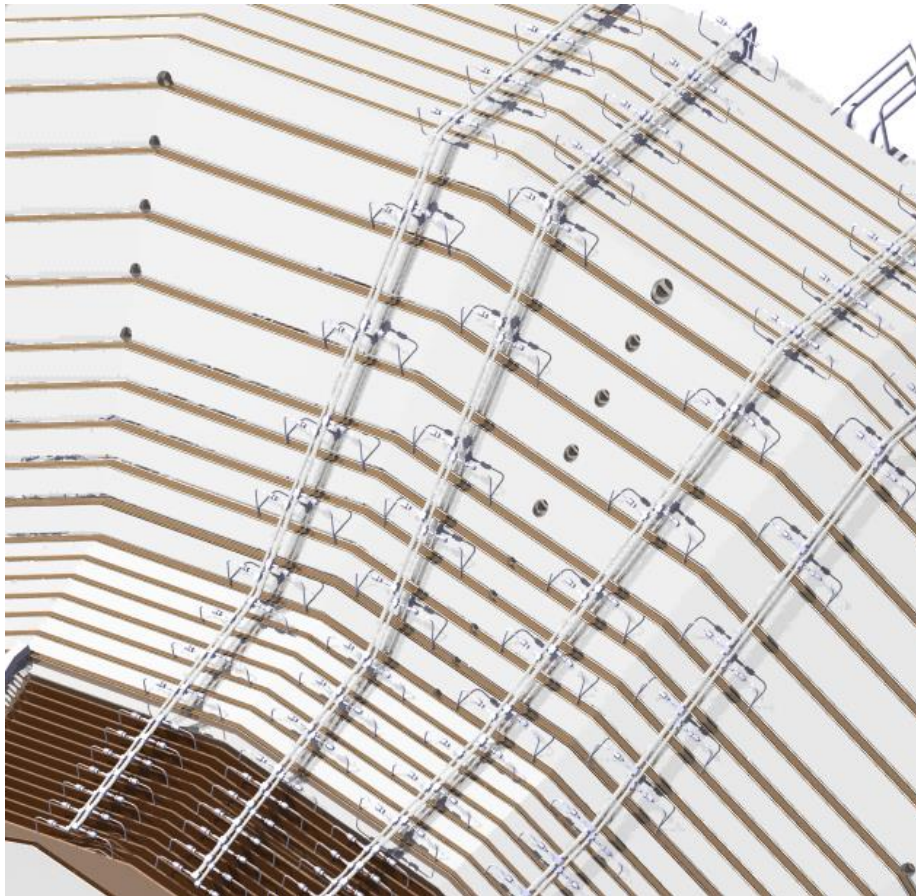


Figure 21: Imagen general de un sector del calorímetro, incluyendo ambas partes CE-E (inferior) y CE-H (superior).

Equipo de refrigeración

Desde la parte del equipo que calcula la potencia y los sistemas necesarios para la refrigeración del calorímetro se obtiene una serie de directrices útiles a la hora de diseñar el serpentín del circuito:

- Cada casete de 60° contará con dos circuitos internos, cada uno abasteciendo a unos 30° de sector. Esto implica que se encuentran dos circuitos, con ida y retorno, en cada sector¹⁸ de 60° del calorímetro. Sin embargo, como podemos ver en la Figure 21, encontraremos cuatro. Cada circuito de refrigerante alimentará a capas alternas. Esto se debe a medida de seguridad. En el supuesto que uno de los circuitos fallara no se perdería vision completa de un sector del calorímetro si no parcial (solo la mitad de las capas estarían activas).

¹⁸ Se entiende como sector abarcando todo el tronco de cono, en forma longitudinal, tanto del CE-E como del CE-H.

- El coeficiente de película correspondiente al CO_2 bifásico circulando por el circuito será entre 1000 y 6000 $W/(m^2 \cdot K)$. Para las simulaciones se toma $h = 1000 W/(m^2 \cdot K)$ considerando que durante el enfriado existirá poca evaporación.

Dada esta información y conociendo las condiciones iniciales del problema se podrán realizar simulaciones que darán una información orientativa útil para el diseño. Se usará en la sección 2.2.2.4.

Geometría de los módulos hexagonales

El punto que más importa a la hora de caracterizar el serpentín de la tubería de refrigeración será cómo están distribuidos los módulos hexagonales sobre la superficie del casete. En relación a estos módulos, existen dos puntos fundamentales que se ha de tener en cuenta para definir el diseño:

- Evitar los puntos de fijaciones de los módulos hexagonales y las fijaciones para sostener los absorbentes. Como se puede ver en Anexos III, en el plano “Inser_Copper_Detail”, cada grupo de tres módulos hexagonales estará fijado a la placa de cobre mediante un sistema de fijación que se detalla en la sección 2.3.1.1. Estos perforarán la placa de cobre por lo que debe de ser sorteado por el circuito de refrigeración.
- Maximizar la superficie hexagonal refrigerada pasando por el “centro” de los hexágonos. De este modo, se optimiza el paso de refrigerante por el módulo hexagonal, adquiriendo una temperatura de trabajo más homogénea que si pasase por otro punto distinto al centro.

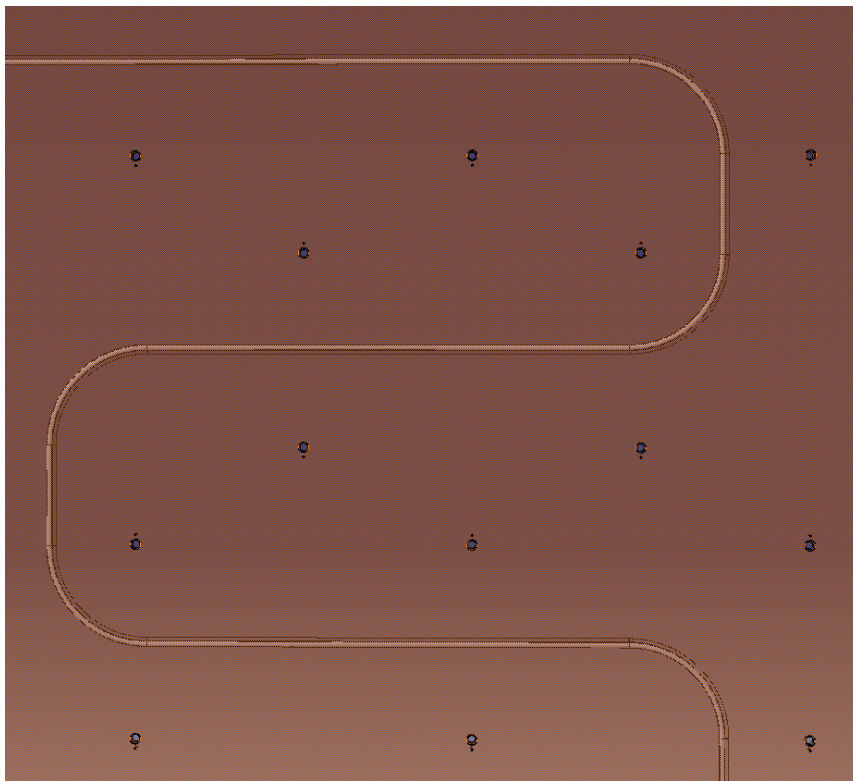


Figure 22: Parte del serpentín refrigerante en el interior de la placa de cobre.

Manufacturación de las tuberías de refrigeración

Las tuberías de refrigeración conforman unos de los sistemas más críticos del calorímetro. Es así debido a la inaccesibilidad durante la fase operacional. Por tanto, se ha de buscar la mayor robustez a la hora de su

fabricación y en la elección de materiales. En lugar de elegir cobre u otra aleación de este metal, se elige acero inoxidable. La razón es que para una vida operacional comprendida entre diez y quince años, en las tuberías de cobre se forman sedimentos debido al paso del refrigerante conllevando la obstrucción de las mismas.

El proceso a seguir será el de doblado de tubos. Para ello y teniendo en cuenta las dimensiones de los circuitos de refrigeración (entre 4 y 4.5 mm de diámetro externo y entre 2 y 3 mm de diámetro interno) se tendrán dos limitaciones. Estas vienen aconsejadas por la maquinaria necesaria para realizar estas operaciones:

- Mínima longitud de tubería en torno a 20 mm (distancia necesaria para fijar la tubería y realizar el doblado)
- Mínimo radio de giro igual a 50 mm.

Bajo estas condiciones se ha realizado el serpentín interior en la placa de cobre que puede verse en la Figure 64.

2.2.2.4 Simulaciones para el tiempo de enfriamiento

A partir de los datos provistos para la refrigeración se pueden realizar simulaciones para comprobar si a partir de nuestro diseño CAD se puede alcanzar la temperatura propuesta de -35°C .

El enfriamiento de un determinado cuerpo con masa depende de:

- Masa del cuerpo
- Coeficiente de película entre el fluido y el cuerpo
- Área donde el coeficiente de película actúa
- Valor del calor específico del material usado en el cuerpo a estudiar
- Incremento de temperatura inicial y final.

Para estimar el tiempo de enfriamiento según diferentes holguras entre tubería y placa de cobre se utiliza el módulo de ANSYS transient thermal. Previamente se simplificará la geometría, ya que para valores orientativos no es necesario alto nivel de detalle de la misma. Esto permitirá reducir la cantidad de elementos en el mallado. Por lo tanto, se importa la geometría CAD al módulo de ANSYS SpaceClaim donde serán llevadas a cabo dichas operaciones. Así, se estudiará la mitad de la placa de cobre. El casete, al ser prácticamente simétrico, también en cuanto al circuito de refrigeración, los valores orientativos para una mitad serán análogos para el casete completo.

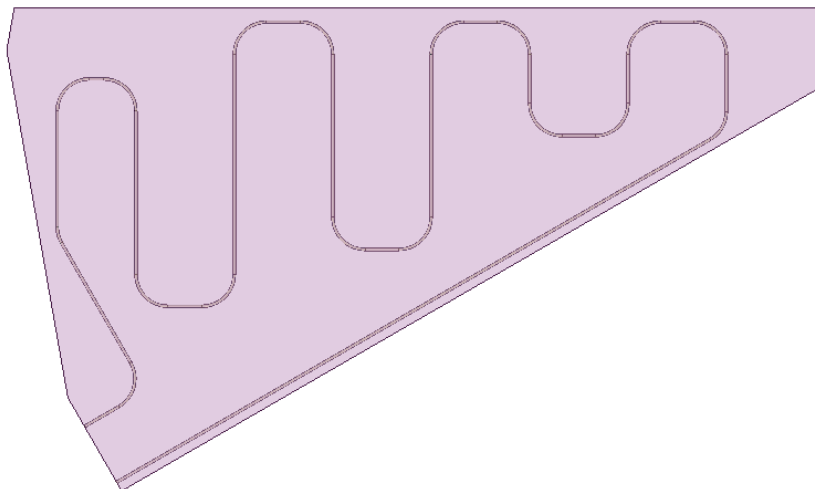


Figure 23: mitad del modelo simplificado de una placa de cobre

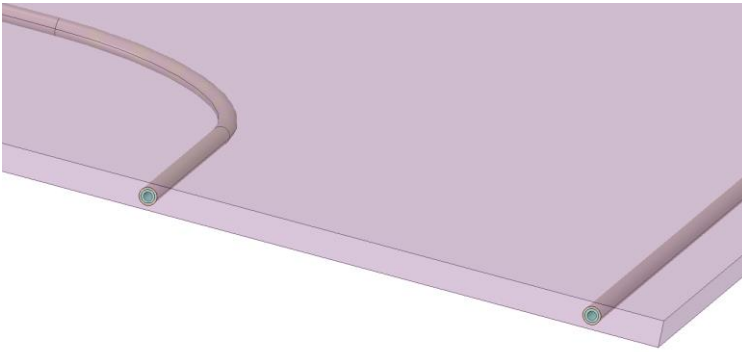
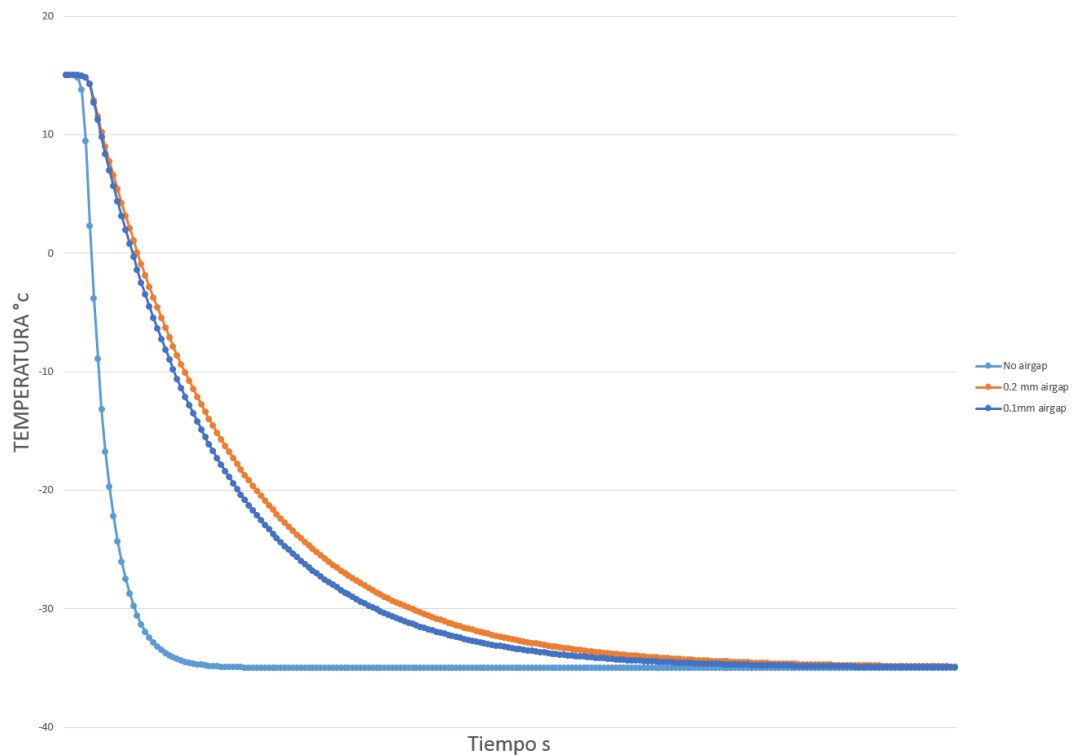


Figure 24: detalle tubería

Un factor conservador de esta simulación está en la geometría. En lugar de considerar el aire entre tubería y placa situado en la holgura entre ambas como gas se considera como sólido con las propiedades térmicas del gas. Al estar prácticamente en una atmósfera estacionaria y sin movimiento es una aproximación podría considerarse válida. Así, se procede a estudiar la diferencia en tiempo de enfriamiento de la placa de cobre para distintos valores de la holgura entre tubería y el circuito mecanizado en el interior de esta. Para ello, se procede aplicando temperatura por convección en el interior de la tubería de acero inox., de -35° con un coeficiente de película de $1000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ como se ha indicado en la sección 2.2.2.3. Una vez se ha aplicado esta condición, se corre la simulación para un tiempo estimado de 30.000s. Se realizan tres simulaciones: No gap, sin holgura entre la tubería y la placa de cobre, 0.1mm gap (espacio de 0.1 mm entre tubería y placa de cobre) y 0.2 mm gap (espacio de 0.2 mm entre tubería y placa de cobre)

Table 2: Variación de temperaturas máximas dependiendo del tiempo para 3 casos de espacio entre tubería y placa de cobre: a) No gap, b) 0.2 mm gap, c) 0.1mm gap



De estas gráficas se pueden extraer dos conclusiones:

- Evidentemente, cuanto mejor sea el contacto entre la tubería y la placa de cobre más rápido alcanzaremos la temperatura operacional. Como era de esperar en la Table 2, en la simulación no gap, la temperatura máxima de la placa de cobre se alcanza mucho antes que en los casos en los que existe holgura.
- Aproximadamente, la placa de cobre tarda entre 2 y 8 horas en alcanzar la temperatura operacional, dependiendo del contacto entre superficies¹⁹.

Por tanto, la holgura existente entre las tuberías y la placa de cobre será un factor fundamental a la hora de calcular la potencia necesaria de refrigeración. Un mejor contacto térmico entre ambos elementos permitiría reducir la potencia necesaria para refrigerar la placa de cobre. Un mejor estudio del enfriamiento de la placa de cobre será necesario en estudios futuros, introduciendo otras fuentes de calor como son los módulos hexagonales.

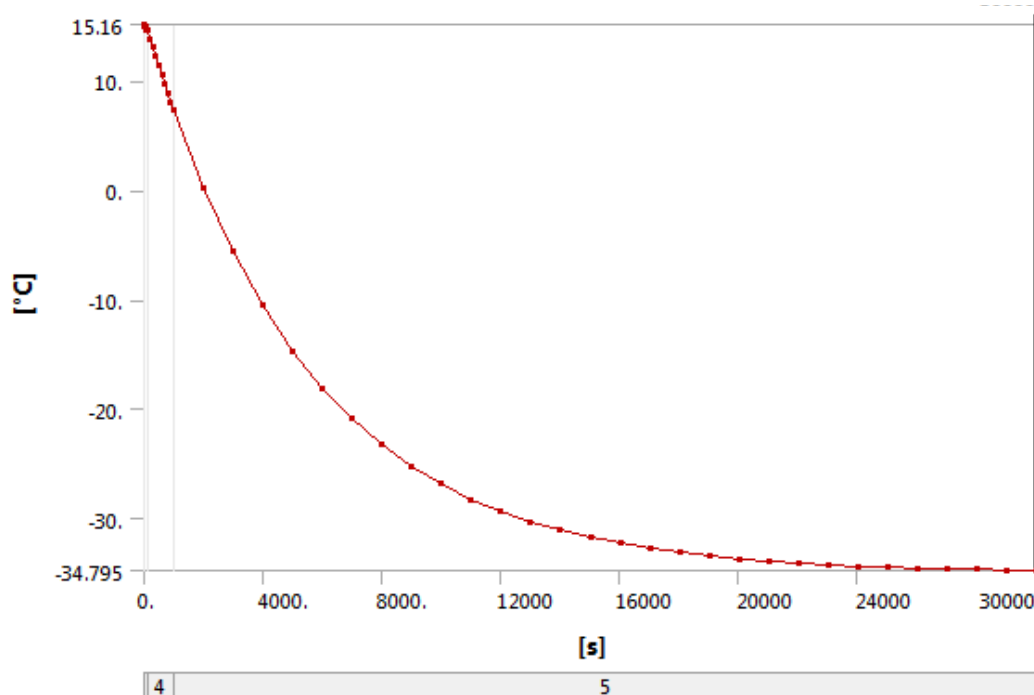
Para tener una aproximación del tiempo máximo que tardará el CE-E en llegar a la temperatura de operación en torno a los -35 ° se observa las distintas partes que conforman la parte electromagnética del calorímetro.

El único elemento no refrigerado directamente en el CE-E junto a los absorbentes es el disco soporte situado en la base de la parte electromagnética del calorímetro (ver **Error! Reference source not found.**), disco detrás de todas las placas de cobre). De acero inoxidable y con un espesor cercano a los 40 mm se convertirá en la parte que más tarde en alcanzar la temperatura de operación. Se puede estimar el tiempo que tarda en enfriarse a través del “lumped-model”.

Este modelo solo será válido si el número de Biot²⁰ es menor que la unidad dependiendo de la geometría del sólido. Se define este valor adimensional como:

$$Bi = \frac{\bar{h} \cdot L}{K_b} \quad (6)$$

Table 3: Máxima temperatura en disco soporte durante el enfriamiento



¹⁹ Para la fijación de la tubería con la placa de cobre se barajó la utilización de alguna resina, aunque iría en detrimento de la conductividad térmica. Este estudio aún no está definido.

²⁰ Número de Biot: Relaciona la relevancia de la transferencia de calor por conducción en un cuerpo frente a la transferencia de calor por convección en la superficie del mismo.

Donde $\bar{h}$ es el coeficiente de película en $W/(m^2K)$, L espesor de la placa en m y K_b es la conductividad térmica medido en $W/(mK)$. Se toman los siguientes valores para el acero inox y aire en atmósfera estancada²¹.

Table 4: Propiedades físicas materiales tuberías

Material	Conductividad Térmica	Calor Específico	Coeficiente de película	Densidad
SS	16 $W/(mK)$	480 $J/Kg^{\circ}C$	-	7990 Kg/m^3
Air	0.0262 $W/(mK)$	1005 $J/Kg^{\circ}C$	5 $W/(m^2K)$	1.225 Kg/m^3

Introduciendo los valores para el disco soporte en la ecuación $Bi = \frac{\bar{h} \cdot L}{K_b}$ (6) se obtiene:

$$Bi = 0.0125$$

Por tanto, se puede aplicar el método del gradiente nulo: la temperatura del sólido será constante y sólo será función del tiempo ya que la resistencia por conducción es despreciable en el sólido.

Partiendo de la primera ley de la termodinámica, donde el calor es igual a la variación de energía interna del sistema:

$$Q = \frac{\partial U}{\partial t} \Rightarrow -\bar{h}A(T - T_{ref}) = \frac{\partial}{\partial t}(\rho cV(T - T_{ref})) \quad (7)$$

Siendo Q el calor, U la energía interna, $\bar{h}$ el coeficiente de película, T la temperatura del cuerpo, T_{ref} la temperatura de referencia, ρ la densidad del cuerpo, c la conductividad térmica del cuerpo y A y V el área y el volumen del sólido respectivamente. Entonces, la expresión (7) puede describirse a partir de la temperatura del fluido convectivo :

$$\frac{\partial(T - T_{\infty})}{\partial t} = -\frac{\bar{h}A}{\rho cV}(T - T_{\infty}) \quad (8)$$

Esta ecuación se resuelve como:

$$\ln(T - T_{\infty}) = -\frac{t}{\frac{\rho cV}{\bar{h}A}} + C \quad (9)$$

Se llama al cociente $\frac{\rho cV}{\bar{h}A}$ como la constante de tiempo T . Al ser la temperatura inicial T_i para $t = 0$, entonces la constante C será igual a $\ln(T_i - T_{\infty})$. Por lo tanto, el enfriado del sólido vendrá dado como:

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = e^{-\frac{t}{T}} \quad (10)$$

Para una temperatura inicial del sólido de 15° , (temperatura ambiente de la caverna), se obtiene que haría falta en torno a 1 día para que la parte electromagnética del calorímetro alcanzase la temperatura de trabajo, siendo el disco soporte la última parte en alcanzarlo. Así, se tiene una aproximación máxima y conservadora el tiempo de enfriamiento del calorímetro²².

²¹ Actualmente todas las simulaciones están siendo realizadas mediante el módulo mechanical, simulando el fluido como un sólido efectuando conductividad térmica. Esto es viable hasta cierto punto considerando los pequeños espesores existentes entre capas, en torno a la décima de milímetro. Para futuras simulaciones, el uso de módulos incorporados en Ansys como Fluent/cfx serán necesarios para la correcta simulación del calorímetro.

²² Elementos de fijación crearán puentes térmicos por los que estos tiempos se verán reducidos.

Los cálculos anteriores han servido para obtener valores orientativos que darán respuesta a la potencia implementada en el sistema. Ahora se sabe el orden de magnitud en tiempo para el enfriado del CE-E así como afecta la holgura entre tubería y placa de cobre al enfriado del casete. No obstante, para futuras simulaciones habría que tener en cuenta:

- Transferencia de calor desde el detector de silicio hacia la placa de cobre cuando está en funcionamiento debido al paso de corriente por los circuitos. Al estar toda la placa cubierta de sensores, supondrá un factor a tener en cuenta a la hora de calcular la potencia necesaria de refrigeración.
- Estudio del contacto entre tubería y la placa de cobre. Modelos de soldadura de la tubería al copperplate.
- Especificación del material para el copperplate para así tener las propiedades adecuadas a la hora de realizar simulaciones.

2.2.3 Absorbentes

Los absorbentes son una parte fundamental del calorímetro ya que servirán para frenar las partículas captadas por los sensores (ver Figure 41). Un metal que cumple para este propósito es el Plomo por su buen ratio densidad/precio. Está formado por tres capas, formando una estructura tipo sandwich: Cuerpo o “core” en la parte central y caras o “facesheets” en las externas.

En este caso, no se usa la estructura tipo sandwich para aliviar el peso del conjunto, reduciendo el peso del cuerpo. Pero sí comparte las mismas características:

- Las caras han de ser suficientemente gruesas para aguantar los esfuerzos a tensión y compresión.
- El cuerpo debe soportar los esfuerzos cortantes inducidos por las cargas de diseño. El adhesivo de unión entre caras deberá ser lo suficientemente fuerte como para trasladar los esfuerzos al cuerpo.

En el caso de estudio en el CE-E, está limitado por la estructura del calorímetro. Como ya se sabe, cada casete estará formado por dos absorbentes a cada lado de la placa de cobre. Esta configuración permite dos opciones en cuanto a los absorbentes: se podría duplicar cada capa, manteniendo el espesor en las caras y duplicando el espesor del cuerpo. Sin embargo, existen dos razones que invalidan esta posibilidad:

- El plomo, al ser un material con densidades que rondan los 11.000 kilogramos el metro cúbico haría aumentar el peso que la placa de cobre ha de soportar, implicando el incremento de esfuerzos en los soportes que ligan el absorbente a la placa de cobre y acentuando el esfuerzo en la unión de la placa de cobre al cono soporte.
- La superficie de absorbente sólo puede cubrir aquella donde están los módulos hexagonales. Puesto que no toda la placa de cobre estará cubierta por dichos módulos, el tamaño de los absorbentes no coincidirá con el de las placas de cobre. Puesto que cada casete incluirá una configuración aproximada pero no por qué igual de módulos, se encontrarán diferentes tipos de absorbentes según qué casetes, complicando la visión de doble cuerpo.

Por tanto, aunque se hiciera el prototipado de los dos modelos, para este diseño se optará por el modelo simple, dejando el estudio del doble core a un lado (ver Figure 25).

Ambos prototipos han sido comprobados aquí en las instalaciones del cern. En concreto en los talleres situados en el punto5, donde se sitúa la caverna del CMS. A partir de las deflexiones de ambos prototipos junto a la simulación de la placa en Ansys se pueden obtener algunos datos significativos.

Con la ayuda de una máquina de 3 ejes, a través de un puntero de medición con sensibilidad de décimas de milímetro, se obtiene la deflexión del prototipo calculando el desplazamiento vertical de una muestra de puntos (ver Figure 27).

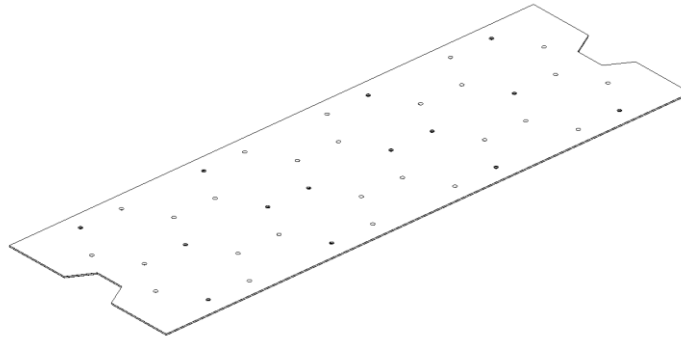


Figure 25: prototipo absorbente, Longitud = 1200mm, Anchura= 400mm

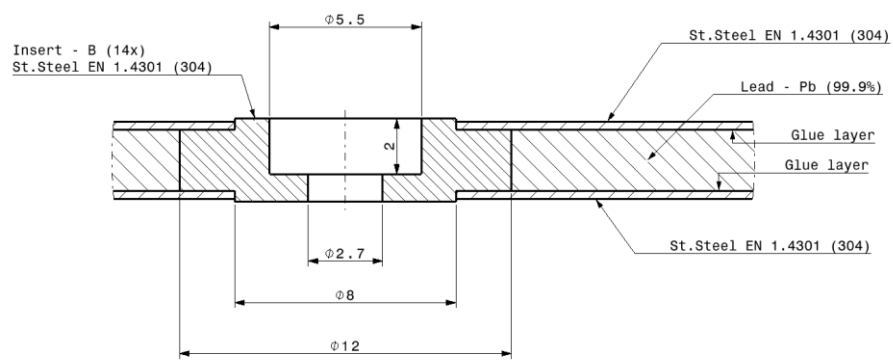


Figure 26: Descripción inserción en el prototipo

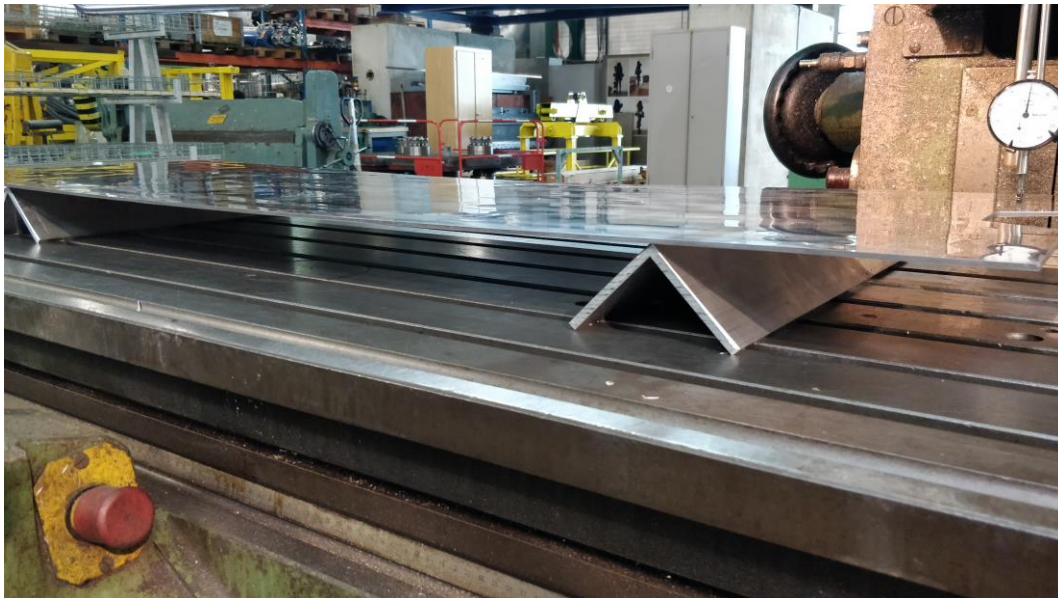


Figure 27: Medición prototipo de absorbente sobre máquina de 3 ejes

Table 5: Propiedades físicas Absorbente

Material	Espesor	Densidad	Módulo de Young
SS (facets)	0.3 mm	7850 kg/m^3	193 GPa
Plomo (core)	2.3 mm	11340 kg/m^3	14 GPa

Este desplazamiento es debido al peso del propio prototipo biapoyado en dos puntos del mismo²³.

Las medidas obtenidas en el taller²⁴ se contrastarán con el modelo del prototipo en Ansys y junto a un modelo a mano.

2.2.3.1 Modelo a Mano

Para el modelo a mano se usa la fórmula de resistencia de materiales para vigas (ver anexo I). Esta aproximación es viable debido a dos razones:

- Una de las dimensiones de la placa es mucho más larga que las demás. El largo, constituyendo 1200mm es tres veces mayor que el ancho, 400 mm, y mucho mayor que el espesor, 3 mm.
- Las condiciones de contorno no están en todo el contorno de la placa: está biapoyada en dos puntos de su superficie, pudiéndose aproximar por un modelo 2D.

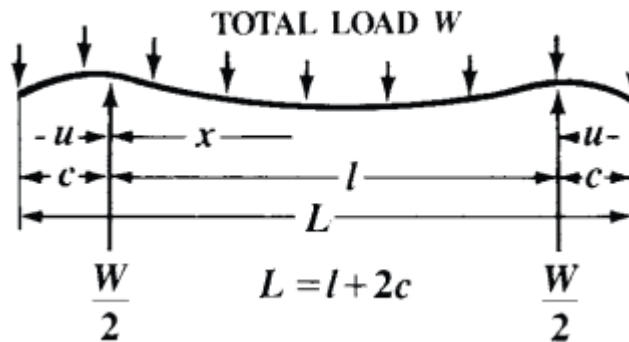


Figure 28: Modelo de barra.

El máximo desplazamiento en el centro vendrá dado por:

$$y_{\max} = \frac{Wl^2}{384EI} (5l^2 - 24c^2) \quad (11)$$

Siendo “W” el peso de la estructura, “l” la distancia entre apoyos, “E” módulo de elasticidad, “I” inercia, “L” largo de la placa. Se calculará el desplazamiento máximo para diferentes longitudes entre apoyos. El desplazamiento máximo vendrá dado para la máxima distancia entre apoyos. En este caso, $l=1000$ mm.

²³ El muestreo se realizó para diferentes distancias de los soportes.

²⁴ La tabla con todos los puntos del muestreo puede verse en el Anexo VI

Primero se calcula el peso de la placa a través de las densidades y de los volúmenes de las diferentes capas:

$$M = \rho_{ss}V_{ss}2 + \rho_c V_c \quad (12)$$

Siendo ρ_{ss} la densidad de las caras, ρ_c la densidad del cuerpo, V_{ss} volumen de las caras y V_c volumen del cuerpo.

Por tanto, incluyendo en (12) los datos de la Table 5 se obtendrá el peso del prototipo como:

$$W = M \vec{g} \cong 145 \text{ N}$$

Luego se calcula el módulo de Young por la Inercia Equivalente como:

$$E \cdot I_{eq} = E_c I_c + 2E_f I_f \quad (13)$$

Siendo E_c el módulo de Young del cuerpo, E_f el módulo de Young de las caras, I_c inercia del cuerpo e I_f de las caras. Además, se refiere a “c” como core (Plomo) y a “f” como facets (Acero Inoxidable). Se calcula la inercia como:

$$I_c = \frac{b \cdot c^3}{12} ; I_f = \frac{b \cdot t^3}{12} + \frac{b \cdot t \cdot d^2}{4} \quad (14)$$

Siendo “b” el ancho de la placa, “c” el espesor del core y “t” el espesor de las facets, siendo “d = c + t”.

Introduciendo todos los valores en la ecuación del desplazamiento se obtiene un máximo en el centro de:

$$y_{\max} = -17.76 \text{ mm} \quad (15)$$

2.2.3.2 Modelo Ansys

Se introducen las mismas propiedades del material del modelo a mano en Ansys. Se simula la placa biapoyada, esta vez en un estudio 3D. Para ello, en el módulo static mechanical se introcen las condiciones de contorno necesarias para permitir el desplazamiento vertical del sándwich apoyado sobre dos superficies longitudinales simulando el ensayo mostrado en la Figure 27. Además, se usará el contacto bonded entre las tres placas (contacto cara- cuerpo) simulando un perfecto adhesivo entre los tres cuerpos.

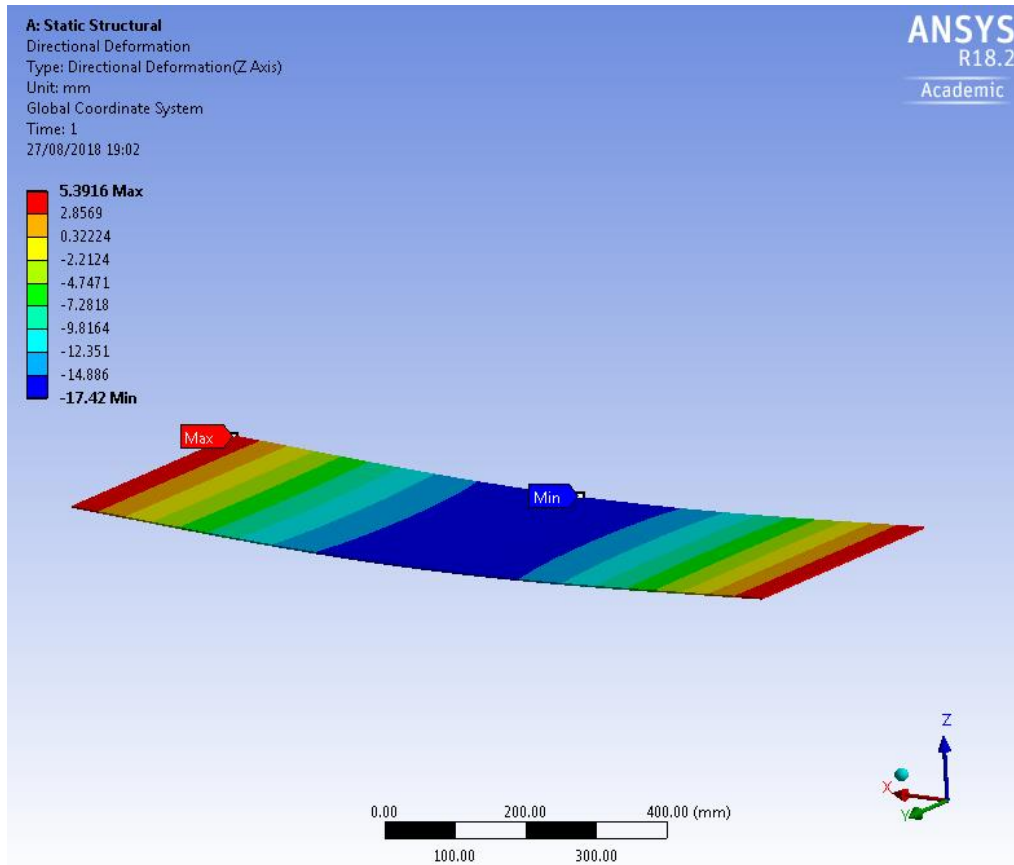


Figure 29 : Simulación deflexión sándwich absorbente

Se obtiene que el desplazamiento en el punto medio es similar al cálculo a mano ($y_{max} = -17.76 \text{ mm}$ (15):

$$y_{max} \cong -17.42 \text{ mm}$$

El desplazamiento máximo para $l=1000 \text{ mm}$ obtenido en el taller, en el modelo de 3 mm de espesor es de:

$$y_{max} \cong -14 \text{ mm}$$

Por tanto, difiere en torno a 3.5 mm de los modelos realizados. Se encuentran las siguientes razones de esta diferencia:

- El biapoyo encontrado en el taller no es perfecto. Incorpora cierta anchura en la superficie de contacto el cual disminuye el desplazamiento máximo de la placa.
- En la simulación en Ansys como en el estudio a mano no se ha considerado las dos capas de pegamento de unión de las placas, los cuales ofrecen rigidez al desplazamiento.
- Aun siendo mínimo, la aparición de los agujeros para las inserciones de acero inoxidable incorporadas al prototipo restará masa del modelo, afectando a su deformación.

Se concluye que se podría ser capaces de simular la deformación en su desflexión más crítica afinando el modelo

ansys con las condiciones anteriores para futuros estudios del absorbente.

2.2.4 Cono Soporte

El peso del conjunto de todas las capas formadas por los casetes en el calorímetro estará soportado por una estructura en forma de tronco de cono, ensamblada a la parte Hadrónica del Calorímetro. Este tronco de cono tendrá que soportar también el peso del moderador de neutrones situado tras la parte electromagnética, aunque en este diseño se focalizará en la parte que concierna a las capas del CE-E.

Actualmente existen dos modelos de cono soporte.

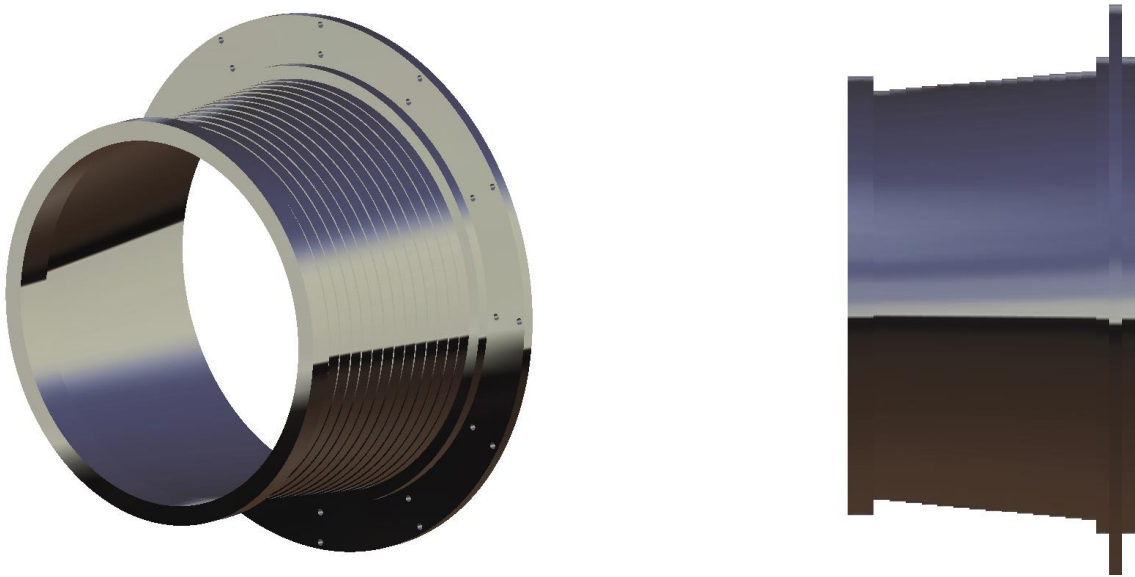


Figure 30: Cono soporte versión anillo interior, vista 3D (izq.) y vista perfil (der.)

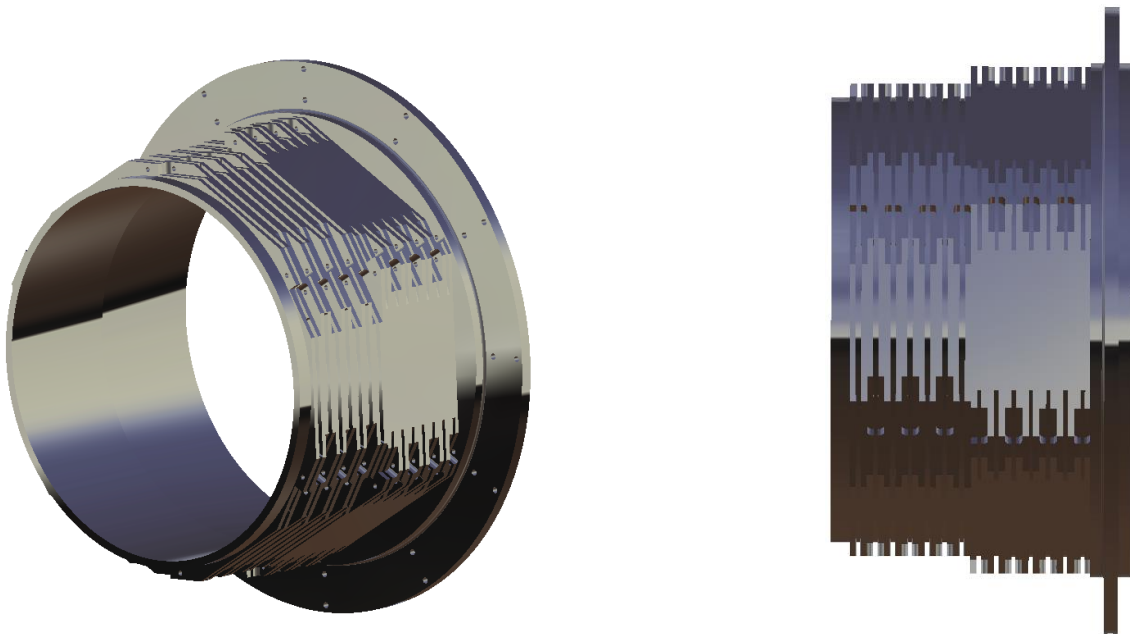


Figure 31: Cono soporte versión integrada, vista 3D (izq.) y vista perfil (der.)

Si se observan ambos modelos existen dos diferencias fundamentales:

- El modelo de la ilustración Figure 30 incorpora el sistema de anclaje de los casetes mientras que el modelo de la ilustración Figure 31 necesita un sistema que un cono soporte y casetes. A este sistema se le llamará anillo interno o “inner ring”²⁵. Por el contrario, el otro modelo no necesita ningún elemento intermedio para la fijación de los casetes, ya que estos irán fijados en una de las seis posiciones que incorpora el cono.
- El modelo que incorpora el inner ring se caracteriza por tener una pendiente constante desde la capa situada en la base hasta la última capa situada al final del cono. Esto significará que se tendrán 14 capas de casetes con distintos radios internos. Del mismo modo, la unión entre los diferentes inner rings en “cada escalón” deberá o bien ser en pendiente también o estar en diferentes alturas relativas a cada casete. El primer modelo implicaría una solución mecánica con una carga no distribuida de forma homogénea mientras que la segunda implicaría una utilización del espacio sobre el casete no óptimo, realizando una doble fijación, casete-inner, inner-inner o casete-casete. Por otro lado, el otro modelo se caracteriza por la supresión de esta pendiente sustituyéndola por un salto entre dos superficies horizontales. Supone una ventaja a la hora del mecanizado, ya que sólo se tendrán dos tipos de casetes según su radio inferior. Si bien es cierto que existe una discontinuidad en el modelo, permite hacer un cono robusto y sin elementos extra de unión.
- En cuanto a mecanizado de la estructura, el factor de incorporar los soportes para los casetes hace que el proceso de fabricación sea más costoso.

Ambos modelos siguen bajo estudio. En concreto la elección de la aleación a usar para esta estructura. Se ha de tener en cuenta que deberá soportar en torno a 20 T de peso. Además, se necesitará que sea viable la manufacturación para realizar las operaciones de mecanizado oportunas. Por todo, una de las aleaciones a considerar será: Al Cast G. Al C330 EN AW 7071.

Para tener una primera aproximación de la validez de esta aleación y de nuestro modelo de cono soporte se simulará en Ansys para comprobar los niveles de tensión y de deformación. Para ello se introducirá la carga de peso sobre los 6 puntos de apoyo. Además, se fijará el cono según iría fijado a la parte Hadrónica, contando como soporte el backplate.

Al ser una comprobación orientativa es prácticamente irrelevante cómo se soporte el cono (suponiendo que se ancla a la parte hadrónica) mientras que los valores de tensión en el cono no se vean alterados. Esto es debido a que existen numerosas formas de colocar las condiciones de contorno.

Se aplica una fuerza equivalente al peso de todas las capas de discos formados por casetes. Esto es, por tanto, el equivalente a 14 capas de 6 casetes cada una. Barajando el peso del casete en torno a los 250 kg, se obtiene una fuerza de 205.800 KN, en el sentido de la aceleración de la gravedad.

Se obtiene una distribución de tensiones mostrada en la imagen Figure 33²⁶.

De estos resultados obtenidos se pueden sacar dos conclusiones claras:

- El modelo de cono soporte aguanta el peso de los casetes
- Los puntos más calientes se encuentran en los puntos medios del plano medio vertical del cono. Esto podría conllevar un futuro estudio de un cono soporte asimétrico en caso de que se quisiera aumentar el factor de seguridad en dichas localidades.

²⁵ El modelo de inner ring no aparece en la imagen debido a que no es la corriente de desarrollo elegida para nuestro modelo.

²⁶ Los resultados de esta simulación han sido doblemente comprobados con los obtenidos desde el equipo trabajando en París, obteniendo el mismo resultado orientativo.

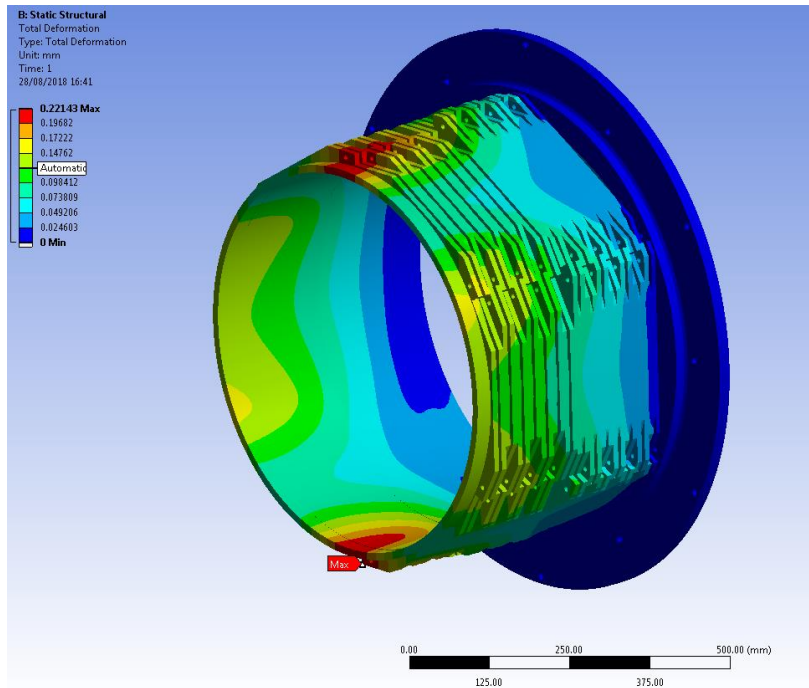


Figure 32: Distribución de deformaciones en el cono soporte

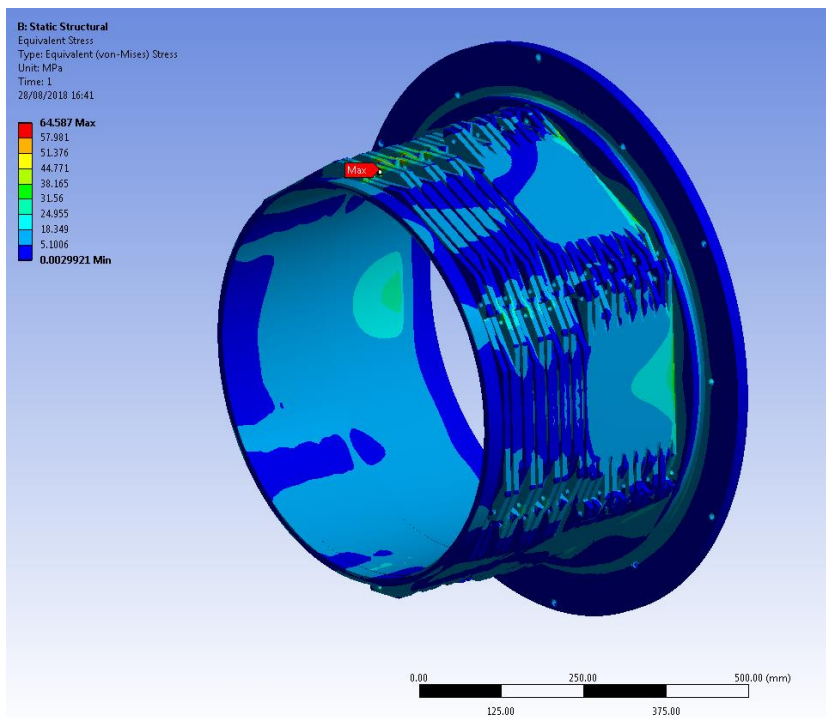


Figure 33: Distribución de tensiones en el cono soporte

2.3 Ensamblado

Se necesita un Sistema de fijación entre las diferentes partes que conforman el casete dentro del CE-E. Por ello, se encuentra en este desarrollo preliminar tres sistemas de fijación: módulo hexagonal – placa de cobre, absorbente – placa de cobre, casete – casete – cono.

2.3.1 Módulo Hexagonal – Placa de cobre

Parte de este sistema de fijación se ha visto previamente cuando se analizó el desplazamiento relativo entre módulos hexagonales debido a la contracción térmica (ver sección 2.2.1). Como se mencionara, se instalarán dos pines que fijarían posicionalmente los módulos hexagonales en la placa de cobre. Luego, se necesitará un sistema de fijación que retuviera a los módulos hexagonales pegados a la placa de cobre para mejorar la conductividad térmica entre ambos elementos.

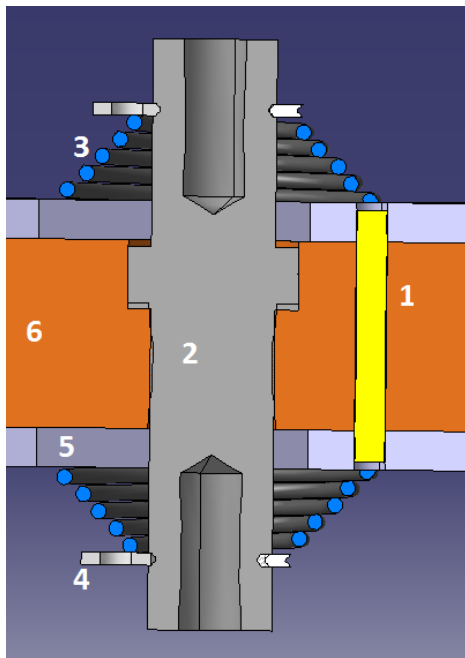


Figure 34: Diagrama de partes del sistema de fijación módulo hexagonal-Copperplate.

- 1 Pin
- 2 Inserto Soporte
- 3 Resorte de compresión
- 4 Junta elástica o clip
- 5 Baseplate o Módulo Hexagonal
- 6 Copper plate o placa de cobre

Además, este sistema de sujeción de los módulos hexagonales cumpliría una doble funcionalidad al mantener una restricción sobre el desplazamiento de los pines, manteniéndolos en su posición de diseño.

Se situará en el espacio situado entre 3 módulos hexagonales, de ahí la necesidad de los “mousebites” en las esquinas del módulo hexagonal.

2.3.1.1 Partes del Sistema de fijación módulo hexagonal – placa de cobre

2.3.1.1.1 Pin

Tiene como funcionalidad fijar el módulo hexagonal sobre la cara de la placa de cobre. Cada módulo hexagonal constará de dos pines situados en partes opuestas del mismo: uno irá fijado sobre el agujero normal y otro sobre el agujero largo o long hole permitiendo el desplazamiento relativo del módulo hexagonal respecto a la placa de cobre.

El material elegido para este elemento es acero inoxidable. El diámetro aproximado del pin estará entre 1 y 2

milímetros.

2.3.1.1.2 Inserción de soporte

Constituye una pieza fundamental en el ensamblaje. Tiene una triple función:

- Transmitir el peso de los absorbentes a la placa de cobre.
- Fijar la posición del absorbente sobre la placa de cobre.
- Colocar los elementos del sistema de fijación módulo hexagonal –placa de cobre.

El material elegido es acero inoxidable. Esta inserción contará con unas ranuras donde se situarán los clips para sujetar los resortes de compresión. Dependiendo del sistema de fabricación de las placas de cobre, estas inserciones vendrán o no directamente situadas y soldadas sobre ella (casos de soldadura al vacío o soldadura por fricción).

Otra opción que se baraja para el diseño sería incorporar anillos de tolerancia en estas inserciones para garantizar que el peso del absorbente queda igualmente distribuido sobre estos elementos, ganando en seguridad de la estructura. Estos anillos de tolerancia actúan como sujetadores de fricción entre dos componentes, admitiendo cierto desplazamiento radial entre ellos debido a vibraciones o expansión/contracción térmica.



Figure 36: Inserción como parte del sistema de sujeción



Figure 35: Anillo de tolerancia

2.3.1.1.3 Resorte de compresión

A través de un resorte de compresión se creará la fuerza en dirección a la placa de cobre para fijar el módulo hexagonal y así maximizar la conducción térmica entre la placa de cobre y el módulo hexagonal. Además, se usará un resorte helicoidal de diferentes diámetros en su base y en su altura: a través de su base se fijará la posición de los pines. La parte superior del resorte irá limitada por la junta elástica o pin.

Otra solución sería la utilización de arandelas elásticas cónicas. Haciendo un montaje en oposición: superposición de varias arandelas elásticas se consigue el mismo efecto que en el resorte. Sin embargo, la flexibilidad de poder reducir uno de los dos diámetros de la base del resorte facilita la reducción de espacio, junto a la inserción del clip.

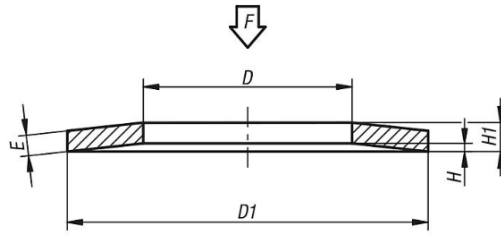


Figure 37: Sección arandela elástica

2.3.1.1.4 Junta elástica o Clip

Tienen como objetivo detener el movimiento relativo de dos piezas. Están diseñados para soportar grandes fuerzas axiales. Se situarán a ambas partes de la inserción soporte para comprimir el resorte que fija el módulo hexagonal. Se sinúa entre la “mother Board”²⁷ y el resorte.



Figure 38: Circclip para ejes DIN471

Al ser una pieza estándar se tomará de la base de datos en Smarteam. En concreto el modelo usado en el diseño es el CIRCLIP FOR SHAFT Ø04 - DIN 471.



Figure 39: Montaje final sistema de fijación Módulo hexagonal-Coperplate

²⁷ Para este diseño no se ha introducido ni la PCB (“Printed Circuit Board”) ni la MB (“Mother Board”) ya que no se relaciona con nuestro departamento.

2.3.2 Absorbente – Placa de cobre

El sándwich absorbente estará atornillado al copperplate a través de la inserción soporte.

Mostrado en la sección 2.2.3 aparece el esquema de unas pequeñas inserciones de acero inoxidable que atraviesan todas las capas del sándwich. Estas piezas metálicas estarán incrustadas allí donde se coloque el sistema de fijación de los módulos hexagonales. Así, servirán como soporte para los tornillos que irán roscados, atravesando el absorbente, en las inserciones del copperplate.

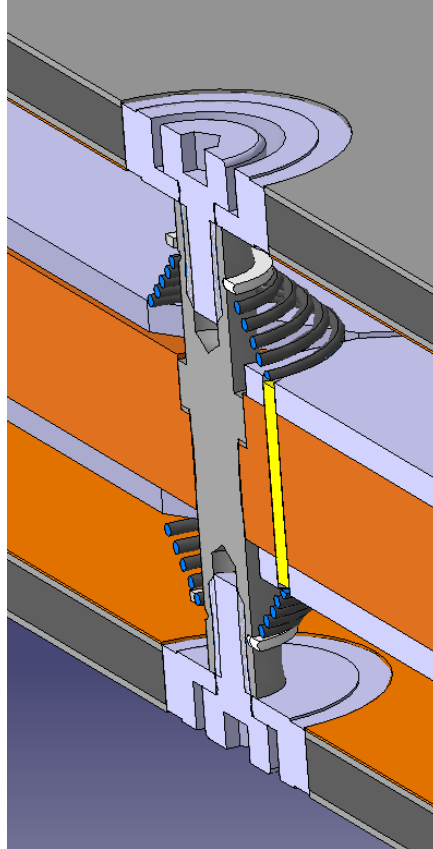


Figure 40: Diagrama de partes del sistema de fijación
Absorbente-Placa de cobre.

El tornillo se usará un estándar de la base de datos de Smarteam: HEX SOCKET LOW HEAD SCREW M3x5²⁸.

²⁸ El estudio del trabajo que realiza esta parte del ensamblaje quedará pospuesto a futuros pasos.

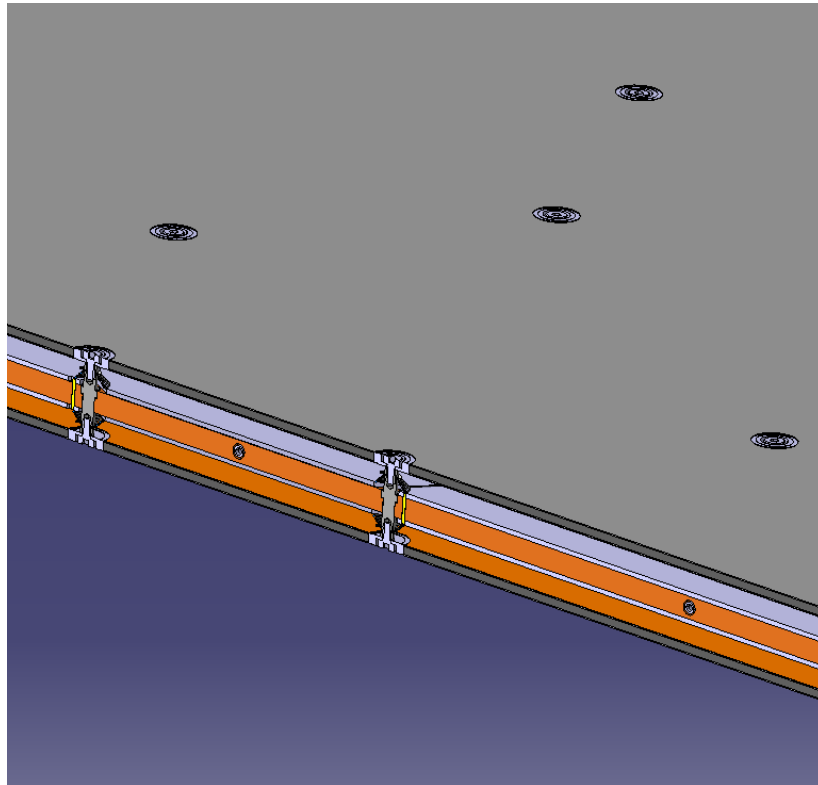


Figure 41: Sección casete

2.3.3 Casete - Cone

El sistema de fijación del casete se apoya entres zonas o elementos a tener en cuenta:

Zona de fijación con el cono: la mayor parte del peso del casete recaerá sobre el soporte en el cono, a través de un eje o pin en torno a unos 8 mm de diámetro permitiendo el giro del casete respecto al eje. Significa que esta parte de la placa y el pin tendrá que soportar en torno a 200 kg de peso.

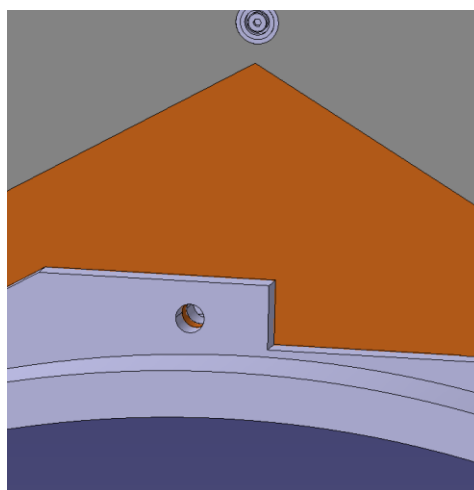


Figure 42: Zona de fijación casete – cono soporte

Realizando una pequeña simulación en Ansys donde se estudia una capa de 6 casetes se comprueba que

efectivamente se trata de un punto caliente.²⁹

En los puntos situados a las 12h y 6h se encuentran los mayores puntos de tensión. La fuerza de reacción en esos puntos será en torno al doble que en los demás. Esta distribución de cargas viene determinada debido a la unión de los casetes en sus extremos. En estos puntos llevarán incorporado un sistema de tornillo sin fin que permita ajustar la posición relativa de un casete respecto a otro, a través del giro en su posición en el cono soporte. Otra opción era fijar el casete mediante dos pines o ejes a través del cono (el diseño del cono podría permitir esa fijación). Sin embargo, una mala manufacturación en los agujeros del casete en esa posición crearía un gran error de posición aguas arriba. No obstante, al fijar la posición a través de puntos más alejados significaría una mayor precisión a la hora de su colocación.

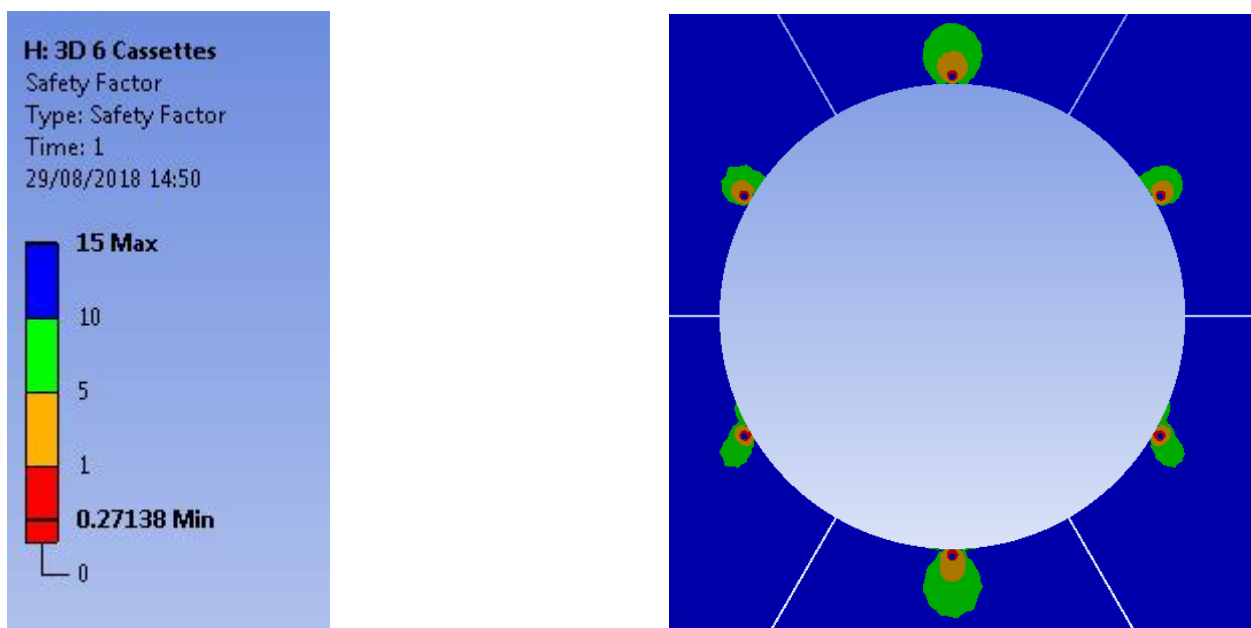


Figure 43: Factor de seguridad simulación pines

Además, en este ejemplo, se supone que los casetes son simétricos, además de tener el cdg situado en su plano medio de simetría. Esta configuración permitiría observar que no existe transmisión de fuerza entre los casetes situados a las 9h y 3h debido a una igualdad de momentos entre los casetes situados en la parte superior y en la parte inferior.

Por ello, se observa que el factor de seguridad, y a través de él, las tensiones en la placa de cobre son mayores en los puntos situado a las 12h y 6h.

Una posible solución ante este problema de rotura sería reforzar esta zona de la placa de cobre en contacto con el eje. Agrandando el agujero en la placa de cobre e incorporando un anillo de Acero Inoxidable incrustado en ella, así, sería como agrandar el diámetro del pin, redistribuyendo las tensiones sobre el agujero de la placa de cobre.

Sin embargo, ni los casetes son simétricos ni el cdg estará situado en la línea vertical con el soporte, por lo tanto, se tendrá que incorporar un sistema que prevenga la rotación y fije los casetes.

²⁹ Caso en el que ninguna estructura externa absorbe ningún porcentaje del peso de la estructura.

A través de la opción en catia de Measure Inertia se puede obtener la posición del centro de gravedad del casete desde el origen de coordenadas, situado en donde estaría el eje del cono soporte. Como se puede observar en la Figure 44, se encuentra desplazado del eje vertical formado por el centro del cono y el vértice superior del casete.

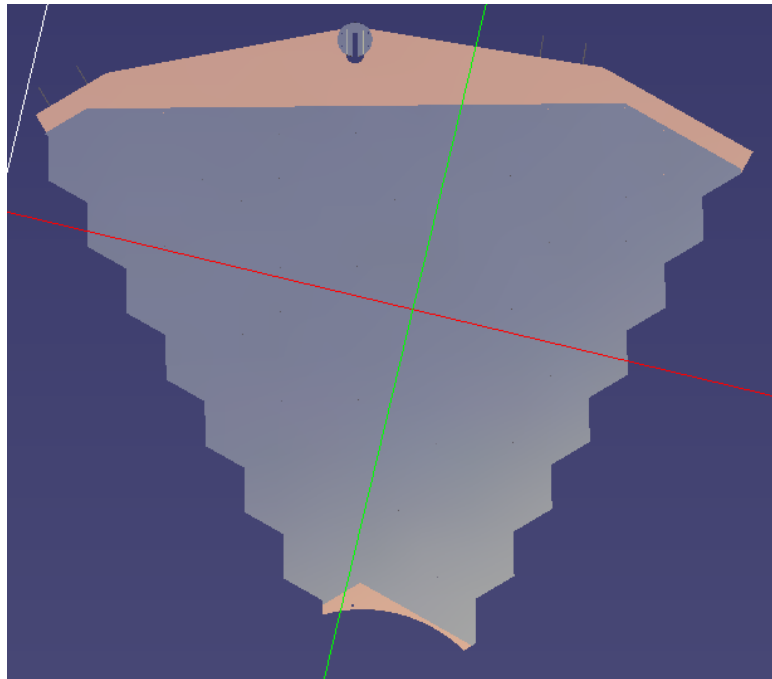


Figure 44: Centro de gravedad del casete

Coordenadas del cdg del casete, $G = (G_x, G_y, G_z) = (126.639, 1021.639, \cong 0)$, estando situado en el plano de simetría, ya que todos los elementos aparecerán por duplicados a ambos lados de la placa de cobre.

Este desplazamiento del cdg en el eje x debido a la no simetría del casete en el eje vertical obliga a bloquear el movimiento de rotación en la dirección angular en torno al eje de giro en el en la unión del casete con el cono.

Además del desplazamiento del cdg existen otras razones de seguridad por las que son necesarias las fijaciones externas del casete a tener en cuenta, como son los movimientos sísmicos o la inclinación de la caverna del CMS³⁰.

³⁰ Para acceder a las diferentes partes del detector, este se subdivide en una serie de estructuras, permaneciendo la parte central inamovible y siendo los extremos los que se desplazan, como puede verse en la Figure 2. El suelo de la caverna ha de soportar 14.000 toneladas en no más de 25 metros de largo. Con el tiempo, el continuo desplazamiento de las estructuras externas ha ocasionado la erosión de los cimientos de la caverna, desequilibrando la superficie de apoyo. Como consecuencia del desplazamiento de las estructuras, existe una inclinación entre el tubo de haz de partículas y la estructura donde va situado el calorímetro de 3°. Esto sugiere que existen diferencias de más de 1 metro a lo largo de la caverna en la dirección vertical. Este deterioro del subsuelo de la caverna afecta no sólo a la estructura del detector sino a todos los sistemas que lo alimentan y vienen colgados desde los balcones a sus costados.

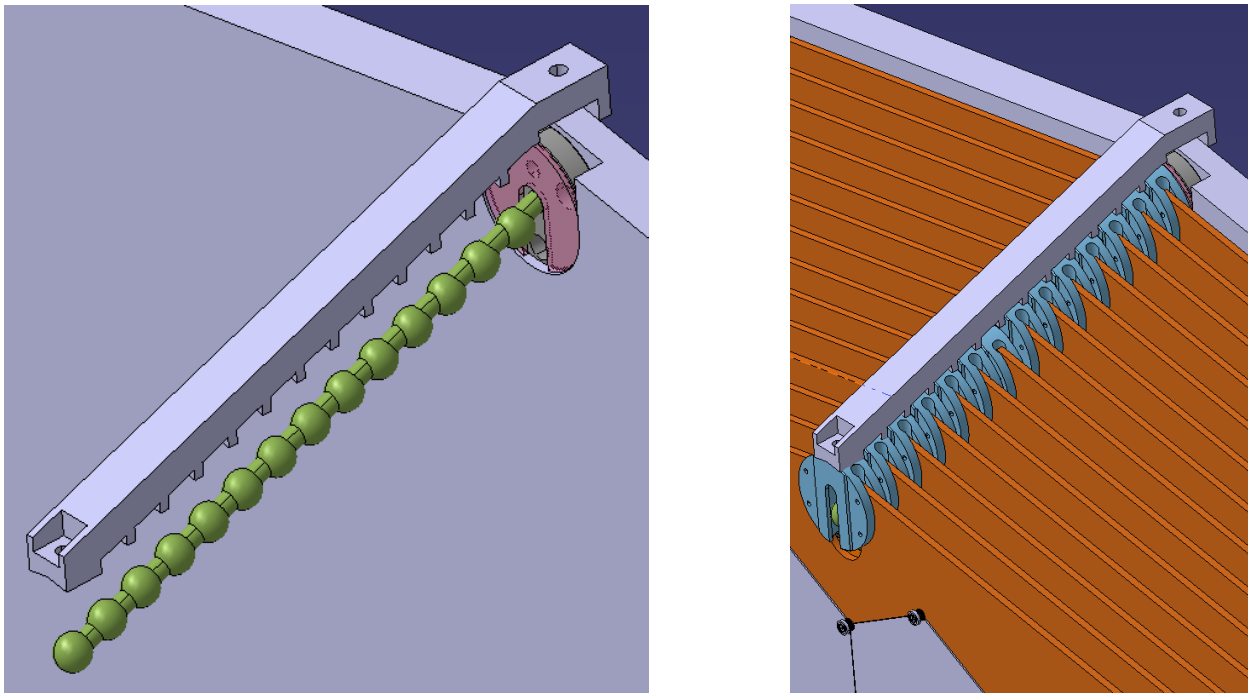


Figure 45: Sistema antirotación casetes

Esta idea en desarrollo permite bloquear la rotación de los casetes, fijando su posición. Además, permite el desplazamiento vertical del casete debido a la contracción térmica. Recibe la rigidez a través de un fijador que parte desde el backplate. El número de antirotadores por casete dependerá del espacio disponible, variando entre uno y dos. Además, este fijador absorbería parte del peso del casete, reduciendo un porcentaje la carga que reciben los pines situados en el cono soporte³¹.

Por lo tanto, el sistema para la correcta colocación de los casetes de forma y segura y precisa consta de un sistema de unión entre casetes más un sistema para evitar la rotación de los mismos. Han de estar presentes ambos ya que:

- El sistema de antirotación de cassetes no ofrece la suficiente rigidez para sostener en posición correcta las 14 capas de casetes (en torno a 21 T) con precisión de décimas de milímetro. Debido a la optimización de espacios para los diferentes sistemas en el calorímetro (eléctricos, refrigeración...), el espacio reservado para sistemas mecánicos en calorímetro será limitado por lo que no se podrá instalar todos los rigidizadores requeridos para esta tarea. Así, se aumentará la rigidez del sistema mediante la unión de los casetes.
- Como ya se barajara anteriormente, se podrá fijar el casete además con dos pines al cono soporte en lugar de uno. Esto supondría tener un sistema sobredimensionado junto a la problemática que ya se indicase.

³¹ Este modelo de diseño está en sus primeras etapas de diseño y aun requiere diferentes estudios. Muestra un tipo de solución a la problemática de la fijación de los casetes.

3 MODELO CATIA

“You have to have the fighting spirit. You have to force moves and take chances”

“Tienes que tener el espíritu de lucha. Tienes que forzar los movimientos y aprovechar las oportunidades”

- Bobby Fischer -

La principal herramienta usada para este proyecto es CATIA V5 r22-23. Perteneciendo a Dassault Systemes, se presenta como una de los softwares de integración de producto y diseño 3D más potentes. Cuenta con más de 150 módulos, siendo en el CERN la herramienta de diseño utilizada. A través de la plataforma Smarteam podemos compartir, ver, modificar archivos CATIA, tanto de demás usuarios como a bases de datos con piezas estándares. En lo que respecta al proyecto, será realmente útil el acceso a esta herramienta a la hora de creación de planos, búsqueda de piezas estándares como tornillos, muelles, inserciones, y para la comprensión de partes de la estructura siendo visibles a partir de archivos catia creados por otros usuarios.

Una de las grandes ventajas de este software es la capacidad de parametrización. A través de estructuras tipo esqueleto y publicaciones junto a la introducción de parámetros se obtendrán modelos paramétricos los cuales ayudarán a agilizar los modelos y la facilidad para realizar cambios.

En este capítulo se explicará la necesidad de un modelo paramétrico 3D y cómo se ha llevado a cabo, sacando partido a técnicas de diseño recibidas en las instalaciones del CERN por el equipo de Catia Support.

3.1 Introducción

El objetivo final de este Proyecto es desarrollar un modelo 3D del CE-E considerando los detalles técnicos detallados en el capítulo 2. La idea de desarrollar un modelo dinámico surge debido a la constante modificación de dimensiones o formas del modelo sujeto a los sucesivos cambios que se van dando conforme avanza el desarrollo del diseño. Esta forma de actuar permite ser flexibles debido a cualquier cambio ocasionado en la estructura, dando una respuesta rápida ante cualquier modificación.

Por otro lado, como hemos visto la parte electromagnética del calorímetro está compuesto por 84 casetes diferentes atendiendo a las diferentes capas. La ventaja de desarrollar un modelo dinámico de un casete permitirá la reconstrucción del calorímetro con mayor facilidad. Si bien es cierto que no se podrá tener 84 modelos dinámicos del casete, a través del módulo *Start > Infraestructure > Product Data Filtering* se podrán crear casetes a partir del modelo dinámico. De este modo, completaremos el ensamblaje de los 14 discos para reconstruir el CE-E. Al final, a modo de completar la estructura se añadirá los mecanismos de sujeción.

Sin embargo, aún siendo posible, se anulará la creación de la vía de desarrollo de un modelo dinámico de la totalidad del calorímetro debido a que:

- El número de cambios realizados en el casete es mucho mayor que el número de cambios realizados en el calorímetro. Esto quiere decir que el número de operaciones repetitivas debido al número de partes que conforman un casete va a ser mayor que el número de operaciones repetitivas que implica el calorímetro sin contar con el casete.
- El tiempo invertido en una total parametrización del Calorímetro es:
 - Mucho mayor que el requerido para la modificación de un casete y su posterior modificación.
 - Al ser una fase temprana de diseño, numerosas decisiones han de ser tomadas como para invertir una cantidad de tiempo importante para el diseño global de un conjunto expuesto a demasiados cambios como para parametrizar. Por este motivo es viable una parametrización parcial del modelo de casete el cual permita una rápida recreación del mismo.

Por las razones anteriores, se llevará a cabo una parametrización de los elementos del casete, garantizando la flexibilidad tanto en el posicionamiento como en las dimensiones de módulos hexagonales, copperplates, sistemas de fijación, absorbentes y tuberías de refrigeración internas al casete.

3.2 Modelo Esqueleto

El concepto seguido para diseñar el modelo es el siguiente: a través de un modelo esqueleto o “skelletion” se puede concentrar todos los parámetros y sketches del resto de parts en un part dentro del product “casete” y a través de este modificar el resto de parts incluidos en el product. Para vincular estos sketches a los diferentes parts se usa el concepto de Publicación. Así, automáticamente modificando los parámetros de los sketches en el modelo esqueleto se modificarán los diferentes parts.

Aquí, estamos aplicando dos conceptos: Parametrización y Publicaciones, los cuales se describirán a continuación.

3.2.1 Parametrización

Se accede al menú *Knowledge* a través de la barra de herramientas, pulsando el icono fórmulas aparecerá el siguiente menú donde se puede crear parámetros de diferente índole, especificando si medimos ángulos, longitudes, etc.



Figure 46: Knowledge módulo barra de herramientas

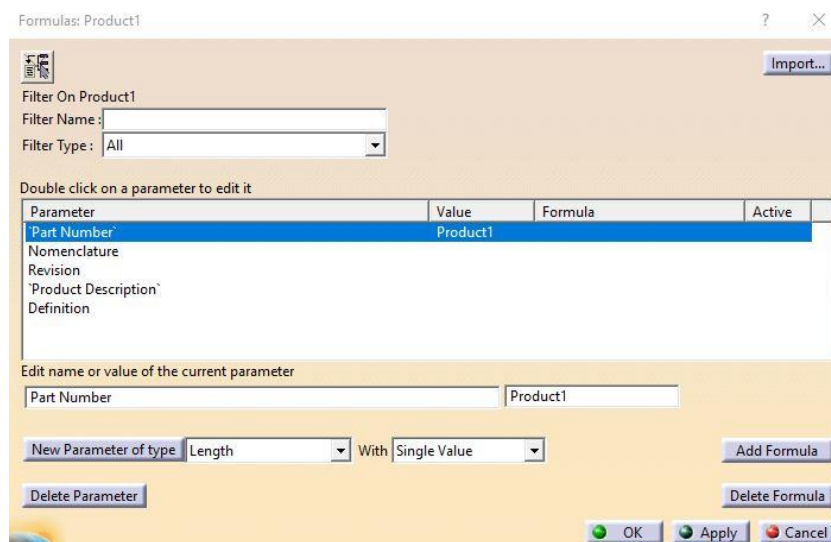


Figure 47: : Menú fórmula para la edición de parámetros

Una vez creado se asigna a la dimensión que se quiera, pudiendo realizar operaciones matemáticas o usar distintos parámetros. Luego, se podrá modificar este número a través del árbol, modificándose automáticamente la constraint³² a la que se haya asignado.

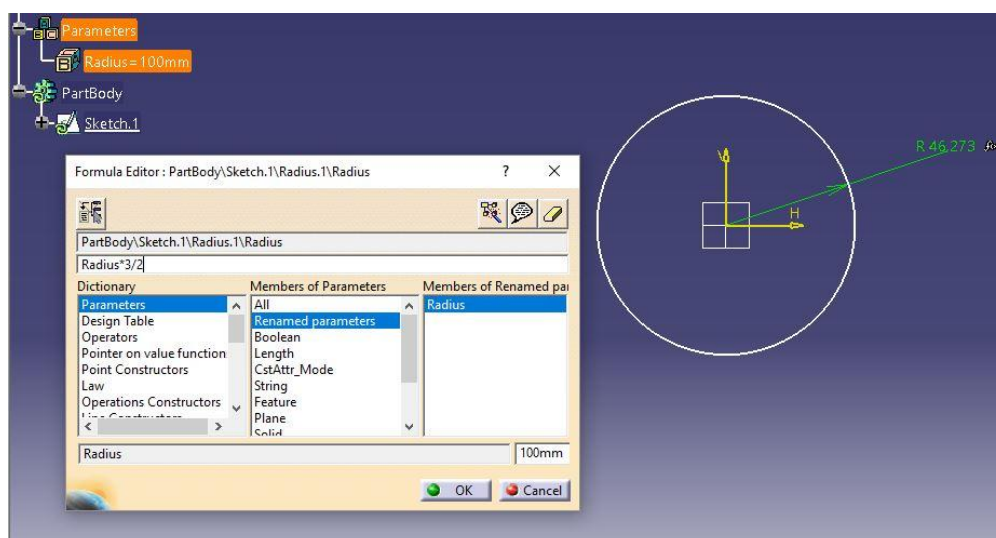


Figure 48: : Ejemplo aplicación parámetros y localización en el árbol

De esta forma, se creará un amplio abanico de parámetros los cuales permitan modificar el modelo. El conjunto de parámetros creados para el modelo dinámico del casete se puede ver en el Anexo I.

³² En este caso se refiere a una constraint de medida.

3.2.2 Publicaciones

Se accede al menú de publicaciones a través de *Tools>Publication*. Primero se selecciona que componente del árbol de operaciones se quiere publicar.

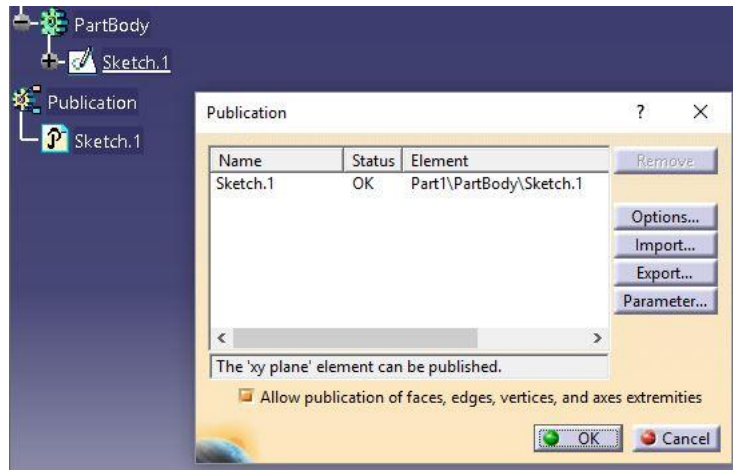


Figure 49: Menú Publication. A base de ejemplo hemos publicado Sketch.1.

Luego, se copia esta publicación como *Paste Special > As Result With Link* en otro part, el cual se quiere tener vinculado a través de la publicación. Así, aparecerá como referencia externa.



Figure 50: Cómo vincular elementos

Como se puede observar en la Figure 51 la publicación también será útil para la copia de parámetros, los cuales son genéricos para todo el modelo.

Igualmente se podría copiar directamente desde el Skeleton al part sin usar las Publicaciones. Sin embargo, la ventaja de usar publicaciones reside en la versatilidad que ofrece: si en un futuro se modifica el elemento original, se eliminará la publicación antigua y a la nueva publicación se le pondrá el nombre de la eliminada. De este modo, se actualizarán de forma automática todas las referencias externas, modificando consecuentemente la geometría del part asociado.

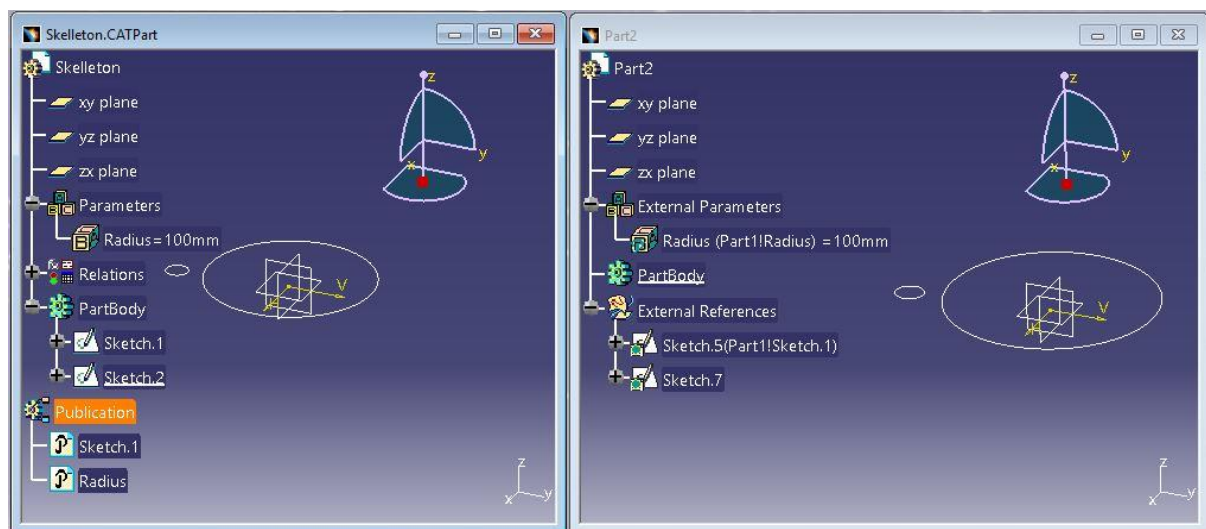


Figure 51: Relación entre Skeleton y part asociado

3.2.3 Modo caché

Este será el modo que se utilizará para trabajar una vez se haya finalizado el modelo dinámico y se comience a realizar el ensamblaje del CE-E final.

Se utilizarán dos formas de abrir los conjuntos de piezas:

- Apertura normal de modelos: Se cargan todas y cada una de las piezas contenidas en el conjunto. Una vez cargada se genera la visualización de cada una de ellas. Todas estas operaciones generan un tiempo de procesamiento más un espacio de memoria. Para conjuntos grandes (en número de piezas) o pesados, puede que el sistema no tenga la suficiente memoria y no se pueda abrir el modelo.

Este modo se usará para abrir el modelo de casete, ya que no es un ensamblaje tan pesado y el ordenador permite manipularlo sin ninguna dificultad. Además, será un modelo donde realizaremos todas las operaciones por lo que tendremos que cargar las piezas y acceder a su árbol.

- Modo caché: este modo no carga todo el contenido de todas las piezas, genera un modelo render de las caras de las piezas de los modelos. A este modelo se le llama CGR. Así se generan estos modelos para la representación visual. Son aproximaciones para facilitar la visualización del conjunto.

Este modo será necesario a la hora de realizar las constraints en el assembly debido a que se contará con más de 1000 piezas, imposible para el ordenador con el que se trabaja cargarlas todas.

Existe la opción de abrir el modelo en su versión cgr y cargar parcialmente piezas que queramos modificar. Esto permite cierta flexibilidad a la hora de abrir con celeridad grandes conjuntos y realizar modificaciones sobre alguno de sus productos.

Otra forma de trabajar sería activando y desactivando nodos. Para aumentar el rendimiento del ordenador y descargar memoria se puede eliminar la geometría de pantalla, quedándose cargada. Así, volviendo a activar nodos una vez se hayan terminado las operaciones se tendrá de nuevo la representación gráfica en pantalla.

En el Cern, antes de abrir Catia una ventana emergente aparece donde se puede elegir si abrir Catia como “Small Assembly” o como “Large Assembly”. Esto es apertura normal de modelos o versión cgr con modo caché activo. Así, se previene la caída del sistema si por error se abren grandes conjuntos en su versión Small Assembly. De normal se trabajará con Large Assembly y se cargarán los productos en los que se trabajan, dejando el resto en su versión cgr.

3.3 Diseño CE-E

Una vez explicado la forma en la que se va a proceder a diseñar el modelo dinámico, mediante el concepto de part esqueleto y la publicación de sus componentes para crear y posicionar el resto de componentes, se procede a diseñar y ensamblar las diferentes partes del CE-E. Se puede dividir el diseño de la parte electromagnética del calorímetro en tres grupos o etapas.

En la primera etapa se realizará el modelo semiparamétrico del casete o modelo dinámico. A partir del modelo esqueleto se irán añadiendo parts al product casete hasta completar todos sus elementos. Así, se incluirá la placa de cobre, junto a las tuberías de refrigerante en su interior además de las perforaciones tanto como para los soportes de los absorbentes y las fijaciones para los módulos hexagonales como para los pines de sujeción de estos. Luego se añadirán los módulos hexagonales, y junto a la posibilidad de simetría de Catia, también se cubrirá la otra parte de la placa de cobre de módulos hexagonales. Se incorporarán los sistemas de fijación y para finalizar ambos absorbentes a cada lado del casete. Todas las posiciones de estos elementos vendrán determinadas mediante el part esqueleto, permitiendo una rápida modificación de los elementos. Este parte se detalla en la sección 3.3.1.

La segunda parte se compone de la realización de la unión de los seis casetes que unen un disco. A partir de aquí el modelo deja de ser semiparamétrico y pasa a ser totalmente manual con el objetivo de la creación de la estructura final. En esta sección será fundamental ensamblar los casetes teniendo en cuenta el margen de distancia entre los mismos. Además, para realizar este paso será vital la transformación individual de cada casete desde el modelo dinámico del casete.

Para la última etapa se agruparán todos los elementos diseñados para formar la estructura completa abarcada en este proyecto del CE-E. Así, se montarán sobre el cono soporte los catorce discos de casetes junto a los sistemas de fijación vistos en la sección 2.3.3, además del backplate en la parte trasera que colinda con la hadrónica.

Cuando se hayan completado estas tres etapas se podrá disfrutar de la vista del ensamblaje del modelo CE-E, compuesto por más de 680 partes.

3.3.1 Modelo Dinámico³³ Del Casete

En esta sección se abarca la reconstrucción del modelo de casete siguiendo los razonamientos abordados en el Capítulo 2. Mediante un proceso de segmentación se procederá a explicar cómo se ha llevado a cabo el proceso de diseño de los elementos que componen el casete mediante el uso de la herramienta software Catia V5.

Para ello, se tomarán distintas capturas del proceso de desarrollo, visualizando paso por paso la construcción del diseño de los elementos que conforman el CE-E.

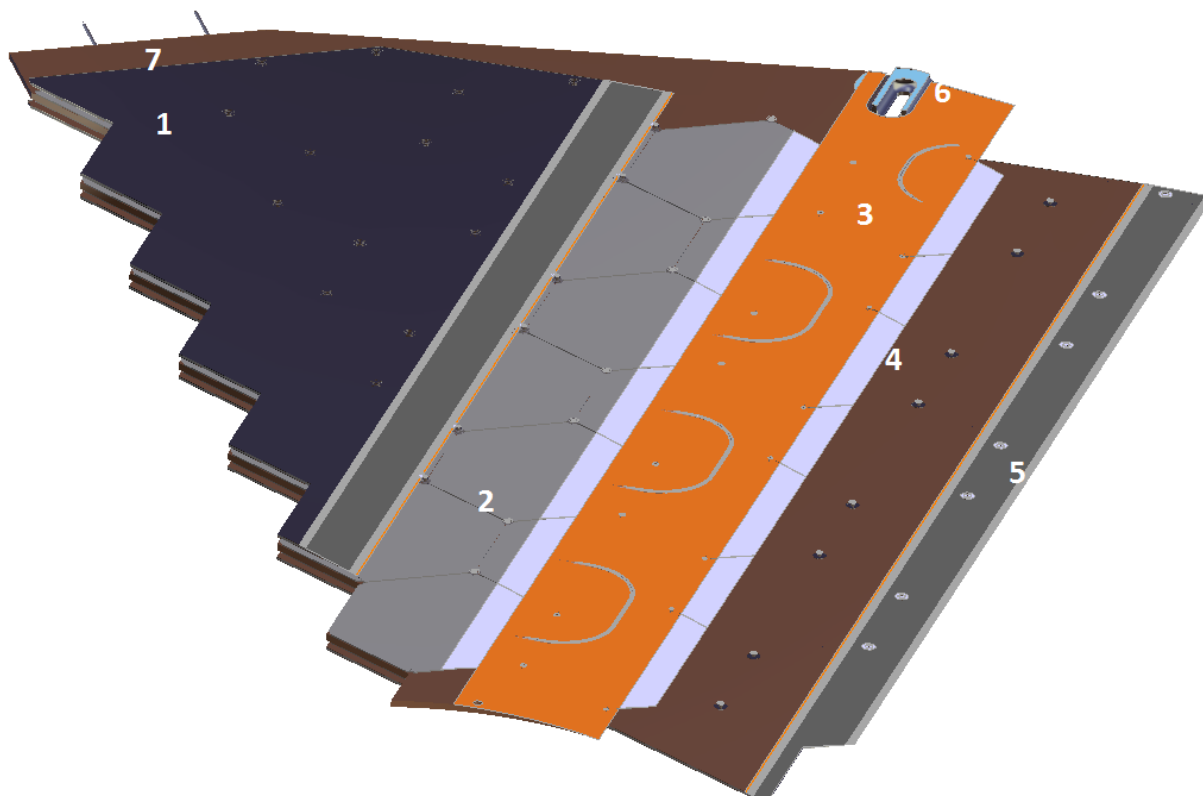


Figure 52: Sección del casete

- 1- Sandwich SS Pb SS
- 2- Módulos hexagonales
- 3- Placa de cobre (Visibilidad de tuberías de refrigeración)
- 4- Módulos hexagonales II
- 5- Sandwich SS Pb SS II
- 6- Sistema fijación de la placa de cobre
- 7- Entrada/Salida Tuberías de refrigeración

³³ Número de parámetros viene especificado en el anexo Anexos

3.3.2 Módulo hexagonal

Conforma el elemento en torno al cual gira el resto de partes debido a que su geometría definirá el resto de geometrías. Por ello, para este diseño, todas las dimensiones vendrán dadas en función de las características del módulo hexagonal.

- 1- Para centrar la posición del módulo hexagonal se publica desde el part Skeleton el punto “Keypoint” que servirá como referencia para centrar los módulos hexagonales sobre el copperplate. Se importa el plano medio del módulo hexagonal para situarlo a la altura respecto al copperplate. Originalmente se introdujeron los parámetros “X_Origin” e “Y_Origin” para facilitar un desplazamiento de todos los hexágonos relativo a la placa de cobre. Se verá que no será necesario este desplazamiento puesto que se distribuirán los hexágonos a partir de este módulo centrado respecto al disco de casetes.
- 2- Se dibujará el hexágono con su circunferencia circumsrita en su exterior de diámetro el diámetro del waffle. Se tienen dos opciones de diámetro:
6 pulgadas = 152.4 milímetros
8 inches = 203.2 milímetros
- 3- Se realizan los “mousebites” en las esquinas del hexágono. Se usa el parámetro “Mouse_Bite_Distance” para controlar la distancia de estas mordidas.
- 4- Con el parámetro “Thickness_baseplate” se controla el espesor del módulo hexagonal.³⁴
- 5- A través de los “Pin_fixed_distance_from_centre_baseplate” y “Hole_diameter” se controlan las medidas de los agujeros del módulo hexagonal. A través de la operación “Slot” realizamos el agujero con holgura vertical, controlando que la posición del hexágono esté en posición vertical, con los agujeros en el eje de simetría.
- 6- Por último, se aplica material para la renderización.

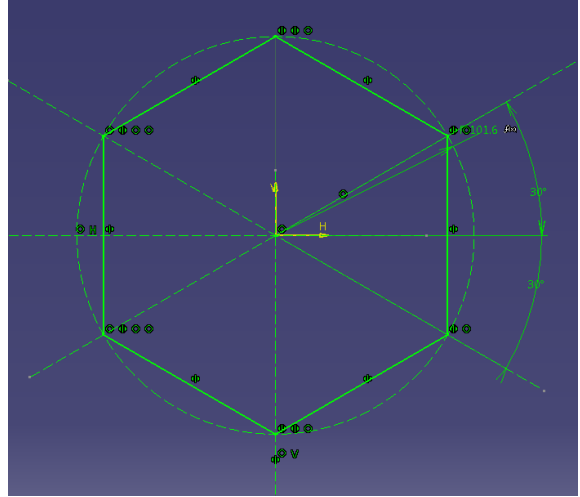
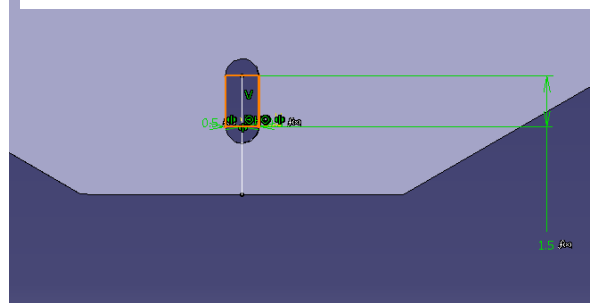


Figure 53: Sketch baseplate



parámetros “Distance_from_mouse_bite”,

Figure 54: Agujero con Holgura

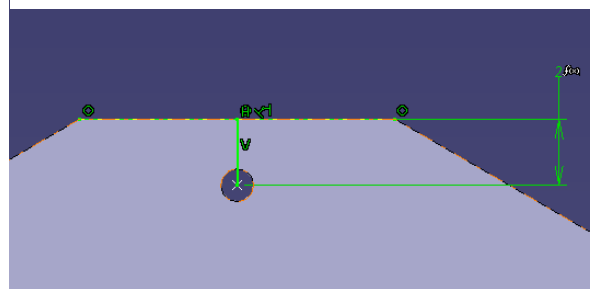


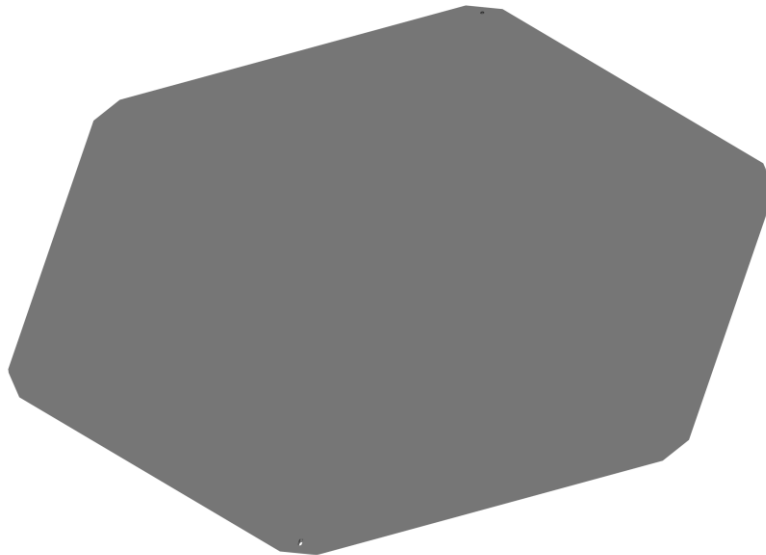
Figure 55: Agujero Normal

³⁴ Estos parámetros junto a los relacionados con los agujeros serán intrínsecos al part Baseplate.

Una vez diseñado el módulo hexagonal se importa al product “Cassette”. Aparecerá en la posición señalada por el “KeyPoint” al haber sido este el elemento publicado que se usan como centro del módulo hexagonal, y como posteriormente se verá, como centro para el diseño.

Más adelante, a través de la función “Reuse Pattern” se multiplicará este módulo hexagonal a lo largo del casete, evitando la colocación individual para su mayor número de módulos Hexagonales. Sin embargo, existirá un número de ellos que se deben introducir de forma individual debido a la variación del número de módulos hexagonales por casete conforme aumenta el tamaño de los casetes en cada disco.

Estos módulos hexagonales añadidos no siempre serán completos puesto que existe la posibilidad de tener sensores de la mitad del módulo hexagonal³⁵.



Sabiendo que el centro de el m'odulo hexagonal será “Key_Point” siendo el plano medio de este el plano “Plane XY baseplate (Midplane)” se procederá a situar el resto de centros de los módulos hexagonales sobre dicho plano. Luego, se desactivan los nodos, se deshabilitarán o se esconderán aquellos que salgan del perímetro del casete.

A partir de aquí, el diseño y distancias se convierte en un juego de medidas entre parámetros del Hexágono: Diámetro o “Diameter” y distancia entre Hexágonos o “Ease”.

³⁵ El estudio de cómo de pueden dividir estos módulos hexagonales para maximizar la superficie donde impactan las partículas aún no ha clarificado cómo pueden distribuirse. Para este diseño se ha simulado una distribución considerando la posibilidad de tener particiones del 50% del módulo hexagonal.

Procedimiento Centro de los Módulos Hexagonales:

Como se ha mencionado en la sección anterior, todo el diseño gira en torno a la posición del centro de los módulos hexagonales. Por ello, una vez se ha decidido la posible distribución de los mismos a través de la opción pattern de catia, se distribuirán el resto de módulos hexagonales sobre la cara de la placa de cobre.

1- Creación de Sketch para ser usado luego en el pattern:

Actualmente se tiene un módulo hexagonal, situado en el Key_Point. Se necesitará otro hexágono para hacer un rectangular pattern y cubrir todos los huecos. Por ello, se colocará el centro del hexágono más próximo que esté a diferente altura. Usando fórmulas geométricas dividiendo la geometría del hexágono en triángulos, se obtiene que esta distancia es $= \text{Ease} + \text{Diameter} * (\sqrt{3}) / 2$, que es la distancia entre dos centros de hexágonos a través de sus lados, a la que se llamará con el parámetro “Horizontal_Distance”.

2- Una vez se tiene el Sketch de los dos centros se usa la función rectangular pattern para obtener el resto de centros de los módulos hexagonales. Se usarán ambas direcciones, parametrizando con los parámetros “Number_of_repetitions_h” y “Number_of_repetitions_v” para obtener el número de líneas de módulos hexagonales que se quiere y rellenen el Copperplate.

Estos parámetros relacionan el largo del casete con la distancia entre hexágonos de forma horizontal y vertical, obteniendo una buena aproximación del número de repeticiones que se necesiten.

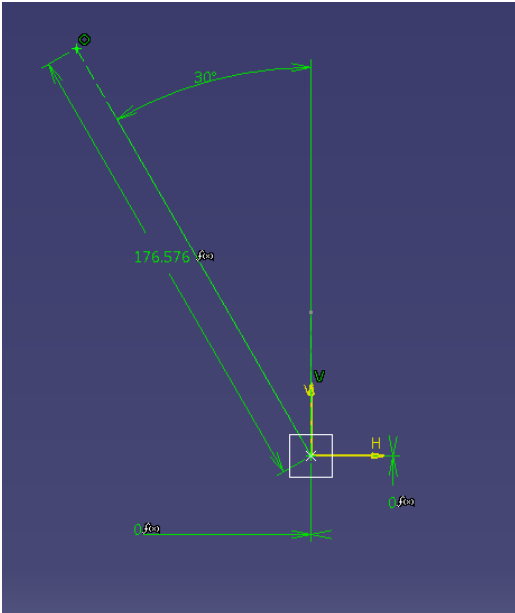


Figure 57: Sketch Centro Baseplates

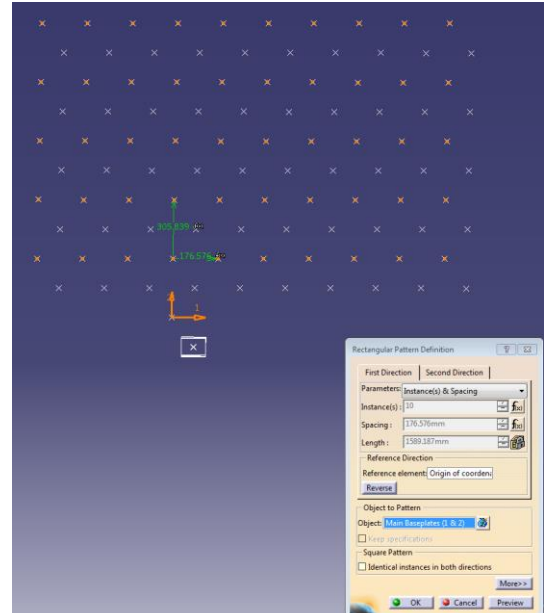


Figure 56: Rectangular Pattern centro de los Baseplates

En paralelo, el siguiente proceso a realizar será la placa de cobre.

3.3.3 placa de cobre

La placa de cobre formará, junto a su plano medio, la parte central del diseño. Además, es donde todos los elementos se ensamblan, por no mencionar que por dentro habrá que diseñar las tuberías de circulación. Por tanto, se convierte en el elemento donde más operaciones son llevadas a cabo.

Procedimiento para la creación de la placa de cobre:

- 1- Se establecen los límites del cassette. El límite inferior vendrá dado por el radio del cono aproximadamente en cada uno de sus escalones, mientras que el límite superior vendrá dado por las diferentes alturas dependiendo de qué capa del casete se encuentre. El diámetro interior se controlará mediante el parámetro “Radio_internal_cassette” mientras que el exterior mediante “Radio_external_cassette”. Por los lados irá limitada por la posición de los hexágonos.
- 2- En el part esqueleto se definirán los diferentes límites que luego serán publicados en el part “Copper_Plate”. Estos Sketches serán diseñados en el plano “Mid_plano_copper_plate”.
- 3- Los módulos hexagonales no deben de estar colindando con los bordes de la placa de cobre por lo que se considera la mitad de la holgadez entre hexágonos para hexágonos situados en los bordes.
- 4- Como ya se hiciera para la colocación de los centros de los módulos hexagonales, se creará un sketch que servirá para repetirlo a través de la longitud del casete. Se hará lo mismo con su rotación de 60° para completar así los bordes del casete.
- 5- Usando el mismo concepto que en los centros de los módulos hexagonales, se prolonga este patrón del módulo hexagonal más allá del radio exterior del casete. Así, se coratá estos patrones en dos límites tanto en la parte inferior como superior, superiores a los límites del casete. Luego, a través de la función “Join”, se unirán para formar una única línea continua. Se publicará este “Join” para copiarlo en el part “Copper_plate”.

Table 6: Dimensiones de los casetes desde el eje del cono soporte.

Capa	Altura desde el eje del cono(mm)
1	1568.906
2	1577.502
3	1586.1
4	1594.695
5	1603.292
6	1611.888
7	1620.485
8	1629.081
9	1637.678
10	1646.274
11	1654.871
12	1663.467
13	1672.067
14	1680.661

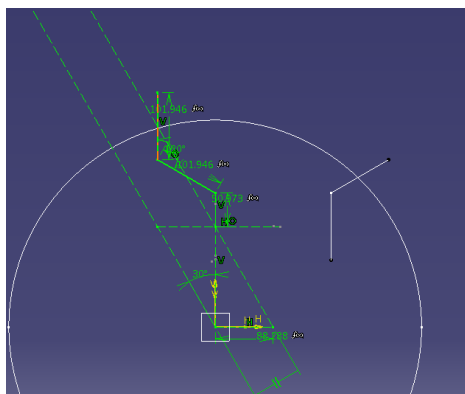


Figure 58: Paso 4

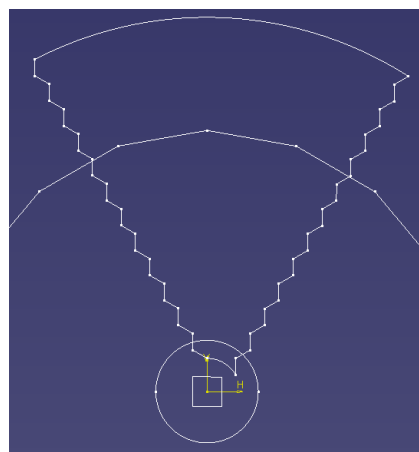


Figure 59: Punto 5

- 6- Se crean Sketches para límites exteriores e interior del casete por separado. Se hace la misma operación que con “Join”. Así, se cuenta en el part “Copper_plate” con todo el perímetro necesario para hacer el pad de la placa de cobre previo dos operaciones de “Pocket”. Este es un diseño robusto que garantiza la compilación en el rango de medidas en el que se mueve.

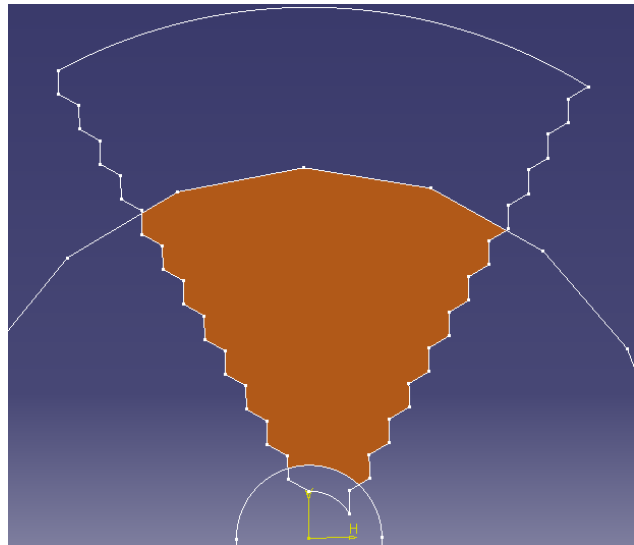


Figure 60: Punto 6

- 7- Una vez se dimensiona la placa de cobre la siguiente operación será la creación tanto de los agujeros para los pines de fijación de los hexágonos, tanto para los pines como para la injerción. Se usa el mismo método mediante los patterns. Sin embargo, esta vez no será válida la opción de no mostrar las partes que no se quiera. Se tendrá que tener acceso a todos los agujeros y deshabilitar aquellos que estén fuera de rango.³⁶ El tipo de agujero es “Counterbored” o abocardado que traspasa la placa de cobre para permitir la inserción del soporte donde se atornillarán los absorbentes.

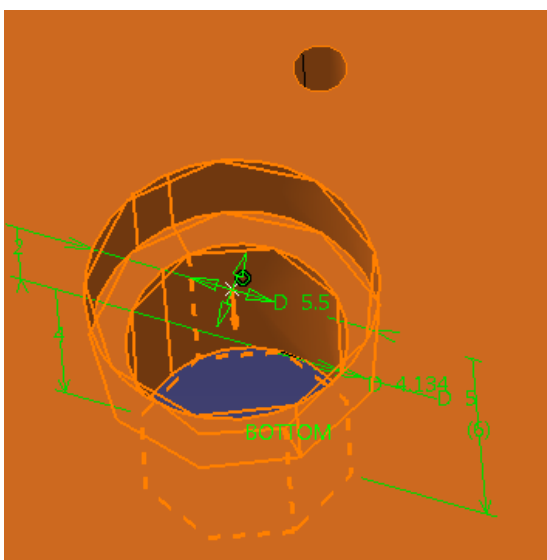


Figure 61: Detalle agujero soporte

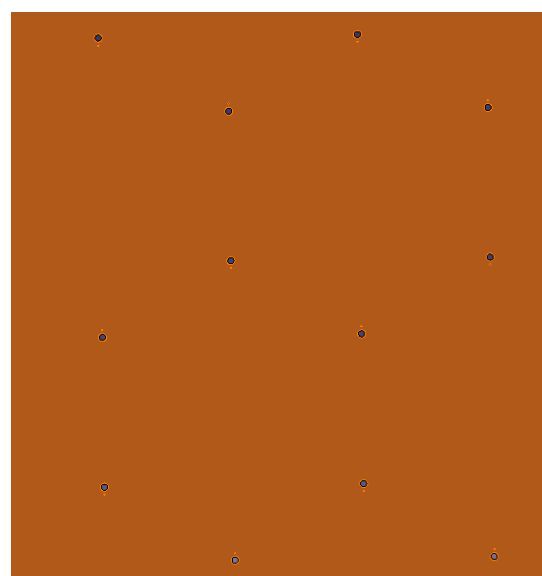


Figure 62: Operaciones de agujeros sobre la placa de cobre

³⁶ Esta operación resulta opuesta a la filosofía de realización de un modelo paraétrico. La obtención de la colocación en los puntos exactos que queramos será una de las mejoras para nuestro modelo paramétrico.

- 8- Se realiza la operación de canalizado de las tuberías de refrigeración interior al casete. Debido a la redundancia que explicamos en el apartado Sistema de refrigeración en el interior de la placa de cobre.2.2.2.2, se diseñarán dos tipos de canalizaciones dependiendo si es una capa par o impar. Así, se crean diferentes bodies refiriéndose a la canalización 1: “Pipes_Configuration_1_1” y “Pipes_Configuration_1_2” o a la canalización 2: “Pipes_Configuration_2_1” y “Pipes_Configuration_2_2”. De esta forma, se modificará el casete escondiendo/deshabilitando las tuberías que no se necesiten, así igual con los slots dentro de la placa de cobre, configurándose las tuberías de refrigeración del casete según se requiera.

Igual que con los pasos anteriores, los Sketches de las tuberías de refrigeración serán diseñados en el “Part Sketch” para luego a través de su publicación copiarlos en el part “Copper_plate”.

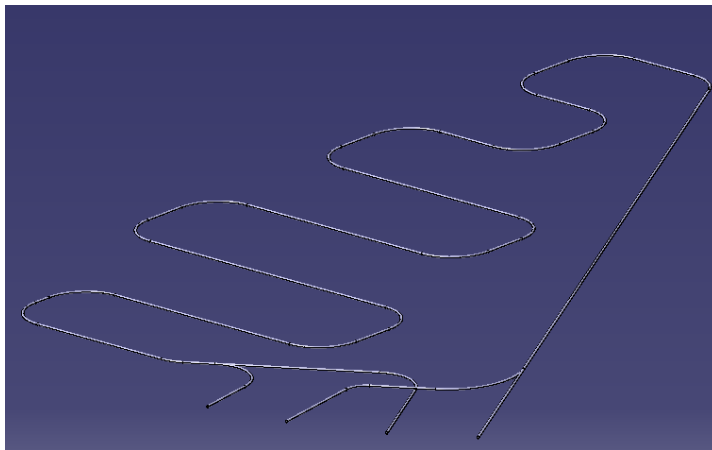


Figure 64: Tuberías de refrigeración, incluidas en distintos Bodies al de la placa de cobre.

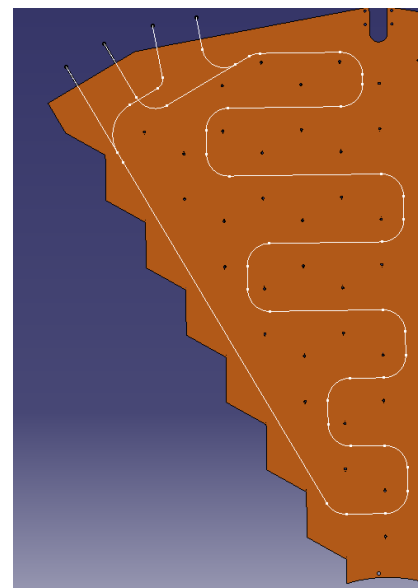


Figure 63: Distribución sobre la placa de cobre.

- 9- La distribución de las tuberías está parametrizada en función de cómo y por donde pasarán los centros de los módulos hexagonales y según los límites exteriores de la placa de cobre. Sin embargo, una parametrización total según las dimensiones de los módulos hexagonales resultaría objeto de mejora del modelo, puesto que habría que estudiar el aumento del número de líneas en su recorrido por la placa de cobre. Así, para el modelo, se ha hecho el diseño preliminar de estas líneas de refrigeración teniendo en cuenta el modelo de hexágono de 8 pulgadas.
- 10- Las dimensiones de las tuberías, en cuanto a diámetros de la misma tubería como del slot por donde circula dentro de la placa se modifican mediante los parámetros: “Diameter_Pipes_Hole”, “Diameter_Pipes_External” y “Diámetro_Pipes_Internal”. Además, el posicionamiento relativo respecto a las tuberías que traen el refrigerante hacia el CE-E, junto a la distancia entre tubería de entrada/salida a la placa de cobre serán modificables mediante los parámetros: “p11”, “Distance_Separation_inlet_pipes” y “Large_inlet_pipes”.

- 11- Para realizar el modelo de ensamblaje y con objeto de estudio, fuera de diseño paramétrico, se añaden varias operaciones como son los sistemas de fijaciones: tanto para la fijación con el cono como para el sistema antirotación:

Para el sistema de fijación respecto al cono se realizarán dos agujeros y dependiendo de para qué capa habilitaremos uno u otro, así como se hiciese con las tuberías de refrigeración. Se importarán las medidas de los agujeros en el cono en nuestro diseño del casete.



Figure 66: Fijación para el cono

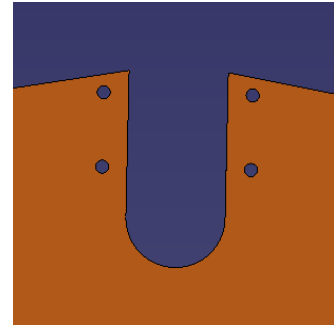


Figure 65: Fijación soporte antirrotación

El soporte antirotación estará formado por un pocket y por un assemble donde realizaremos los distintos agujeros a través de un pattern por posición o “User Pattern”.

3.3.4 Incorporación de elementos al Casete.

Una vez hechos todos los taladros sobre la placa de cobre es el momento de añadir los módulos hexagonales o módulos hexagonales y de los sistemas de fijaciones de estos a la placa de cobre.

- 1- A través de la función Reuse Pattern se puede multiplicar un product siguiendo un patrón. En este caso, se colocan dos módulos hexagonales originales en posiciones iniciales (1 y 2) y luego se realizará esta operación a través del pattern “Centre_Baseplate”, que posiciona cada uno colocados según su centro.

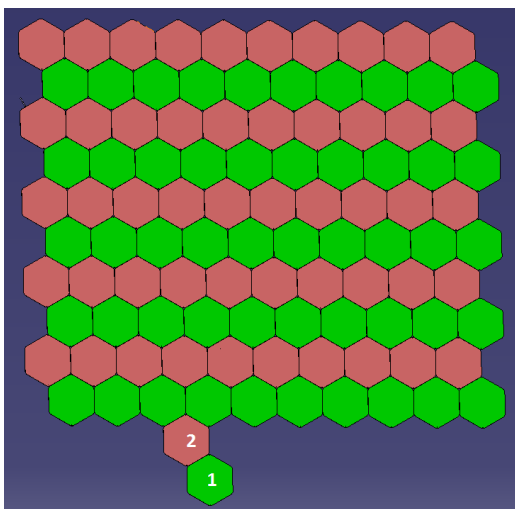


Figure 68: Baseplates Pattern

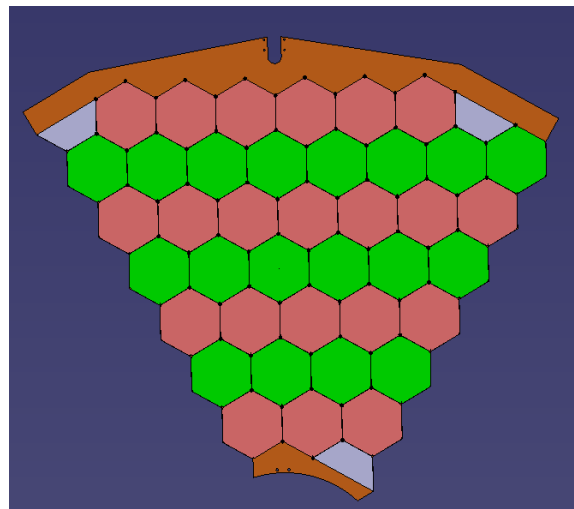


Figure 67: filtrado de Módulos hexagonales

Puntualmente se incorporarán mitades de módulos hexagonales para completar la geometría.

- 2- Con la función Symmetryse duplica la multiplicación de módulos hexagonales realizada anteriormente, todos juntos (Gathered) para cubrir la parte trasera del copperplate³⁷. Así se consigue cubrir la placa de cobre por ambas caras.
- 3- Para la incorporación tanto de los pines como de las fijaciones se llevará a cabo el mismo proceso³⁸.

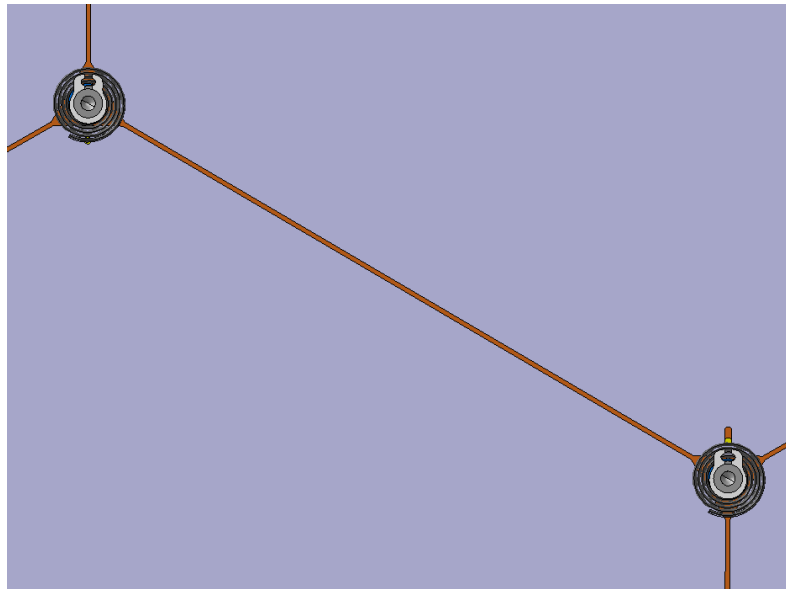


Figure 69: Fijación baseplates

3.3.5 Absorbentes

La condición impuesta sobre los absorbentes de que traten de cubrir sólo la parte de los módulos hexagonales hace que sea un elemento difícil de parametrizar. Por tanto, los límites exteriores e interiores del mismo habrán de realizarse manualmente. Sin embargo, existen partes del absorbente que se pueden aguilizar, como son la introducción de las inserciones a través de la ayuda del pattern para las fijaciones en el copperplate ya que comparten el mismo eje.

- 1- Se publica y copia en el part del “SSPbSS_Plate” la unión de los límites de la placa de cobre, y los Sketches manuales de los límites inferior y superior para el absorbente considerando donde están colocados los módulos hexagonales.
- 2- Usando la función “Split” se crea el contorno del absorbente, que luego a través del “Join” se unirá para obtener la línea cerrada con la que a través de la función “Pad” se crean las distintas capas del absorbente.

³⁷ Aquellos elementos que fueran introducidos manualmente habrán de ser duplicados de la misma forma.

³⁸ Sin embargo, no será necesaria la operación de simetría para la fijación central ya que se formará en el part para cubrir ambas partes.

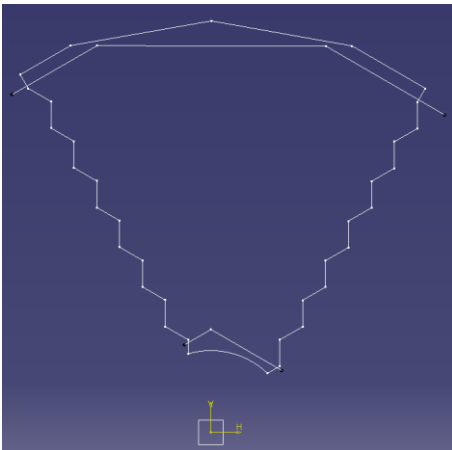


Figure 71: Absorbente Sketches

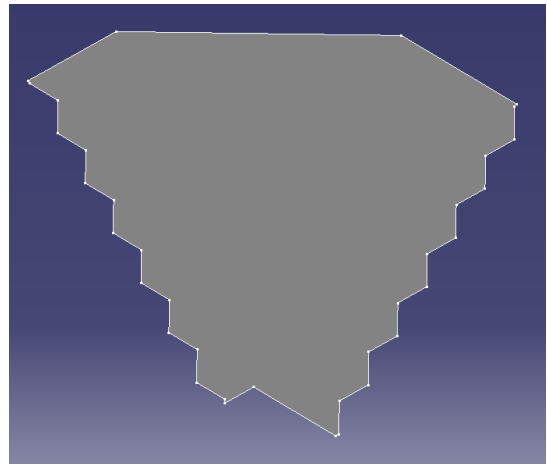


Figure 70: Absorbente

- 3- Se crean las siguientes capas introduciendo cada una en un “body” distinto, así se tendrán las dos caras del sándwich en Acero Inox. (SS), el cuerpo de Plomo (Lead) y la lámina de cobre en contacto con la Mother Board.
- 4- Una vez se tiene el sándwich se crean los agujeros para introducir las inserciones. Para ello, se usará la función “Remove” dentro de las operaciones Booleanas. Para ello, en un body donde a partir del pattern de los centros de los soportes de fijación (misma localización que los insertos del sándwich) se crea unos cuerpos cilíndricos de radio el radio de los insertos que luego serán removidos dejando los huecos para las inserciones.

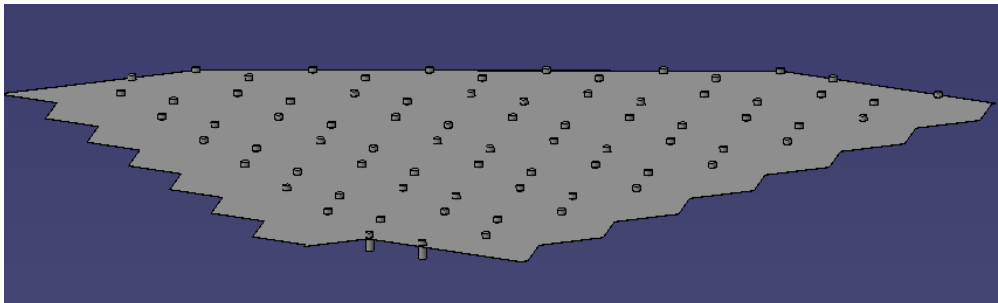


Figure 72: Absorbente pre perforación

- 5- Con la introducción de las inserciones se finaliza el modelo del absorbente³⁹. Se obtendrá el lado lado correspondiente a la otra cara de la placa de cobre a través de la función de “Symmetry”.
- 6- Por último, se atornillan los absorbentes a través de los insertos de la placa de cobre completando la construcción del casete.

³⁹ Como procesos anteriores, deshabilitaremos los insertos que no se necesiten.

3.3.6 Modelo Casete ensamblado

Una vez se han ensamblado todos los elementos se obtiene el modelo preliminar del casete, uno de los seis segmentos que formará cada uno de los 14 discos que forman el CE-E, Figure 73. De no más de 24 mm de anchura por 1300 mm de alto y ancho en su parte más externa se erige la pieza de puzzle del CE-E.

Sin contar con los sensores, partiendo sólo de las estructuras mecánicas de esta estructura, cuenta con más de 650 piezas, distribuidas en torno a las dimensiones de los módulos hexagonales, parte clave en la distribución de la estructura. En esta imagen se puede observar la segmentación de 20 grados de los casetes en su parte externa. Además, la asimetría respecto al eje vertical debida a la distribución de los módulos hexagonales.

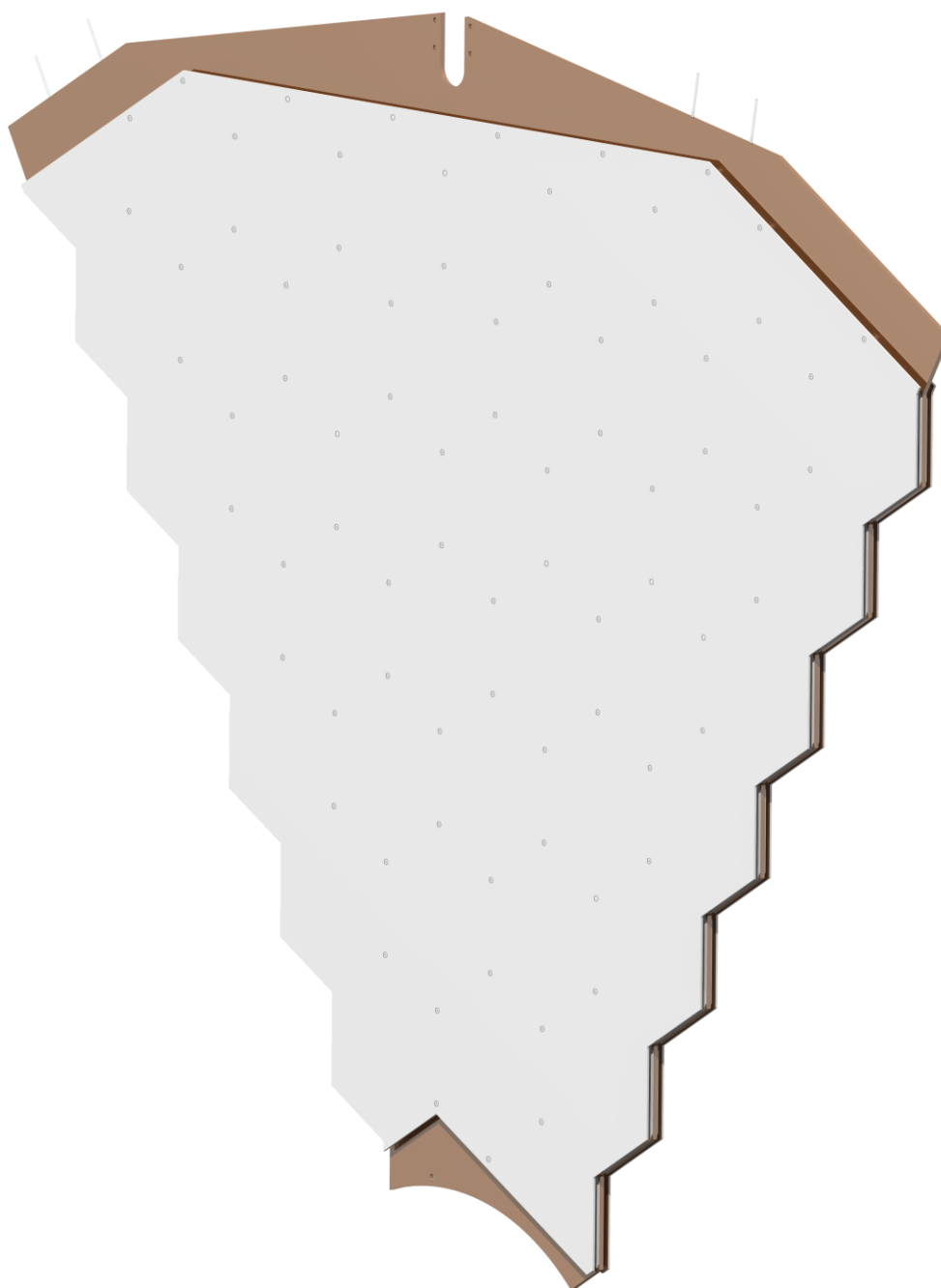


Figure 73: Modelo de casete

3.4 Ensamblaje Elementos CE-E

Una vez se ha desarrollado el modelo dinámico del casete el siguiente objetivo es la creación del modelo completo de la estructura del CE-E. Con este objetivo se trata de probar los siguientes puntos:

- Correcta funcionalidad del modelo dinámico del casete a la hora de crear los diferentes casetes para las diferentes capas que conforman el CE-E..
- Correcto ensamblaje entre todas las capas del CE-E.
- Crear una visualización global del CE-E, junto a los diferentes elementos de fijación.

Desde de aquí se convierte en un proceso irreversible ya que a partir de un casete parametrizado se obtienen el resto de casetes para todo el modelo. Este paso cobra utilidad una vez se han declarado las dimensiones para calcular pesos, momentos de inercias entre otras características globales de la parte electromagnética del calorímetro.

Para este proceso existe un módulo en Catia esencial. Entramos en *Start > Infrastructure > Product Data Filtering*. Este módulo permite pasar un product a otro product pasando todos su bodies como solidos. Esto permite guardar la propiedad intelectual debido a que no se podrá acceder a las diferentes funcionalidades del árbol de ese part. Sin embargo, para este diseño tendrá otro objetivo y es congelar las dimensiones del product desde la modificación de sus parámetros.

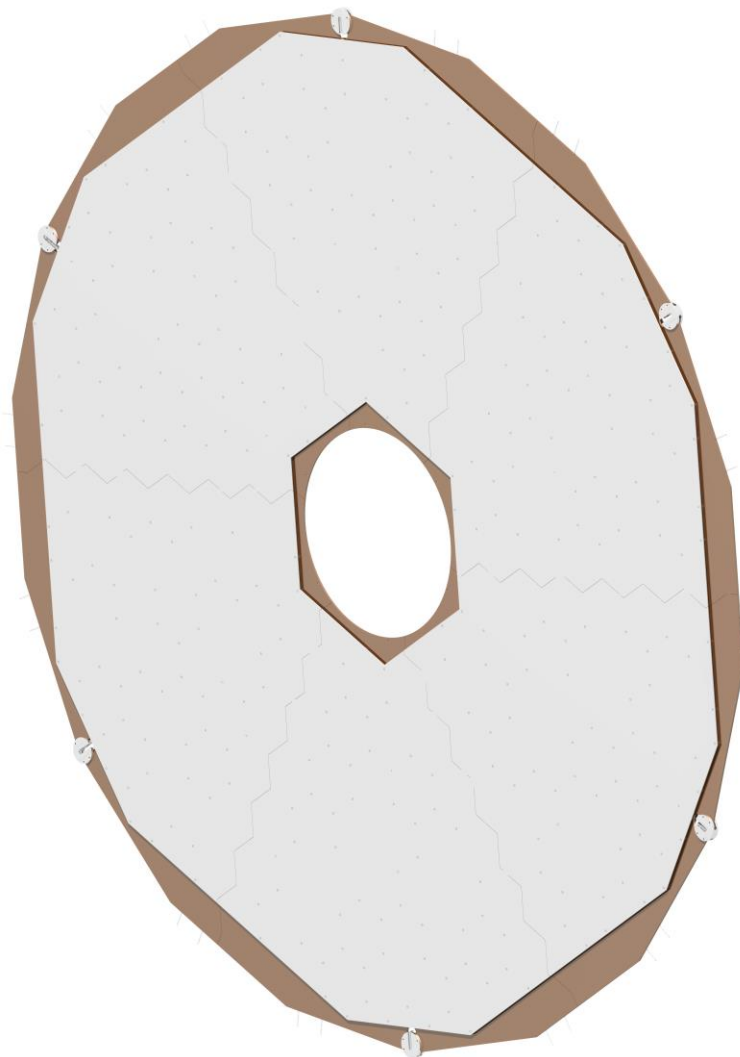


Figure 74: Ejemplo capa del CE-E

Una vez “filtrado” nuestro sólido se aplica material a las diferentes partes del casete. De este modo, se puede caracterizar el sólido, calculando pesos, momentos de inercia, etc, además de obtener una visual renderizada. Este proceso será especialmente relevante a la hora de estimar los pesos del Calorímetro contando con todas las partes que aquí se estudian.

Un requisito fundamental a la hora de ensamblar cada casete en su capa será la distancia entre estos⁴⁰. Está estimada en torno a 0.5 mm entre casetes (provisional). Esta distancia viene determinada por dos factores:

- Distancia de seguridad respecto a la expansión /contracción térmica. Como se ha mencionado en secciones anteriores, en los casetes se ha introducido un mecanismo de redundancia en caso de que uno de los conductos de refrigeración se estropeará y no perder visibilidad total en el CE-E. Si esto ocurriera, ese casete aumentaría su temperatura, expandiéndose. Por lo tanto, una distancia de seguridad deberá ser tenida en cuenta en el caso que se produjese dicha expansión.
- Distancia a la hora de ensamblar los casetes en el cono soporte. Será una de la problemática a resolver en los pasos futuros debido a la estrechez existente entre casetes a la hora de montar el conjunto.

Esta distancia la se obtendrá desplazando los casetes en la dirección radial hasta obtener dicho margen. A través de los parámetros “Radio_external_cassette”, “Radio_internal_cassette”, junto a la distancia del soporte en el casete para el cono se ajusta esta distancia de separación entre casetes.

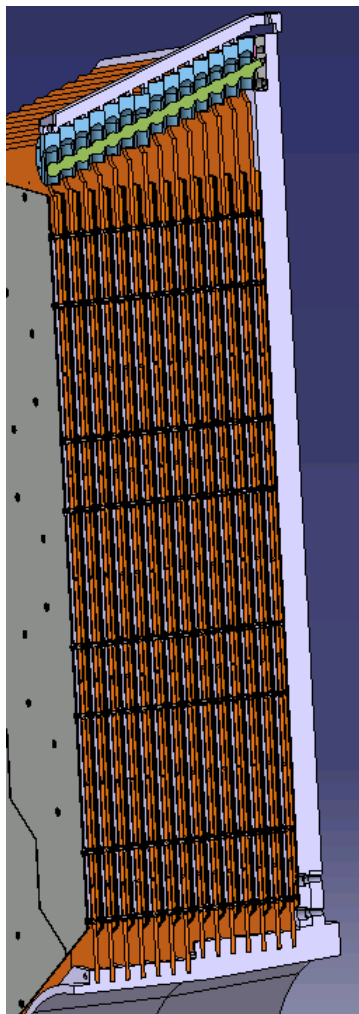


Figure 75: Sección ensamblaje final CE-E

En la Figure 75 se observan los diferentes componentes que conforman el CE-E. En la parte inferior vemos el cono soporte, donde claramente se observan los dos escalones donde van ensamblados los casetes. En la parte trasera se observa el disco soporte, de mayor espesor que las capas del CE-E. En la parte superior podemos entrever la posición de los rigidizadores unidos a cada uno de los antirrotadores unidos a los casetes.

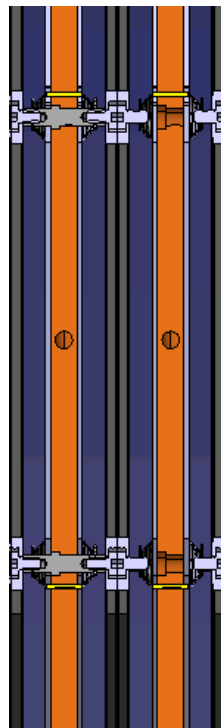


Figure 76:Detalle de dos capas de casetes

En la Figure 75 se observa en detalle la posición de dos discos de casetes situados en posiciones consecutivas. En la imagen se puede apreciar la posición de los pines, soportes (véase en el casete de la derecha el hueco que tendría el soporte en la placa de cobre). En esta imagen se puede apreciar el tamaño relativo de los diferentes componentes que forman los discos de casetes.

⁴⁰ Esta será controlada mediante las uniones entre casetes. Como hemos mencionado anteriormente, un mecanismo de control a través de tornillo sin fin que permita el desplazamiento en la dirección transversal podría ser una solución al problema.

En la Figure 77 se observa el diseño final del la parte electromagnética del calorímetro. En el Anexo V se detalla el número de elementos que está compuestos, además de las masas de cada uno de ellos.

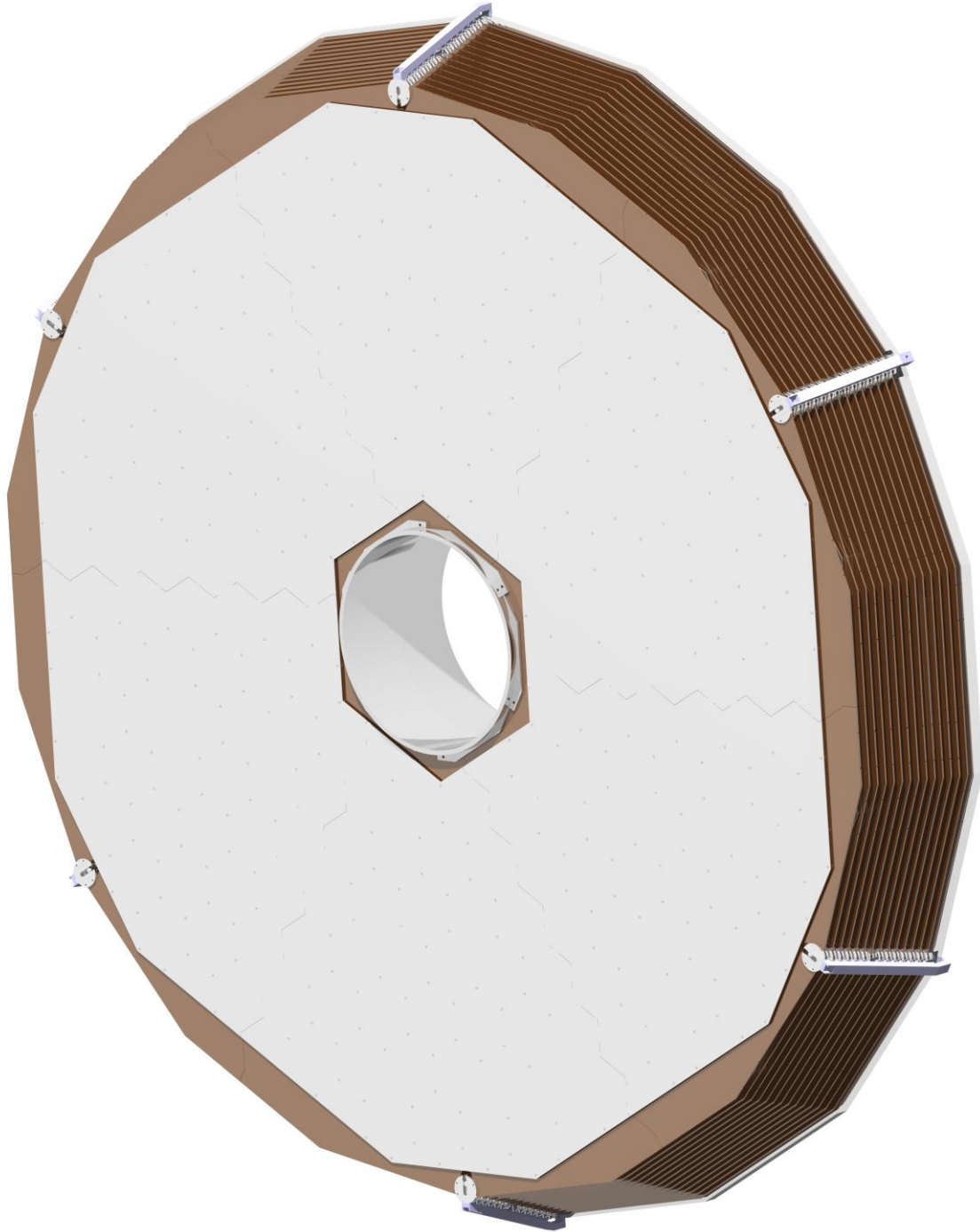


Figure 77: Diseño final del CE-E

4 FUTUROS PASOS

"Everything existing in the universe is the fruit of chance and necessity"

" Todo lo que existe en el universo es fruto de la casualidad y la necesidad"

-Democritus of Abdera -

Conforme avanza el estudio de los componentes y sus características instalados en el calorímetro, prototipos más fieles al estudio podrán diseñarse hasta converger en la solución final. Mientras tanto, se estudia el amplio abanico de posibles soluciones y el estudio de mercado en cuanto a nuevos materiales o formas de trabajarlos para que cuando sea el momento de tomar decisiones ya se hayan estudiado la mayor parte de ellas. Sin embargo, habrá que contar con una limitación económica de financiación y de tiempo de desarrollo actuando siempre de la forma más productiva y eficiente posible.

Uno de los elementos clave en el desarrollo del producto es la evolución del estudio sobre los Módulos Hexagonales. Su distribución, así como sus características en términos de composición más los servicios de los que se nutre afectan de manera directa al diseño del calorímetro. Por tanto, tanto la geometría, como los circuitos de refrigeración en el interior de la placa de cobre, como la potencia necesaria para el enfriamiento de la parte electromagnética, se ven afectados por el cambio en los Módulos Hexagonales. Como siguiente paso de estudio, una vez clarificado unívocamente la distribución de los módulos hexagonales además de la decisión de cómo podría dividirse los mismos teniendo en cuenta los sensores de Silicio sobre él, es el completo estudio térmico de la placa de cobre contando con todas las fuentes térmicas que actúan sobre él. A través del estudio térmico-mecánico en Ansys realizando modelos coupled (traspasando los resultados desde módulo thermal Transient al Transient Mechanical) obtener las variaciones y el tiempo de enfriando según en qué puntos del CE-E.

También habrá que focalizar los siguientes pasos es en la atmósfera creada en el interior del calorímetro, dentro de la pantalla térmica aislante o "thermal screen". Al estar en temperaturas operacionales en torno a los -30°C existe la posibilidad de la creación de hielo en el interior del calorímetro, tanto en la parte Electromagnética como en la Hadrónica. Será necesario el estudio del sistema de introducción de gas seco circulando dentro del calorímetro: viabilidad de paso a través de la placa de cobre para hacerlo circular alrededor del cono soporte. Este estudio fluido-dinámico es uno de los pasos a completar en esta fase de prototipado.

Otra dirección de estudio debe ser a nivel global de estructura. Como se ha visto, entendemos que el calorímetro debe ensamblarse de forma horizontal partiendo desde la base de la sección Hadrónica hasta instalar la última capa (Analogía de secciones de pizza). Esto supone unos esfuerzos y deformaciones para la estructura totalmente diferentes a los que encontrará una vez colocado en su forma final (vertical). Una de las vías de estudio radica en la compresión de estos casetes para reducir la deformación debido a su propio peso en el proceso de ensamblaje. Afectará a los sistemas de fijación entre los diversos elementos por lo que conllevará rehacer cálculos en este ámbito.

Por otro lado, seguir en la tendencia continuista de creación de prototipos como hemos observado en este trabajo (placa de cobre, absorbentes...), obteniendo mejor información acerca de los elementos incorporados en él. La elección del tipo de proceso por la que estará conformado la placa de cobre es un paso que debe de ser seleccionado de forma breve debido a que conforma uno de los pilares del Calorímetro en ambas partes, tanto la electromagnética como la hadrónica. Además, la elección de qué tipo de cono soporte sustentará el peso de la parte electromagnética del calorímetro, si bien el cono soporte de dos escalones o el que incorpora un anillo interno entre casete y cono soporte.

Estos serían los siguientes pasos que a modo continuista seguiría al estudio realizado en este proyecto.

Evidentemente, cuando se trata de un proyecto que tiene su fecha de operabilidad a 7 años vista numerosos procesos habrán de ser estudiados y probados por lo que este capítulo sería insuficiente para enumerarlos a todos.

5 CONCLUSIONES

"This is your last chance. After this, there is no turning back. You take the blue pill - the story ends, you wake up in your bed and believe whatever you want to believe. You take the red pill - you stay in Wonderland and I show you how deep the rabbit-hole goes"

"Esta es tu última oportunidad. Después de esto, no hay vuelta atrás. Tomas la píldora azul - la historia termina, te despiertas en tu cama y crees lo que quieras creer. Tomas la píldora roja, te quedas en el País de las Maravillas y te muestro lo profunda que es la madriguera de conejo".

-Morpheus, The Matrix (1999) -

Queda patente en este trabajo una primera vista de la envergadura de un proyecto en el que un número alto de piezas han de encajar y en el que la seguridad en su ejecución requiere numerosos tipos de comprobaciones. Hemos dado una visión general de los aspectos mecánicos que conforman el calorímetro a instalar en 2026 en el detector CMS en las instalaciones del CERN.

Se han realizado diferentes estudios preliminares de diversa índole, véase térmicos, mecánicos, y se ha podido realizar trabajo de campo en el taller con el estudio de algunos prototipos que conformarán las bases de la estructura final. Así, como objetivo de este trabajo se han realizado estudios preliminares sobre todos los principales componentes mecánicos que van incluidos en el CE-E, además de proporcionar coherencia y nuevas vías de estudio de su desarrollo.

Además, durante este periodo se han realizado numerosos cálculos en ansys, como se ha visto en el capítulo dos, a la hora de trabajar con la placa de cobre, absorbentes, casetes, movilidad de módulos hexagonales, entre otros. Los resultados obtenidos han sido discutidos mediante el equipo de trabajo situado en las instalaciones del CERN, mejorando y afinando los resultados hasta alcanzar los aquí mostrados. En este proceso se ha interiorizado la importancia de trabajar dentro de un equipo. Como parte extra, hemos sido capaces de asentar una cierta metodología a la hora de trabajar con módulos de diseño y preparación de piezas como es Space Claim, así como con los módulos trabajados en este proyecto, como son Structural y Thermal, tanto Static como Transient y realizando simulaciones coupled, sintetizando ambos módulos.

También, se ha trabajado con la herramienta CATIA en su versión V R27 descubriendo nuevas formas de trabajo como son el modelo Skelletion y las publicaciones, de las que hemos nutrido nuestro modelo dinámico. Con el cumplimiento del objetivo de la creación del modelo Electromagnético se consigue dar visibilidad a del trabajo de estudio preliminar, así como dimensionar usando modelos paramétricos la parte electromagnética del calorímetro.

Se ha tenido la suerte de recibir formación en ambas herramientas desde los cursos de formación que se imparten aquí en el CERN, además de los consejos bajo petición del equipo soporte, con los que se ha optimizado la forma de trabajar en nuestros modelos.

A través de este proyecto se ha asistido a numerosas reuniones donde se ha participado activamente mostrando resultados obtenidos como de forma pasiva, adquiriendo formación acerca del proceso de desarrollo de la fase de diseño de un proyecto de grandes magnitudes en el que hay un gran equipo de personas involucrado.

Por último, el desarrollo de este trabajo se ha llevado acabo en una atmósfera internacional. Trabajar con un equipo de personas formado por diversas nacionalidades y en diferentes partes del mundo requiere un mayor tiempo de discusión y a veces, de comprensión.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ansys, Inc. (2017): *Introduction to Ansys Mechanical*
- [2] Chevalier, André (2004): *Guide du dessinateur industriel* Paris: HACHETTE LIVRE
- [3] H. Lienhard, John IV & H. Lienhard, John V (2011 [1981]): *A Heat Transfer textbook* Mineola: DOVER
- [4] Hexcel (1989): *TSB 124 Bonded Honeycomb Sandwich Construction*
- [5] López González, Luis Ricardo (2013): *Soldadura Por Fricción* Chile: Universidad del Bío-Bío
- [6] MiSUMi : *Tolerance Rings*" Disponible en <https://uk.misumi-ec.com/vona2/detail/221005518699/>
- [7] Oberg, Erik & Jones, Franklin D. & Horton, Holbrook L. & Ryffel, Henry H. (2012[1914]): *"Machinery's Handbook"* New York: INDUSTRIAL PRESS, INC.
- [8] P. Kollár, László & Springer, George S. (2003): *Mechanics Of Composite Structures* Cambridge: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS
- [9] Project Management Document (2016): *High Luminosity LHC Project Description* EDMS NO.1474445 Rev 3.0 Draft
- [10] París Carballo, Federico (2000 [1996]): *Teoría de la Elasticidad* Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales
- [11] Technical Design Report (2017): *The Phase-2 Upgrade of the CMS Endcap Calorimeter Technical Design Report* CERN: CERN-LHCC-2017-023
- [12] "The history of CERN" disponible en <https://home.cern/about>
- [13] Torrecilla Insagurbe, Eduardo (2012): *El Gran Libro de Catia* Barcelona: MARCOMBO

GLOSARIO

ALICE	
A large Ion Collider Experiment	19
ATLAS	
A Toroidal LHC ApparatuS	19
CAD	
Computer Aided Design	10
CE-E	
Parte Electromagnética del Calorímetro	10
CERN	
Conseil européen pour la recherche nucléaire	11
CMX	
CMS Experiment Group	24
ECAL	
Electromagnetic Calorimeter	21
EI	
Engineering Integration	24
EP	
Experimental Physics	24
eV	
Electron-Voltio	22
FEA	
Finite Element Analysis	24
HCAL	
Hadronic Calorimeter	21
HGCAL	
High Granularity Calorimeter	23
HL-LHC	
High Luminosity Large Hadron Collider	18
LHC	
Large Hadron Collider	11
PCB	
Printed Circuit Board	26

ANEXO I: Parámetros del modelo de Casete

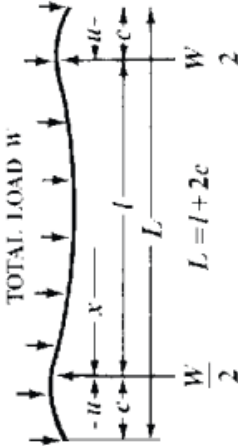
- 1- X_Origin = Desplazamiento en el eje X
- 2- Y_Origin = Desplazamiento en el eje Y
- 3- $Ease$ = Margen de distancia entre Hexágonos
- 4- $Diameter$ = Diámetro waffle.
- 5- $Radio_external_cassette$ = Radio externo del cassette
- 6- $Radio_internal_cassette$ = Radio interno del cassette
- 7- $Horizontal_Distance$ = $Ease + Diameter * (\sqrt{3}) / 2$, distancia entre centros de Hexágonos en la misma línea mismo horizontal.
- 8- $Vertical_Distance$ = $Diameter * 3/2 + Ease * \sqrt{3}$, distancia entre centros de Hexágonos en la misma línea vertical.
- 9- $Number_of_repetitions_h$ = $Radio_external_cassette / Horizontal_Distance$, útil para dimensionar a la hora de usar patterns.
- 10- $Number_of_repetitions_v$ = $Radio_external_cassette / Vertical_Distance$, análogo al horizontal.
- 11- $Copper_plate_thickness$ = Espesor del copper plate.
- 12- $Distancia_radial_cassette$ = $Diameter * 3/2 + Ease * (\sqrt{3} + 2 * \sqrt{3}) / 3$, Distancia en la dirección radial relacionada con la posición de los hexágonos
- 13- $Number_of_repetitions_radial$ = dimensionamiento en la dirección radial
- 14- a,b,c,d = parámetros relacionados con las dimensiones de los hexágonos para su colocación, para pines, centro de sistema de fijación entre hexágonos.
- 15- p11 = colocación entrada/salida pipes.
- 16- $Distance_Separation_inlet_pipes$ = Separación entre las tuberías en la entrada/ salida
- 17- $Large_inlet_pipes$ = Distancia que sobresale las tuberías del copper plate.
- 18- $Radio_curvature_pipe_inner$ = radio curvatura de la tubería de refrigeración
- 19- $Diameter_Pipes_Hole$ = Diámetro de la cavidad de las tuberías de refrigeración
- 20- $Diameter_Pipes_External$ = Diámetro exterior de las tuberías de refrigeración
- 21- $Diámetro_Pipes_Internal$ = Diámetro interior de las tuberías de refrigeración
- 22- $Mouse_Bite_Distance$ = Distancia de las mordidas a los baseplates.
- 23- $Distance_from_mouse_bite$ = Parámetro de apoyo al diseño de los agujeros del baseplate.

External parameters:

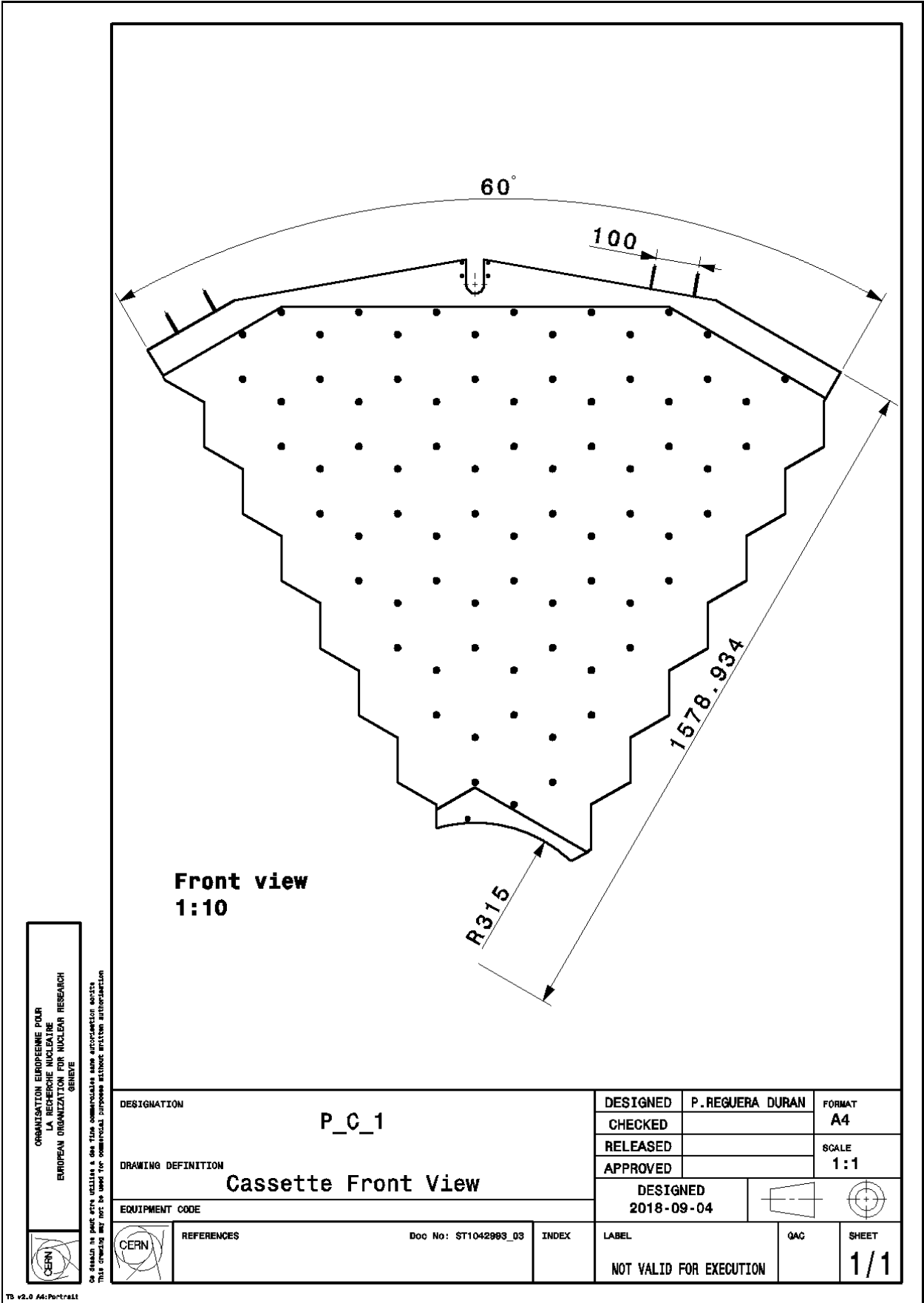
- 24- $Thickness_Baseplate$ = Espesor Baseplate
- 25- $Pin_fixed_distance_from_centre_baseplate$ = colocación agujeros baseplates
- 26- $Hole_diameter$ = Diámetro agujero baseplates.

ANEXO II: Tabla modelo a mano del absorbente

Table 1. (Continued) Stresses and Deflections in Beams

Type of Beam	Stresses		Deflections	
	General Formula for Stress at any Point	Stresses at Critical Points	General Formula for Deflection at any Point ^a	Deflections at Critical Points ^a
	Case 4. — Supported at Both Ends, Two Symmetrical Loads		General Formula for Deflection at any Point ^a	
	Between each support and adjacent load, $s = -\frac{Wx}{Z}$ Between loads, $s = -\frac{Wa}{Z}$	Stress at each load, and at all points between, $-\frac{Wa}{Z}$	Between each support and adjacent load, $y = \frac{Wx}{6EI} [3a(l-a) - x^2]$ Between loads, $y = \frac{Wa}{6EI} [3v(l-v) - a^2]$	Maximum deflection at center, $\frac{Wa}{24EI} (3l^2 - 4a^2)$ Deflection at loads $\frac{Wa^2}{6EI} (3l - 4a)$
	Case 5. — Both Ends Overhanging Supports Symmetrically, Uniform Load		General Formula for Deflection at any Point ^a	
	Between each support and adjacent end, $s = \frac{W}{2Zl} (c-u)^2$ Between supports, $s = \frac{W}{2Zl} [c^2 - x(l-x)]$	Stress at each support, $\frac{Wc^2}{2Zl}$ Stress at center, $\frac{W}{2Zl} (c^2 - \frac{1}{4}l^2)$ If cross-section is constant, the greater of these is the maximum stress. If l is greater than $2c$, the stress is zero at points $\sqrt{\frac{1}{4}l^2 - c^2}$ on both sides of the center. If cross-section is constant and if $l = 2.828c$, the stresses at supports and center are equal and opposite, and are $\pm \frac{WL}{46.62Z}$	Between each support and adjacent end, $y = \frac{Wu}{24EIL} [6c^2(l+u) - u^2(4c-u) - l^3]$ Between supports, $y = \frac{Wx(l-x)}{24EIL} [x(l-x) + l^2 - 6c^2]$	Deflection at ends, $\frac{Wc}{24EIL} [3c^2(c+2l) - l^3]$ Deflection at center, $\frac{Wl^2}{384EIL} (5l^2 - 24c^2)$ If l is between $2c$ and $2.449c$, there are maximum upward deflections at points $\sqrt{3(\frac{1}{4}l^2 - c^2)}$ on both sides of the center, which are, $-\frac{W}{96EIL} (6c^2 - l^2)^2$

ANEXO III: Planos del Casete



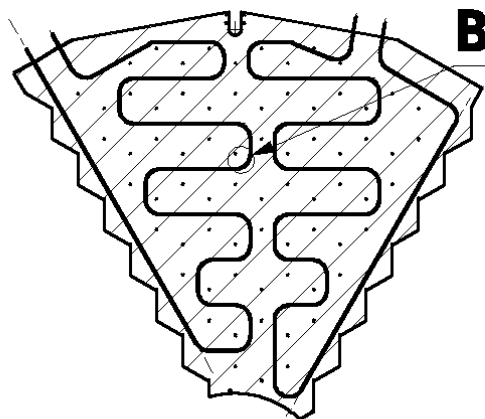
ORGANISATION EUROPEENNE POUR
LA RECHERCHE NUCLEAIRE
EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH
GENEVE



ON DEMAND IN PARTS ARE UTILIZED A ONE TIME COMPARISON WITH INFORMATION ADVICE
THIS DRAWING MAY NOT BE USED FOR COMMERCIAL PURPOSES WITHOUT AUTHORIZATION



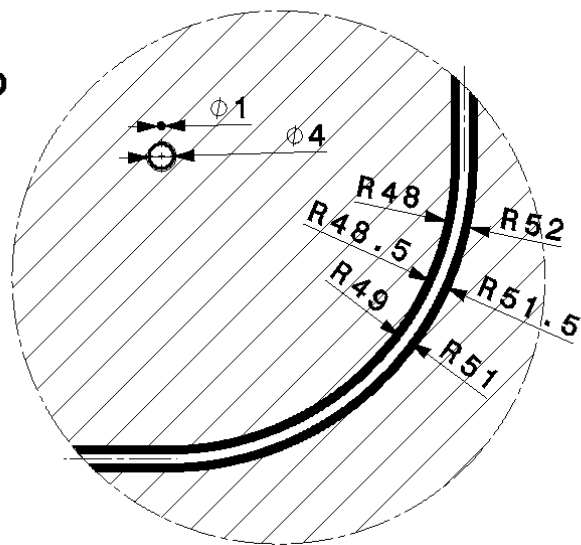
Bottom view
1:20



A-A
1:20

B

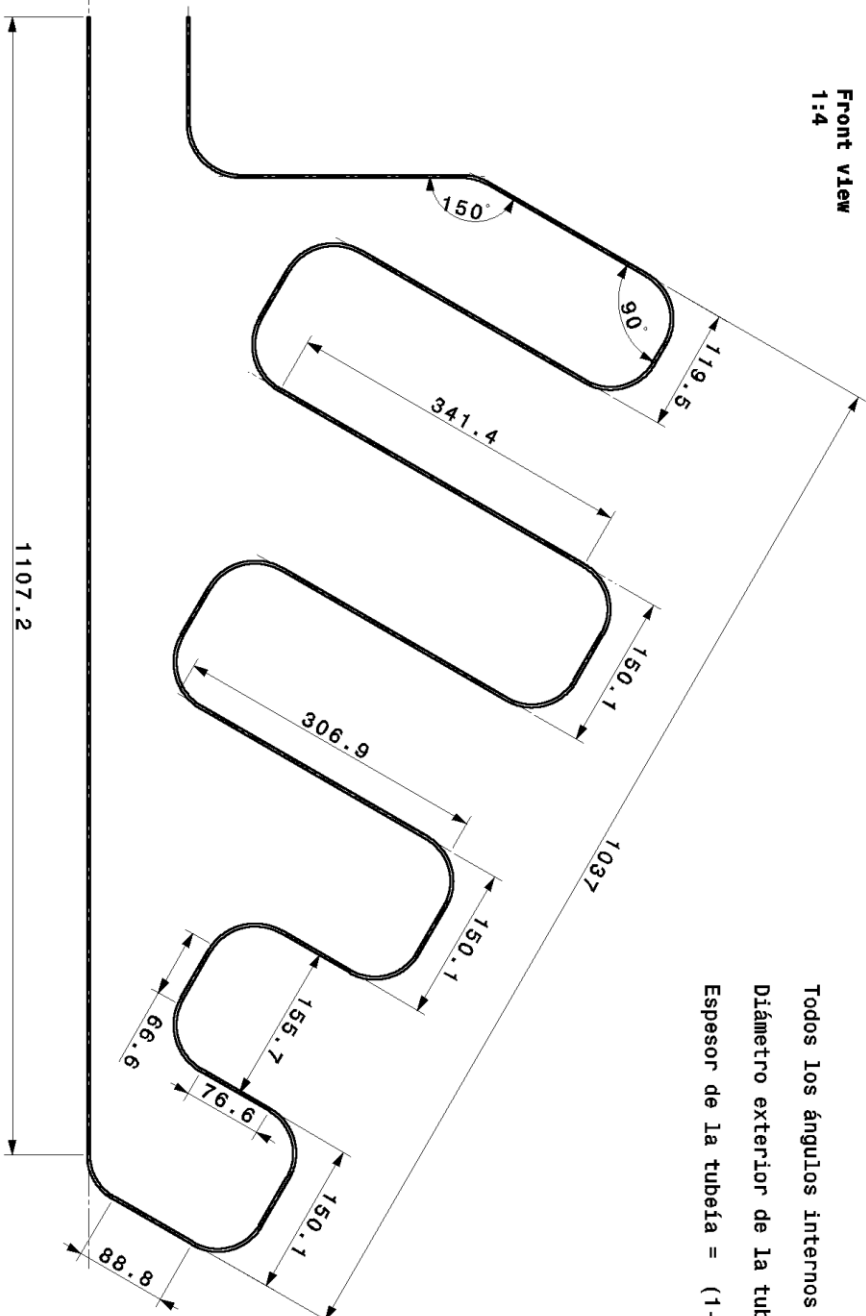
B
1:1



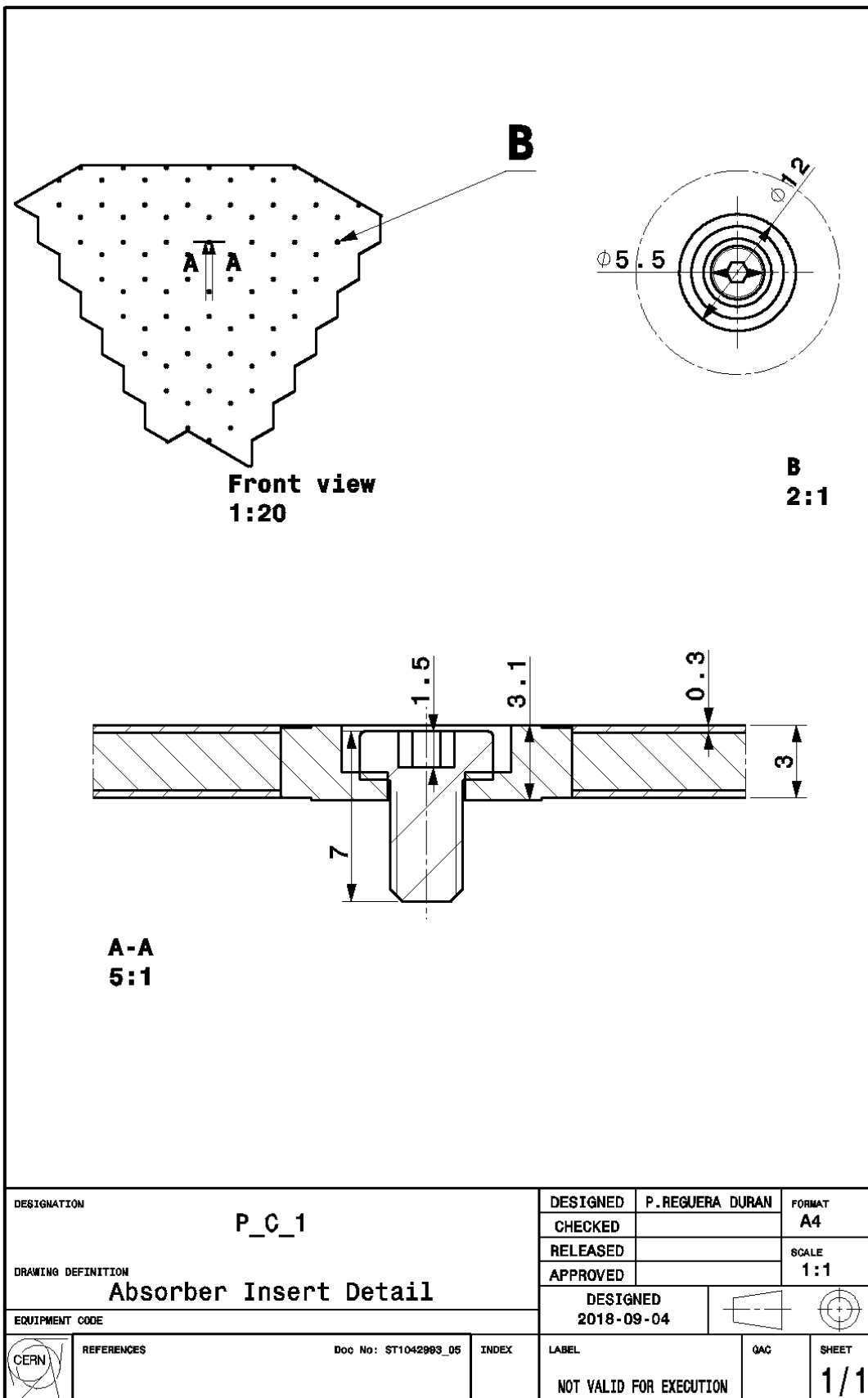
DESIGNATION		DESIGNED	P.REGUERA DURAN	FORMAT	A4
		CHECKED			
		RELEASED		SCALE	1:1
		APPROVED			
DRAWING DEFINITION		DESIGNED			
		2018-09-04			
EQUIPMENT CODE					
REFERENCES		Doc No: ST1042983_04			
		INDEX			
		LABEL			
		NOT VALID FOR EXECUTION			
		QAC			
				SHEET	
				1/1	

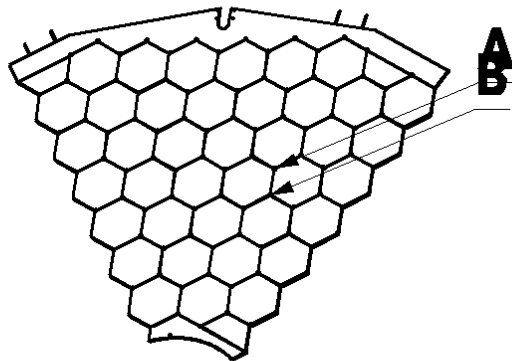
Ce dessin ne peut être utilisé à des fins commerciales sans autorisation écrite
This drawing may not be used for commercial purposes without written authorization

Todos los ángulos internos = 90°
 Diámetro exterior de la tubería = 4 mm
 Espesor de la tubería = (1-2) mm

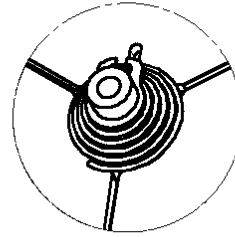


DESIGNATION		DESIGNED		P. PEREIRA DURAN		FORMAT	
CE_pipes		CHECKED				A3	
		RELEASED				SCALE	
		APPROVED				1:1	
EQUIPMENT CODE		DESIGNED		2018-08-22			
REFERENCES		LABEL		DWG		SHEET	
		NOT VALID FOR EXECUTION				1 / 1	

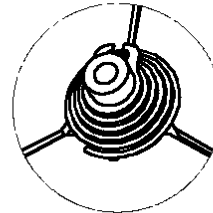




Isometric view
1:20



A
2:1

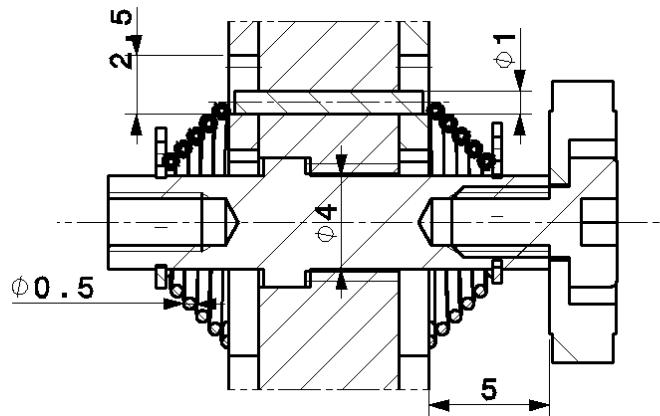


B
2:1

Corte A-A = Long Hole

Corte B-B = Normal Hole

Corte C-C = Support from Front View



C-C
4:1

ORGANISATION EUROPEENNE POUR
LA RECHERCHE NUCLEAIRE
EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH
CERN



On should in part with the use of this drawing for commercial purposes without written authorization
This drawing may not be used for commercial purposes without written authorization

DESIGNATION			DESIGNED		P.REGUERA DURAN		FORMAT	
P_C_1			CHECKED				A4	
DRAWING DEFINITION			RELEASED				SCALE	
			APPROVED				1:1	
Inser_Copper_Detail			DESIGNED					
EQUIPMENT CODE			2018-09-04					
	REFERENCES		Doc No: ST1042993_06		INDEX		LABEL	
							QAC	
							SHEET	
				NOT VALID FOR EXECUTION				1/1

ANEXO IV: Tabla de pesos de los componentes del Casete

Componente	Masa (kg)	Número de unidades ⁴¹
Placa de Cobre	73	1
Tubería refrigeración	0.150	2
Módulo Hexagonal	0.564	85
Absorbente	31.965	2
Pins	-	176
Inserto en la placa de cobre	-	78
Spring	-	156
Clip	-	156
Antirrotador	0.569	1
Total	187	657

El peso estimado del casete está en torno a 220-250 Kg dependiendo del disco del calorímetro que se tome, siendo el más pesado el más cercano a la parte Hadrónica.

Para alcanzar esa estimación habría que añadir a nuestro modelo el peso de los sensores de silicio, así como las PCB junto al resto de cableado, el cual estimamos en unos 40 kg.

⁴¹ Cantidad de unidades del componente presente en el casete. Este número es aproximado y orientativo en función de los valores tomados para este diseño.

ANEXO V: Tabla de pesos del Electrocalorímetro

Componente	Masa (kg)	Número de unidades ⁴²
Disco de Casetes	1.100 - 1.130 ⁴³	14
Sistema Antirrotación	3.2	6
Cono Soporte	77.385	1
Disco soporte o Backplate	2.651,377 ⁴⁴	1
Total	18425	

Este peso total dista en torno a 3t del peso estimado a la hora de hacer las simulaciones que debía aguantar el Cono soporte. Suponemos estos 3.000 kg faltantes debidos al conjunto de cableados, sensores y sistemas, como ya introdujésemos en el Anexo IV.

⁴² Cantidad de unidades del componente presente en el casete.

⁴³ Varía según el disco al que se quiera referir.

⁴⁴ Orden de magnitud, en el supuesto de hacerse de acero inoxidable.

ANEXO VI: Tabla de medidas del absorbente en la máquina de 3 ejes

Absorbente de 3 mm⁴⁵.

Test:3mm																
Nr:	Left Support			1000mm											Right Support	
1-12	1.825	0.300	-2.500	-6.465	-9.840	-12.510	-13.895	-13.980	-13.800	-12.330	-9.680	-6.310	-2.155	0.000	1.935	
13-24	1.790	0.100	-2.440	-6.360	-9.765	-12.410	-13.620	-13.860	-13.635	-12.070	-9.635	-6.080	-2.105	0.045	1.995	
25-36	1.690	-0.435	-2.550	-6.480	-9.715	-12.490	-13.715	-13.835	-13.535	-12.200	-9.435	-6.045	-2.065	0.080	2.220	
37-48	1.460	-0.690	-2.865	-6.785	-10.355	-12.900	-14.210	-14.350	-14.050	-12.430	-9.735	-6.325	-2.065	0.065	1.960	
Supports:	100 mm from border															
Test:2																
Nr:	Left Support			800mm											Right Support	
1-12	2.155	0.550	-0.220	-1.075	-2.730	-4.200	-5.040	-5.070	-4.965	-4.165	-2.805	-1.275	-0.440	0.355	1.665	
13-24	2.340	0.720	-0.040	-0.870	-2.525	-4.035	-4.670	-4.845	-4.720	-3.885	-2.705	-1.100	-0.275	0.405	1.685	
25-36	2.400	0.755	0.000	-0.870	-2.395	-3.960	-4.625	-4.700	-4.550	-3.885	-2.480	-0.990	-0.295	0.450	1.885	
37-48	2.335	0.715	0.090	-0.870	-2.685	-4.100	-4.835	-4.935	-4.740	-3.885	-2.530	-1.085	-0.335	0.415	1.605	
Supports:	200 mm from border															
Test:3																
Nr:	Left Support			6000mm											Right Support	
1-12	-1.245	-0.745	-0.205	-0.065	0.005	-0.225	-0.425	-0.370	-0.370	-0.205	-0.105	-0.210	-0.420	-0.930	-1.790	
13-24	-1.005	-0.530	-0.080	0.070	0.025	-0.245	-0.260	-0.360	-0.315	-0.105	-0.180	-0.290	-0.370	-1.035	-1.925	
25-36	-0.890	-0.475	-0.090	0.000	0.145	-0.210	-0.240	-0.240	-0.165	-0.155	0.010	-0.175	-0.365	-1.085	-1.875	
37-48	-0.970	-0.525	-0.030	0.055	-0.055	-0.235	-0.330	-0.355	-0.245	-0.030	0.035	-0.175	-0.445	-1.215	-2.250	
Supports:	300 mm from border															
Test:4																
Nr:	Left Support			400mm											Right Support	
1-12	-6.490	-4.460	-2.360	-0.560	0.070	0.520	0.975	1.100	1.025	0.530	-0.080	-0.610	-2.450	-4.540	-7.015	
13-24	-6.185	-4.180	-2.180	-0.560	-0.015	0.380	0.980	0.965	0.920	0.500	-0.065	-0.815	-2.565	-4.800	-7.305	
25-36	-6.055	-4.080	-2.150	-0.440	0.000	0.385	0.960	1.025	1.015	0.380	-0.085	-0.720	-2.670	-5.010	-7.410	
37-48	-6.065	-4.110	-2.095	-0.600	-0.155	0.440	0.955	0.995	0.955	0.505	-0.035	-0.765	-2.890	-5.285	-7.945	
Supports:	400 mm from border															

⁴⁵ Las casillas en amarillo indican el punto de referencia Z = 0.

Absorbente de 6 mm:

Test 6 mm													
Nr.		Left Support				100mm				Right Support			

