



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TRABAJO DE FINAL DE GRADO

Grado en Ingeniería mecánica

**OPTIMIZACIÓN Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE UN
SISTEMA DE ALTA PRESIÓN PARA REFLECTOMETRIA DE
NEUTRONES**



Memoria y Anexos

Autor/a: Brahim Ben khay Aita khayi
Director/a: Luis C. Pardo Soto
Convocatoria: Enero 2022

Resumen

El presente trabajo describe un nuevo dispositivo experimental de alta presión diseñado, fabricado y testeado en la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), con el fin de realizar experimentos de reflectometría de neutrones a alta presión. Se ha llevado a cabo a petición y en colaboración con el instituto de física de materiales Hereon, el cual se especializa en el estudio de las microestructuras de los materiales, con centro de experimentación en la fuente de neutrones de investigación Heinz Maier-Leibnitz en Múnich (FMRII).

La principal particularidad de este dispositivo innovador es la de llegar a presiones de trabajo de hasta 300 MPa (3000 bar). El objetivo propuesto es, lograr a la presión mencionada, una perfecta estanqueidad tanto en el bloque como en alojamiento de la celda interior.

El dispositivo se compone de tres partes diferenciadas, el circuito hidráulico, el bloque y finalmente la celda interior con alojamiento para la muestra que se pretende estudiar. Se presentarán todos los elementos por separado, sus justificaciones teóricas y las optimizaciones llevadas a cabo en cada caso para tratar de asegurar el cumplimiento de las prestaciones/solicitudes durante el experimento. Finalmente, se explican las diferentes pruebas realizadas.

Resum

El present treball descriu un nou dispositiu experimental d'alta pressió dissenyat, fabricat i testat en la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), amb la finalitat de realitzar experiments de reflectometria de neutrons a alta pressió. S'ha dut a terme a petició i en col·laboració amb l'institut de física de materials Hereon, el qual s'especialitza en l'estudi de les microestructures dels materials, amb centre d'experimentació en la font de neutrons de recerca Heinz Maier-Leibnitz a Munic (FMRII).

La principal particularitat d'aquest dispositiu innovador és la d'arribar a pressions de treball de fins a 300 MPa (3000 bar). L'objectiu proposat és, aconseguir a la pressió esmentada, una perfecta estanquitat tant en el bloc com en allotjament de la cel·la interior.

El dispositiu es compon de tres parts diferenciades, el circuit hidràulic, el bloc i finalment la cel·la interior amb allotjament per a la mostra que es pretén estudiar. Es presentaran tots els elements per separat, les seves justificacions teòriques i les optimitzacions dutes a terme en cada cas per a tractar d'assegurar el compliment de les prestacions/sol·licitacions durant l'experiment. Finalment, s'expliquen les diferents proves realitzades.

Abstract

This work describes a new high-pressure experimental device designed, fabricated and tested at the Polytechnic University of Catalonia (UPC), in order to perform high-pressure neutron reflectometry experiments. It has been carried out at the request of and in collaboration with the Hereon Institute of Materials Physics, which specialises in the study of the microstructures of materials, with its experimental centre at the Heinz Maier-Leibnitz Research Neutron Source in Munich (FMR II).

The main special feature of this innovative device is that it can reach working pressures of up to 300 MPa (3000 bar). The proposed objective is to achieve, at this pressure, a perfect seal both in the block and in the housing of the inner cell.

The device is made up of three distinguishable parts, the hydraulic circuit, the block and finally the inner cell with the housing for the sample to be studied. All the elements will be presented separately, along with their theoretical justifications and the optimisations carried out in each case to try to ensure compliance with the performance/requirements during the experiment. Finally, the different tests carried out are explained.

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi familia, en especial a mis padres por darme una educación e inculcarme unos valores basados en el respeto, en ser paciente y en el esfuerzo como único medio para conseguir mis metas, sin duda, de no haber sido de esta forma, no estaría escribiendo estas líneas.

En segundo lugar, un especial agradecimiento a todo el profesorado de nuestra escuela con el que he compartido clases a lo largo de mis estudios, por su esfuerzo, paciencia y muchas veces por una ayuda que, sin ella, hoy tampoco estaría aquí.

Por supuesto, muchas gracias a mi tutor Luis C. Pardo, por darme la oportunidad de realizar este trabajo y por sus consejos y ayuda siempre que ha sido necesario.

Finalmente, muy agradecido a Javier Rojo, por su ayuda y su predisposición incondicional a ayudarme des del primer día de forma completamente desinteresada.



Índice

RESUMEN	I
RESUMA	II
ABSTRACTO	III
AGRADECIMIENTOS	IV
PREFACIO	1
1.1. Origen del trabajo	1
1.2. Motivación	1
INTRODUCCIÓN	3
1.3. Objetivos del trabajo	4
1.4. Alcance del trabajo	4
DISPOSITIVO EXPERIMENTAL	5
1.5. Bloque	5
1.5.1. Optimización	15
1.5.2. Validación teórica.....	17
1.5.3. Validación experimental	44
1.6. Circuito hidráulico.....	44
1.6.1. Validación teórica.....	50
1.6.2. Validación experimental	50
1.7. Celda interior	51
1.7.1. Optimización	55
1.7.2. Validación teórica.....	58
1.7.3. Validación experimental	58
1.8. guía del experimento.....	59
ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL	65
CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	67
PRESUPUESTO Y/O ANÁLISIS ECONÓMICO	69
BIBLIOGRAFÍA	71
ANEXO A	72
A1. Texto del apartado 1 del Anexo	¡Error! Marcador no definido.

Prefacio

1.1. Origen del trabajo

El instituto de física de materiales Hereon, situado en la ciudad de Múnich, en Alemania, es un organismo especializado en el estudio de las microestructuras de los materiales, con el objetivo de generar conocimiento e investigar nuevas tecnologías con una mayor resiliencia y sostenibilidad en beneficio del clima, la costa marina y las personas.

El origen de este trabajo nace dentro del marco de las investigaciones de vanguardia y desarrollo de nuevos métodos de experimentación para la mejora del medio ambiente. El interés común en este tipo de estudios, tanto del departamento de caracterización de materiales de nuestra universidad, como del instituto de física de materiales Hereon, han convergido en la elaboración de este proyecto dentro del ámbito de colaboración internacional.

Finalmente, la necesidad del instituto de física de materiales Hereon de testear y asegurar el cumplimiento de ciertos requisitos específicos del dispositivo, tanto de funcionamiento, como sobre todo en cuestión de seguridad para los usuarios, dan lugar a la presente memoria por tal de dar respuesta a estas cuestiones.

1.2. Motivación

La motivación de este trabajo viene dada por la necesidad de disponer de un dispositivo de alta presión, con ciertas condiciones específicas, que de otro modo no podría lograrse. Además, esta herramienta abriría la posibilidad de realizar experimentos en condiciones muy difíciles de simular, por no decir, prácticamente imposibles.

En cuanto a motivación personal, tener la oportunidad de participar en un proyecto de investigación de este calibre, en un grupo de trabajo internacional, siendo además un trabajo tangible, ha sido una oportunidad muy importante que no podía desaprovechar.

Introducción

La reflectometría de neutrones es una técnica de difracción de neutrones utilizada para estudiar las propiedades de láminas delgadas, similar en el modo de operar a otro tipo de técnicas más comunes como la reflectividad de rayos X o la elipsometría. La particularidad de esta técnica es que, ante la presencia de metales, estos no tienen interferencia ninguna en la trayectoria de los neutrones presentando un comportamiento inerte, en cambio, ante elementos orgánicos, como plásticos o madera orgánica, los neutrones se ven reflejados y no son capaces de atravesarlos. Los rayos X presentan un comportamiento opuesto, ante plásticos y materia orgánica no existe ninguna reacción física, en cambio ante la presencia de metales, estos se ven reflejados y no son capaces de atravesarlos. Dado que se quiere estudiar láminas delgadas de muestras orgánicas y además bajo condiciones de alta presión, impera la necesidad de fabricar el dispositivo en metal para que pueda soportar la alta presión, por tanto, sólo podría llevarse a cabo el estudio mediante reflectometría de neutrones.

La reflectometría de neutrones surgió como un nuevo campo en la década de los 80 a raíz del descubrimiento de la magnetorresistencia gigante en películas multicapa acopladas antiferromagnéticamente.

La técnica consiste en hacer incidir un haz de neutrones altamente colimado sobre una superficie plana y medir la intensidad de radiación reflejada en función del ángulo de incidencia o la longitud de onda del neutrón, la cual suele ser del orden de 0.2 a 1 nm. La forma exacta del perfil de reflectividad proporciona información detallada sobre la muestra, como son la estructura superficial, el grosor, la densidad en función de la profundidad y su rugosidad.

Para poder llevar a cabo este método se requiere de una fuente de neutrones, que puede ser un reactor nuclear de investigación o una fuente de espalación basada en un acelerador de partículas.

La alta presión toma un papel muy importante, puesto que el objetivo último es estudiar las propiedades de las láminas delgadas bajo los efectos de esta, un claro ejemplo es el efecto de la presión hidrostática presente en el fondo de los océanos, el experimento a realizar en este caso sería estudiar las propiedades de las membranas celulares de los peces en condiciones de presión como las que se dan en su hábitat natural. Una de las múltiples ventajas que ofrece, es la de lograr la esterilización de productos sin necesidad de añadir sustancias químicas (autoclave), gracias a los efectos directos de la alta presión que reducen la cantidad de microorganismos e inactivando las enzimas involucradas en el deterioro del producto, esta técnica es comúnmente utilizada en el sector de la medicina.

1.3. Objetivos del trabajo

Resulta muy complicado encontrar un dispositivo de alta presión como el que se describe en esta memoria en todo el mundo, o por lo menos no se tiene constancia de casos documentados, el motivo es que no se comercializan, existen algunos pocos prototipos, pero ninguno de ellos ha sido diseñado y fabricado para llegar a la presión de 3000 bar ni tampoco con una celda interior con capacidad de 13.74 cm³ para el alojamiento de la muestra. Si bien existe el ejemplar “*High pressure cell for neutron reflectivity measurements up to 2500 bar*” publicado en la revista “*REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS 82, 025106*” en el año 2011 de los autores “*Koo J&Czeslik C*”, dicho prototipo llega a presiones máximas de 2500 bar y una celda interior de 6 cm³.

Como puntos más importantes dentro de los objetivos:

- Es muy importante recalcar los peligros de trabajar con líquidos a alta presión, por tanto, el primer objetivo es conseguir un dispositivo seguro para las personas que lo emplearán, así que se realizará los cálculos demostrativos en este aspecto, simulación computacional y finalmente prueba de funcionamiento por tal de demostrar la fiabilidad del aparato.
- El segundo objetivo, consistirá en lograr que el dispositivo que se presenta soporte la presión de 3000 bar con su debida estanquidad en el circuito, bloque y en la celda interior.
- El dispositivo deberá ser funcional y llevar a cabo la experimentación.

1.4. Alcance del trabajo

Este proyecto está planteado de tal manera que, partiendo de un dispositivo fabricado en gran parte, pero sin documentar. Se debe hacer el montaje, realizar los testeos, corregir los defectos detectados y llevar a cabo las modificaciones necesarias para conseguir su funcionamiento óptimo. Se deberá trazar el origen de todos los componentes para posteriormente crear la documentación pertinente.

El alcance real será:

1. Identificar y documentar todas las partes que componen el dispositivo.
2. Testar el conjunto y corregir los defectos encontrados.
3. Realizar las piezas en 3D mediante el programa SolidWorks con sus respectivos planos y para ciertas piezas también se harán simulaciones con condiciones de contorno.

Dispositivo experimental

En el presente apartado, se procede a explicar en detalle las partes del dispositivo, donde cabe diferenciar entre tres partes importantes:

- En primer lugar, el conjunto bloque de acero inoxidable.
- En segundo lugar, el circuito hidráulico.
- Finalmente, la celda interior.

Se realizaron los cálculos necesarios para demostrar que cada elemento ha sido diseñado correctamente para poder soportar las sollicitaciones mecánicas, así como simulación computacional en ciertos elementos de vital importancia.

1.5. Bloque

Se empezará presentando el bloque, el cual hace a la vez de soporte, como se podrá ver más adelante, consta de dos ventanas laterales de un material aluminio para favorecer la circulación de neutrones al interior de la celda.

Mediante la figura 1.1 se muestra el bloque con todos sus elementos identificados para, a continuación, describir cada uno de ellos con sus particularidades.

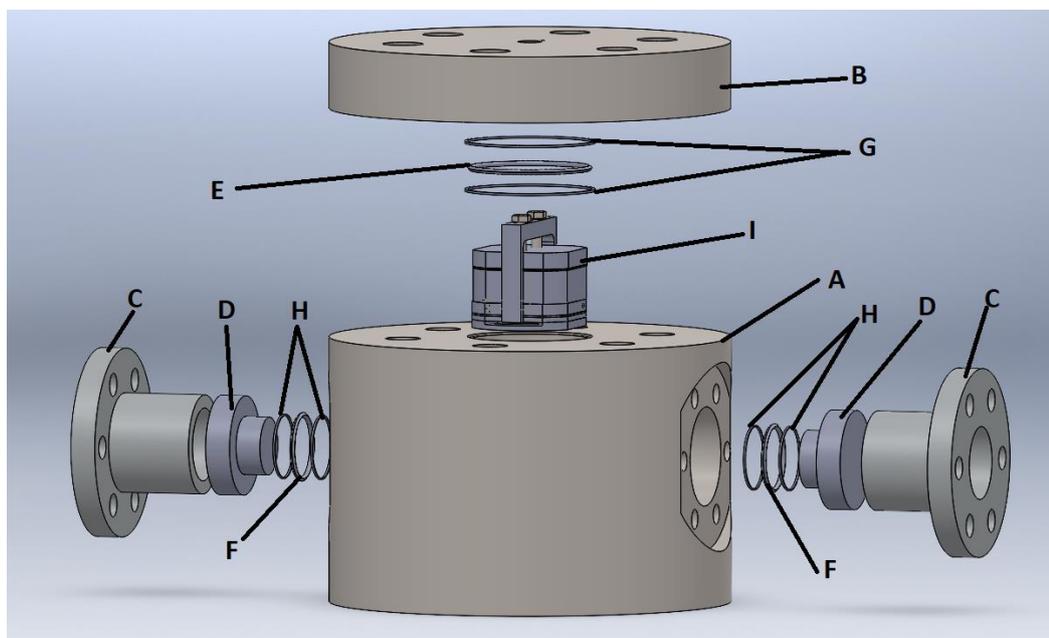


Figura 1.1. Vista explosionada de las partes que conforman el dispositivo.

Cilindro (A):

El cilindro de pared gruesa es, a su vez, el soporte principal del sistema sobre el que se mecanizan las ventanas, los orificios roscados de los tornillos y ranuras para juntas. Por tanto, es de importancia capital que tenga un correcto diseño y un factor de seguridad lejano a 1.

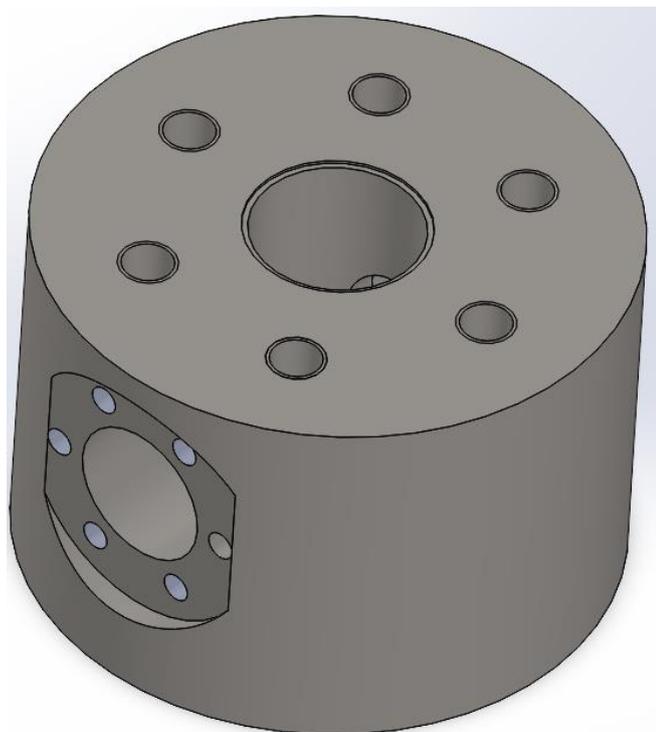


Figura 1.2. bloque.

El material empleado es acero inoxidable denominado Stavax ESR equivalente a un AISI 420 (W.-Nr. 1.2083), los principales motivos de la elección del material son por su gran resistencia mecánica, por tanto, con el fin de responder a las sollicitaciones sin necesidad de tener una pared excesivamente gruesa, y obviamente también por coste económico, ya que siempre en este tipo de proyectos se tiende a buscar un equilibrio entre los costes económicos y las prestaciones. Asimismo, sus principales propiedades son las siguientes:

- Buena resistencia a la corrosión
- Buena pulibilidad
- Buena resistencia al desgaste
- Buena maquinabilidad
- Buena estabilidad en el temple

Este tipo de acero es comúnmente usado para fabricar utilajes como moldes para inyección de plástico por sus excelentes propiedades mencionadas anteriormente.

En la *tabla 1.1* se puede observar las propiedades mecánicas más importantes, así como la composición molecular de este material y, por tanto, entender mejor el motivo de sus principales propiedades.

Stavax ESR 1.2083				
Offset yield strenght ($R_{p0.2}$)		1280 MPa		
Resistencia a la tracción (R_m)		1420 MPa		
Dureza		45 HRC		
Densidad (20 °C)		7800 kg/m ³		
Composición (%):				
C (0.38)	Si (0.9)	Mn (0.5)	Cr (13.6)	V (0.3)

Tabla 1.3. Propiedades materiales Stavax ESR 1.2083.

En su interior se encuentra mecanizado el cilindro de 70 mm de diámetro para alojar la celda interior y el aceite a presión, también se pueden observar mecanizadas los dos orificios laterales, con una separación de 180° para poder insertar las dos ventanas de aluminio en ellos, así como sus respectivos soportes atornillado al bloque para su correcta fijación. En su parte superior también se ha mecanizado 6 orificios roscados, equidistantes para poder atornillar la tapa superior y así cerrar el cilindro. Además, dispone de 3 orificios roscas en su parte inferior para fijar el bloque.

Tanto en la parte superior del cilindro, como en el exterior de los orificios para alojar las ventanas se ha mecanizado el alojamiento de las juntas, tantas para las planas como las juntas tipo C-rings.

Tapa superior (B):

Su función es cerrar el bloque en la parte superior, también fabricado en acero inoxidable Stavax ESR 1.2083, el mismo material que el cilindro, por tanto, sus propiedades mecánicas son las mismas ya mencionadas. En su parte inferior dispone de un saliente que se introduce en el cilindro por tal de favorecer que la junta C-ring pueda trabajar de forma correcta.

Además de hacerle los 6 orificios pasantes para los tornillos, se le ha hecho 3 orificios roscados para poder roscar cáncamos en ellos, un detalle muy importante, ya que el conjunto completo unido tiene un peso que supera los 60 kg.



Figura 1.3. Tapa superior.

Además de hacer de tapa superior, contiene mecanizado en su parte superior y, en su centro, la rosca para el conector de alta presión por tal de roscar la manguera de la que proviene el aceite a presión para el interior del cilindro, la punta del conector se introduce en el orificio de 3 mm de diámetro que conecta con el interior. Asimismo, se la ha realizado un pequeño orificio de 1.8 mm de diámetro a 45° que conecta el fondo de la rosca con el exterior (véase en la figura 1.3 señalado con una circunferencia en rojo), para poder purgar el circuito de aire antes de empezar a presurizar el dispositivo.

Soporte ventanas (C):

En todo el conjunto se han usado dos materiales para la fabricación, el acero inoxidable Stavax ESR mencionado ya anteriormente y el segundo material empleado es la aleación de aluminio 7075 T6, tanto para el soporte de las ventanas como para las ventanas.

La razón de emplear este tipo de material, y no acero inoxidable como en el resto del bloque, es porque este tipo de aleación de aluminio es “transparente” para los neutrones, todos los materiales absorben

cierta parte de neutrones, pero en este caso se busca que sea la mínima parte posible, para, de esta manera, obtener resultados en menos tiempo, por tanto, hacer experimentos más eficientes.

En la tabla 1.2 se pueden observar las principales mecánicas del aluminio 7075 T6.

Aluminio 7075 T6	
Offset yield strenght ($R_{p0.2}$)	503 MPa
Resistencia a la tracción (R_m)	572 MPa
Shear strenght (τ_{max})	331 MPa
Dureza	7 HRC
Densidad (20 °C)	2810 kg/m ³

Tabla 1.2. Propiedades materiales AL 7075 T6.

La función del soporte de las ventanas es fijar las ventanas en su alojamiento en contra de la presión que ejerce el interior del cilindro contra las ventanas y que estas transmiten al soporte. Para ello se atornilla al bloque mediante 6 tornillos de métrica 14.



Figura 1.4. Soporte ventana.

Ventanas (D):

De igual modo que los soportes de las ventanas, las ventanas se han fabricado con el material AL 7075 T6, como se ha comentado anteriormente para facilitar el pase del máximo número de neutrones a través de la ventana.

Como se puede ver en la figura 1.5, la ventana se ha diseñado en dos diámetros diferentes, esto es debido a que el diámetro menor se introduce en el orificio que conecta las ventanas con el interior del cilindro, acercándose lo máximo posible a la celda interior, mientras en la sección de diámetro mayor se encarga mantener la presión de apriete sobre las juntas para mantener la estanqueidad.



Figura 1.5. Ventana.

C-ring bloque (E):

En este tipo de construcciones se pueden escoger entre diferentes materiales, variar sus dimensiones e incluso hay diferentes opciones que pueden funcionar, el gran problema se presenta en la unión, o en la sección de unión de las diferentes piezas, no es tarea fácil poder lograr un perfecto sellado del cilindro interior.

Para este caso se ha recurrido a juntas de estanqueidad que se utilizan en grandes infraestructuras como son las plataformas petrolíferas o en tecnológica tan precisa y crítica como es la aviación. Este tipo de juntas las fabrica la empresa alemana GFD y pasan por un control de calidad antes de ser enviadas a sus clientes.

Las juntas metálicas C-ring están diseñadas de tal manera que la presión que soportan favorece que la junta sea más estanca, lógicamente, siempre y cuando no se sobrepasan los límites de presión que pueden soportar.

Como se puede apreciar en el recuadro rojo de la figura 1.6, las juntas siguen una codificación que permite sacar la información técnica para cada tipo de junta.

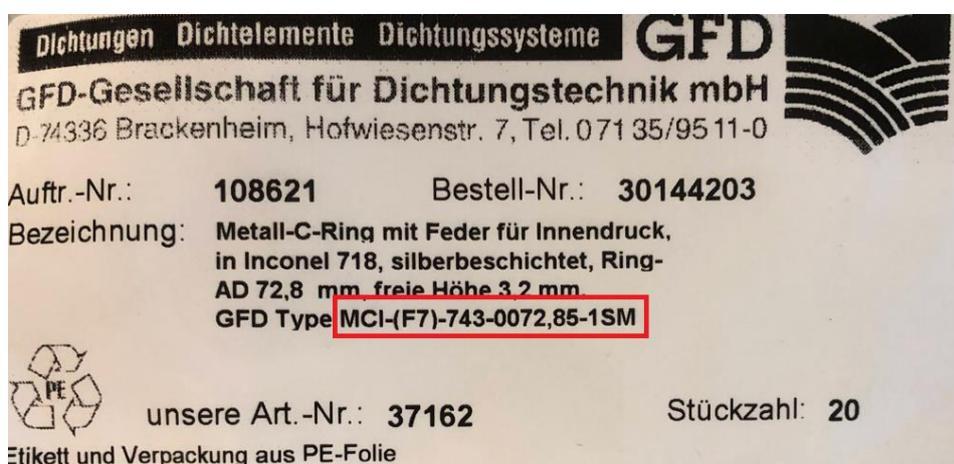


Figura 1.6. Etiqueta C-rings (Fuente: Etiqueta producto GFD).

En el catálogo del mismo fabricante se puede encontrar el significado de dicha codificación siguiendo la información detallada en la figura 1.7.

MCI	5	3	2	096,80	1	S	1
Metall-C-Ring	Material	C-Ring-Ø	Wandstärke	Ring-Außen-Ø	Wärmebehandlung	Beschichtung	Schichtdicke
MCI = Innendruck	1=	1= 0,9	1= 0,15		1 = normal	O=Ohne	1= 0,03 - 0,05
MCO= Außendruck	2=	2= 1,6	2= 0,25		kaltgehärtet	S=Silber	2= 0,05 - 0,08
MCA= Axialdruck	3= Incoel 321	3= 2,4	3= 0,36		2 = einfach	T=PTFE	3= 0,06 - 0,10
	4= Incoel 600	4= 3,2	4= 0,46		wärmebehandelt	C=Kupfer	X= Spezifikation
	5= Incoel X-750	5= 4,0	5= 0,51		3 = spezielle Langzeit-Wärmebehandlung	P=Blei	
	6= Nimonic 80A	6= 4,8	6= 0,64		4 = spezifische Wärmebehandlung (nach Anwendungsfall)	I=Indium	
	7= Incoel 718	7= 6,4	7=			N=Nickel	
						G=Gold	
						X=Spezifikation	
						Z=Zinn	

Figura 1.7. Codificación juntas GFD (Fuente: Catálogo GFD).

Por tanto, se puede deducir que las C-Rings que se han usado, son para presión interior, se han fabricado en material Inconel 718, con diámetro de 3.2 mm, 0.36 mm de grosor de pared, el diámetro de la circunferencia es de 72.85 mm, tratamiento térmico normal y finalmente recubierta de plata.

Como bien indica su nombre, este tipo de juntas son en forma de C con un refuerzo interior como se puede apreciar en la figura 1.8.



Figura 1.8. C-Ring.

C-ring ventanas (F):

La problemática en los orificios de las ventanas es la misma que se da entre el bloque y la tapa del cilindro, y la solución en ambos casos ha sido la misma.

Lógicamente, en este caso el diámetro se ha ajustado, pero en lo referente al tipo de junta y los materiales empleados en su fabricación es exactamente igual. Sólo se da una diferencia respecto a la C-ring del cilindro, y esta es la accesibilidad a ella, no es tan sencillo cambiarla como en el caso de la grande, ya que una está muy accesible y la otra no.



Figura 1.9. Ubicación C-Ring ventana.

Juntas metálicas bloque (G):

Para dar cierto acomodo a las juntas C-ring, estas se instalan entre dos juntas planas de espesor 1.3 mm, a pesar de no ser el método que recomienda el fabricante GFD en su catálogo es una adaptación sujeta a comprobación experimental.

Ambas juntas son de acero inoxidable, si bien no del mismo que se ha construido el bloque y la tapa superior, ya que no conviene que ciertos elementos como este tipo de juntas tengan la misma resistencia mecánica que elementos más importantes del conjunto.

Como se aprecia en la figura 1.10 las juntas quedan perfectamente ajustadas a su ranura.



Figura 1.10. Ubicación juntas planas y C-Ring.

Juntas metálicas ventanas (H):

En este caso, como ya se ha visto con la C-ring, las condiciones y materiales son idénticos al caso anterior con la diferencia del diámetro de ambas juntas y su accesibilidad para colocarlas y quitarlas de su ranura.

Celda interior (I):

Dentro del cilindro se encuentra la celda interior, a su vez, en su interior está el alojamiento para la muestra que se pretende estudiar.

Como se puede mostrar en la figura 1.11 es importante que el espacio que quede entre las ventanas y la celda interior sea minimizado, ya que esto afecta directamente a la cantidad de neutrones que pueden llegar al colector.

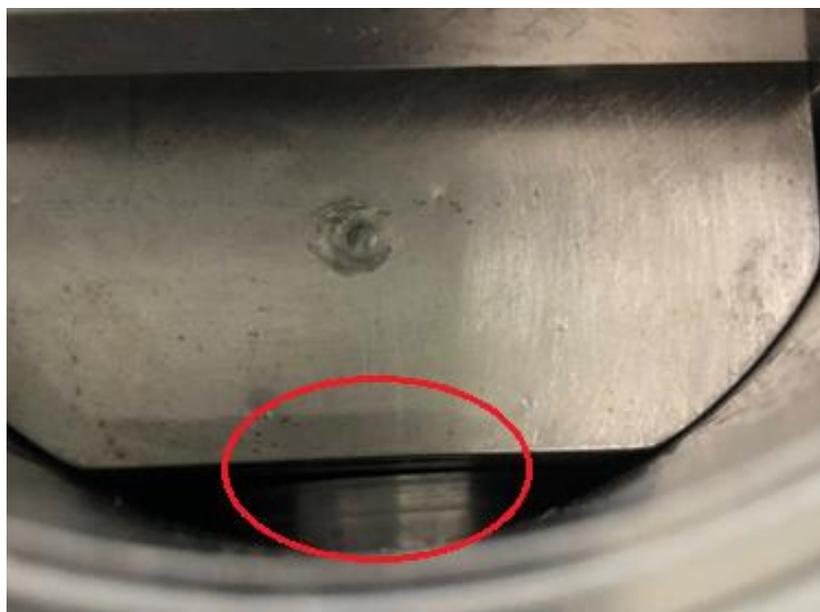


Figura 1.11. Distancia entre ventana y celda interior.

Se ha diseñado de tal manera que el alojamiento de la muestra quede lo suficiente bajo, respecto a las ventanas, para poder disponer de diferentes ángulos de incisión de neutrones. En la figura 1.12 las líneas amarilla y roja representan los diferentes ángulos de proyección de neutrones sobre la muestra.

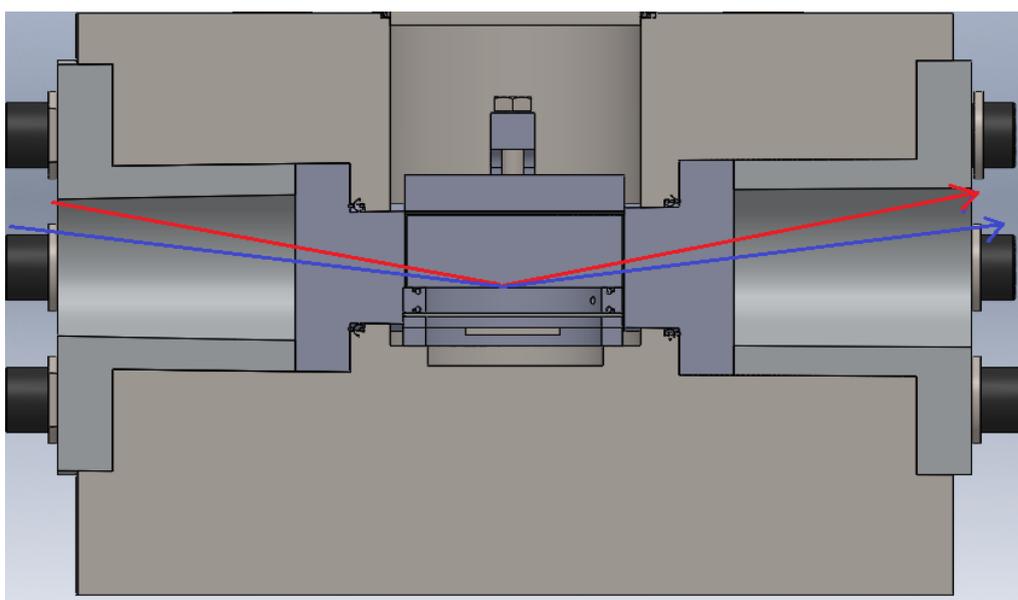


Figura 1.12. Representación ángulo de incisión de los neutrones.

1.5.1. Optimización

En el conjunto bloque ha requerido se han detectado dos problemas de diferente naturaleza, uno de ellos perjudica la tapa superior del bloque y el segundo impide que se puedan llegar a las presiones deseadas, se han llevado a cabo optimizaciones pertinentes de la siguiente forma:

- A menudo, hay detalles muy importantes de diseño que pueden pasar desapercibidas, en este caso se trata de un dispositivo que se desea usar a muy alta presión y que en la cabeza de los tornillos se soportarán grandes esfuerzos, por este motivo se le ha añadido arandelas para que estas absorban el desgaste debido a estos esfuerzos y proteger la tapa del bloque.



Figura 2.1. Orificio sin arandela y orificio con arandela para el tornillo.

Como se puede apreciar en la figura 2.1 el hecho de realizar el montaje sin usar arandelas daña directamente la tapa del bloque, en cambio sí se usan arandelas, se consigue que el daño ocasionado por la cabeza de los tornillos recaiga sobre la arandela. Por tanto, de esta forma se puede evitar un problema añadiendo este siempre elemento.

- El segundo defecto ha sido complicado de detectar, ya que las pérdidas de presión se producen en un valor muy cercano al objetivo de 300 MPa, después de muchas pruebas, desmontar el conjunto y volverlo a montar más de una vez, se ha encontrado el problema. Esta segunda optimización ha consistido en corregir las dimensiones de los soportes de las ventanas, dando que durante las pruebas que se han ido realizando se ha detectado que las ventanas eran un foco de escape de presión a partir de los 2900 bar, por este motivo, se ha procedido a rebajar 0.25 mm la cara del soporte de las ventas que está en contacto con el bloque, consiguiendo así transmitir toda la presión debido al par de apriete de los tornillos a las ventanas, finalmente después de esta corrección se ha conseguido sobrepasar la presión de 3000 bar.

Antes de proceder a rebajar las ventanas, se ha realizado un nuevo experimento usando unas juntas provisionales de caucho ubicadas entre el soporte y la ventana por tal de verificar que realmente la pérdida de presión es debida a este motivo.



Figura 2.2. Junta provisional de verificación.



Figura 2.3. Soportes de ventanas en el taller para rebaje de 0.25 mm.

Tras estas dos optimizaciones no ha sido necesario realizar ninguna adicional para lograr el correcto funcionamiento del dispositivo.

1.5.2. Validación teórica

Pared del cilindro

En este apartado se estudia si el grosor de la pared del bloque es suficiente para poder soportar la presión de 300 MPa en su interior.

Como se puede observar en la figura 3.1. el espesor de la pared del cilindro es de 85 mm, siendo el diámetro interior de 70 mm y el exterior de 240 mm.

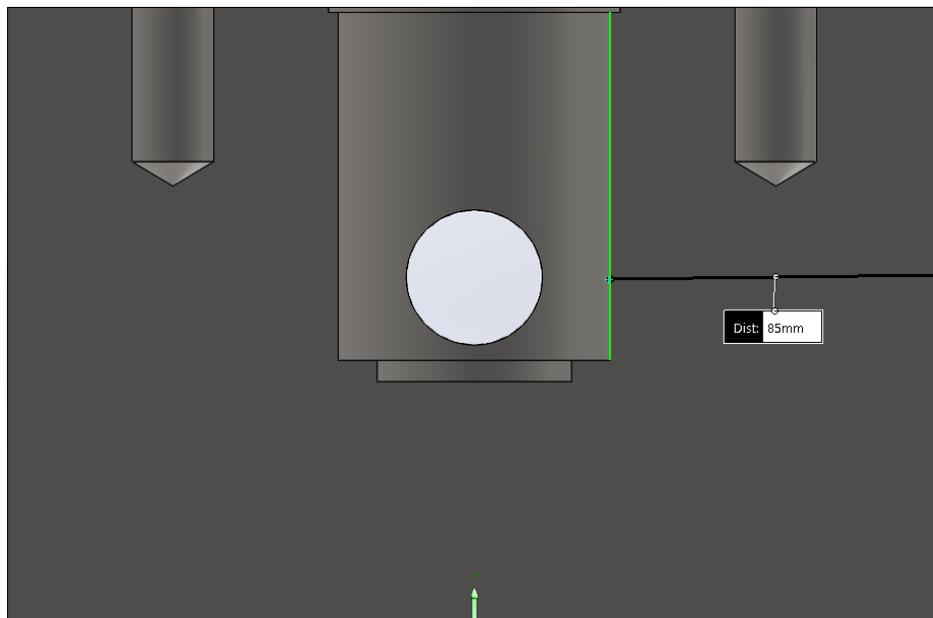


Figura 3.1. Espesor pared del cilindro.

Cálculos pared del cilindro:

Para el cálculo de la anchura de la pared del cilindro se utiliza la ecuación 3.1, la cual relaciona el cociente entre los dos diámetros con la presión de fluencia.

$$P_y = \frac{\gamma^2 - 1}{\gamma^2 \cdot \sqrt{3}} \cdot R_{p0.2} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Donde;

P_y : presión de fluencia necesaria para exterior cilindro (N/mm^2).

γ : relación de diámetros (d_1/d_2).

$R_{p0.2}$: Offset yield strenght of the material (N/mm^2).

Aplicando los datos para la ecuación 3.1, se puede obtener la presión necesaria en el interior del bloque para llegar a presión de fluencia en la capa exterior del cilindro.

$$P_y = \frac{(240/70)^2 - 1}{(240/70)^2 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1280 = 676.14 \text{ N/mm}^2$$

Donde;

Material: Estaba ESR 1.2083 (45 HRC)

γ : 240 mm / 70 mm

$R_{p0.2}$: 1280 N/mm².

Por tanto, se puede obtener el factor de seguridad (Fs) de la anchura del cilindro.

$$Fs = \frac{676.14 \text{ MPA}}{300 \text{ MPA}} = 2.25$$

La presión máxima para rotura se obtiene de la siguiente expresión:

$$P_b = \frac{2}{\sqrt{3}} R_{p0.2} \left(2 - \frac{R_{p0.2}}{R_m} \right) \ln \gamma \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Donde,

R_m : 1420 N/mm².

Aplicando la ecuación 3.2, se puede obtener la presión límite que puede soportar el bloque.

$$P_b = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot 1280 \left(2 - \frac{1280}{1420} \right) \ln(240/70) = 2000 \text{ N/mm}^2$$

Dado que la presión máxima para el diseño será de 300 MPa, se obtiene un factor de seguridad bastante holgado.

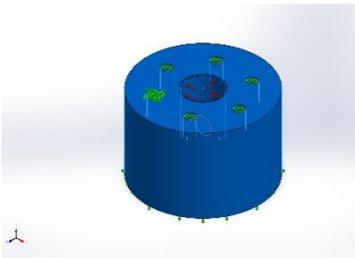
$$F_s = \frac{2000 \text{ MPa}}{300 \text{ MPa}} = 6.67$$

Esto significa que se debería exceder la presión de trabajo del orden de 7 veces mayor para llegar al punto de rotura.

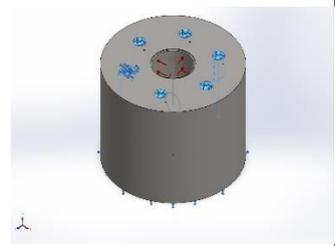
Simulación con SolidWorks cilindro:

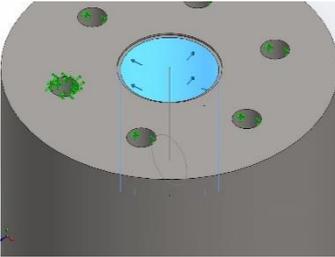
Aparte de realizarse los cálculos teóricos, se realiza también una simulación con un cilindro simplificado en el programa de SolidWorks, donde se obtienen los siguientes resultados que se muestra a continuación.

Material Properties:

Model Reference	Properties	Components
	<p>Nombre: 1.2083 (X40Cr14)</p> <p>Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal</p> <p>Criterio de error predeterminado: Tensión de von Mises máx.</p> <p>Límite elástico: 1,280e+09 N/m²</p> <p>Límite de tracción: 1,5e+09 N/m²</p> <p>Módulo elástico: 2,1e+11 N/m²</p> <p>Coefficiente de Poisson: 0,28</p> <p>Densidad: 7.740 kg/m³</p> <p>Módulo cortante: 7,9e+10 N/m²</p> <p>Coefficiente de dilatación térmica: 1,1e-05 /Kelvin</p>	<p>Outer cell base</p>
Curve Data:N/A		

Loads and Fixtures:

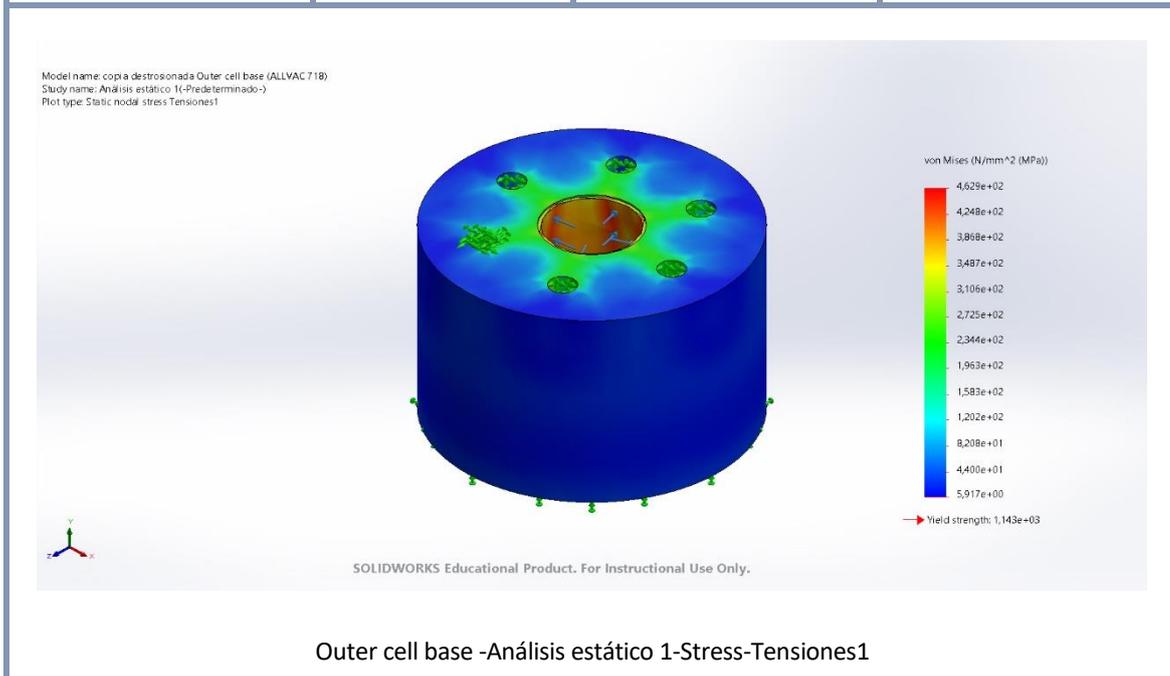
Fixture name	Fixture Image	Fixture Details		
Fijo-1		<p>Entities: 1 edge(s), 7 face(s)</p> <p>Type: Fixed Geometry</p>		
Resultant Forces				
Components	X	Y	Z	Resultant
Reaction force(N)	104,971	1,13518e+06	-14,4771	1,13518e+06
Reaction Moment(N.m)	0	0	0	0

Load name	Load Image	Load Details
Presión-1		<p>Entities: 4 face(s)</p> <p>Type: Normal to selected face</p> <p>Value: 300</p> <p>Units: N/mm^2 (MPa)</p> <p>Phase Angle: 0</p> <p>Units: deg</p>

Resultados:

Tensión de Von misses:

Name	Type	Min	Max
Tensiones 1	VON: von Mises Stress	5,917e+00N/mm^2 (MPa) Node: 2349	5,129e+02N/mm^2 (MPa) Node: 10429

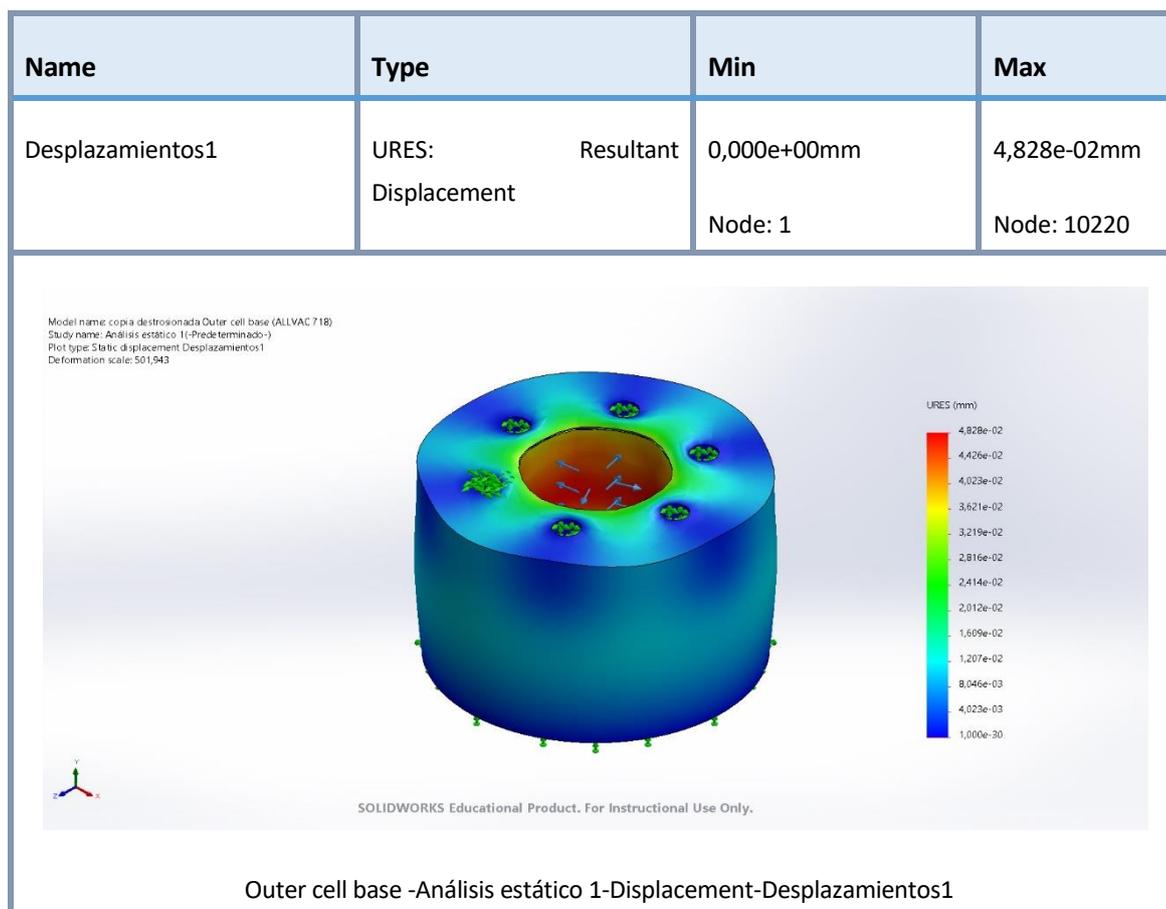


Como se puede observar en el mapa de tensiones según colores, la tensión máxima de Von Misses es de 462.9 MPa, teniendo en cuenta que límite elástico del material es de 1280 MPa, se obtiene el factor de seguridad siguiente:

$$F_s = \frac{1280}{512.9} = 2.48$$

Mediante cálculos teóricos se obtiene un factor de seguridad de 2.25, mientras que en la simulación este es de 2.48, estas discrepancias de deben a las simplificaciones tomadas en cuenta en los cálculos, además de como se puede observar en el modelo usado para la simulación, no consta de ventanas por razones de no distorsionar los valores de la simulación.

Desplazamientos:



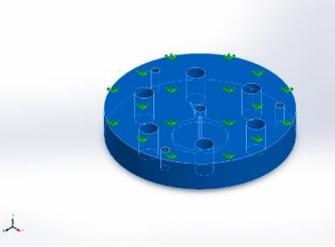
En cuanto a los desplazamientos, se produce un desplazamiento máximo de 0.048 mm, es decir, prácticamente despreciable.

En el esquema del bloque se ha utilizado un factor de deformación de 501.94 para poder apreciar visualmente la tendencia de la deformación del bloque cuando es sometido a la presión de trabajo.

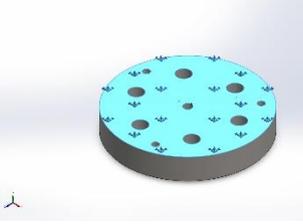
Simulación con SolidWorks tapa superior:

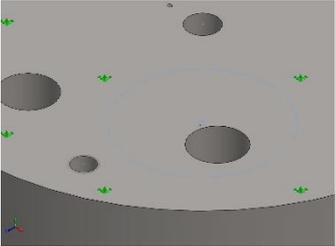
Se procede a mostrar los resultados de la simulación en Solidworks de la tapa superior sometida a la carga de 300 MPa.

Propiedades de material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<p>Nombre: 1.2083 (X40Cr14)</p> <p>Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal</p> <p>Criterio de error predeterminado: Tensión de von Mises máx.</p> <p>Límite elástico: 1,280e+09 N/m²</p> <p>Límite de tracción: 1,5e+09 N/m²</p> <p>Módulo elástico: 2,1e+11 N/m²</p> <p>Coefficiente de Poisson: 0,28</p> <p>Densidad: 7.740 kg/m³</p> <p>Módulo cortante: 7,9e+10 N/m²</p> <p>Coefficiente de dilatación térmica: 1,1e-05 /Kelvin</p>	<p>Tapa superior</p>
<p>Datos de curva:N/A</p>		

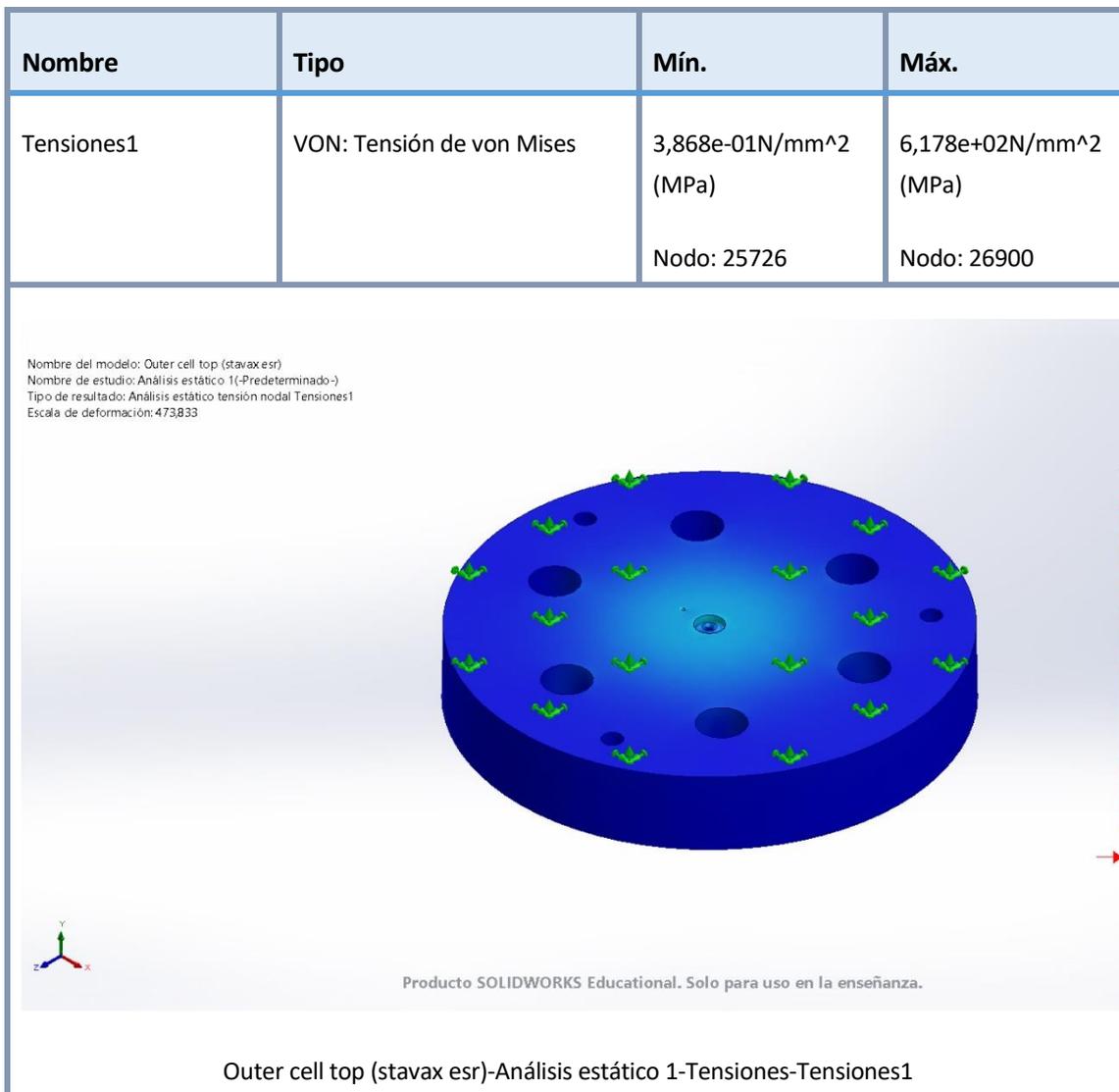
Cargas y sujeciones:

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción		
Fijo-1		<p>Entidades: 1 cara(s)</p> <p>Tipo: Geometría fija</p>		
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	-1,23718	-1,15236e+06	-1,29785	1,15236e+06
Momento de reacción(N.m)	0	0	0	0

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Presión-1		<p>Entidades: 1 cara(s)</p> <p>Tipo: Normal a cara seleccionada</p> <p>Valor: 300</p> <p>Unidades: N/mm^2 (MPa)</p> <p>Ángulo de fase: 0</p> <p>Unidades: deg</p>

Resultados del estudio

Tensión de Von Misses:

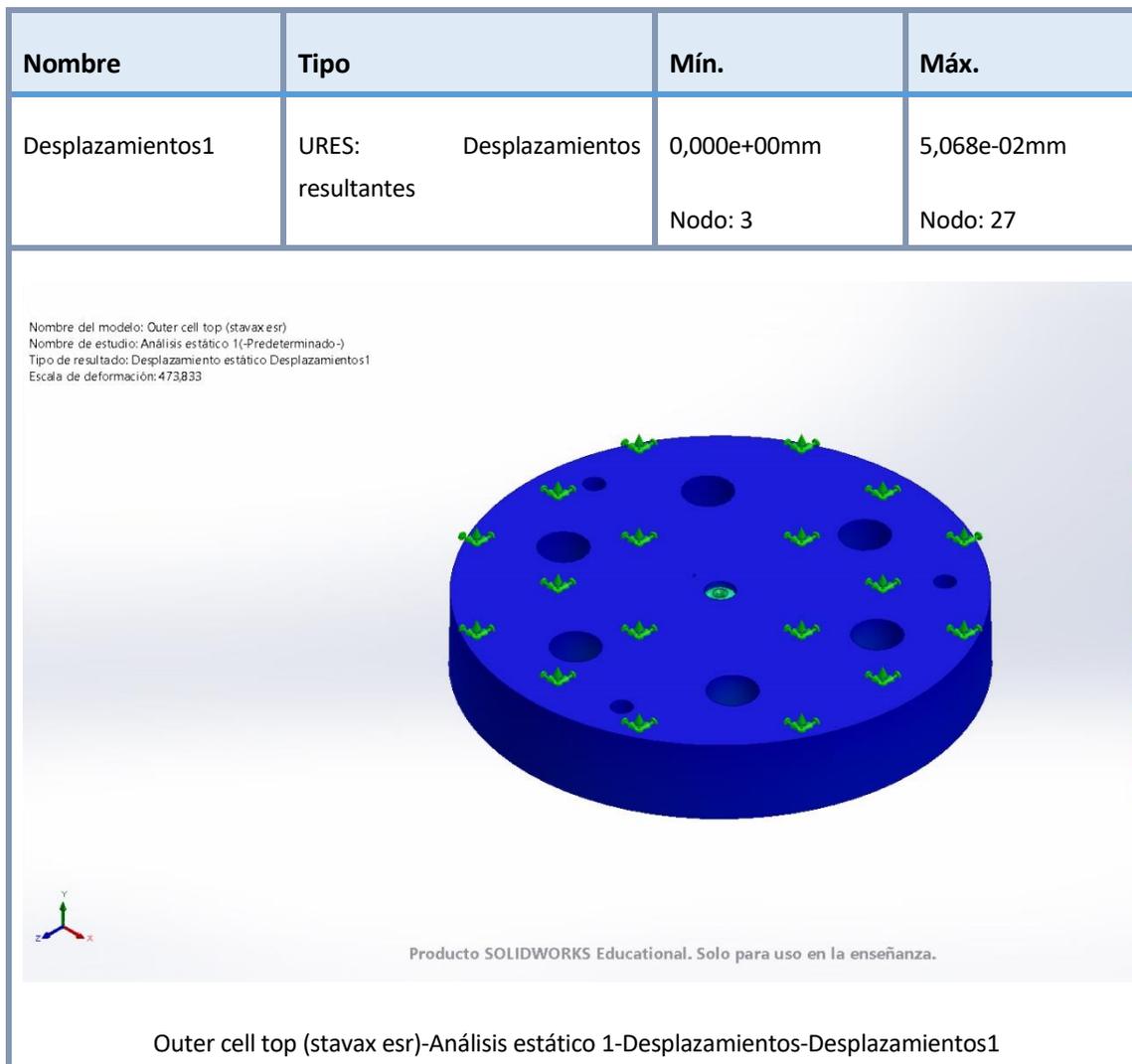


La tensión de equivalente de Von Misses máxima obtenida es de 617.8 MPa, por tanto, se obtiene el siguiente factor de seguridad:

$$Fs = \frac{1280}{617.8} = 2.07$$

El factor es superior a 2 y similar al obtenido en los cálculos del cilindro.

Desplazamientos:



En este caso también el desplazamiento máximo obtenido es de 0.05068 mm, prácticamente despreciable.

Tornillos tapa superior:

A continuación, se presenta en la tabla 3.1 las características técnicas necesarias para los cálculos de los tornillos utilizados en la parte superior del bloque.

TAMAÑO DE ROSCA	M24
Paso (P)	3 mm
Diámetro de flancos (d_2)	22,051 mm
Diámetro de núcleo (d_3)	20,319 mm
Sección resistente (A_R)	353 mm ²
Altura de la cabeza (k)	15 mm
Longitud de rosca (n)	40 mm
Calidad	12.9
Límite elástico min. (σ_y)	1100 MPa
Stress proof load ($\sigma_{proof\ load}$)	970 MPa

Tabla 3.1. Propiedades tornillería M24x3.

Para determinar las tensiones a las que se somete el tornillo, el primer paso a dar es calcular la fuerza aplicada:

$$F = p \cdot A = p \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Donde;

p : presión interior del bloque.

d : diámetro máximo interior del cilindro.

Aplicando la ecuación 3.3 podemos obtener la fuerza:

$$F = p \cdot A = 300 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 74.96^2 = 1\,323\,946 \text{ N}$$

Obtenida la fuerza resultante de la presión, se divide entre el número total de tornillos.

$$F = \frac{1\,323\,946 \text{ N}}{6} = 220\,660 \text{ N}$$

A continuación, se estudian las diferentes causas por las que puede fallar el tornillo en el caso de montaje sin tensión y con carga axial posterior:

- Ruptura del núcleo del tornillo.
- Aplastamiento de los filetes de la rosca.
- Cizallamiento de los filetes de la rosca.

Rotura del núcleo del tornillo:

En este caso se analiza el fallo del tornillo por ruptura de su sección.

Por tanto, la tensión en el núcleo del tornillo (σ) es:

$$\sigma_{ruptura} = \frac{F}{A_R} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Donde;

F : fuerza de separación.

A_R : área resistente del tornillo M24.

Por lo tanto, aplicando los valores, se obtiene la tensión en el núcleo del tornillo.

$$\sigma_{ruptura} = \frac{220\,660}{353} = 625.1 \text{ N/mm}^2$$

Finalmente, se puede obtener el factor de seguridad (F_s) del núcleo del tornillo.

$$F_s = \frac{\sigma_y}{\sigma_{ruptura}} = \frac{1100 \text{ MPa}}{625.1 \text{ MPa}} = 1.76$$

Aplastamiento de los filetes de la rosca:

La presión ejercida sobre la rosca (p) se calcula a través de la expresión:

$$p = \frac{F'}{\pi \cdot d_2 \cdot H_1} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

Donde d_2 es el diámetro de flancos y H_1 es la altura del filete, que en el caso de ser una rosca de perfil triangular ISO tiene la siguiente expresión:

$$H_1 = 0.54127 \cdot P \quad (\text{Eq. 3.6})$$

Siendo P el paso de la rosca. En la ecuación 3.5, F' es la proporción de fuerza que le corresponde a cada ranura y su cálculo se realiza mediante:

$$F' = \frac{F}{i} = \frac{F}{\frac{n}{P}} \quad (\text{Eq. 3.7})$$

Donde i es el número de filetes, que equivale al cociente entre la longitud roscada ($m=40\text{mm}$) y el paso de la rosca ($P=3\text{mm}$). Por lo tanto:

$$F' = \frac{220\,660}{\frac{40}{3}} = 16\,549.5 \text{ N}$$

Como resultado de los anteriores cálculos, y volviendo a la ecuación 3.5., se obtiene el valor de la presión:

$$p = \frac{16\,549.5}{\pi \cdot 22.051 \cdot 0.54127 \cdot 3} = 147.12 \text{ N/mm}^2$$

Para corregir la distribución no uniforme de la presión, se le aplica un factor corrector:

$$\sigma_{\text{aplast}} = \frac{p}{0.46} = 319.86 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Eq. 3.8})$$

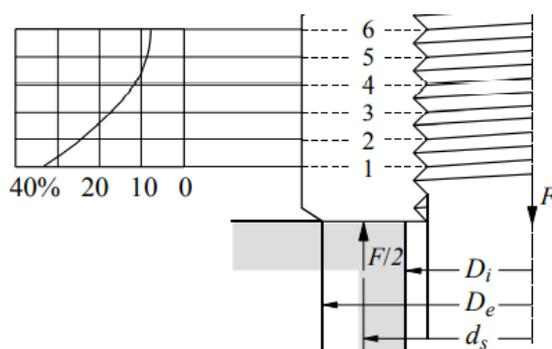


Figura 3.2. Distribución no uniforme de carga en rosca (Fuente: *Unions Cargolades*).

Cizallamiento de los filetes de la rosca:

En este caso, la rotura se produce en los filetes por tensión tangencial debido a la cizalladura. El valor de la tensión tangencial (τ) se obtiene con la siguiente expresión:

$$\tau = \frac{F}{\pi \cdot d_3 \cdot n} \quad (\text{Eq. 3.9})$$

Donde;

F : fuerza de separación de la tuerca.

d_3 : diámetro de la tuerca en la base del flanco.

n : longitud roscada.

Por tanto, aplicando los valores en la ecuación A.9 la tensión calculada es:

$$\tau = \frac{220\,660}{\pi \cdot 20.319 \cdot 40} = 86.42 \text{ N/mm}^2$$

Esta tensión de cizalladura junto con la tensión de aplastamiento calculada en el caso anterior, crean un estado de sollicitación combinado el cual se reduce a un estado de sollicitación equivalente:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{aplast}^2 + 3 \cdot \tau^2} = 353.15 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Eq. 3.10})$$

Dado que el esfuerzo que se obtiene en este apartado y en el anterior son menor al que se obtiene en el núcleo del tornillo, se tomará como factor de seguridad el obtenido anteriormente de 1.76.

Ventanas de aluminio:

Para las ventanas, se ha utilizado el material de aleación de aluminio 7075 T6, en la Tabla 3.2. se pueden observar las principales características técnicas de este material.

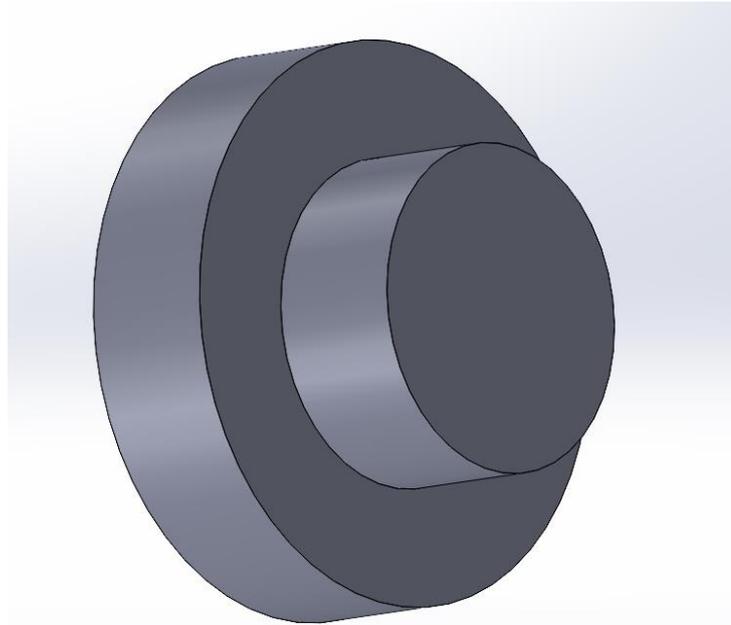


Figura 3.3. Ventana aluminio.

Aluminio 7075 T6	
Offset yield strenght ($R_{p0.2}$)	503 MPa
Resistencia a la tracción (R_m)	572 MPa
Shear strenght (τ_{max})	331 MPa
Dureza	7 HRC
Densidad (20 °C)	2810 kg/m ³

Tabla 3.2. Propiedades AL 7075 T6.

Dado que la resistencia la cortante es menor que la resistencia a tracción se comprobará esta puesto que es la más crítica de ambas.

Para determinar las tensiones cortantes a las que se somete el aluminio de la ventana, el primer paso a dar es calcular la fuerza aplicada.

Aplicando la ecuación 3.1, se puede obtener la fuerza:

$$F = p \cdot A = 300 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 38.71^2 = 353\,067 \text{ N}$$

Conocida la fuerza resultante de la presión, se utiliza la siguiente ecuación 3.11 para obtener el esfuerzo cortante:

$$\tau = \frac{F}{\pi \cdot t \cdot d_n} \quad (\text{Eq. 3.11})$$

Donde;

F: fuerza de separación.

d_n: dimetro máximo interior ventana.

t: espesor sometido a esfuerzo.

Aplicando la expresión A.11 se puede obtener el esfuerzo cortante máximo que se da en la primera sección interior de la ventana:

$$\tau = \frac{353\,067}{\pi \cdot 15 \cdot 38.71} = 193.55 \text{ N/mm}^2$$

Por tanto, se puede obtener el factor de seguridad (Fs) de las ventanas.

$$F_s = \frac{\tau_{max}}{\tau} = \frac{331}{193.55} = 1.71$$

Soporte ventana:

Suponiendo que todo el esfuerzo se reparte únicamente por el perímetro exterior de los tornillos hacia el soporte de las ventanas (peor caso posible), se comprobará su resistencia a cizalladura.

$$F = 353\,067\text{ N}$$

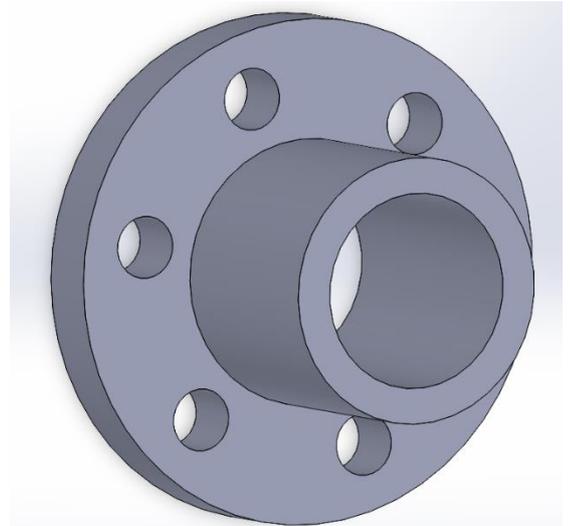


Figura 3.4. Soporte ventana aluminio.

Obtenida la fuerza resultante, se utiliza la ecuación 3.11 para obtener el esfuerzo cortante:

$$\tau = \frac{F}{\pi \cdot t \cdot d_n} \quad (\text{Eq. 3.11})$$

Donde;

F: fuerza de separación.

d_n: diámetro exterior cabeza tornillo.

t: espesor sometido a esfuerzo.

Aplicando la expresión A.11 se puede obtener el esfuerzo cortante máximo que se da entre la cabeza de los tornillos y el soporte de las ventanas.:

$$\tau = \frac{353\,067}{\pi \cdot 15 \cdot 20.67 \cdot 6} = 60.41\text{ N/mm}^2$$

Se puede ver que el valor es muy lejano a la tensión máxima, de todos modos, el factor de seguridad (*F_s*) del soporte de las ventanas, es el siguiente:

$$F_s = \frac{\tau_{max}}{\tau} = \frac{331}{60.41} = 5.48$$

Tornillos soporte ventanas:

A continuación, se presenta en la tabla 3.3. las características técnicas necesarias para los cálculos de los tornillos utilizados en las ventanas.

TAMAÑO DE ROSCA	M14
Paso (P)	2 mm
Diámetro de flancos (d_2)	12,71 mm
Diámetro de núcleo (d_3)	11,546 mm
Sección resistente (A_R)	115,523 mm ²
Altura de la cabeza (k)	15 mm
Longitud de rosca (n)	25 mm
Calidad	12.9
Límite elástico min. (σ_y)	1100 MPa
Stress proof load ($\sigma_{proof\ load}$)	970 MPa

Tabla 3.3. Propiedades tornillería M14x2.

Para determinar las tensiones a las que se somete el tornillo, el primer paso a dar es calcular la fuerza aplicada en cada tornillo.

$$F = \frac{353\ 067\ N}{6} = 58\ 845\ N$$

A continuación, se estudian las diferentes causas por las que puede fallar el tornillo con carga axial:

- Ruptura del núcleo del tornillo.
- Aplastamiento de los filetes de la rosca.
- Cizallamiento de los filetes de la rosca.

Rotura del núcleo del tornillo:

En este caso se analiza el fallo del tornillo por rotura de su sección.

Por tanto, la tensión en el núcleo del tornillo (σ) es:

$$\sigma_{ruptura} = \frac{F}{A_R} \quad (\text{Eq. 3.12})$$

Donde;

F : fuerza de separación.

A_R : área resistente del tornillo M14.

Seguidamente, aplicando los valores, se obtiene la tensión en el núcleo del tornillo.

$$\sigma_{ruptura} = \frac{58\,845}{115.523} = 509.38 \text{ N/mm}^2$$

Finalmente, se puede obtener el factor de seguridad (F_s) del núcleo del tornillo.

$$F_s = \frac{\sigma_y}{\sigma_{ruptura}} = \frac{1100}{509.38} = 2.16$$

Aplastamiento de los filetes de la rosca:

La presión ejercida sobre la rosca (p) se calcula a través de la expresión:

$$p = \frac{F'}{\pi \cdot d_2 \cdot H_1} \quad (\text{Eq. 3.13})$$

Donde d_2 es el diámetro de flancos y H_1 es la altura del filete, que en el caso de ser una rosca de perfil triangular ISO tiene la siguiente expresión:

$$H_1 = 0.54127 \cdot P \quad (\text{Eq. 3.14})$$

Siendo P el paso de la rosca. En la expresión *ecuación 3.5*, F' es la proporción de fuerza que le corresponde a cada ranura y su cálculo se realiza mediante:

$$F' = \frac{F}{i} = \frac{F}{\frac{n}{P}} \quad (\text{Eq. 3.15})$$

Donde i es el número de filetes, que equivale al cociente entre la longitud roscada ($m=25$ mm) y el paso de la rosca ($P=2$ mm). Por lo tanto:

$$F' = \frac{58\,845}{\frac{25}{2}} = 4707.6 \text{ N}$$

Como resultado de los anteriores cálculos, y volviendo a la ecuación 3.14, se obtiene el valor de la presión:

$$p = \frac{4707.6}{\pi \cdot 12.71 \cdot 0.54127 \cdot 2} = 108.91 \text{ N/mm}^2$$

Para corregir la distribución no uniforme de la presión, se le aplica un factor corrector:

$$\sigma_{aplast} = \frac{p}{0.46} = 236.76 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Eq. 3.16.})$$

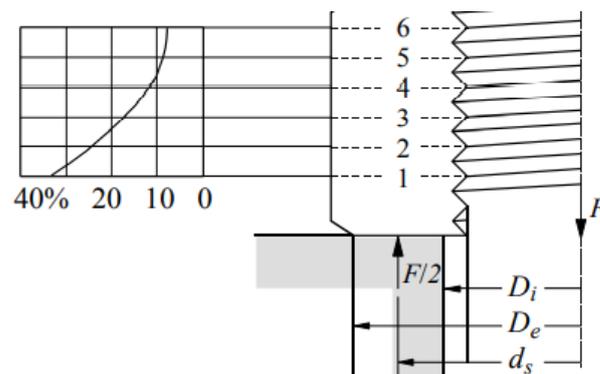


Figura 3.5. Distribución de carga no uniforme en rosca (Fuente: *Unions Cargolades*).

Cizallamiento de los filetes de la rosca:

En este caso, la rotura se produce en los filetes por tensión tangencial debido a la cizalladura. El valor de la tensión tangencial (τ) se obtiene con la siguiente expresión:

$$\tau = \frac{F}{\pi \cdot d_3 \cdot n} \quad (\text{Eq.3.17})$$

Donde;

F: fuerza de separación de la tuerca.

d₃: diámetro de la tuerca en la base del flanco.

n: longitud roscada.

Por tanto, la tensión a cortadura calculada es:

$$\tau = \frac{58\,845}{\pi \cdot 11.546 \cdot 25} = 64.90 \text{ N/mm}^2$$

Esta tensión de cizalladura junto con la tensión de aplastamiento calculada en el caso anterior, crean un estado de sollicitación combinado el cual se reduce a un estado de sollicitación equivalente:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{aplast}^2 + 3 \cdot \tau^2} = 269.10 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Eq. 3.18})$$

Tanto en este caso como en el anterior no precisa calcular factor de seguridad dado que los esfuerzos obtenidos son menores que los que sufre el núcleo del tornillo, por tanto, el factor de seguridad a tener en cuenta es de 2.16.

Par de apriete tornillos tapa superior:

Se calcula el par de apriete mínimo necesario para lograr transmitir a las C-Ring la suficiente presión que viene determinada por el fabricante, posteriormente se calcula el par de apriete máximo que soporta el tornillo según la normativa UNE 17-108-81, y finalmente el par de apriete a emplear se obtendrá de forma experimental debido a las singularidades de su cometido en este caso, pero sabiendo que éste deberá estar entre el mínimo y el máximo.

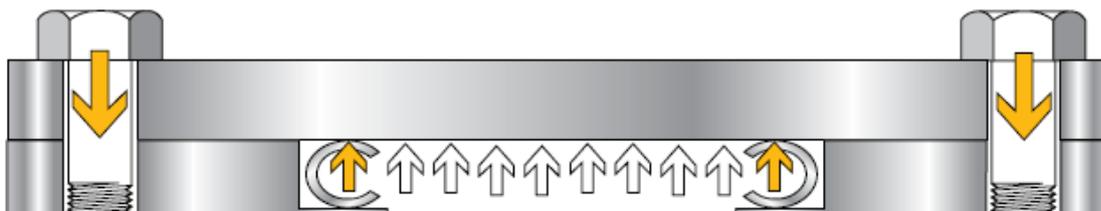


Figura 4.6. Fuerza de apriete transmitida a la C-ring (Fuente: Catálogo Parker).

Par de apriete según fabricante de las C-Ring, la ecuación 3.19 ha sido obtenido del catálogo del fabricante de este tipo de juntas, llamado Parker.

$$T = L' r_t \left(\frac{\cos \theta \tan \alpha + \mu_1}{\cos \theta - \mu_1 \tan \alpha} + \frac{r_c}{r_t} \mu_2 \right) \quad (\text{Eq. 0.19})$$

Donde;

T : Torque (Nm).

L' : Bolt load (N).

θ : Angulo entre eje vertical del tornillo y la fuerza en grados.

α : Angulo rosca del tonillo en grados.

μ_1 : Coeficiente de fricción rosca.

μ_2 : Coeficiente de fricción cabeza tornillos.

r_t : Radio paso del tornillo (m).

r_c : Radio cabeza del tornillo (m).

Según el fabricante, este tipo de juntas metálicas se les debe aplicar una fuerza mínima por unidad de longitud para que puedan cumplir con su cometido.

Se puede obtener el valor de dicha fuerza por unidad de longitud en el catálogo:

$$f = 230 \frac{lb}{Inch} = 40\,280 \text{ N/m}$$

Teniendo en cuenta que la longitud de aplicación de fuerza sobre la junta metálica es el perímetro superior del cilindro.

$$L = f \cdot \pi \cdot d \quad \text{(Eq. 3.20)}$$

$$L = 40\,280 \cdot \pi \cdot 0.0728726 = 9\,221.54 \text{ N}$$

Dado que el objetivo es encontrar el par de apriete para cada tornillo, la fuerza total, se reparte entre el número de tornillos.

$$L' = \frac{9\,221.54}{6} = 1\,536.92 \text{ N}$$

Una vez obtenidos todos los valores necesarios, se procede a aplicar la ecuación 3.19 para obtener el torque mínimo necesario.

$$T = 1\,536.92 \cdot 0.011032 \left(\frac{\cos 0 \cdot \tan 60 + 0.15}{\cos 0 - 0.15 \cdot \tan 60} + \frac{0.018}{0.011032} \cdot 0.15 \right) = 47.26 \text{ Nm}$$

Se ha tomado $\mu_1 = \mu_2 = 0.15$

Par de apriete máximo según normativa UNE 17-108-81:

$$T = \frac{L'}{1000} [0.161 P + 0.583\mu_1 d_2 + 0.25\mu_2 (d_e + d_i)] \quad (\text{Eq. 3.21})$$

Donde;

T : Torque (Nm).

L' : Bolt load (N).

P : paso de la rosca (mm).

μ_1 : Coeficiente de fricción rosca.

μ_2 : Coeficiente de fricción cabeza tornillos.

d_e : Diámetro exterior cabeza tornillo (mm).

d_i : Diámetro interior cabeza tornillo (mm).

d_2 : Diámetro núcleo tornillo (mm).

Donde:

$$L' = \frac{VEA_s}{\sqrt{1 + 3\left[\frac{4}{\frac{d_3}{d_2} + 1} \left(\frac{P}{\pi d_2} + 1.155\mu_1\right)\right]^2}} \quad (\text{Eq. 3.22})$$

Donde;

L' : Bolt load (dN).

V : Relación tensión aplicada u límite elástico.

E : Límite elástico (N/mm²).

A_s : Área sección resistente (mm²).

P : paso de la rosca (mm).

μ_1 : Coeficiente de fricción rosca.

d_2 : Diámetro medio de la rosca (mm).

d_3 : Diámetro núcleo de la rosca (mm).

Aplicando la ecuación 3.22, se obtiene L' :

$$L' = \frac{0.7 \cdot 1100 \cdot 353}{\sqrt{1 + 3 \left[\frac{4}{\frac{20.319}{22.051} + 1} \left(\frac{3}{\pi 22.051} + 1.155 \cdot 0.15 \right) \right]^2}} = 271\,735.47 \text{ dN}$$

Una vez obtenido el valor de L' , ya se puede calcular la ecuación 3.23 para obtener el par de apriete máximo:

$$T = \frac{271\,735.47}{1000} [0.161 \cdot 3 + 0.583 \cdot 0.15 \cdot 22.051 + 0.25 \cdot 0.15(36 + 24)] = 1266.66 \text{ Nm}$$

Se ha tomado $\mu_1 = \mu_2 = 0.15$

Finalmente, el par de apriete a aplicar se ha establecido en 200 Nm en este caso, esto es debido a que se han realizado varios experimentos con diferentes pares de apriete por tal de lograr la estanqueidad del bloque con un par de apriete lo más próximo al mínimo posible, aplicando un factor de seguridad de 2. En la figura 3.7 se puede observar una de las pruebas con un par de apriete insuficiente.



Figura 3.7. Consecuencia de par de apriete en tapa insuficiente.

Par de apriete tornillos de los soportes de las ventanas:

Par de apriete según fabricante de las C-Ring, la ecuación 3.19 ha sido obtenido del catálogo del fabricante de este tipo de juntas, llamado Parker.

Según el fabricante, este tipo de juntas metálicas se les debe aplicar una fuerza mínima por unidad de longitud para que puedan cumplir con su cometido.

Se puede obtener el valor de dicha fuerza por unidad de longitud en el catálogo:

$$f = 230 \frac{lb}{Inch} = 40\,280 \text{ N/m}$$

Teniendo en cuenta que la longitud de aplicación de fuerza sobre la junta metálica es el perímetro superior del cilindro.

$$L = f \cdot \pi \cdot d$$

$$L = 40\,280 \cdot \pi \cdot 0.038586 = 4\,882.5 \text{ N}$$

Dado que el objetivo es encontrar el par de apriete para cada tornillo, la fuerza total, se reparte entre el número de tornillos.

$$L' = \frac{4\,882.5}{6} = 813.75 \text{ N}$$

Una vez obtenidos todos los valores necesarios, se procede a aplicar la ecuación 3.19 para obtener el torque mínimo necesario.

$$T = 813.75 \cdot 0.006355 \left(\frac{\cos 0 \cdot \tan 60 + 0.15}{\cos 0 - 0.15 \cdot \tan 60} + \frac{0.0105}{0.006355} \cdot 0.15 \right) = 14.43 \text{ Nm}$$

Se ha tomado $\mu_1 = \mu_2 = 0.15$

Par de apriete máximo según normativa UNE 17-108-81:

Aplicando la ecuación 3.22, se obtiene L':

$$L' = \frac{0.7 \cdot 1100 \cdot 115.52}{\sqrt{1 + 3 \left[\frac{4}{\frac{11.546}{12.71} + 1} \left(\frac{2}{\pi 12.71} + 1.155 \cdot 0.15 \right) \right]^2}} = 69\,093.35 \text{ dN}$$

Una vez obtenido el valor de L' , ya se puede calcular la ecuación 3.23 para obtener el par de apriete máximo:

$$T = \frac{69\,093.35}{1000} [0.161 \cdot 2 + 0.583 \cdot 0.15 \cdot 12.71 + 0.25 \cdot 0.15(21.25 + 14)] = 190.38 \text{ Nm}$$

Se ha tomado $\mu_1 = \mu_2 = 0.15$

Finalmente, el par de apriete a aplicar se ha establecido en 150 Nm en este caso también, esto es debido a que se han realizado varios experimentos con diferentes pares de apriete por tal de lograr la estanqueidad en las ventanas con un par de apriete lo más próximo al mínimo posible, aplicando un factor de seguridad de 2. En la figura 3.8 se puede observar una de las pruebas con un par de apriete insuficiente.



Figura 3.8. Consecuencia de par de apriete en ventanas insuficiente.

1.5.3. Validación experimental

En el inicio de la experimentación, las presiones máximas que se podían alcanzar eran de hasta 2900 bar. Tras las optimizaciones llevadas a cabo para los elementos que componen el bloque, se ha realizado la prueba para la validación experimental.

Se conseguido llevar el dispositivo a una presión cercana a 3400 bar y mantener esta presión, cosa que nos indica que el bloque es perfectamente estanco, por tanto, se considera que satisfecho la validación.

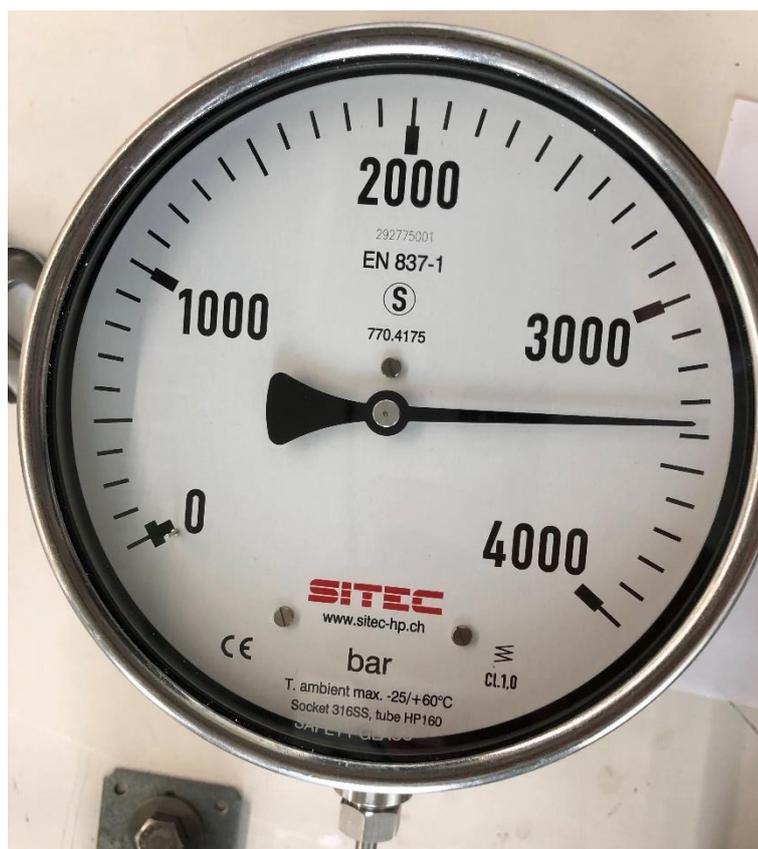


Figura 3.9. Validación experimental.

1.6. Circuito hidráulico

En este apartado se hablará del conjunto de elementos que conforman el circuito hidráulico capaces de trabajar en presiones de 3000 bar. Todos los elementos han sido manufacturados de la empresa suiza Sitec, especializada en alta presión. El conjunto del circuito se ha montado gracias a la ayuda de un conjunto de soportes soportes en forma de escuadra como los que se presentan en la figura 2.0.

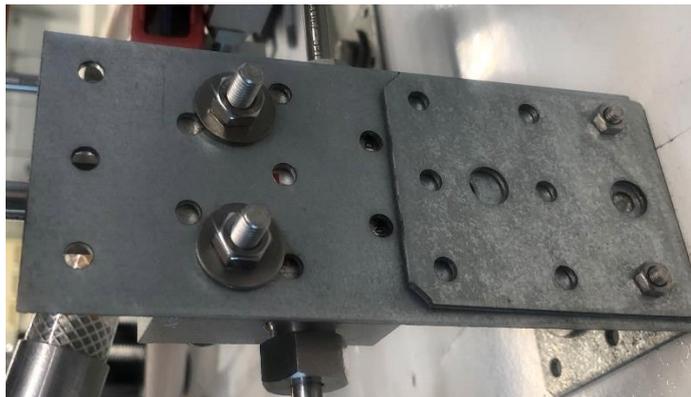


Figura 6.1. Soportes tipo escuadra.

En la figura 6.2 se puede observar los elementos identificados con las diferentes letras, a continuación, se explicada sus particularidades y características más importantes.

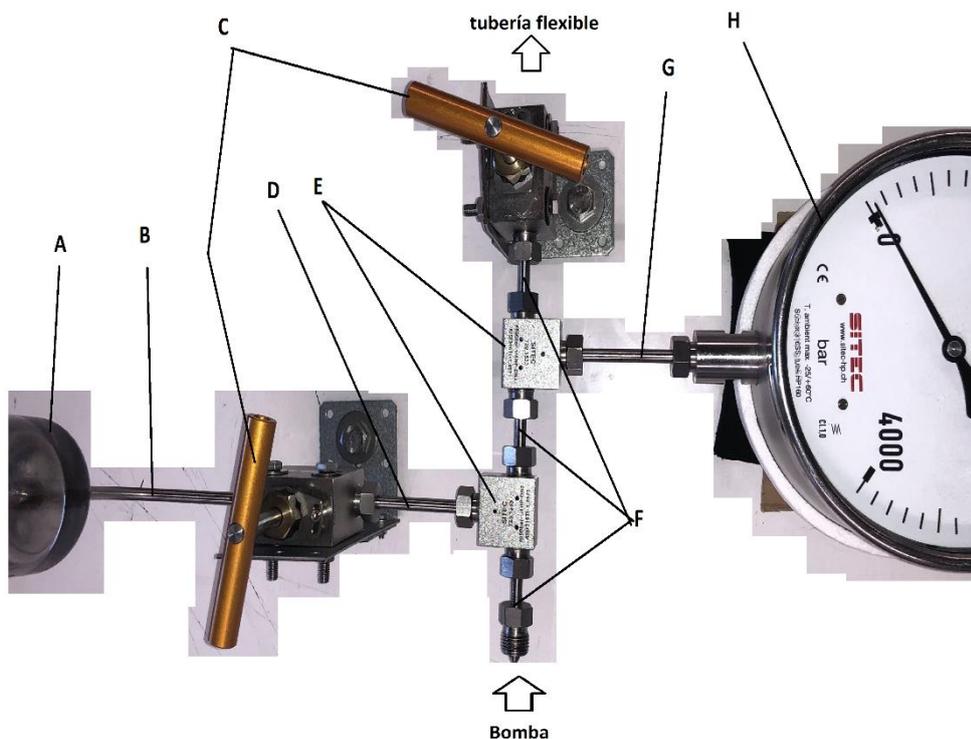


Figura 6.2. Circuito hidráulico.

Depósito (A):

El primer elemento para comentar es del depósito del aceite térmico que alimenta el circuito hidráulico, de todo el circuito es la única pieza que se ha fabricado por separado, básicamente consiste en un recipiente con las propiedades químicas para no reaccionar con aceites, por tanto, cualquiera

con propiedades similares es válido para la función. Su capacidad es de 215 cm³ de aceite y se encuentra a presión atmosférica.

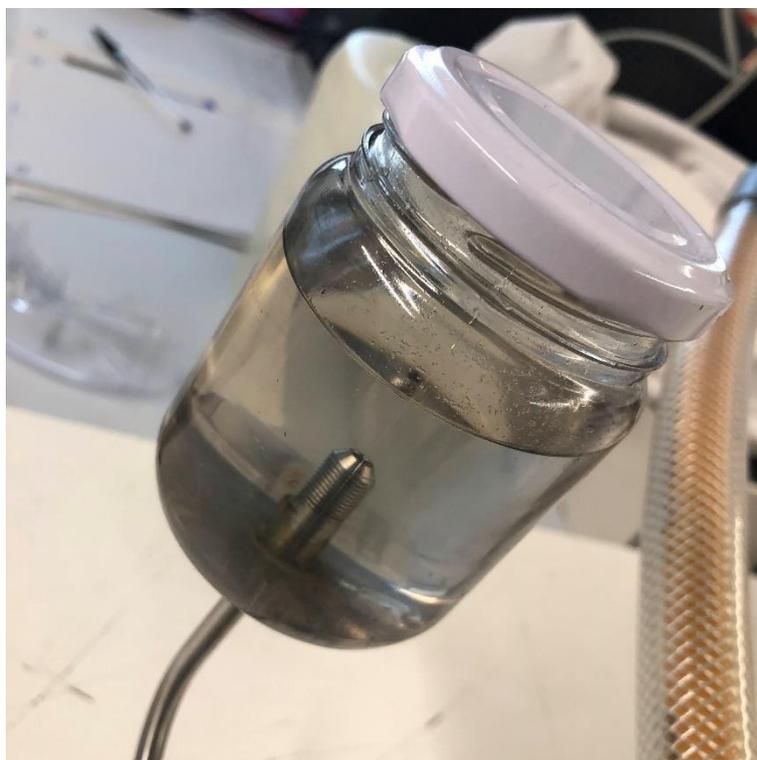


Figura 6.3. Depósito de aceite para el circuito.

Tubería curva 90° (B):

Fabricado en acero AISI 316 es capaz de soportar presiones de trabajo de hasta 4000 bar, en este caso ha sido necesario disponer de una curvatura de 90° para poder insertar el extremo en la parte inferior del depósito (véase la figura 2.2).

Su referencia en el catálogo sitec es la 730.1342, donde se puede encontrar más información como, por ejemplo, el tipo de conexión por la que está diseñado es de 1/4", es decir 6.35 mm, con el orificio interior con diámetro de 2.4 mm, en su punta dispone de un ángulo de 58° para poder realizar las conexiones de alta presión de forma estanca y segura.



Figura 6.4. Conexión 1/4" hp.

Válvulas (C):

En el circuito se dispone de dos válvulas de apertura y cierre, con funciones diferentes cada una de ellas, la primera su función es la conexión de la bomba con el depósito, mientras que la segunda, su función es la de conectar la bomba con la tubería flexible que suministra presión al cilindro.

Las válvulas, como el conjunto de elementos sitec, pueden trabajar hasta presiones de 4000 bar, si bien a diferencia de los demás elementos, las válvulas se abren y cierran constantemente, su referencia en el catálogo sitec es la 710.5310.



Figura 6.5. válvula.

Tubería 100 mm (D y G):

Las propiedades de estas tuberías son las mencionadas anteriormente en la tubería curva, con el único cambio de las dimensiones, al ser tuberías rectas su función es unir elementos que se encuentran a la misma altura.

T bifurcación (E): Las "T" son elementos comúnmente usados en las tuberías para conectar bifurcaciones, en este caso permiten conectar diferentes partes del circuito. Su presión máxima de

trabajo es de 4000 bar, como los demás elementos, también disponen de orificio para purgado del circuito.

Tubería 65 mm (F):

Como en el caso de las tuberías de 100 mm, sus propiedades son las mismas que las mencionadas anteriormente, en este caso su longitud es de 65 mm, lógicamente es interesante minimizar la distancia entre dos elementos siempre que sea posible.

Manómetro (H):

En cualquier circuito donde sea importante el control de la presión, es imprescindible disponer de un manómetro, en este caso, del mismo fabricante que los demás elementos del circuito, cosa que hace fácil su instalación, marcando presiones máximas de 4000 bar.

Bomba de presión (750.1400):

La bomba manual de presión es capaz de trabajar máxima de hasta 4000 Bar (400 MPa). Dispone de 3 brazos para rotar el tornillo sinfín y así empujar el embolo dentro del cilindro que tiene.

Su capacidad es de 7.5 ml de aceite, por cada vuelta se logra introducir 0.15 ml en el circuito. Sus conexiones, de igual modo que el resto de los elementos, son de ¼" hp.



Figura 6.6. Bomba manual.

Tubería flexible (730.3328-3):

Se trata de una tubería con un recubrimiento de seguridad en caso de rotura, la tubería interior está fabricada en material POM con excelentes propiedades mecánicas a pesar de ser flexible, diseñada para una presión de trabajo de 3200 bar i siendo 7000 bar la presión de rotura.

En un extremo dispone de una conexión de 1/4" de alta presión, en el segundo extremo dispone de una conexión de alta presión con rosca M16x1.5, el diámetro interior del conducto es de 2.6 mm.

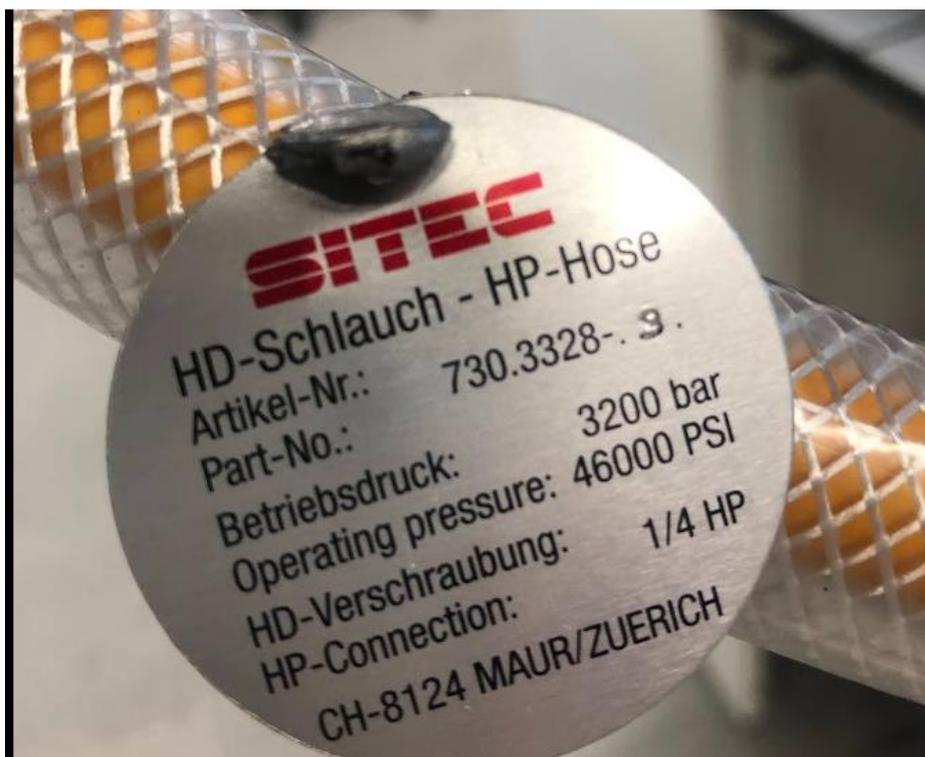


Figura 6.7. Tubería flexible.

Aciete térmico:

El medio de transmisión de presión que se ha escogido es el aciete térmico "Therm 240" fabricado en la empresa alemana Lauda, el hecho de usar un aciete térmico responde a sus excelentes propiedades de mantener la densidad incluso si se trabaja en altas temperaturas, aunque este aceite en cuestión se puede usar hasta temperaturas de 350 °C, en este caso nunca se llegará a solicitar estas prestaciones.

En la gráfica de la figura 2.7 se puede observar la tendencia de la densidad en función de la temperatura.

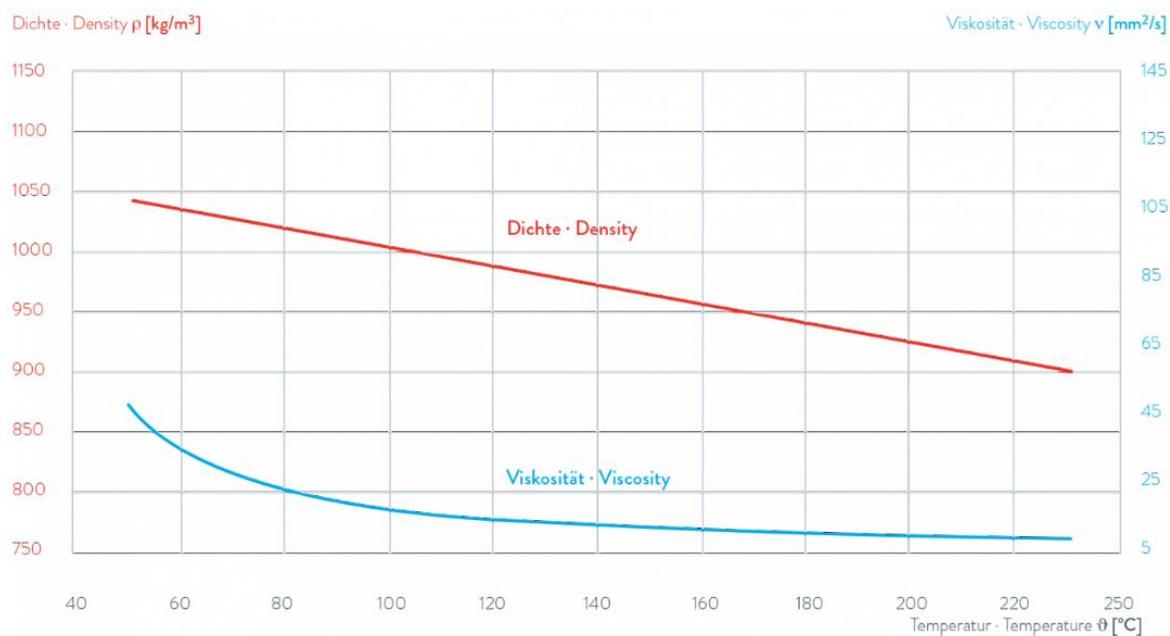


Figura 6.8. Densidad-temperatura aceite Therm 240.

1.6.1. Validación teórica

Todos los elementos usados para el montaje del circuito cumplen con las especificaciones que les atribuye el fabricante en su catálogo.

1.6.2. Validación experimental

Tras las pruebas realizadas para los elementos que componen el bloque, se ha demostrado que el circuito también es funcional y no presenta ningún tipo de problema en condiciones de trabajo.

1.7. Celda interior

Como se ha procedido en el apartado anterior con la explicación de las partes que conforman tanto el circuito como el bloque, en el presente, se procede a explicar las partes que conforman la celda interior, así como las acciones que se han llevado a cabo sobre estas piezas por tal de que un funcionamiento lo óptimo posible.

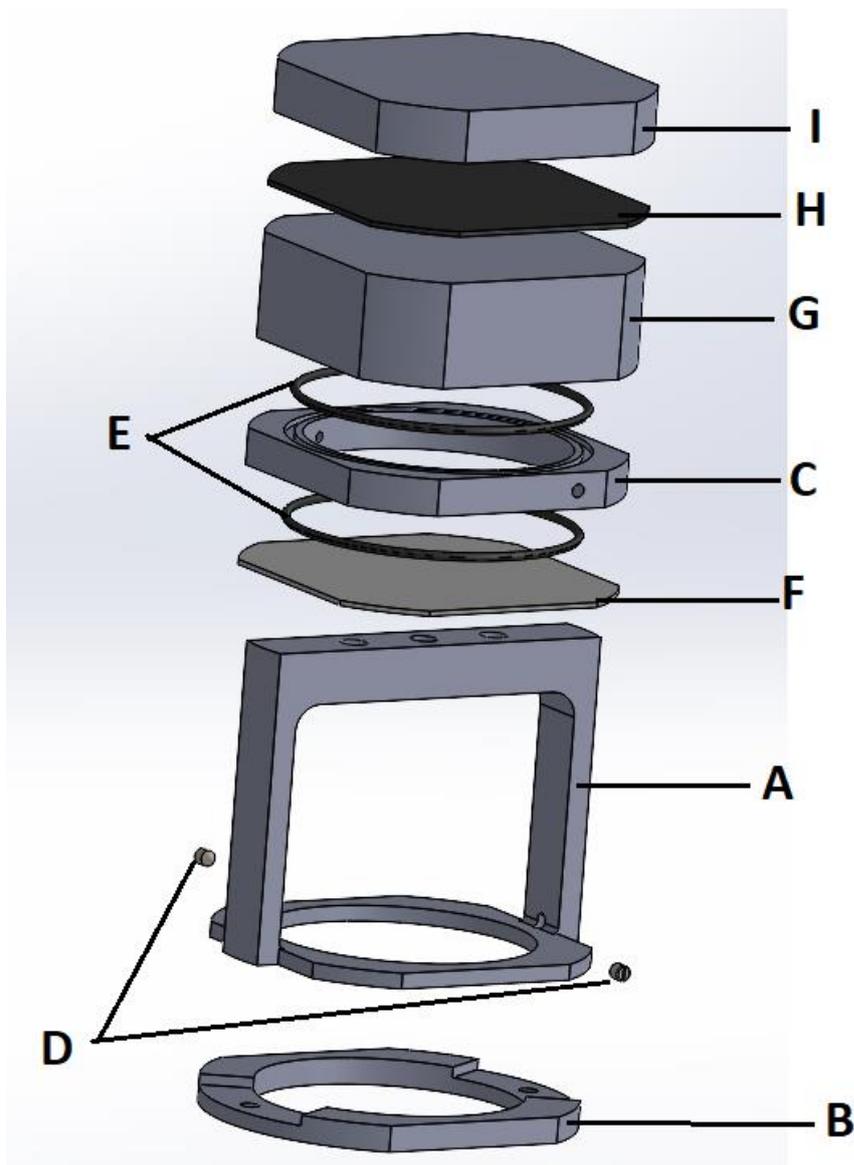


Figura 7.1. Vista explosionada celda interior.

Soporte celda (A):

Es el principal soporte de la celda interior y se ha fabricado con el mismo material que el bloque, acero inoxidable AISI 316, su función es la de fijar todos los elementos que componen esta celda, además gracias a los dos orificios roscados que tiene en su parte superior permite que se puedan roscar dos tronillos de M6 para conseguir con ello aplicar la presión suficiente en el resto de los componentes por tal de que no se separen y mantengan su linealidad, en su parte inferior tiene dos orificios roscados para poder fijar en ellos mediante dos tornillos M3 la base inferior.

Base inferior (B):

Es el elemento que está en contacto con el fondo del cilindro, fijado mediante dos tornillos de M3 al soporte, fabricado también en acero inoxidable AISI 316, en sus laterales dispone de dos ranuras para que el aceite térmico pueda introducirse, acumularse y circular libremente bajo la lámina de nylon que transmite la presión al interior del compartimiento para las muestras.



Figura 7.2. Soporte celda y base inferior.

Compartimento para muestra (C):

Para estudiar las muestras requieren estar en diferentes líquidos adecuados para dicho uso y estos no pueden mezclarse con el aceite térmico, es por este motivo que se ha diseñado este espacio separado del interior del cilindro del bloque, fabricado en acero inoxidable común. En su parte superior y parte inferior dispone de juntas tóricas que se explican más adelante con detalle, en sus laterales dispone de dos orificios de diámetro parcial roscado de 3 mm y diámetro de 2 mm, la función de estos es poder introducir el líquido de la muestra una vez se ha montado la celda interior.

Tornillos (D):

Puesto que para introducir el líquido que baña la muestra la celda interior debe estar cerrada, se ha hecho necesario realizar orificios en el compartimento para, con ayuda de una aguja, introducir dicho líquido y sellar la celda mediante tornillo. Se ha optado por utilizar, como se aprecia en la imagen 7.3, tornillos tipo allen ciegos de M3 con 4 mm de rosca, de este modo se consigue que no sobresalga y choquen con las ventanas de aluminio.



Figura 7.3. Compartimento con tornillo allen ciego.

Juntas tóricas (E):

Como se aprecia en la figura 7.3, se ha realizado una ranura en el compartimento para que esta pueda alojar la junta tórica de goma que se inserta en ambos lados de este, para ello se han seguido las indicaciones que marca el catálogo del fabricante, Interseal, S.A.

Lámina de PTFE (F):

Para poder transmitir la presión del aceite térmico al interior del compartimento de la muestra, sin mezclar los líquidos los dos líquidos presentes, se utiliza una junta de teflón de 1 mm de espesor, gracias a que es capaz de resistir grandes presiones y al mismo tiempo es flexible, permite transmitir la presión del cilindro a la celda interior.

En este caso se ha usado una lámina de teflón, pero otros polímeros elásticos podrían ser aptos para esta función, siempre y cuando puedan soportar grandes compresiones y no tengan reacciones químicas con el aceite térmico.



Figura 7.4. Lámina nylon.

Oblea de silicio (G):

El material ideal usado en la reflectometría de neutrones es el Silicio puesto que es un material completamente invisible para los neutrones, pero presenta el gran inconveniente de ser muy frágil, es por este motivo que se ha sustituido por acero inoxidable AISI 316 durante este proceso, una vez el conjunto llegue a las instalaciones finales en Alemania se usará una oblea de silicio.

Plato de presión (I):

La función de este plato es la de recibir la fuerza aplicada en los dos tornillos y transmitir una presión uniforme a la oblea de acero gracias a la junta de caucho, se ha fabricado en acero inoxidable AISI 316.

Junta caucho (H):

Esta junta de caucho colocada entre la oblea de silicio y el plato de acero tiene la función de equilibrar la presión que se aplicando mediante los dos tornillos superiores a la primera junta sobre la segunda junta, de esta manera se consigue que se aplique una presión similar en los 360º de la junta tórica.

El hecho de usar el material caucho es básicamente por que es capaz de soportar grandes presiones y ofrece un muy buen agarre.



Figura 7.5. Junta caucho.

1.7.1. Optimización

En el caso de la celda interior, disponía de los orificios para los tornillos, pero nunca se les llegó a hacer la rosca, además se detectaron dos problemas más, a continuación, se procede a explicar cada optimización:

- La celda interior disponía de los dos orificios para el compartimento de la muestra, estos eran de 2 mm y no se les había realizado la rosca, se decidió agrandarlos a y hacerles rosca de 3

mm, esto facilitaría insertar el líquido que acompaña la muestra, de dejarse un orificio de 2 mm esta simple cuestión podría resultar muy complicada de hacer. Además, se optó por utilizar tornillos ciegos de tipo allen, dando que durante las pruebas se usaron otros tipos de tornillos que sobresalían de la celda y estos chocaban con la ventana de aluminio, gracias a esta elección se puso corregir este problema.



Figura 7.6. Tornillo con cabeza y ciego allen.

- Uno de los problemas que se detectó es que el soporte de la celda interior, en su parte inferior en contacto con el fondo del cilindro era demasiado plano y durante el experimento, debido a la presión, el aceite no se mantenía entre ambas superficies. Este problema se ha detectado puesto que cuando se intenta sacar la celda interior hay que tirar de ella con la suficiente fuerza como para vencer el vacío que se crea.

Para corregir este aspecto, se optó por dar un tratamiento mecánico a la parte inferior de la base de la celda para lograr cierta rugosidad que logre retener aceite en todo momento.

Para ello se le ha realizado el proceso de chorro de arena a presión, gracias a esta acción llevada a cabo en el taller de la universidad, se puede extraer la celda interior del cilindro sin mayor esfuerzo.



Figura 7.7. Base celda interior sometida a chorro de arena.

- En el momento de introducir o sacar la celda interior en el cilindro no cabía otra manera que la de sujetarla con los dedos e introducir estos en el aceite, para este caso se ha creado una herramienta que facilita esta labor al usuario y se ha realizado un orificio roscado de M6 en la parte superior central del soporte de la celda para poder introducirla y extraerla del cilindro sin ser manchados por el aceite.



Figura 7.8. Herramienta insertar/extraer celda interior.

- Por último, dado que los elementos que componen la celda interior no son perfectamente planos entre ellos, dependiendo de la orientación que se les dé en el montaje estos presentan una inclinación en el eje vertical y la celda se estanca en el cilindro. Para corregir este punto se marcó los elementos por tal de realizar siempre el montaje de la misma forma, siendo la adecuada para la celda no toque con las paredes del cilindro.



Figura 7.9. Marcado posición elementos celda interior.

1.7.2. Validación teórica

Dado que la celda está diseñada por tal de transmitir la presión del cilindro al compartimiento de la muestra, el diferencial de presiones es nulo, por tanto, no requiere de ningún cálculo teórico adicional.

1.7.3. Validación experimental

Para la validación experimental de la celda interior se procedió a realizar el experimento usando colorante dentro de esta, se colocó dentro del cilindro y se puso el dispositivo a 3000 bar.

Después del experimento no se apreció ninguna cantidad de colorante dentro del cilindro, ni posteriormente se apreció ninguna cantidad de aceite térmico dentro de la celda interior.



Figura 7.10. Insertando colorante en compartimiento de la muestra.

1.8. guía del experimento

Mediante el presente apartado se pretende explicar paso a paso el montaje del dispositivo y la puesta en funcionamiento por tal de que quede claro y se pueda llevar a cabo el experimento de forma segura.

1. En primer lugar, se debe realizar el montaje del circuito de acuerdo con la figura 6.2. como se muestra en la página 45. Es importante tener dos detalles muy importantes en consideración:
 - Las conexiones de alta presión deben quedar con el casquillo lo suficientemente roscado en la tubería para dejar la punta libre y esta pueda penetrar en el alojamiento cónica dispuesto para ello.



Figura 8.1. Correcta posición casquillo.

- El segundo aspecto para tener consiste en ayudarse de una segunda llave a la hora de realizar el montaje, por tal de no transmitir el torque creado con la llave al intentar apretar las conexiones al resto del circuito.



Figura 8.2. Contrarrestar torque.

2. Para el montaje del bloque también se deberá seguir realizar conforme a la figura 1.1. como se muestra en la página 5. Se deberá prestar especial atención a la colocación de las C-ring, tanto en ventanas como en la parte superior del cilindro.
 - Es importante tener claro que se debe introducir la celda interior dentro del cilindro antes de colocar las dos juntas y entre estas dos la C-ring, de lo contrario no se podría introducir debido a la diferencia de diámetros.Cundo sea necesario puede ayudarse de un martillo de nylon para colocar los elementos en su sitio sin causar daño en ellos.



Figura 8.3. Colocando junta plana superior con ayuda del martillo de nylon.

En el caso de la tapa superior, debido a que se desmonta y se vuelve a montar con más asiduidad que las ventanas, es importante saber que no es necesario desmontar siempre la junta plana ubicada encima de C-ring, es posible colocar la C-ring en el saliente de la tapa superior del bloque.



Figura 8.4. Colocación alternativa de C-ring.

- Como último punto sobre el montaje, los tornillos de las ventanas se les deberá dar un par de apriete de 150 Nm, mientras los de la tapa superior deberá ser de 200 Nm, los tornillos deberán apretarse en estrella (véase la figura 8.5. para mayor compresión), se les deberá dar el par de apriete en 4 pasadas, aplicando la primera una 25% de apriete, después un 50%, un 75% y finalmente una última pasada al 100% del apriete mencionado, es decir, en el caso de los de la tapa superior, primero a 50 Nm, después a 100 Nm, a 150 Nm y finalmente a 200 Nm.

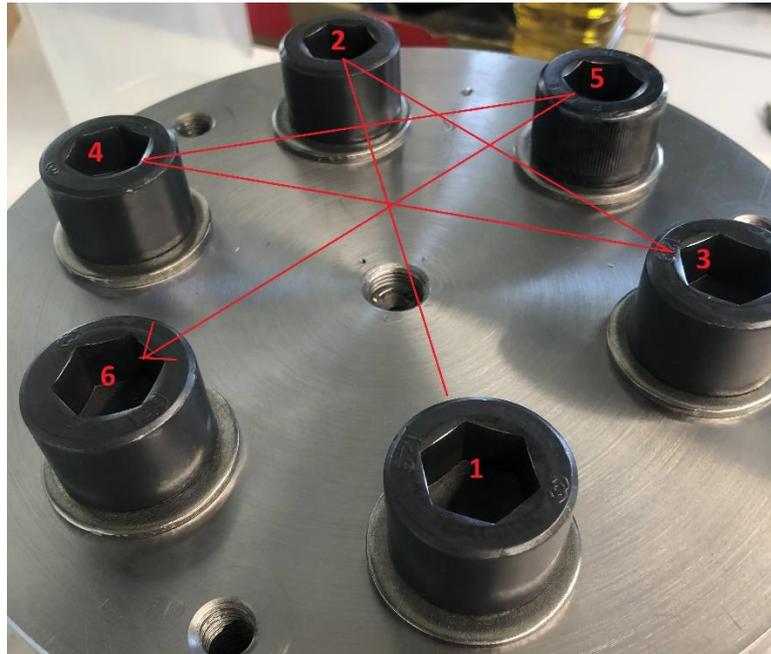


Figura 8.4. Apriete en estrella.

Este tipo de apriete y metodología evita que la tapa pueda inclinarse a uno de los lados y por tanto soportar un apriete desequilibrado.

- Deberá rellenarse el interior del cilindro de aceite hidráulico antes de colocar la tapa superior, se debe tener en cuenta que cada carrera de la bomba son 7.5 ml.
3. Para el montaje de la celda interior se deberá realizar de acuerdo con la figura 7.1. como se puede observar en la página 51.
- A los dos tornillos se les deberá aplicar en apriete gradualmente de forma alterna, sin llegar nunca a superar los 10 Nm.

Una vez se ha montado tanto el circuito hidráulico como el bloque, deberá colocarse la manguera flexible en la tapa del bloque roscando esta lo mínimo para fijarla, para posteriormente bombear aceite hasta purgar el circuito, es importante bombear el aceite hasta sacar todas las burbujas de aire en el orificio de purgado ubicado en la tapa superior.



Figura 8.5. Purgando el circuito.

Una vez ya no se aprecian burbujas de aire, se deberá fijar bien la conexión y podrá finalmente empezarse el experimento.

A continuación, se explica el procedimiento a seguir para presurizar el dispositivo a la presión deseada.

- 1- Deberá tener la bomba en el final de su carrera.
- 2- Cierre la válvula en la que sale la manguera flexible y abra la del depósito.
- 3- Retrocede el embolo de la bomba a la posición de inicio, de este modo estará succionando el aceite del depósito.
- 4- Cierre la válvula del depósito y abra la que va a la manguera flexible.
- 5- Gire la bomba para llevar el embolo a su posición final.

¡ATENCIÓN! Preste especial atención al indicador del recorrido de la carrera, en caso de no parar antes de llegar al inicio o final de carrera romperá este indicador.



Figura 8.6. Indicador de carrera de la bomba.

- 6- Repita el proceso desde el punto 1 al 5 hasta lograr que la presión empiece a subir.

En el momento en que el manómetro empiece a subir, se deberá cambiar la forma en que se presuriza el circuito para evitar el “golpe de ariete”, debido a que ya existe un diferencial de presión entre la parte del circuito de la bomba y la parte de la tubería flexible y bloque.

- 1- Deberá tener la bomba en el final de su carrera.
- 2- Anote la presión que marque el manómetro.
- 3- Cierre la válvula en la que sale la manguera flexible.
- 4- Retroceda en embolo de la bomba hasta que el manómetro marque “0 bar”.
- 5- Abra la válvula del depósito.
- 6- Ahora, retrocede el embolo de la bomba a la posición de inicio, de este modo estará succionando el aceite del depósito.
- 7- Cierre la válvula del depósito y gire la bomba para avanzar el embolo hasta llegar en el manómetro a la presión marcada en el punto 2.
- 8- Abra la válvula en la que sale la manguera flexible.
- 9- Gire la bomba para llevar el embolo a su posición final.
- 10- Repita el proceso desde el punto 2 hasta lograr la presión deseada.

Es muy importante que nunca abra ninguna de las dos válvulas sin haber logrado antes un diferencial de presión nulo entre sus dos lados.

Para el proceso de despresurización se deberá seguir los pasos:

- 1- Deberá tener la válvula del depósito cerrada.
- 2- Anote la presión que marca el manómetro.
- 3- Cierre la válvula en la que sale la manguera flexible.
- 4- Retroceda en embolo de la bomba hasta que el manómetro marque “0 bar”.
- 5- Abra la válvula del depósito.
- 6- Gire la bomba para avanzar el embolo hasta aproximadamente el 75% de la carrera de aceite en el depósito.
- 7- Gire la bomba para avanzar el embolo hasta lograr la presión anotada en el punto 2.
- 8- Repita el proceso hasta llegar a bajas presiones.
- 9- Cuando la presión es lo suficientemente baja (50 bar aproximadamente), puede comunicar directamente ambas partes del circuito para llegar a la presión 0.

Análisis del impacto ambiental

Hoy en día, en cualquier tipo de proyecto, pequeño o grande, el aspecto del impacto medioambiental ha adquirido una gran importancia ya que es trascendental reducir al máximo el efecto que este pueda tener en nuestro ecosistema. La finalidad última de este proyecto precisamente es tratar de realizar estudios en la línea de conservar el medio ambiente.

Se sabe que el acero inoxidable es prácticamente reciclable en su totalidad, y también otro de los materiales es el Silicio, uno de los materiales más abundantes en el planeta y este no produce ningún efecto negativo en el ambiente.

Para este caso se tendrá en cuenta las emisiones de CO₂ equivalentes emitidas en el gasto de energía eléctrica por la máquina de CNC en el proceso de mecanizada de las piezas que conforman el dispositivo, más allá de este aspecto, el funcionamiento de este, siempre que se haga un uso correcto, no representa un peligro para el medio ambiente.

Teniendo en cuenta se emplearon un total de 24 horas de mecanizado, que la máquina CNC tiene un consumo de 17 KW cada hora, y que según los datos de la Generalitat de Cataluña de este año, 1 KWh equivale a 259 g CO₂ equivalente, podemos calcular:

$$24h \cdot 17 \text{ KW} \cdot \frac{259 \text{ g CO}_2\text{eq}}{1 \text{ KWh}} = 105\,672 \text{ g CO}_2\text{eq}$$

Por tanto, la elaboración de este proyecto ha contribuido en 105.672 Kg de CO₂ a la atmosfera.

Conclusiones y trabajos futuros

El dispositivo de alta presión es funcional y ha sido enviado a Múnich donde se realizarán las primeras pruebas in situ en breve. Se ha logrado, por tanto, los objetivos propuestos al inicio de este. Podrían destacarse cuatro puntos importantes en estas conclusiones:

- Se ha logrado montar todo el circuito hidráulico y se ha comprobado su correcto funcionamiento.
- El bloque ha sido el elemento más complejo del sistema debido a la dificultad de poder localizar los puntos de falla, pero gracias a las optimizaciones llevadas a cabo se ha logrado el funcionamiento a presiones superiores de 3000 bar de manera completamente estanca.
- En la celda interior también se logró de forma satisfactoria la estanqueidad de su celda interior, y las optimizaciones ayudarán al futuro usuario a trabajar en ella de forma más eficaz.
- Finalmente, se ha completado este trabajo realizando un pliego de condiciones del dispositivo para su uso, en este caso, para que los usuarios del instituto de física de materiales Hereon en Múnich puedan trabajar de forma correcta y segura.

Trabajos futuros:

- Cabe la posibilidad de realizar el desplazamiento a Alemania a presenciar y supervisar las primeras pruebas que se realizarán con el dispositivo, de concretarse, sería el mejor examen posible para estudiar los defectos, si los hubiera, y los puntos óptimos del diseño.
- Se deberá sustituir la oblea de acero por la de silicio, como se ha comentado anteriormente, las pruebas se han realizado en acero debido a la gran fragilidad que presenta el silicio. Actualmente ya se ha solicitado la fabricación a una empresa externa en Múnich.
- En segundo lugar, a pesar de funcionar de forma correcta, de volver a diseñar el bloque las ranuras de las juntas C-ring, se debería llevar a cabo conforme las indicaciones del fabricante.
- Un punto muy importante que se considera que debería mejorar, es el coste de los componentes del circuito, si bien son de un fabricante especializado en la alta presión, sería interesante estudiar diferentes posibilidades de reducir los costes como, por ejemplo, emplear bombas hidráulicas usando diferentes secciones en el embolo para lograr grandes presiones.

Finalmente, a modo personal, debo decir que ha sido una experiencia muy enriquecedora, el poder participar en un proyecto internacional dentro de un equipo de trabajo, y saber de primera mano que el dispositivo tiene una utilidad real dentro del mundo experimental, es un hecho que me llena de satisfacción y agradecimiento.



Presupuesto y/o Análisis Económico

Para el análisis económico de este proyecto se desglosará en 4 apartados, la mano de obra de las horas invertidas, el coste del material del bloque y celda, así como de su mecanizado, el coste de los elementos que componen el circuito hidráulico, y finalmente el coste de los demás elementos necesarios.

- Mano de obra de un ingeniero Junior:

Concepto	Precio unitario con IVA (€/h)	Horas totales (h)	Total (€)
Mano de obra	25 €/h	375	9.375 €

- En segundo lugar, se desglosa tanto la mano de obra como el precio de los materiales mecanizados. Debe tenerse en cuenta que se ha realizado en el taller de la universidad.

Concepto	Coste con IVA (€)
Material	2.207,67 €
Mano de obra	1.440 €
	3.647,67 €

- En este apartado se desglosa el precio de los elementos del circuito hidráulico, siendo todos ellos de la empresa suiza Sitec.

Descripción	Precio Unitario (€)	Unidades	Precio con IVA (€)
Bomba manual	7.555,00 €	1	7.555,00 €
Manómetro	212,00 €	1	212,00 €
válvulas	64,00 €	2	128,00 €
Tuberías	29,00 €	5	145,00 €
"T"	39,00 €	2	78,00 €
Manguera flexible	198,00 €	1	198,00 €
		TOTAL:	8.316 €

- Por último, se realizado un desglose del resto de materiales:

Descripción	Precio Unitario (€)	Unidades	Precio con IVA (€)
Tornillo M24x3 12,9	12,47 €	6	74,82 €
Tornillo M14x2 12,9	11,12 €	12	133,44 €
C-rings	37,00 €	15	555,00 €
Juntas planas	8,00 €	4	32,00 €
otros	-	-	60,00 €
TOTAL:			855,26 €

Finalmente, el coste total que suma todos los apartados anteriores es el siguiente:

Coste total del proyecto	22.193,93* €
---------------------------------	---------------------

**Algunos importes se han realizado mediante estimaciones por la imposibilidad de conocer el importe real.*

Bibliografía

Bonetti, M., & Calmettes, P. (2004). High-pressure cell for small- and medium-angle neutron scattering measurements up to 300 MPa. *Review of Scientific Instruments*, 75(2), 440–444. <https://doi.org/10.1063/1.1637434>

Ananta, E., Heinz, V., Schlüter, O., and Knorr, D. 2001. Kinetic studies on high-pressure inactivation of *Bacillus stearothermophilus* spores suspended in food matrices. *Innovative Food Sciences and Emerging Technologies*. 2: 261-272.

Klotz, S., Strässle, T., Rouse, G., Hamel, G., & Pomjakushin, V. (2005). Angle-dispersive neutron diffraction under high pressure to 10 GPa. *Applied Physics Letters*, 86(3), 1–3. <https://doi.org/10.1063/1.1855419>

Kohlbrecher, J., Bollhalder, A., Vavrin, R., & Meier, G. (2007). A high pressure cell for small angle neutron scattering up to 500 MPa in combination with light scattering to investigate liquid samples. *Review of Scientific Instruments*, 78(12). <https://doi.org/10.1063/1.2817632>

Jeworrek, C., Steitz, R., Czeslik, C., & Winter, R. (2011). High pressure cell for neutron reflectivity measurements up to 2500 bar. *Review of Scientific Instruments*, 82(2). <https://doi.org/10.1063/1.3553392>

Wang, P., Lerner, A. H., Taylor, M., Baldwin, J. K., Grubbs, R. K., Majewski, J., & Hickmott, D. D. (2012). High-pressure and high-temperature neutron reflectometry cell for solid-fluid interface studies. *European Physical Journal Plus*, 127(7), 1–15. <https://doi.org/10.1140/epjp/i2012-12076-0>

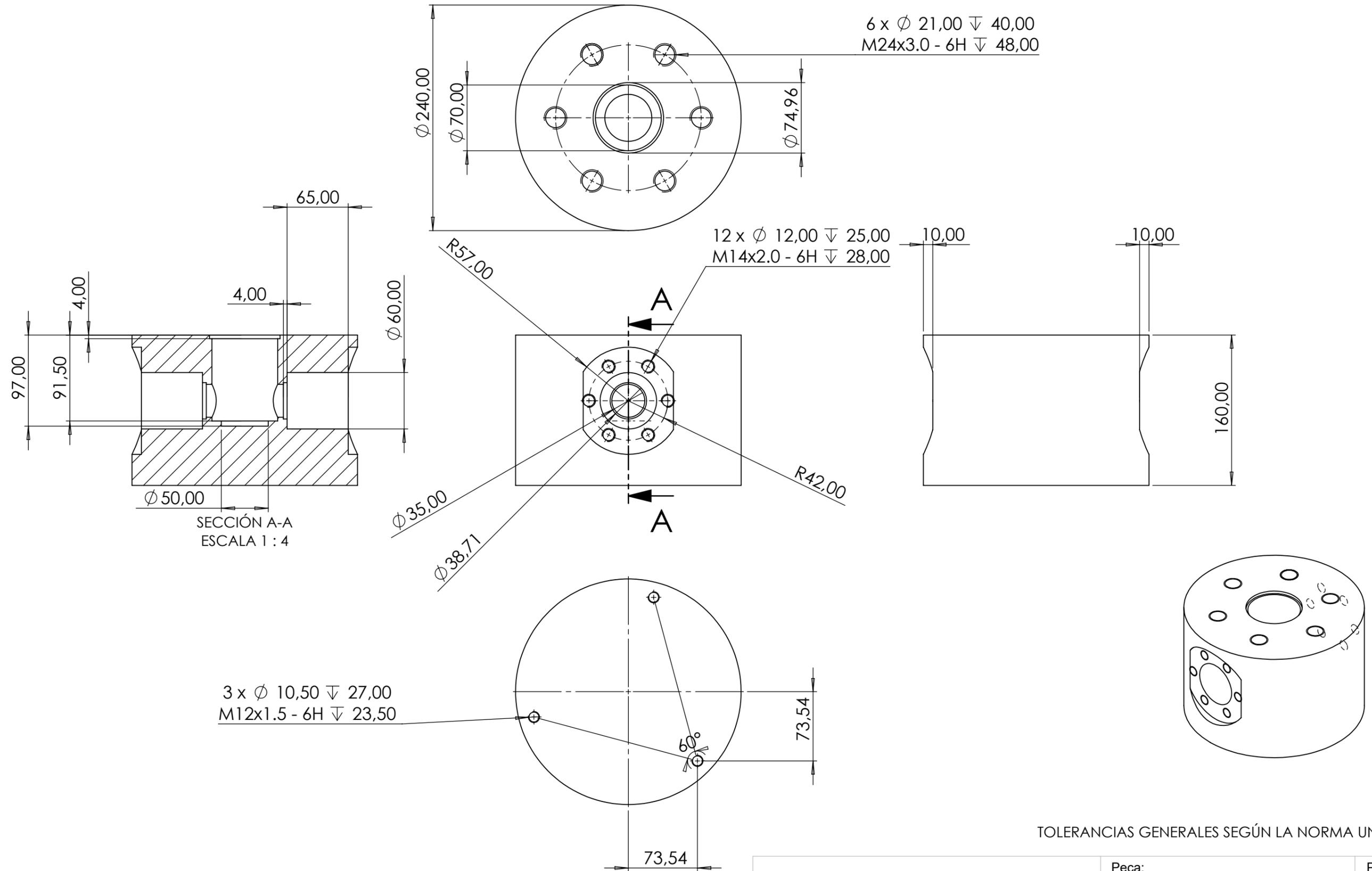
Fenollosa i Coral, Josep., Veciana, J. M. (Joaquim M., Martínez Miralles, Jordi., & Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria Mecànica. (2016). *Unions cargolades*. Edicions UPC.

Ananta, E., Heinz, V., Schlüter, O., and Knorr, D. 2001. Kinetic studies on high-pressure inactivation of *Bacillus stearothermophilus* spores suspended in food matrices. *Innovative Food Sciences and Emerging Technologies*. 2: 261-272.

<https://tienda.aenor.com/norma-une-17108-1981-n0000800>

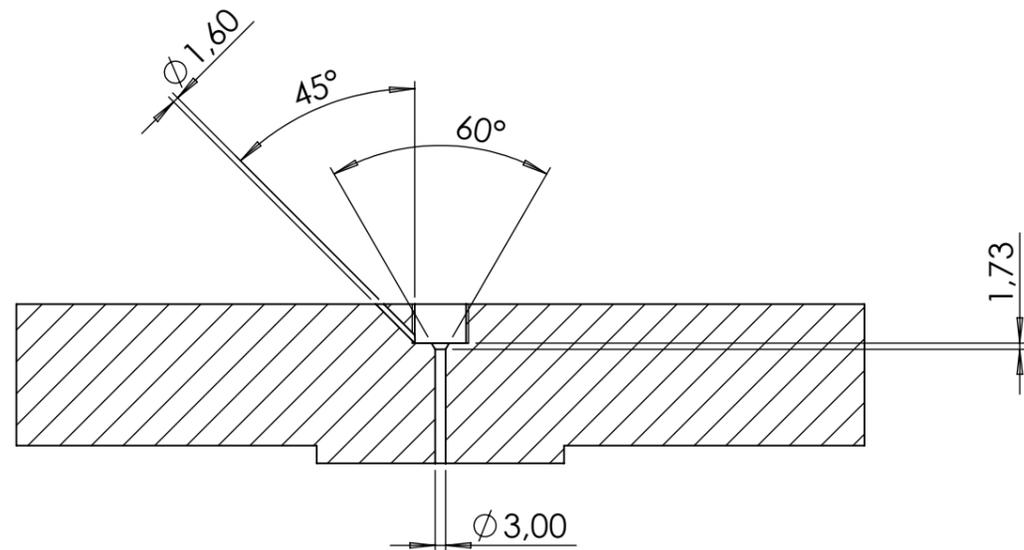
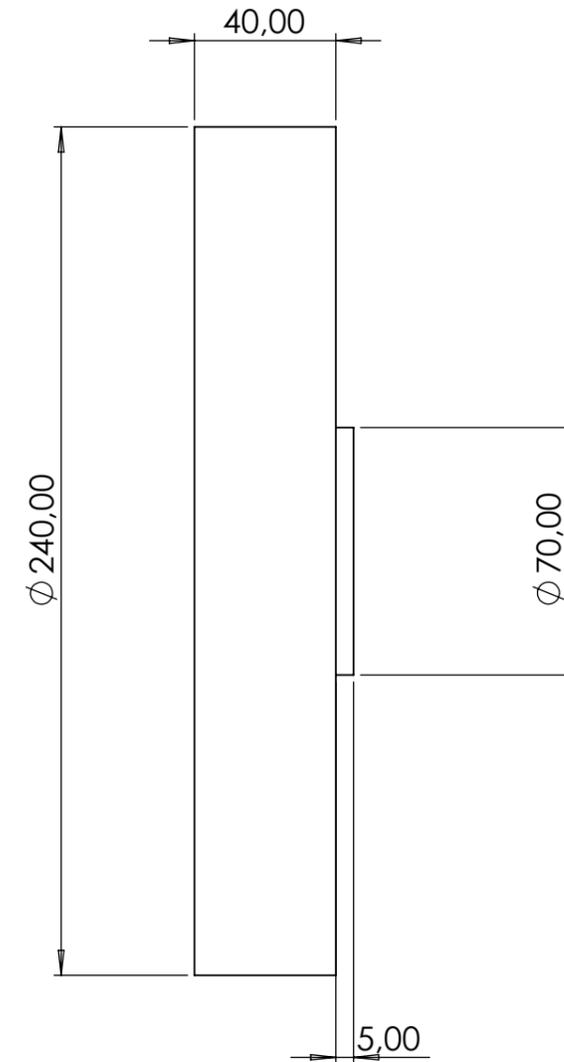
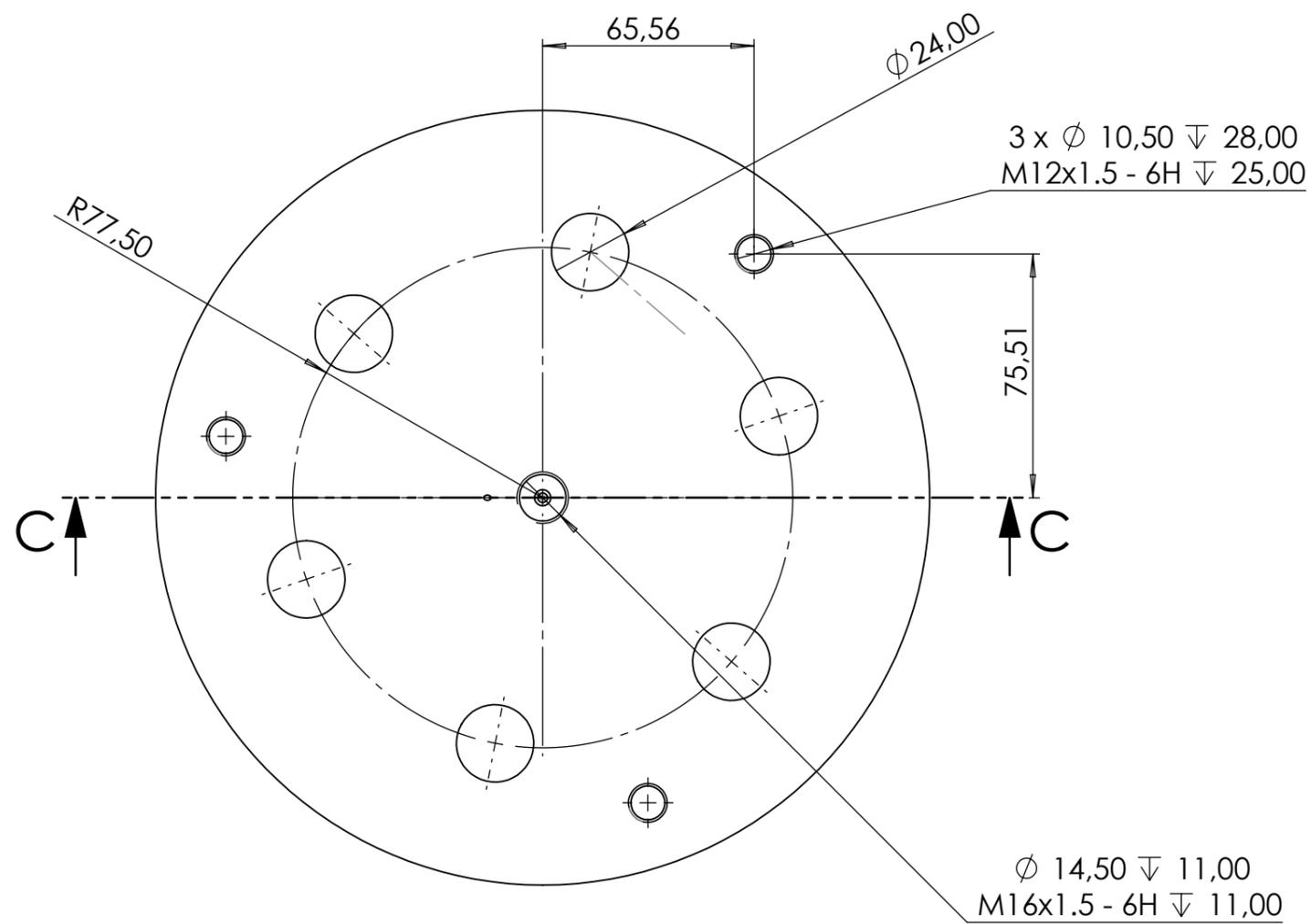
Anexo A

En presente anexo se pueden encontrar los planos que contienen las cotas de los elementos que componen el bloque y la celda interior.



TOLERANCIAS GENERALES SEGÚN LA NORMA UNE 22768.

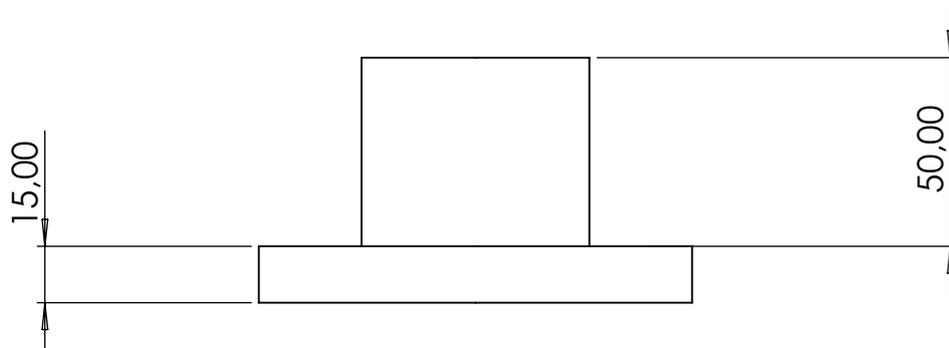
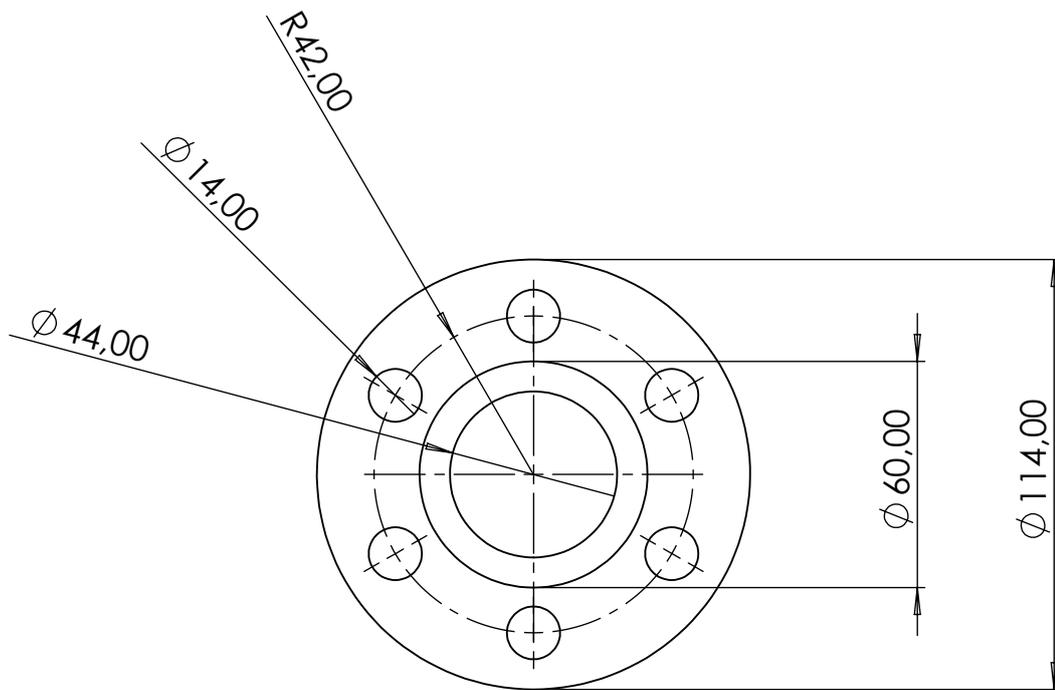
OPTIMIZACIÓN Y PUESTA EN FUNCIONAIMEINTO DE UN SISTEMA DE ALTA PRESIÓN PARA REFLECTOMETRIA DE NEUTRONES	Peça: Bloque		Plànol n°: 1
	Data d'entrega: 15/01/2023		Quantitat: 9
Dibuixat: Brahim Ben khay	Format: DIN A3	Escala: 1:4	Projecció:
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola d'Enginyeria de Barcelona Est	Massa: 49 Kg	Material: Stavax ESR	



SECCIÓN C-C
ESCALA 1 : 2

TOLERANCIAS GENERALES SEGÚN LA NORMA UNE 22768.

OPTIMIZACIÓN Y PUESTA EN FUNCIONAIMEINTO DE UN SISTEMA DE ALTA PRESIÓN PARA REFLECTOMETRIA DE NEUTRONES Dibuixat: Brahim Ben khay  UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola d'Enginyeria de Barcelona Est	Peça: Tapa bloque	Plànol n°: 2
	Data d'entrega: 15/01/2023	Quantitat: 9
	Format: DIN A3	Escales: 1:2
Massa: 13.5 Kg	Material: Stavax ESR	

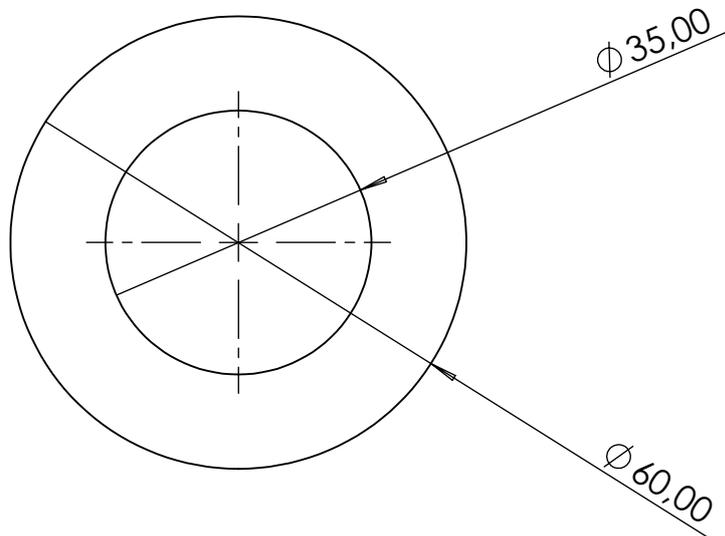
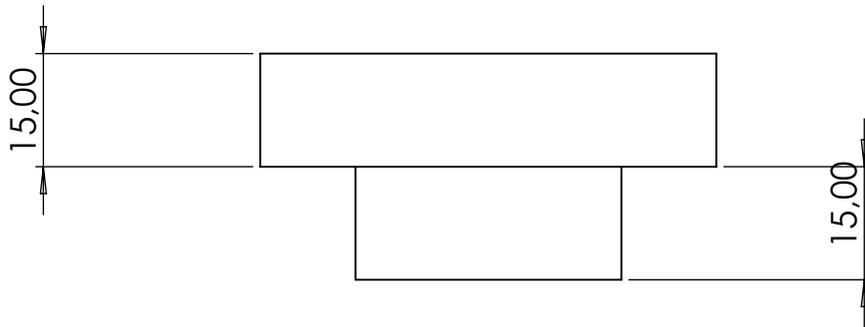


TOLERANCIAS GENERALES SEGÚN LA NORMA UNE 22768.

OPTIMIZACIÓN Y PUESTA EN FUNCIONAIMEINTO DE UN SISTEMA DE ALTA PRESIÓN PARA REFLECTOMETRIA DE NEUTRONES	Peça: Soporte ventana AL		Plànol nº: 3
	Data d'entrega: 15/01/2023		Quantitat: 9
Dibuixat: Brahim Ben khay	Format: DIN A4	Escala: 1:2	Projecció: 
	Massa: 0.42 kg	Material: Al 7075 T6	

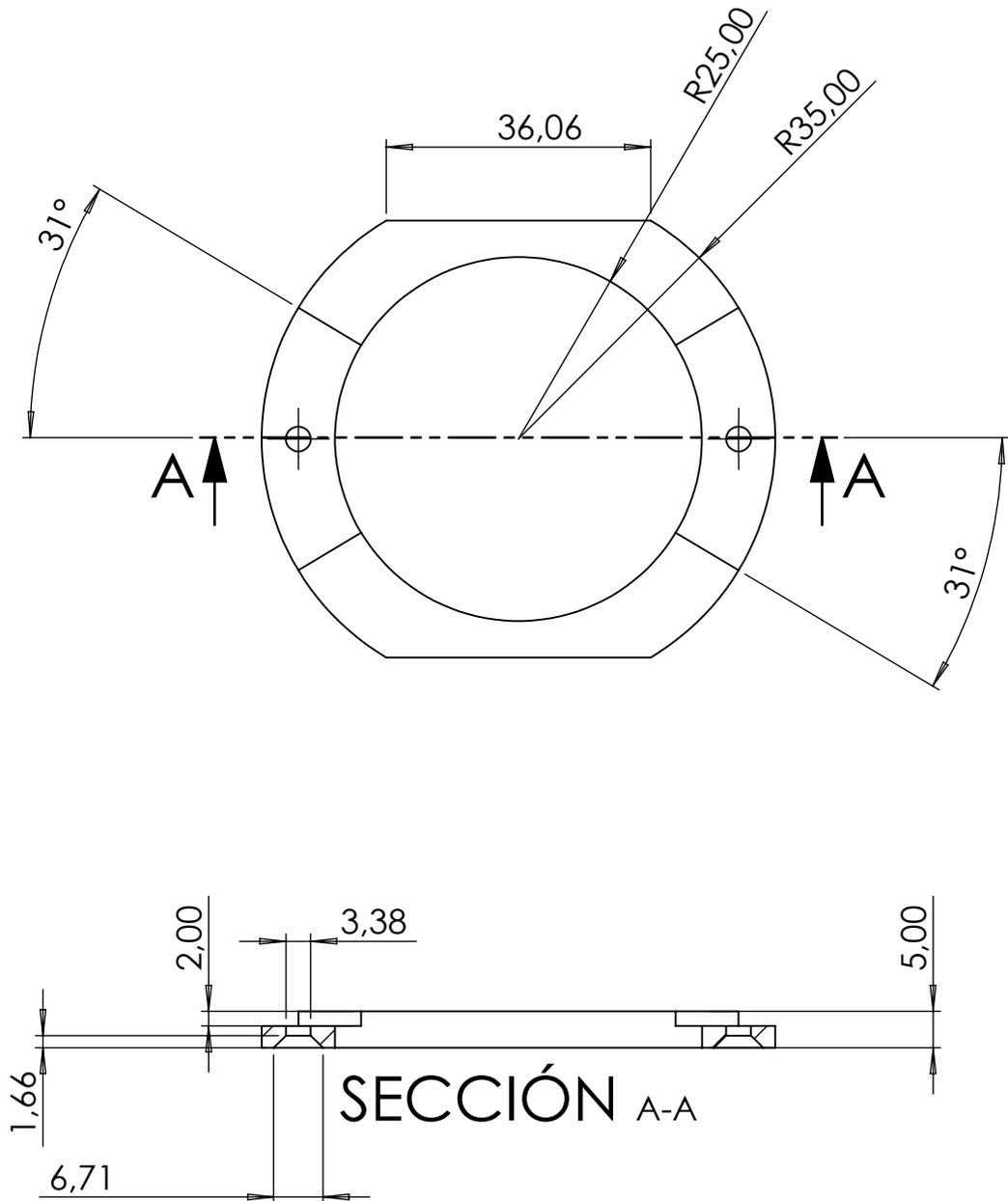


UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est



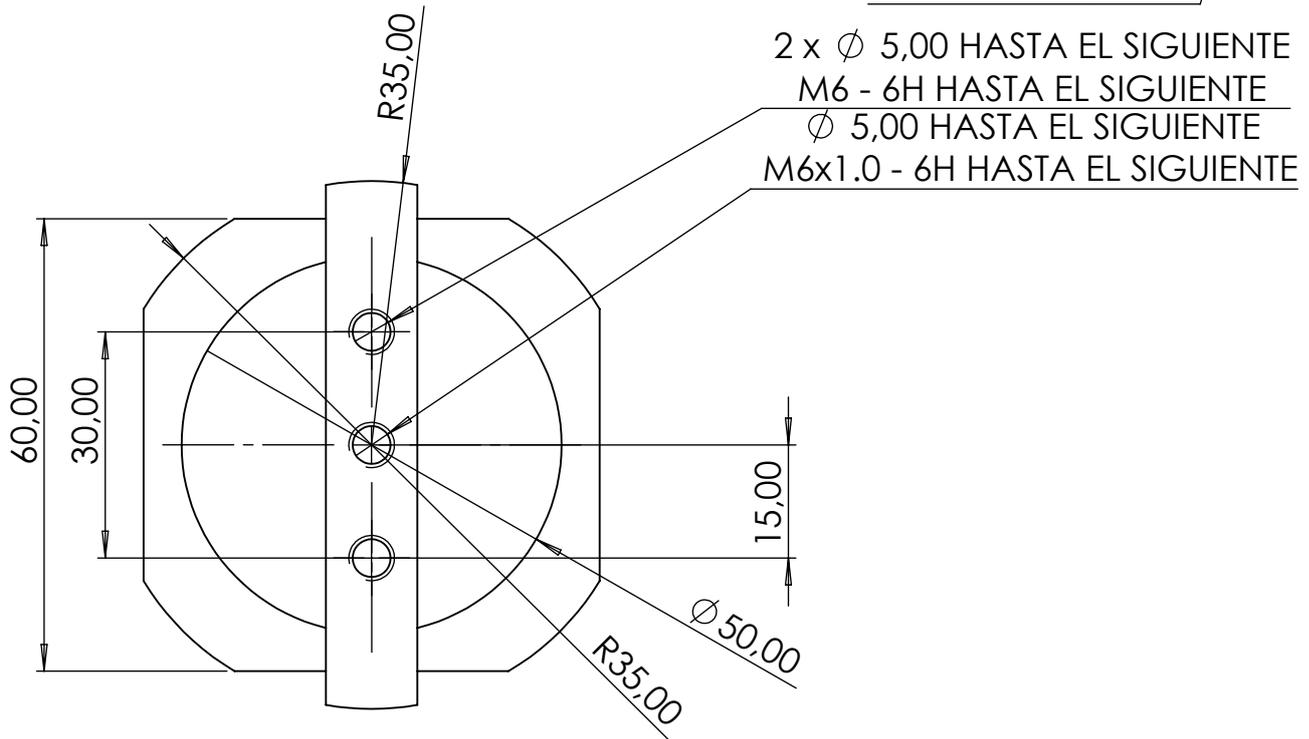
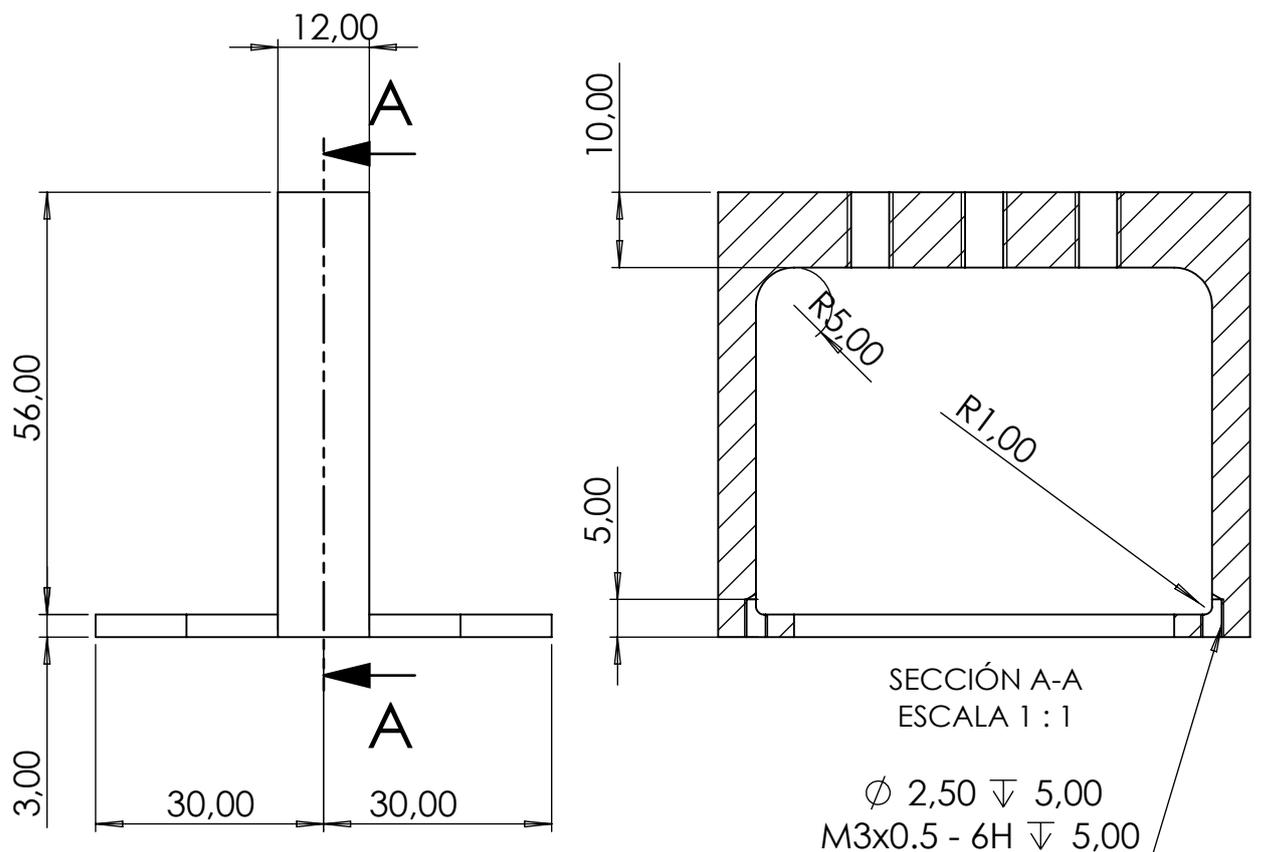
TOLERANCIAS GENERALES SEGÚN LA NORMA UNE 22768.

OPTIMIZACIÓN Y PUESTA EN FUNCIONAIMEINTO DE UN SISTEMA DE ALTA PRESIÓN PARA REFLECTOMETRIA DE NEUTRONES	Peça: Venatana AL		Plànol nº: 4
	Data d'entrega: 15/01/2023		Quantitat: 9
Dibuixat: Brahim Ben khay	Format: DIN A4	Escala: 1:1	Projecció:
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola d'Enginyeria de Barcelona Est	Massa: 0.13 kg	Material: AL 7075 T6	

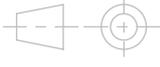


TOLERANCIAS GENERALES SEGÚN LA NORMA UNE 22768.

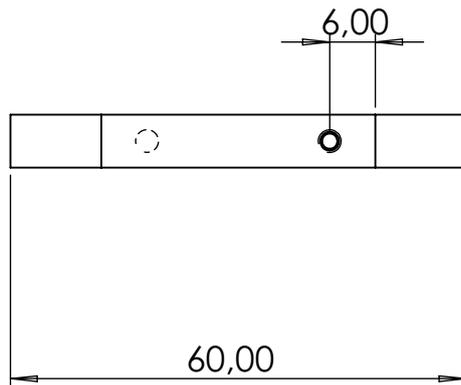
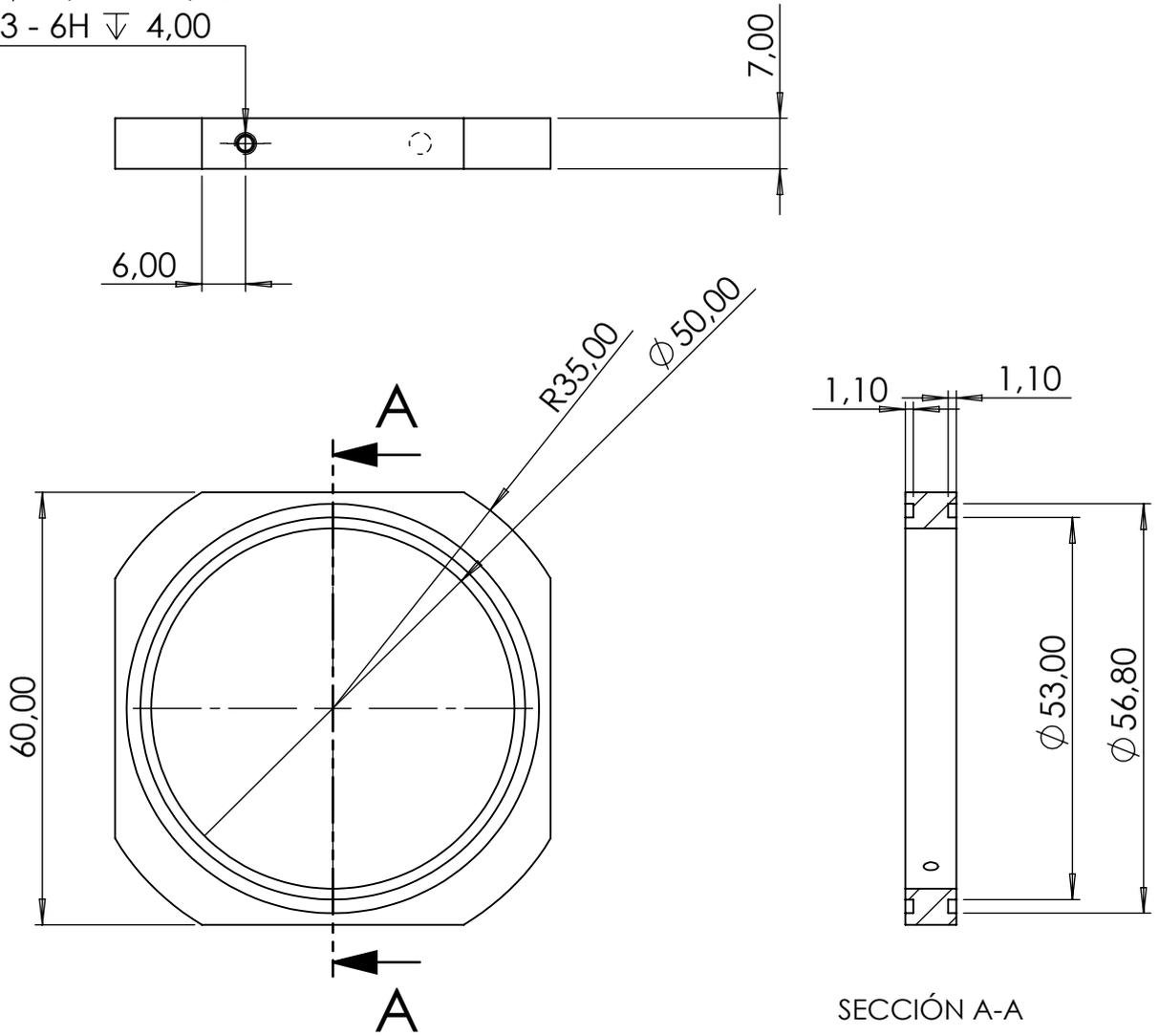
OPTIMIZACIÓN Y PUESTA EN FUNCIONAIMEINTO DE UN SISTEMA DE ALTA PRESIÓN PARA REFLECTOMETRIA DE NEUTRONES	Peça:	Base celda interior		Plànol nº:	5			
	Data d'entrega:	15/01/2023		Quantitat:	9			
Dibuixat:	Brahim Ben khay		Format:	DIN A4	Escala:	1:1	Projecció:	
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola d'Enginyeria de Barcelona Est	Massa:	0.05 kg		Material:	AISI 316			



TOLERANCIAS GENERALES SEGÚN LA NORMA UNE 22768.

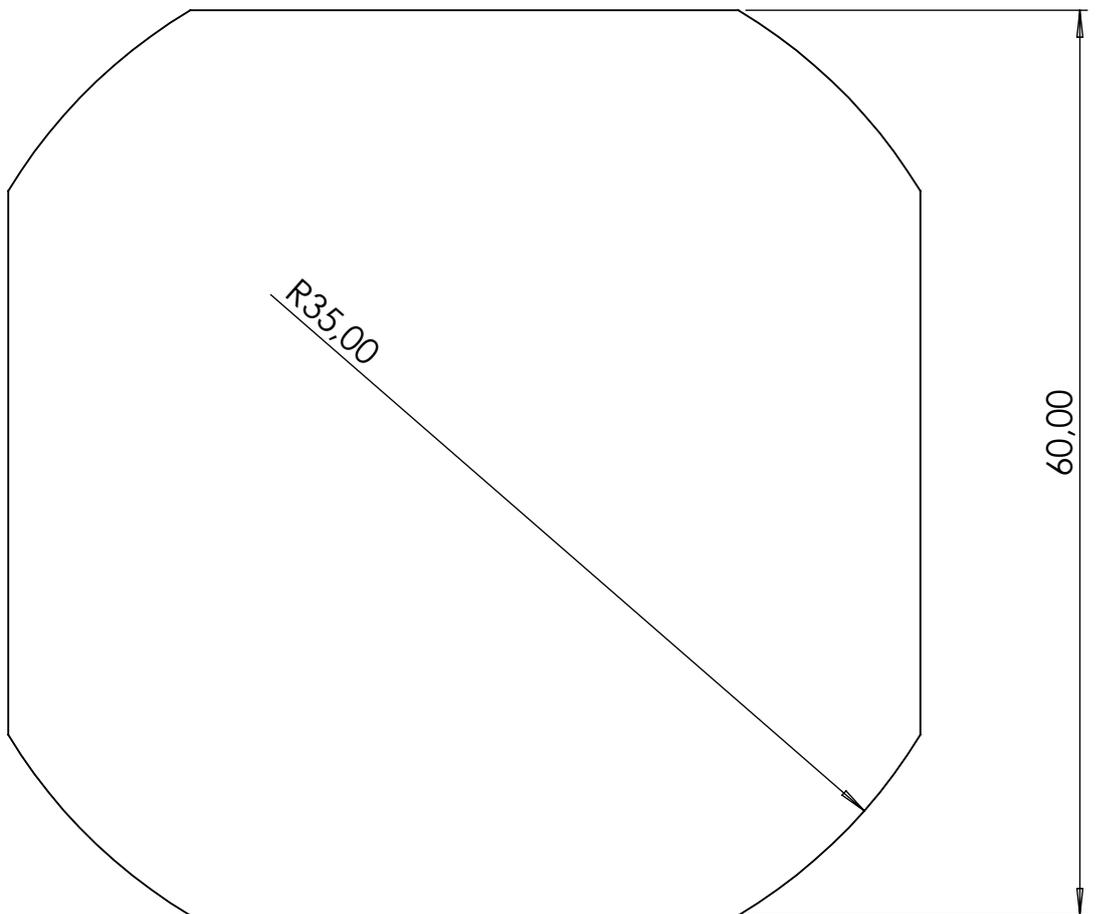
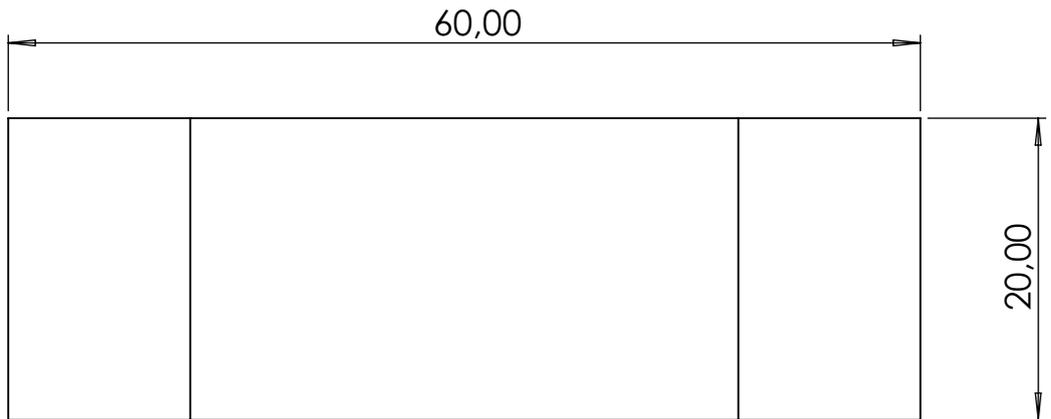
OPTIMIZACIÓN Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE ALTA PRESIÓN PARA REFLECTOMETRIA DE NEUTRONES	Peça:	Soporte celda interior		Plànol nº:	6
	Data d'entrega:	15/01/2023		Quantitat:	9
Dibuixat:	Brahim Ben khay		Format:	ESCALA:	Projecció:
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola d'Enginyeria de Barcelona Est	DIN A4		1:1		
	Massa:	0.14 kg	Material:	Silicio	

2 x \varnothing 2,50 ∇ 4,00
 M3 - 6H ∇ 4,00



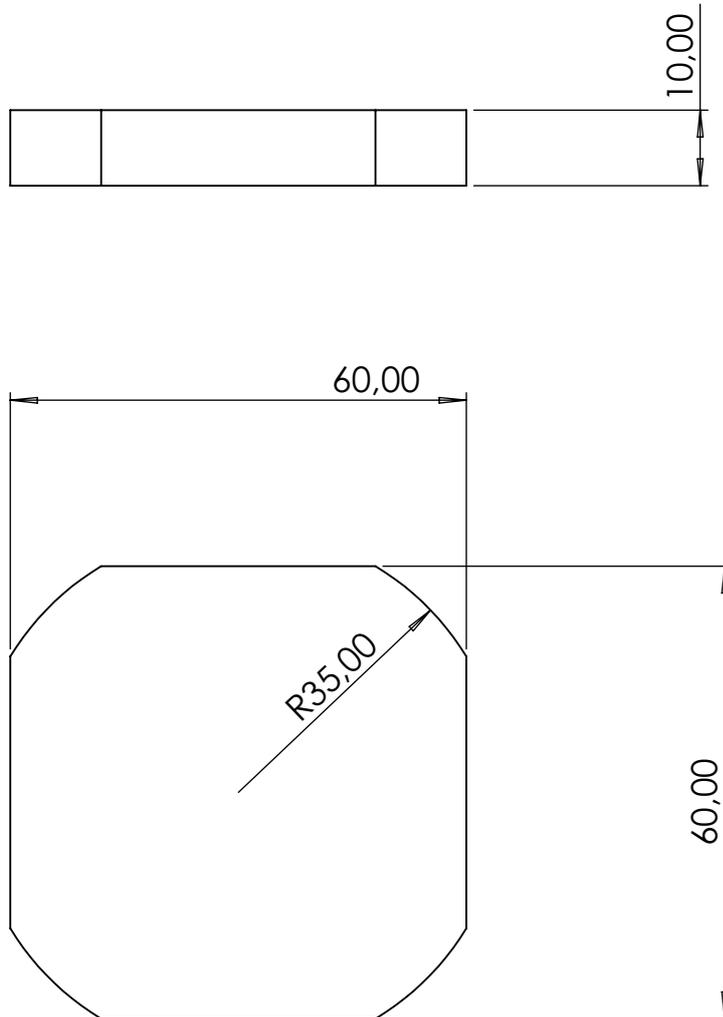
TOLERANCIAS GENERALES SEGÚN LA NORMA UNE 22768.

OPTIMIZACIÓN Y PUESTA EN FUNCIONAIMEINTO DE UN SISTEMA DE ALTA PRESIÓN PARA REFLECTOMETRIA DE NEUTRONES	Peça:	Compartimento muestra		Plànol nº:	7			
	Data d'entrega:	15/01/2023		Quantitat:	9			
Dibuixat:	Brahim Ben khay		Format:	DIN A4	Escala:	1:1	Projecció:	
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola d'Enginyeria de Barcelona Est	Massa:	0.07 kg		Material:	AISI 316			



TOLERANCIAS GENERALES SEGÚN LA NORMA UNE 22768.

OPTIMIZACIÓN Y PUESTA EN FUNCIONAIMEINTO DE UN SISTEMA DE ALTA PRESIÓN PARA REFLECTOMETRIA DE NEUTRONES	Peça:	Oblea de silicio		Plànol nº:	8
	Data d'entrega:	15/01/2023		Quantitat:	9
Dibuixat:	Brahim Ben khay		Format:	Escala:	Projecció:
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola d'Enginyeria de Barcelona Est	DIN A4		2:1		
	Massa:	0.16 kg	Material:	Silicio	



TOLERANCIAS GENERALES SEGÚN LA NORMA UNE 22768.

OPTIMIZACIÓN Y PUESTA EN FUNCIONAIMEINTO DE UN SISTEMA DE ALTA PRESIÓN PARA REFLECTOMETRIA DE NEUTRONES	Peça: Plato de presión		Plànol nº: 9
	Data d'entrega: 15/01/2023		Quantitat: 9
Dibuixat: Brahim Ben khay	Format: DIN A4	Escala: 1:1	Projecció:
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH Escola d'Enginyeria de Barcelona Est	Massa: 0.26 kg	Material: AISI 316	