



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO EXPERIMENTAL
DE CONGELAMIENTO RÁPIDO**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL
MECANICO**

CRISTIAN ARIEL DURÁN BARRÍA

PROFESOR GUÍA:
MARCO ANTONIO BÉJAR VEGA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ÁLVARO VALENCIA MUSALEM
ROGER BUSTAMANTE PLAZA

SANTIAGO DE CHILE MAYO 2010

Resumen

La situación actual de algunos productos agrícolas, como las frutillas y nectarines que presentan problemas en su congelamiento para exportación. Se hace necesario el desarrollo de técnicas de congelamiento, con tal de conservarlos, evitando su desnaturalización al congelar y descongelar. Una de estas nuevas técnicas es la del congelamiento por cambio de presión (*HPSF*), esta técnica ha sido investigada a nivel internacional en los últimos años. Existe la potencialidad de aplicar este proceso de congelamiento en el mercado nacional, especialmente en el rubro de exportación de frutos.

El objetivo principal de este trabajo fue diseñar y construir un equipo experimental para realizar congelamiento por cambio de presión en agua y efectuar pruebas mostrativas en frutas. Para esto se diseñó y construyó una cámara de alta presión para 200[MPa]. El equipo experimental completo incluye un sistema de presión que impulsa aceite a un multiplicador de presión, el que es responsable que la cámara pueda alcanzar una presión elevada, y una camisa aislante térmica. Este fue enfriado por medio de una solución de hielo con sal.

Uno de los métodos mas aplicados para la conservación de alimentos a largo plazo es el congelamiento, pero este presenta problemas relacionados a la velocidad de congelamiento y el tamaño de los cristales de agua que se forman. Ambos fenómenos están ligados entre si. La velocidad de congelamiento influye sobre la cantidad de cristales de hielo formados, si la velocidad es lenta, se formarían cristales de gran tamaño que pueden llegar a destruir las células.

En un congelamiento *HPSF* realizado una presión de 200[MPa], el agua puede bajar su temperatura hasta -22°C sin congelarse. Si se libera la presión bajando a presión ambiente, el agua se superenfria. Convirtiéndose una fracción de agua muy rápidamente en hielo, para luego congelarse la fracción restante. Bajo esta condición la velocidad de congelamiento es alta, obteniéndose cristales de tamaño nanométrico.

La metodología comprendió la realización del diseño y construcción de la cámara de alta presión junto a sus equipos anexos y el montaje de estos; la comprobación de factibilidad de realizar congelamiento de agua por *HPSF* y efectuar pruebas mostrativas en nectarines.

De los resultados obtenidos se concluye que fue posible diseñar una cámara de alta presión operacional a 200[MPa] en la cual es posible desarrollar congelamiento por cambio de presión (*HPSF*).

Agradecimientos

En primer lugar agradezco a Dios, por darme la vida, los medios y el entendimiento necesario para poder estudiar esta carrera.

A Don Marco Antonio Béjar, profesor guía de este trabajo, por presentarme el desafío de realizar esta memoria, dar las indicaciones justa para salir adelante en momentos de incertidumbre. A los profesores de la comisión por responder a mis dudas cuando estas se presentaron.

Para mis padres, Jorge y Maria Teresa, quienes han dedicado su vida a sus hijos. Muchas gracias por todos los años que me apoyaron con esta carrera, por sus sabias palabras de crianza inspiradas por Dios, que siempre he tenido en cuenta desde que era niño me supieron hacer un hombre de bien.

A Karla, que me apoyo cuando mas lo necesite. Supiste como animarme con tus dulce palabras llenas de amor y ternura, muchas veces en momentos que daba todo por perdido. Gracias por haber estado alli y compartir mis triunfos y derrotas durante la realización de esta memoria.

A los funcionarios y operarios del taller de Molina y del departamento de Ingeniería Mecánica, por su ayuda en el desarrollo de esta memoria. Para el IDIC y MADECO por facilitar materiales, equipos y otorgar conocimiento técnico indispensables para este trabajo.

Al club de Rol de Ingeniería *CRI* por lejos los mejores años de mi vida en la U, pudiendo descubrir y desarrollar muchas habilidades. A la gran familia Paulina, residentes del hogar universitario Paulina Starr.

Índice

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes generales	1
1.2. Motivación	2
1.3. Objetivos	2
1.4. Limitaciones	2
2. Antecedentes	4
2.1. Conservación de alimentos por congelamiento	4
2.2. Super-enfriamiento y propiedades del agua a alta presión	4
2.3. Congelamiento por cambio de presión(HPSF)	7
2.4. Descongelamiento a alta presión	8
2.5. Cámaras de muy alta presión	9
2.5.1. Paredes	10
2.5.2. Tapas	11
2.5.3. Sellado	12
2.6. Multiplicadores de presión	13
2.7. Soluciones salinas	14
3. Metodología	15
3.1. Descripción de equipos y proceso	15
3.2. Diseño y construcción de cámara de alta presión	17
3.3. Diseño y construcción de equipos anexos	19
3.3.1. Sistema de presión	19
3.3.2. Camisa aislante térmica	20
3.4. Modelo de enfriamiento	21
3.4.1. Calor a extraer	21
3.4.2. Método de refrigeración	21
3.4.3. Tiempo de congelamiento	21

3.5.	Pruebas de factibilidad	22
3.5.1.	Prueba del sistema de presión	22
3.5.2.	Prueba de presión cámara	22
3.5.3.	Medición de presión en la cámara	22
3.5.4.	Prueba congelamiento cámara bajo presión	23
3.6.	Montaje de equipos	23
3.7.	Caracterización del proceso	24
3.7.1.	Prueba de enfriamiento de la cámara	24
3.7.2.	Prueba de congelamiento rápido de agua	24
3.8.	Pruebas en alimentos	24
4.	Resultados	25
4.1.	Diseño y construcción cámara alta presión	25
4.2.	Diseño y construcción sistemas anexos	28
4.3.	Modelo de enfriamiento	30
4.4.	Montaje final equipos	31
4.5.	Pruebas de factibilidad	32
4.6.	Caracterización del proceso	35
4.7.	Pruebas en alimentos	38
5.	Discusion	41
5.1.	Diseño y construcción cámara y sistemas anexos	41
5.2.	Modelo de enfriamiento	42
5.3.	Montaje de equipos	42
5.4.	Pruebas de factibilidad	43
5.5.	Caracterización del proceso	43
5.6.	Pruebas en alimentos	44
6.	Conclusiones, Comentarios y Recomendaciones	45
6.1.	Conclusiones	45
6.2.	Comentarios y recomendaciones	45
7.	Bibliografía	47
A.	Memoria de Calculo Cámara de Alta Presión	49
A.1.	Calculo Cámara	49
A.1.1.	Esquema del estanque	49

A.1.2. Paredes	50
A.1.3. Esfuerzos sobre paredes	52
A.1.4. Multiplicador de presión	53
A.1.5. Tapas	54
A.2. Estudio según elementos finitos	58
A.2.1. Paredes Cámara	58
A.2.2. Tapas Cámara	60
A.2.3. Pistón Multiplicador	66
A.2.4. Conjunto Cámara	68
A.3. Calculo calor a extraer de la cámara	71
A.3.1. Volúmenes y masas	71
A.3.2. Calor a extraer	72
B. Diseño y utilización de medidor de presión por deformación	73
C. Planos Cámara de Congelamiento	76
D. Planos Sistema presion	89
D.1. Conjunto caja de aceite y bomba	89
D.2. Planos valvula	97

Capítulo 1

Introducción

La situación actual de algunos productos agrícolas, tales como frutillas y nectarines, que tienen importantes problemas al momento de ser congelados para su exportación. Esto hace necesario el desarrollo de nuevas técnicas de congelamiento, con tal de conservar sus propiedades, evitando su desnaturalización al congelar y descongelar dichos productos. Una de estas nuevas técnicas es la del congelamiento por cambio de presión (HPSF), el cual ha probado ser efectivo en distintos tipos de productos agrícolas[1, 3] obteniéndose buenos resultados.

El presente trabajo consistió en el diseño y construcción de una cámara de alta presión que permitió la realización de pruebas de congelamiento rápido de agua y de algunos productos alimenticios principalmente frutas. El equipo experimental consistió de una cámara para 200[MPa] con tapa removible, en la cual se introducen los productos a congelar.

1.1. Antecedentes generales

En los últimos años se han hecho investigaciones con respecto al uso de altas presiones para el procesamiento de alimentos [1, 2, 3], mostrando las ventajas que posee por sobre métodos tradicionales, logrando conservar de mejor forma las propiedades y características originales de los alimentos, además de lograr conseguir una estabilización microbiológica de ellos. Las altas presiones del orden de los 200[MPa] no repercuten en la estructura del alimento, dado que se trata de una presión hidrostática. Los cuerpos no sufren deformaciones al ser sometidos a una presión hidrostática.

El uso de altas presiones para el congelamiento de alimentos, presenta ventajas por sobre el congelamiento a presión ambiente. Los métodos más comunes de congelamiento son el congelamiento asistido por alta presión (HPAF) y el de congelamiento por cambio de presión (HPFS) [3], en este último proceso se enfocó esta memoria.

El congelamiento por cambio de presión ha probado ser mejor que el congelamiento a presión ambiente. Este último tiende a desnaturalizar y dañar los alimentos debido al crecimiento de los cristales

de agua que rompen las células. En cambio el congelamiento por alta presión provoca un congelamiento de los alimentos muy rápido y homogéneo, consiguiéndose cristales de agua de tamaño micrométrico y una muy alta nucleación de los cristales[3], todo esto provocado por un fenómeno de superenfriamiento del agua que se da en un proceso con estas características.

1.2. Motivación

El mercado chileno actual de exportación de productos frutícolas necesita de nuevas técnicas de conservación de frutas para su comercialización tanto interna como externa, así como de nuevas formas de obtener nuevos derivados que den mayor valor agregado a la producción. Así también probar un nuevo método de congelamiento que sea capaz de competir con las tecnologías actualmente empleadas.

Hasta el momento el congelamiento de frutos de exportación como berries, cítricos y nectarines, presentan problemas que influyen en su calidad final, lo que representa anualmente grandes pérdidas para el rubro en Chile.

El conocimiento, diseño, construcción y testeo de un equipo para congelamiento rápido sería de gran utilidad para la evaluación de la potencialidad de uso de este proceso para el congelamiento de la fruta producida en Chile.

1.3. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo fue diseñar y construir un equipo experimental para realizar el congelamiento rápido por cambio de presión en agua y realizar pruebas mostrativas sobre especímenes de alimentos (frutas) usando este proceso de congelamiento.

Los objetivos específicos de este trabajo fueron:

- Diseñar y construir una cámara para una presión de 200[MPa].
- Demostrar la factibilidad de realizar el congelamiento por cambio de presión en la cámara .
- Realizar pruebas mostrativas de congelamiento rápido sobre frutas.

1.4. Limitaciones

Las limitaciones a las cuales estuvo sujeto este trabajo fueron de distinto tipo.

El diseño de la cámara de alta presión se vio limitado por los materiales a utilizar y el cómo modelar el comportamiento de la cámara en funcionamiento, para obtener las dimensiones y formas adecuadas para su construcción.

Una limitación fue el tamaño de la cámara de presión. El tamaño de la cámara para el congelamiento fue de 40[mm] de diámetro y 50[mm] de largo, lo cual impuso que los especímenes de prueba fueran a su vez de tamaño pequeño.

La construcción de la cámara se vio limitada también por la factibilidad tecnológica de fabricación de los elementos mecánicos.

Las pruebas de congelamiento se vieron limitadas en la medición de los resultados obtenidos, es decir en cómo constatar una buena conservación de los especímenes de prueba y de como medir el tamaño de cristales de agua en ellos.

Se tuvo una limitación de medición de los parámetros y variables del proceso de congelamiento, en lo que respecta a presión y temperatura.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Conservación de alimentos por congelamiento

La congelación es un buen método para la conservación a largo plazo de estos, debido a que la baja temperatura disminuye la velocidad de deterioro. El agua al transformarse en hielo deja de comportarse como solvente y reactivo de reacciones químicas en las células del alimento.

El agua presente en la células para pasar a fase sólida (Hielo) debe cristalizar. Ello implica la nucleación y crecimiento de cristales a partir de esos núcleos. La cantidad de cristales está dada en gran parte por la velocidad de enfriamiento: a mayor velocidad, mayor cantidad de núcleos y por lo tanto el tamaño de los cristales de hielo será menor. Al congelar alimentos existe el peligro de dañar su integridad y composición.

Si se considera el tamaño de los cristales de agua, dependiendo del tipo de hielo formado, éstos pueden llegar a variar en volumen hasta un 9% en relación a su estado líquido, lo cual provoca presiones internas que generan daños estructurales en las células del alimento [11].

Si se considera la velocidad de congelamiento, a una velocidad lenta se produce un fenómeno de deshidratación de las células por ósmosis. Esto da lugar a la formación de grandes cristales de hielo extracelular que separa y rompe las células, provocando una pérdida de textura del alimento y exudación de agua al momento de descongelar [11].

De lo anterior, la situación ideal de congelamiento estaría dada por una alta velocidad y que los cristales de hielo formados no tiendan a influir volumétricamente sobre el alimento.

2.2. Super-enfriamiento y propiedades del agua a alta presión

Se define super-enfriamiento de un líquido, como el proceso de bajar la temperatura de éste por debajo de su punto de congelación sin que se haga sólido.

El agua a altas presiones varía su temperatura de cambio de fase, existiendo un punto a una presión

aproximada de 209[MPa] en que la temperatura de congelamiento del agua es de -22°C , que corresponde a la temperatura mas baja a la cual puede comenzar el congelamiento del agua [1] (Ver figura 2.1). En dicho punto también disminuye la entalpia de cambio de fase, lo cual tiende a aumentar la velocidad de congelamiento, y la variación de volumen es menor en comparación al congelamiento a presión atmosférica.

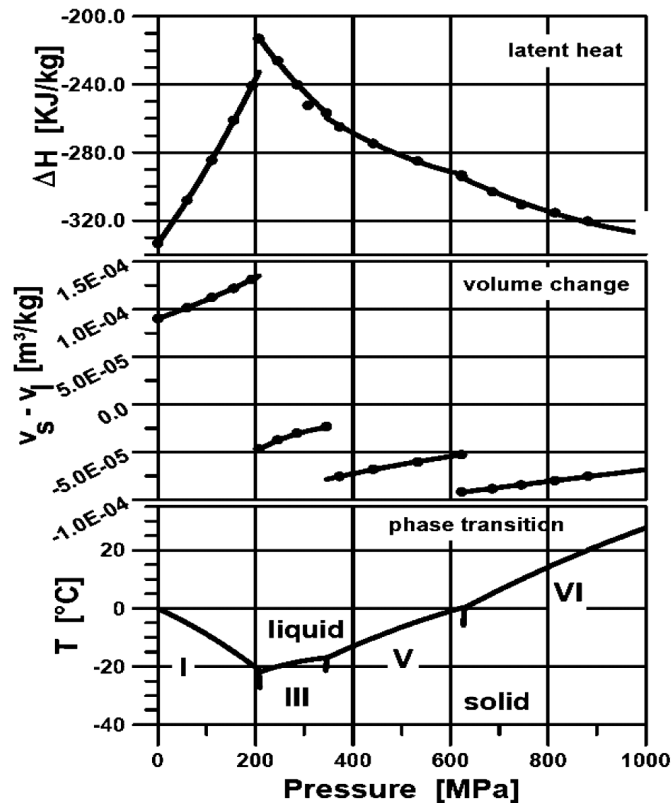


Gráfico 2.1: Influencia de la presión sobre la entalpia de fusión del hielo, volumen específico y temperaturas de cambio de fase, [1].

El superenfriamiento del agua induce la congelación parcial "inmediata" del agua [4, 5], generando una gran cantidad de núcleos de hielo en toda la extensión del líquido superenfriado. Si se induce un superenfriamiento del agua por un cambio de presión, los cristales de hielo formados obedecerán a las propiedades del agua bajo la presión a la cual fue inducido el superenfriamiento (ver figura 2.1).

Las condiciones del agua en torno a los 209[MPa] la hacen ideal para idear un proceso de congelamiento que aproveche las características del agua en dicho punto.

El agua en condiciones de presión entre los 0 y 200[MPa] forma hielo I_h al congelarse, con un aumento en el volumen específico del hielo en relación al volumen que tenía en estado líquido (Ver

gráfico 2.1) y una disminución importante en su capacidad calórica (Ver gráfico 2.2). Para presiones superiores a los 200[MPa] el agua forma otras fases de hielo, dentro de los limites del presente trabajo puede existir la presencia de hielo *III*. El hielo *III* se produce entre los 200 y 350[MPa], esta fase difiere con el hielo I_h en su densidad y estructura. El hielo I_h cuenta con una estructura cristalina hexagonal y el hielo *III* cuenta con una estructura tetragonal.

La capacidad calórica del agua varia grandemente con la variación de presión y de temperatura, además varía según el tipo de hielo que se forme. Esta propiedad del agua aumenta levemente en el intervalo de los 0 a 0.5[GPa], presentando máximos en las temperaturas de cambio de fase. Para presiones mayores a 0.5[GPa] la capacidad calórica disminuya a medida que aumenta la presión. (Ver gráfico 2.2)

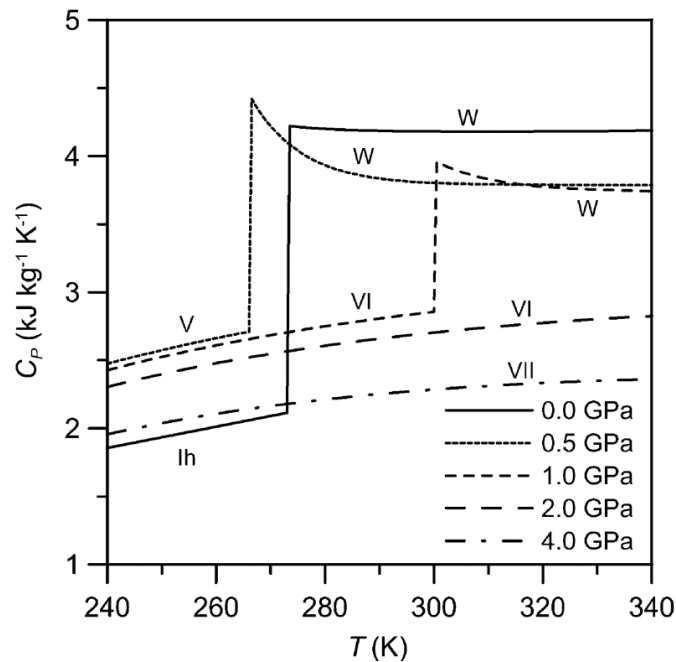


Gráfico 2.2: Capacidad calórica del agua(isobárica) para distintos tipos de hielo y agua líquida, [6].

2.3. Congelamiento por cambio de presión(HPSF)

El congelamiento por cambio de presión HPSF, por sus siglas en ingles (High Pressure Shift Freezing), es un proceso de congelamiento que hace uso de una alta presión para poder bajar la temperatura hasta un punto inferior al de congelamiento a presión ambiente.

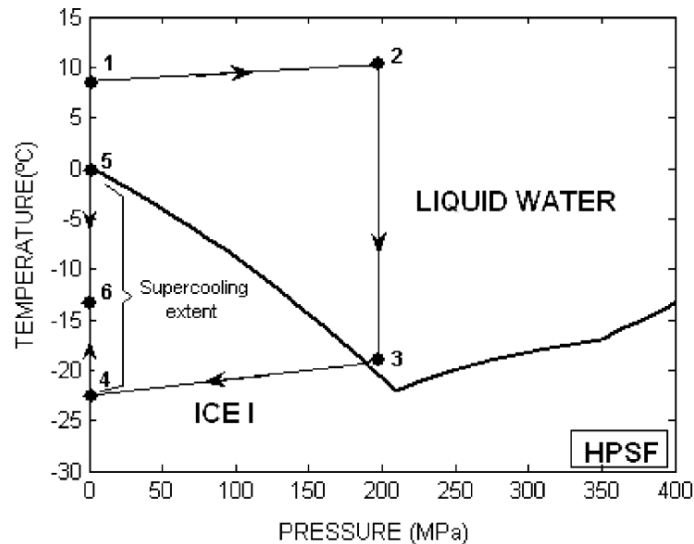


Gráfico 2.3: Congelamiento por cambio de presión. [1-2 compresión, 2-3 preenfriado, 3-4 liberación de presión, 4-5 liberación de calor latente, 5-6 temperado], [3].

Este proceso consiste en elevar la presión del agua hasta una presión que permita un preenfriado por debajo de la temperatura de congelación del agua (0°C), luego se preenfria el agua, tras lo cual se libera la presión de forma rápida, consiguiéndose agua en estado superenfriado, luego esta libera energía congelándose de forma muy rápida consiguiéndose cristales de agua de tamaño micrométrico, distribuidos de forma uniforme[3, 1]. La gran ventaja de esta nucleación intensiva es que evita la formación de cristales de hielo en torno del mismo lugar en el cual se encuentra el agua originalmente lo cual unido a una alta tasa de extracción de calor hace que no exista desplazamiento del agua desde el interior al exterior de las células de los alimentos.

En este tipo de proceso se genera una cantidad de hielo de forma muy rápida, esta cantidad de hielo ha sido cuantificada [4, 5] según modelos numéricos y de forma experimental(Ver tabla 2.4). Para una presión de $200[\text{MPa}]$ y una temperatura de $-20[^{\circ}\text{C}]$, la cantidad de hielo formado instantáneamente es aproximadamente de 23.5%.

El tiempo de congelamiento bajo este tipo de proceso es menor que el tiempo empleado en un congelamiento a presión ambiente (Ver tabla 2.4), dicho tiempo depende de la temperatura y presiones

a las cuales son liberadas la presión. El tiempo total que demora el proceso se puede determinar como la suma del tiempo empleado en subir la presión, bajar la temperatura, expansión, y el tiempo que se demora en congelarse la fracción de agua que no fue congelada por efecto del superenfriamiento. Este último tiempo se ve afectado por el flujo de calor que se puede extraer del líquido que se está congelando.

T_{∞} (°C)	P (MPa)	Percentage ice formation in the expansion			Reduction in plateau time (%)		
		Otero and Sanz (2006)	Model predictions		Otero and Sanz (2006)	Model predictions	
			Slow expansion	Rapid expansion		Slow expansion	Rapid expansion
-8.5	120	11.01 ± 0.04	11.4	12.2	14.6	15.1	15.8
-12.5	160	16.11 ± 0.61	17.5	18.9	24.1	21.1	22.5
-16.5	180	19.43 ± 0.76	23.2	25.3	33.3	26.6	28.5
-20.5	210	23.87 ± 0.76	29.4	32.5	40.6	32.3	35.1

Tabla 2.4: Predicciones de la cantidad de hielo formada instantáneamente, según modelo numérico y datos experimentales, [4].

La tabla 2.4 indica el porcentaje de hielo que nuclea por efecto del sobreenfriamiento al realizar un congelamiento HPSF. La porción de hielo obtenido en la expansión varía en función de la temperatura y presión a la cual se induce el congelamiento. Los datos mostrados en la tabla corresponden a los resultados empíricos obtenidos por un autor (Otero y Sanz) y resultados de un modelo analítico [4] para este tipo de congelamiento.

2.4. Descongelamiento a alta presión

En virtud de lo visto en la sección 2.2, es posible descongelar un alimento a temperaturas bajo cero a una presión adecuada, dado que la temperatura de cambio de fase del hielo tipo I baja según la presión [12]. A una presión cercana a las 200 [Mpa] el calor latente de cambio de fase baja (ver figura 2.1), por lo cual un proceso de descongelamiento bajo presión es más rápido que a presión ambiente.

Existen 2 procesos de descongelamiento a alta presión [13], uno es el *PAT* (Pressure assisted thawing) descongelamiento asistido por presión, que consiste en realizar el cambio de fase del agua bajo un régimen de alta presión, y el segundo es el *PIT* (Pressure induced thawing) descongelamiento inducido por presión, que consiste en descongelar usando como iniciador del cambio de fase un cambio de presión.

2.5. Cámaras de muy alta presión

La cámara a diseñar y construir será para soportar hasta $200[MPa]$ ($29000[psi]$). En este rango los recipientes se consideran de muy alta presión. Para estas presiones, un modelo de estanque considerando pared delgada no es aplicable, sino que se considera un modelo de pared gruesa. Para hacerse una idea, una presión de $200[MPa]$ es 7.5 veces mayor que la presión usada en los balones de gas de oxígeno ($27[MPa]$).

Los estanques de presión son recipientes diseñados para soportar una determinada presión. Si se considera un estanque de pared cilíndrica sometido a una presión interna, existen dos aproximaciones para diseñar el espesor de las paredes [8], dichas aproximaciones son :

- Pared delgada
- Pared gruesa

Según se aprecia en la ecuación 2.1 (ecuación 39.19, en capítulo 39 de la referencia [8]) que determina el espesor de la pared, considerando t como el espesor, p_i como la presión interna, r_i como el radio interno, σ_t como la tensión de fluencia partida por el factor de seguridad. Si la presión interna es cercana a dos σ_t la ecuación se indetermina perdiendo su validez.

$$t = \frac{p_i \cdot r_i}{\sigma_t - 0,5p_i} \quad (2.1)$$

Ante este tipo de presiones elevadas el estanque se debe diseñar según un modelo de capa gruesa.

Para el diseño, construcción y revisión de estanques existe el código ASME para hervidores y cámaras de presión [7]. Este código en su sección 8 da una serie de instrucciones y recomendaciones sobre el proceso a seguir para el diseño y construcción de estanques para funcionar a distintas presiones. La División 3 de la sección 8 da reglas sobre el diseño y construcción de estanques de muy alta presión.

El diseño de una cámara a presión se puede dividir en 3 partes, estas son:

- Paredes
- Tapas
- Sellos

2.5.1. Paredes

Tal como se dijo con anterioridad para diseñar las paredes de una cámara de alta presión de pared cilíndrica se consideran éstas como gruesas. Una pared se clasifica según cómo esta constituida y según el numero de ellas. Según su constitución estas pueden estar hechas de una sola pieza o pueden ser soldadas. Según su número, la cámara puede ser de una sola capa o de varias, una dentro de la otra.

Según el código ASME [7] el espesor de una o varias capas para una cámara de alta presión se pueden calcular recurriendo al artículo KD-2 referente a requerimientos básicos de diseño de cámaras de alta presión. El espesor de una sola capa se puede determinar según KD-251.1 (Ver ecuación 2.2).

$$P_D = \frac{2}{3}(S_y)\ln(Y) \quad (2.2)$$

con

$$Y = \frac{D_{ext}}{D_{int}}$$

Donde P_D es la presión de diseño, S_y es la resistencia elástica del material de la capa, Y es la relación entre diámetros, D_{ext} es el diámetro exterior de la capa, D_{int} es el diámetro interior de la capa.

Para determinar el espesor de las capas de una cámara multicapa, se hace uso de la sección KD-251.2 [7](Ver ecuación 2.3). Según lo anterior la resistencia total de una cámara es la suma de la resistencia individual de cada una de sus capas.

$$P_D = \sum \frac{2}{3}(S_y)\ln(Y) \quad (2.3)$$

En una cámara de alta presión multicapa estas se ensamblan usando autoencogimiento, este autoencogimiento induce esfuerzos residuales sobre las capas. Este esfuerzo residual en estado sin carga en la cámara debe ser tal que no deforme las capas interiores de la cámara. Los esfuerzos residuales entre las capas, según el código ASME [7] se determinan según el artículo KD-8 referente a requerimientos especiales para cámaras multicapa.

La razón de usar varias capas radica en que los esfuerzos residuales ayudan a resistir de mejor manera los esfuerzos provocados por una presión interna, debido a que estos esfuerzos se contraponen¹, el esfuerzo total es la suma algebraica de ambos tipos de esfuerzo.

¹Este fenómeno es explicado por Shiegly [7], capítulo 39, página 39.14, sección 39.5.1

2.5.2. Tapas

Una cámara de presión, como la que se pretende diseñar, necesita tapas que sean fáciles de retirar. Un tipo de tapas fáciles de retirar con las que se atornillan a la cámara, las cuales para motivos de cálculo pueden ser consideradas como tapas planas.

Según el código ASME [7], el artículo KD-6, especifica los requerimientos para tapas planas, pero no da una forma de como calcular su espesor mínimo, para ello se recurre al artículo D-7 de la división 2 de la sección 8 del código ASME, donde se proporciona una forma de como determinar este espesor mínimo. (Ver ecuación A.8)

$$T = d \cdot \sqrt{\frac{C \cdot P}{S}} \quad (2.4)$$

Donde T es el espesor mínimo de la tapa, d es diámetro de la tapa, P es la presión interna de diseño, C es un factor que depende de la forma según como se disponga la tapa en el estanque, S es el valor del límite elástico de la tapa.

Una tapa con hilo no se encuentra dentro de los posibles tipos de tapa a considerar según dicho artículo, por lo cual se determina el espesor de la tapa considerando el peor de los casos, escogiendo un valor de C que castigue el cálculo.

El hilo de las tapas debe ser tal que sea capaz de resistir el esfuerzo provocado por la carga impuesta sobre su cara bajo presión. El esfuerzo sobre el hilo se puede modelar considerando el tipo de hilo usado y considerando el hilo como si fuera una viga muy ancha en voladizo saliendo del radio del cilindro definido por la tapa [9]. (Ver ecuación A.9 y A.10)

$$S_b = \frac{3W \cdot h}{2\pi n r_m b^2} \quad (2.5)$$

$$S_s = \frac{W}{2\pi n r_m b} \quad (2.6)$$

Donde, S_b es el esfuerzo de flexión sobre el hilo, S_s es el esfuerzo de corte sobre el hilo, W es la carga axial sobre la tapa, h es la altura del hilo, n es el número de vueltas del hilo que están siendo afectadas por la carga, b es el ancho de la base del hilo, r_m es el radio medio de la tapa .

Según las ecuaciones anteriores el espesor necesario para la tapa estaría dado por el número de vueltas del hilo sobre la tapa, tal que este pueda resistir la carga impuesta sobre una de sus caras.

2.5.3. Sellado

Los sellos para las tapas y émbolos son una parte muy crítica en una cámara de presión. Una falla en ellos significa una falta de estanqueidad de la cámara y una consiguiente pérdida de carga, que hará mas difícil o imposible alcanzar la presión deseada en la cámara.

El artículo KD-6 del código ASME [7], en su sección KD-660, establece los requerimientos básicos para sellos, pero no da una guía clara para su selección.

El uso de sellos elastoméricos de tipo O-ring esta restringido a $68.9[MPa](10000[psi])[8]$ (sin anillo de respaldo), considerando una separación entre las superficies a sellar de menos de $50[\mu m]$. Los sellos tipo O-ring se pueden usar como sellos estáticos o sellos dinámicos, para ellos se debe considerar una terminación superficial con una rugosidad no mayor a $0.8[\mu m]$ para sellos estáticos y no mayor a $0.4[\mu m]$ para sellos dinámicos.

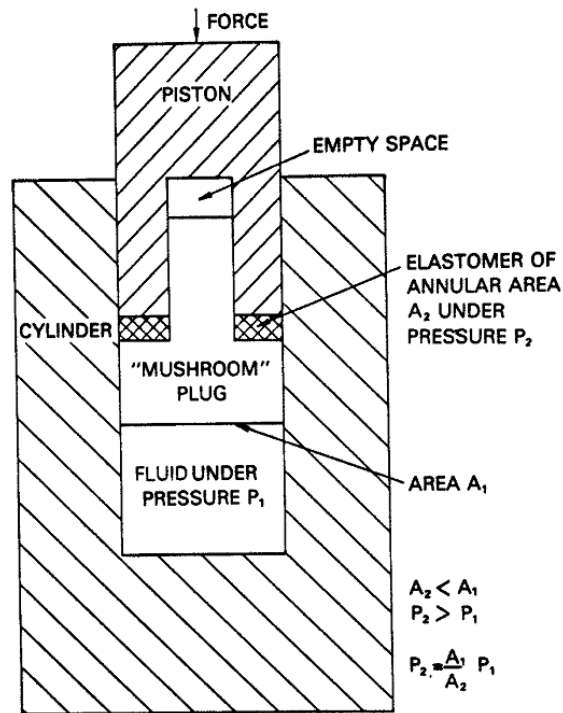


Figura 2.5: Sello Bridgman,[16].

Debido a la incapacidad de los O-ring para sellar mas alla de los $70[MPa]$, se hace necesario el uso de otro tipo de sello, para presiones mas elevadas. El sello Bridgman, o también llamado de área no soportada tiene la capacidad de poder sellar hasta los $5[GPa]$ [14]. Este sello (ver figura 2.5) consiste de un elastómero o metal con la forma de disco, que va entre la cabeza del pistón y la cabeza del tapón. El

líquido o gas presiona este tapón y le transmite dicha presión al disco del sello, como el área del tapón es mayor que el área del disco, entonces la presión contra el disco será mayor que la presión sobre el tapón, lo cual deformará el disco formando un sello contra la pared del cilindro. Ante presiones muy elevadas en vez de usar un material elastomérico se practica ocupar metales para formar el sello (ver figura 2.6) como cobre, bronce o un arreglo de elastómeros y metales[14]. El sello Bridgeman ha evolucionado en el tiempo y se encuentran distintos tipos de aplicaciones siguiendo el principio del área no soportada[15].

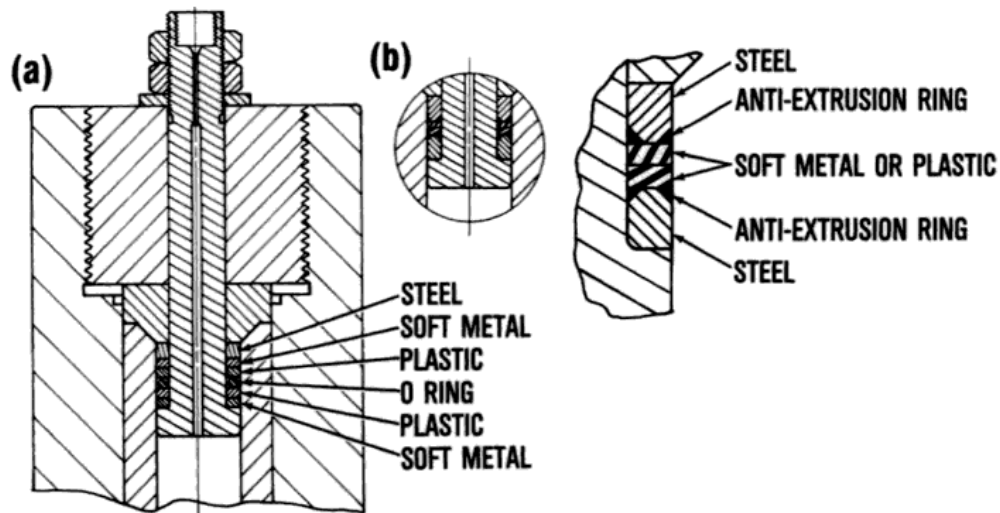


Figura 2.6: Detalle sello Bridgman, [14].

2.6. Multiplicadores de presión

Los multiplicadores de presión son dispositivos hidráulicos que sirven para aumentar la presión aplicada sobre uno de sus émbolos, este aumento de presión es proporcional a la relación entre las áreas de ambos émbolos.

Este tipo de mecanismo se basa en el principio de Pascal.

2.7. Soluciones salinas

Una solución salina posee punto de fusión variable en función de la concentración de sal en la solución. En el punto eutéctico (Ver figura 2.7), que se da para una concentración en peso de sal del 23.3%, la temperatura de fusión baja a -21.1°C . Además, cabe mencionar que el calor específico de dicha solución es mayor que el del agua. Por estas propiedades una solución de agua y sal tanto en forma líquida o sólida se presenta apta como refrigerante.

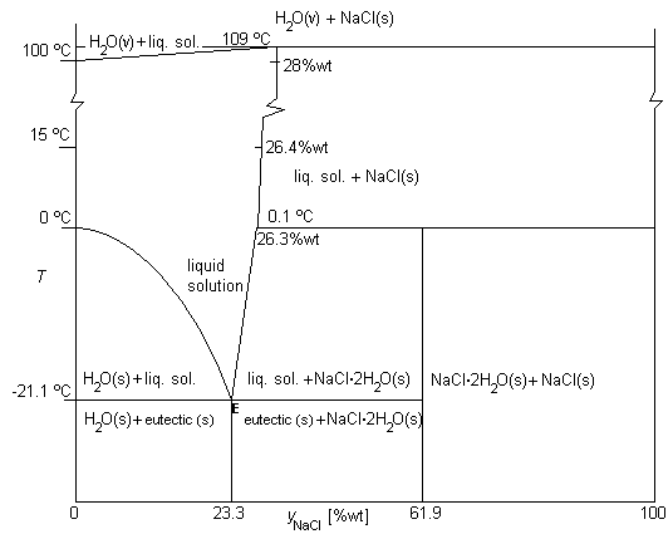


Gráfico 2.7: Diagrama de fases agua-sal, [14].

Capítulo 3

Metodología

En el presente trabajo de título se aborda el diseño y construcción de una cámara de alta presión para realizar congelamiento por cambio de presión. A continuación se describen los pasos para la construcción de dicho equipo y otros anexos necesarios para las pruebas a realizar también descritas en esta sección.

3.1. Descripción de equipos y proceso

Los equipos a usar en la caracterización del proceso de congelamiento por cambio de presión son (Ver figura 3.1):

- Cámara de alta presión.
- Sistema de presión.
- Camisa aislante térmica

La cámara de alta presión en su interior posee tres secciones que son la cámara o zona¹ de alta presión, multiplicador de presión y una cámara o zona de baja presión (Ver figura 3.2). La cámara será diseñada para una presión de 200[MPa], para poder alcanzar dicha presión se hace necesario incluir un multiplicador de presión contiguo a la cámara de alta presión.

La cámara cuenta con 3 capas en la sección de alta presión y en la zona en la que se aloja el émbolo menor del multiplicadora, para la sección de baja presión se tiene solo una capa. Para realizar el sellado de alta presión se consideraran sellos tipo *Bridgeman*, para sellar baja presión se consideraran un sellos elásticos tipo O-Ring.

¹Con el fin de evitar confusiones entre la cámara como un todo y sus subsecciones, a estas últimas se le llamara "zonas", según lo amerite.

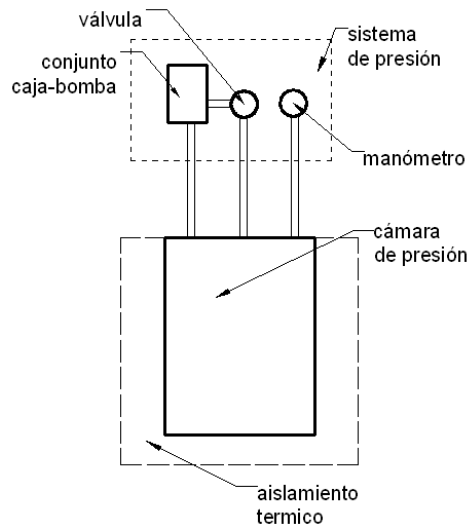


Figura 3.1: Esquema de equipos .

En la figura 3.1 se presenta un esquema de los equipos que fueron usado. El sistema de presión esta destinado a inyectar aceite a presión en la cámara de baja presión, la camisa aislante térmica impidió la entrada de calor a la cámara. La cámara fue enfriada haciendo uso de una mezcla de hielo con sal.

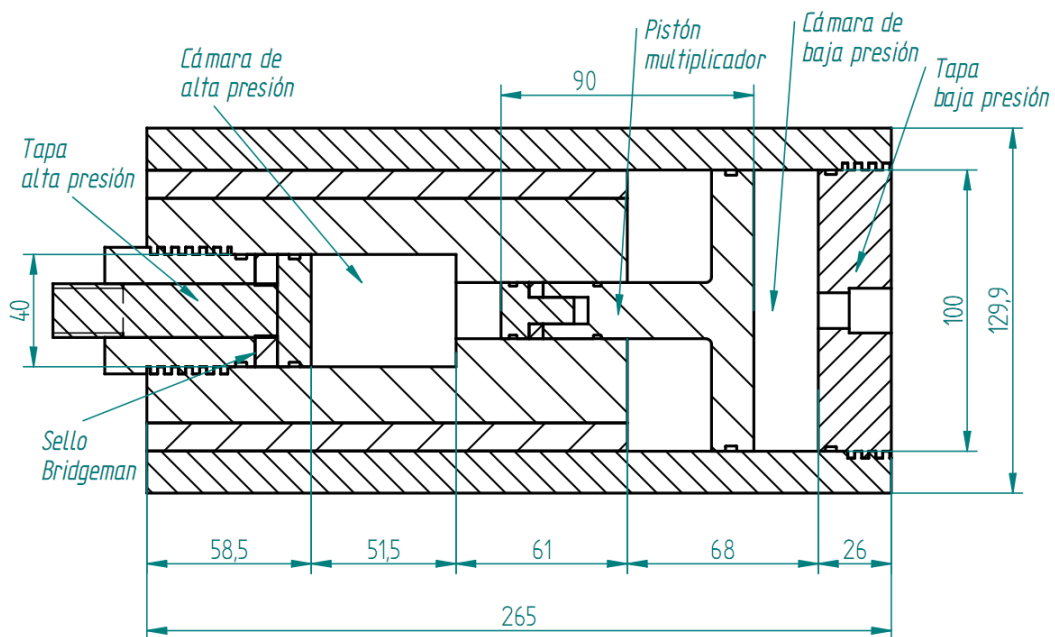


Figura 3.2: Esquema de la cámara, corte transversal.

El proceso de congelamiento por cambio de presión se puede describir de la siguiente manera (Ver figura 2.3). El sistema de presión inyecta aceite a presión en la cámara de baja presión, presionando el émbolo de mayor área. Esta presión es multiplicada al ser transmitida al émbolo de menor área. Se inyectará aceite en la cámara de baja presión hasta alcanzar una presión de $200[MPa]$ en la cámara de alta presión. Luego por medio de una mezcla refrigerante de hielo de agua con sal, se enfriará la cámara hasta $-20^{\circ}C$. En esta punto se libera la presión de la cámara de baja presión, bajando la presión en la cámara de alta. Con ello se consigue un congelamiento por cambio de presión.

Para las pruebas de factibilidad se uso una camisa aislante térmica que disminuye el flujo de calor desde el ambiente a la cámara, se enfrió la cámara usando mezcla de hielo con sal de mesa durante las pruebas de factibilidad. Dicha mezcla se uso de forma definitiva en todas la pruebas siguientes dado que es capaz de enfriar la cámara a una temperatura cercana a los $-20^{\circ}C$.

3.2. Diseño y construcción de cámara de alta presión

Para el diseño de la cámara se optó por el uso de la norma ASME para estanques de muy alta presión[7], dado que ella es la mas usada para guiar el diseño y construcción de dicho tipo de cámaras. La presión de diseño se fijó en $200[MPa]$. La cámara consta de 3 capas de metal embutidas una dentro de la otra, considerando una interferencia de diámetros de una décima de milímetro. Dicha interferencia crea un estado de pretensión en las capas interiores de la cámara permitiendo que resista mejor la presión a la cual es sometida.

En una primera instancia se pretendió usar acero inoxidable, debido a sus cualidades sanitarias, pero dicho material tiene una tensión de fluencia muy próxima a la presión de diseño usada lo cual no daba mayor seguridad sobre la resistencia de la cámara. Se optó por usar acero AISI 4340 para la mayoría de las piezas y acero AISI 1045, para las 2 capas exteriores de la cámara.

Con respecto a las tapas de la cámara, para las zonas de alta presión como de baja presión, se optó por hacerlas atornilladas. El espesor de cada tapa se determinó según los requerimientos de largo del hilo para soportar la carga sobre la tapa y el espesor necesario para que la tapa no se deformara plásticamente por acción de la presión. La tapa de la zona de baja presión posee 3 agujeros en los cuales se conectan la entrada de aceite y las salidas al sistema de presión y hacia el manómetro.

La cámara por la naturaleza de la elevada presión a la cual funcionara consta de 2 tipos de sellos, el primer tipo de sello es de O-ring, el material de éstos es de Nitrilo con una dureza de 90 Shore. El material y dureza fueron seleccionados en virtud de la presión con que se trabaja y la baja temperatura que deben soportar estos sellos. El segundo tipo de sello es de tipo "Bridgeman", el material para

dicho sello es tal que su módulo de Young es menor que el del acero seleccionado para la construcción de la cámara. Con esto se asegura que se logrará la compresión de las caras del sello contra la pared del cilindro que las contiene. El material para dicho sello es cobre tipo C11000 con temple H04, dicho material es relativamente fácil de encontrar en el país.

La rugosidad superficial máxima de las piezas que van en contacto con los sellos es de $0.4[\mu m]$, y la tolerancia entre dichas piezas debe ser menos que $50[\mu m]$. La tolerancia entre las piezas de los sellos Bridgeman y las paredes cilíndricas que los contienen deben ser lo menor posible.

Todas las piezas de este diseño fueron confirmadas bajo análisis de esfuerzos usando un programa de elementos finitos (el programa usado fue "*SolidWorks*"), debido a la facilidad de uso que este presenta. Las condiciones de borde para las piezas fueron las presiones a las cuales están sometidas en su operación en la cámara. Se implementó usando relaciones de simetría, que permiten ahorrar tiempo de cálculo.

Para mayores detalles del proceso de cálculo de las piezas y los resultados de los análisis de elementos finitos ver anexo A.2

Las piezas de la cámara fueron construidas en el taller docente de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile. La mayoría de estas fueron hechas por el alumno. Hay piezas que fueron rectificadas para obtener las rugosidades y tolerancias requeridas, es por ellos que en una primera instancia se fabrican en sobre medida, dejando los surcos para O-ring, en caso de que la pieza los deba tener. Para los cilindros exteriores, la medida exacta que deben tener se determinó tras terminar el cilindro que va dentro de él.

La temperatura a la cual se deben calentar los cilindros para su montaje se determinó usando las ecuaciones de dilatación térmica de un sólido. Dicha temperatura debe ser tal que no genere cambios en la microestructura de los metales calentados, para ambos tipos de acero AISI 4340 y AISI 1045. Con una temperatura de 550 grados se obtiene una dilatación volumétrica de 2.1 %, lo cual es mas que suficiente para el montaje de las piezas.

Los planos de la cámara fueron modificados al finalizar la construcción de ésta, debido a modificaciones que surgieron durante el proceso de construcción. Los planos pueden ser vistos en el anexoC.

3.3. Diseño y construcción de equipos anexos

La cámara para realizar el congelamiento por cambio de presión necesita de equipos auxiliares para su funcionamiento, estos equipos son una primera instancia, el sistema de presión y la camisa de aislamiento térmica.

3.3.1. Sistema de presión

El equipo de presión es un conjunto formado por una bomba de inyección diésel, una caja de aceite adjunta a la bomba, una válvula, manómetro y las cañerías que conducirán el aceite.

La caja posee una manilla con una leva que acciona la bomba diésel para que esta inyecte aceite a presión en la cámara (Ver figura 3.3). Para diseñar la caja de aceite se procedió a medir y hacer un modelo de la bomba, en base a su geometría se diseñó la caja y sus elementos interiores para que se ajustaran a la bomba. La leva interior que acciona la bomba diésel se diseñó en base al recorrido que tiene el resorte interior de la bomba. La cantidad de aceite que almacena la caja se determinó en función a cuánto aceite es necesario hacer ingresar en la cámara para comprimir el agua de la zona de alta presión, además se debe procurar que el nivel de aceite en la caja sea tal que la leva siempre se encuentre bañada en aceite para su buena lubricación. Se contempla la presencia de tapas para la entrada de aceite y la salida de este.

El material seleccionado para la caja es acero estructural A36 para sus paredes, y acero 1020 para el eje, manilla, pasadores y trabas. Se usó acero 1045 para la leva, la cual debió ser templada antes de su uso.

La válvula cumple la función de detener el fluido a la salida de la zona de baja presión de la cámara, permitiendo elevar presión dentro de dicha sección de la cámara. La válvula se construyó de acero 1045 y el "tapon" en la punta del vástago fue hecho de cobre.

El manómetro usado se conectó por una cañería a la zona de baja presión de la cámara por su tapa trasera, éste mide la presión que es ejercida sobre el émbolo mayor del multiplicador de presión, resulta ser útil para dar una idea de la presión ejercida en la zona de alta presión de la cámara. El manómetro seleccionado es uno de caja plástica de glicerina que puede medir en un rango de 0 a 160[bar].

Las cañerías para el sistema de presión debieron ser tales que pudieran resistir altas presiones. Para ello se seleccionaron cañerías de inyección diésel usadas en motores de camiones de gran tonelaje.

El fluido hidráulico a usar debió ser tal que soportara menos de -30°C de modo que su viscosidad no representara una obstrucción de las cañerías del sistema de presión. Para ello se seleccionó el lubricante "SHELL DONAX", que comúnmente es usado como lubricante en cajas de cambio y en sistemas de

dirección hidráulica de camiones.

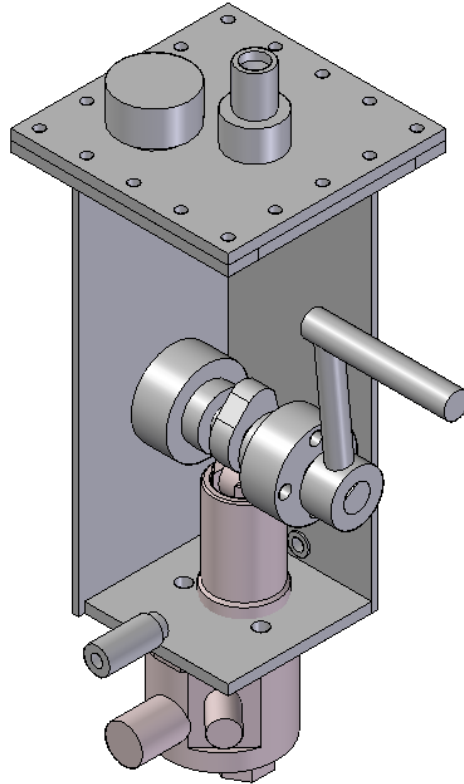


Figura 3.3: Esquema caja de aceite y bomba inyección.

3.3.2. Camisa aislante térmica

La cámara de alta presión posee una camisa aislante que hace que el flujo de calor desde el ambiente hacia la cámara sea mínimo. Considerando las dimensiones actuales de la cámara y se supone una camisa aislante de plumavit de una densidad de $15 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$ de $5[cm]$ de espesor, con temperatura exterior de $20^{\circ}C$ y una temperatura interior de $-20^{\circ}C$, entonces el flujo de calor es de $9.5[Watt]$.

La camisa cuenta con una tapa superior que es desmontable, para permitir el acceso a la cámara de alta presión. La camisa posee una separación con la pared de la cámara de $4[cm]$, que permite poner un agente refrigerante (mezcla hielo-sal) alrededor de la cámara. Esta mezcla es usada en las primeras pruebas de factibilidad. Además posee una abertura en los costados y su parte inferior, que permite el escape del agua líquida que se genera al enfriar la cámara.

3.4. Modelo de enfriamiento

3.4.1. Calor a extraer

El calor extraer de la cámara se calculo como la suma de los calores a sacar del agua, aceite y metal que están dentro y componen la cámara. Las capacidades calóricas, volúmenes y densidades son conocidos. Salvo la capacidad calórica del agua que varía en función de la presión, pero esta puede ser aproximada a $4[\frac{KJ}{Kg}]$ a partir del gráfico 2.2 para una presión de $200[MPa]$. Si se considera una temperatura inicial de $20^{\circ}C$ y una temperatura final de $-22^{\circ}C$, entonces la cantidad total de calor a extraer de la cámara es de $523[KJ]$.

3.4.2. Método de refrigeración

Durante la primeras pruebas el método de refrigeración fue usar una mezcla de hielo en escamas y sal de mesa. Dicha mezcla puede alcanzar una temperatura de $-21^{\circ}C$, dependiendo de la concentración de sal. Esta mezcla fue puesta sobre la cámara y a su alrededor contenida por la camisa aislante, con el fin de enfriarla.

La cantidad de refrigerante a usar en masa o caudal que debe pasar por la cámara, esta determinado por su capacidad de extraer calor.

La cantidad utilizada de esta mezcla fue tal que fuera capaz de llenar el espacio entre la camisa aislante térmica y la pared exterior de la cámara cubriendo con una capa de alrededor de $2[cm]$ de altura la parte superior de la cámara. Se debió tener una cantidad igual o mayor de mezcla para reemplazar la cantidad derretida.

El hielo en escamas para este trabajo fue donado por el empresa de hielos Exposición.

3.4.3. Tiempo de congelamiento

El tiempo que demora el congelamiento se determinó en función de la cantidad de agua que no se congeló instantáneamente por efecto del superenfriamiento. Este tiempo depende de la presión y temperatura a la cual se realiza el proceso de congelamiento rápido (Ver figura 2.4). Además se debió de considerar el tiempo que demora el agua remanente en congelarse.

3.5. Pruebas de factibilidad

Antes de realizar las experiencias destinadas a caracterizar el funcionamiento de este equipo se deben realizar una serie de pruebas de factibilidad, para corroborar el buen funcionamiento de todos los componentes.

3.5.1. Prueba del sistema de presión

Se debió comprobar si el sistema de presión era capaz de alcanzar y mantener más de $8[MPa]$ en cada uno de sus componentes. Esta presión es la requerida para que por medio del multiplicador de presión la zona de alta presión de la cámara pueda alcanzar $200[MPa]$.

Primero se procedió montar la caja de aceite junto a la bomba diésel. Esta se unió por medio de una cañería al manómetro. Se agregó aceite a la caja, se hizo circular hasta que se aseguró la expulsión del aire del circuito. Tras esto se observó en el manómetro hasta qué presión podía llegar la bomba.

Tras la primera prueba se procedió a montar la bomba diésel y la válvula por medio de cañerías de presión dejando al final del circuito el manómetro. Se procedió de forma similar a la primera prueba, se observa si el conjunto era capaz de soportar la presión requerida ($8[MPa]$). Al realizar este par de pruebas se rotaron las cañerías que fueron ocupadas después en el montaje final, para asegurar su buen funcionamiento.

3.5.2. Prueba de presión cámara

Cuando la cámara se encontró lista y con sus piezas montadas, se conectó al sistema de presión y un manómetro. La presión a medir es la que se registró en la zona de baja presión de la cámara. Primeramente se debe ver si la cámara es capaz de alcanzar una presión un poco superior a $8[MPa]$, lo cual indicaría que la presión alcanzada en el lado de alta presión es cercano a $200[MPa]$. Luego se constata que la presión alcanzada no baje dentro de un periodo de tiempo, lo cual vendría a demostrar que la cámara no posee fugas.

3.5.3. Medición de presión en la cámara

Se midió la presión interna de la zona de alta, usando un cilindro con un indentador que usando la deformación plástica de una pieza metálica indica cual fue la presión real ejercida.

La prueba consistió en preparar el cilindro indentador con una pieza de metal en su interior, ponerlo en la cámara de alta presión, tapar la cámara y elevar la presión hasta una presión de $80[bar]$, leída en

el manómetro de la zona de baja.

Esta prueba estuvo destinada a determinar empíricamente cual era la presión que se debió alcanzar en la zona de baja presión, con tal de procurar una presión de $200[MPa]$ en la zona de alta. Mas detalles sobre como se mide presión con este cilindro identador en el anexo B

3.5.4. Prueba congelamiento cámara bajo presión

Tras realizar las pruebas anteriores se procedió a poner la cámara dentro de la camisa aislante térmica. La prueba consistió en alcanzar $200[MPa]$ dentro de la cámara de alta presión, lo cual se constató midiendo la presión en la zona de baja presión de la cámara. Tras alcanzar dicha presión, se procede a llenar el espacio entre la camisa aislante y la cámara con una mezcla de hielo-sal para enfriar la cámara y su contenido a una temperatura cercana a los $-20^{\circ}C$. Cuando se hubo alcanzado dicha temperatura y se constató que la variación de temperatura era mínima en función del tiempo, se liberó rápidamente la presión. Tras ello se destapa la cámara y se observó si se produjo algún grado de congelamiento rápido del agua que estaba en su interior.

Esta prueba se repitió un par de veces con tal de asegurar los resultados, ver la efectividad del uso de la mezcla refrigerante y obtener el tiempo promedio que demoraba la cámara en enfriarse. El líquido a congelar en esta prueba fue una solución de agua con aceite soluble, para evitar la posible oxidación de la cámara.

3.6. Montaje de equipos

Una vez que pruebas de factibilidad son satisfactorias se procedió a realizar el montaje definitivo de la cámara y sus equipos auxiliares (Ver figura 3.1). Para la cámara de alta presión como para la caja de aceite se fabricaron estructuras que las sujetaran, dejando espacio en su parte inferior para manipular los conectores de las líneas de presión. Estas estructuras iban apertadas al tablero sobre el cual se montaron los equipos. El tablero para el montaje de los componentes tenía una cubierta que permitió el escurrimiento del agua y aceite.

Para realizar un registro de la temperatura se utilizaron termocuplas tipo *K*. Para la lectura de dichas termocuplas se uso un lector multicanal de marca *DIGI-SENSE* modelo *69202-30*. Se usaron dos termocuplas, una ubicada en contacto del metal de la tapa y la segunda introducida dentro de la cavidad entre donde se embute el émbolo menor y la pared superior del émbolo mayor(ver imagen 4.1). La punta de la termocupla contacto la pared del émbolo menor.

3.7. Caracterización del proceso

Las experiencias descritas a continuación están destinadas a caracterizar el funcionamiento de este equipo y el proceso de congelamiento realizado en él.

3.7.1. Prueba de enfriamiento de la cámara

Se midió el tiempo que demoraba la cámara en enfriarse hasta una temperatura cercana a -20°C y que la variación de la temperatura en función del tiempo fuera mínima, con tal de asegurar que toda la cámara estuviera a la misma temperatura. Al realizar esta prueba se debió registrar cada cierto tiempo las variaciones de temperatura en los puntos de medición.

3.7.2. Prueba de congelamiento rápido de agua

La prueba consistió en congelar por cambio de presión una solución de agua con aceite soluble confinado dentro de una membrana plástica al interior de una solución que soportara altas presiones y bajas temperaturas. El líquido usado fue el mismo tipo de aceite hidráulico usado en la zona de baja presión, lubricante "*SHELL DONAX*". Con el fin de obtener muestras de hielo producido por este proceso que fuera fácil de sacar de la cámara. Se utilizó una solución de agua con aceite soluble para esta prueba. El tiempo para esta prueba fue el que tomó la cámara en enfriarse, determinado en las pruebas de factibilidad, añadiéndose una hora, para asegurar que el contenido de la cámara se encontrara también a dicha temperatura.

Este hielo obtenido fue comparado con hielo formado a partir de una solución de agua con aceite soluble congelado a presión ambiente.

3.8. Pruebas en alimentos

Se procedió a realizar pruebas con alimentos, el alimento seleccionado para tal fin fueron nectarines. La prueba consistió en poner trozos de nectarín dentro de la cámara. En un medio que resistiera la presión y baja temperatura. Estas muestras fueron contrastadas con nectarines congeladas en trozos a presión ambiente y luego descongeladas.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Diseño y construcción cámara alta presión

Los resultados acerca de las dimensiones mínimas que deben poseer las piezas de la cámara se encuentran explicados en el anexo A. Las piezas diseñadas han sido comprobadas por medio de elementos finitos dicho estudio se encuentra en el anexo A.2. Se desarrollaron planos constructivos de la cámara de alta presión y los conectores para las líneas de presión que fueron usados para su construcción.(Ver anexo C).

En la tapa de alta presión fue necesario hacer una perforación en el pistón que lleva esta, para permitir la salida del aire de la zona de alta presión. Para esto fue necesario fabricar una tapa y un tapón a presión de bronce para sellar dicha perforación.

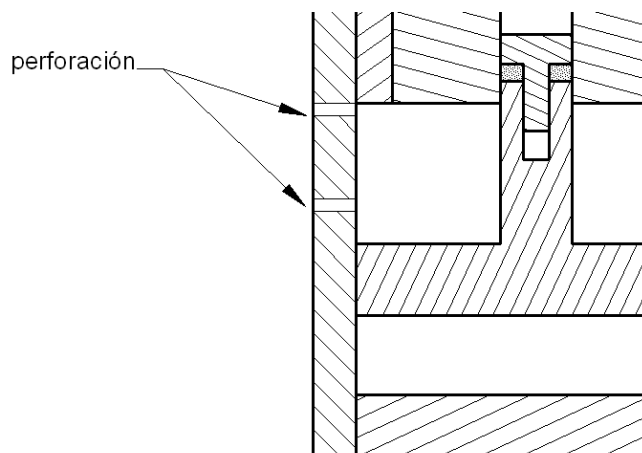


Figura 4.1: esquema perforaciones laterales cámara.

En el cuerpo de la cámara fue necesario hacer perforaciones para permitir la salida del aire atrapado entre la entrada del émbolo menor y la pared superior del émbolo mayor del multiplicador de presión, para servir de escapatoria de líquidos en caso que fallen los sellos y como límite de seguridad al avance

del multiplicador de presión. Ver figura 4.1. Estas perforaciones luego fueron usadas para medir la temperatura al interior de la cámara

En un principio se determino el uso de sellos de dureza 90 Shore para toda la cámara, pero estos sellos probaron ser muy frágiles al momento de ser instalados. Esto se determino al ver que los sellos de dureza 90 Shore se rompían en los bordes de entrada de los cilindros que debían sellar, al ser muy rígidos los sellos se cortaban contra estos bordes. Para solucionar este problema se opto usar sellos de nitrilo de dureza 60 Shore que han probado ser mas resistentes en la instalación e igual resisten la presión impuesta, además de ser mas baratos y faciles de acceder que los sellos de dureza 90 Shore. Los sellos usados en el multiplicador de presión, en su émbolo menor y mayor deben ser cambiados cada cierto numero de usos de la cámara debido a su deterioro o corte. El cambio de los o-ring del multiplicador de presión demanda armar y desarmar la cámara.

Debido a un error de diseño se debió agregar una sección adicional al émbolo menor del multiplicador, dicho error de diseño correspondía al recorrido que tiene el multiplicador dentro de la cámara. El insertar una sección adicional al multiplicador vino a resolver un problema de roce entre piezas por un error en su concentricidad. Ver figura 4.2.

Dentro del diseño, no se considero un sistema hidráulico para hacer bajar el multiplicador de presión y dejarlo listo para otra prueba. Para ello se uso un cilindro metálico dentro de la zona de alta presión, que por acción de la tapa superior hacia bajar el multiplicador.

En las siguientes imágenes se presentan las distintas piezas de la cámara de alta presión tras su fabricación y uso en la misma.



Imagen 4.2: Multiplicador de presión con sellos.



Imagen 4.3: Tapa delantera.



Imagen 4.4: Cámara de alta presión sobre montura.

4.2. Diseño y construcción sistemas anexos

Se desarrollaron planos para la construcción de la caja de aceite y de la válvula, que puede ser visto en el anexo D.

Cabe mencionar que la bomba inyectora diésel fue usada usando un taladro para mover la leva y no una manivela tal como fue diseñado. Debido al nivel de revoluciones y la fuerza ejercida sobre la leva, se ha tenido problemas con el prisionero usado para sujetar. Se debe mantener un nivel de aceite en la caja tal que durante la operación el aceite bañe la leva con fin de lubricarla y enfriarla. Por el roce ejercido en la leva, esta se desgasta liberando polvo metálico que obstruye la bomba inyectora. Debido a esto fue necesario desarmar y limpiar en un par de ocasiones la bomba inyectora, encontrándose partículas metálicas trabando el resorte de la válvula de retorno de la bomba. El aceite hidráulico usado debe de ser filtrado constantemente para evitar que se obstruya la bomba.

En las siguientes imágenes se muestran las partes del sistema de presión y camisa aislante térmica tras ser fabricadas y usadas.



Figura 4.5: Caja de aceite del sistema de presión.



Imagen 4.6: Válvula del sistema de presión.



Imagen 4.7: Camisa aislante térmica desarmada.

4.3. Modelo de enfriamiento

Se ha determinado en una primera aproximación la cantidad de calor que debe ser extraída de la cámara para bajar su temperatura de 20°C a -20°C , esta cantidad de calor es aproximadamente $523\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}\right]$. El calculo de este calor se puede encontrar en el anexo A.3

La cantidad de refrigerante, considerando una mezcla de hielo en escamas y sal, a usar es de acuerdo al volumen que puede contenerse en el espacio entre la camisa aislante y la pared exterior de la cámara de alta presión. Considerando una cantidad de mezcla para ir agregando a medida que se derrita el hielo que esta en el interior de la camisa. En las pruebas realizadas, primeramente se uso hielo en escamas mas hielo preparado a partir de una solución salina. Luego por motivos de disponibilidad. Se opto por hacer la mezcla de hielo en escamas mas sal al momento de ser usado, dando mejores resultados que hacer cubos de hielo de esta misma mezcla. La cantidad de la mezcla usada por prueba fue de aproximadamente 7 kilogramos de hielo en escamas y 2 kilogramos de sal.

Se registraron temperaturas del orden de los -19°C en la mezcla usada para refrigerar la cámara, esta temperatura fue tomada en la camisa aislante como en los "cooler" usados para almacenar la mezcla una vez preparada.

Según los resultados obtenidos al realizar las pruebas de factibilidad. La cámara demora un tiempo aproximado de 2 horas en alcanzar un estado en que la variación de temperatura no va mas allá de los $0.02\left[\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}\right]$, para las mediciones realizadas en el multiplicador de presión.

Para preparar y preservar la mezcla de hielo con sal fue necesaria la fabricación de coolers, a base

de contenedores plásticos y plumavit de 5[cm]de espesor.

4.4. Montaje final equipos

El montaje final de los equipos fue realizado sobre una plancha de madera prensada encontrada en el taller. La plancha fue dimensionada con tal de albergar bien los equipos, que fueron apernados a ella. para evitar que la plancha se impregnara con aceite o agua, fue recubierta con una lamina plástica. Cabe mencionar que fue necesario el uso de una llave tipo cadena para abrir y cerrar la cámara, operación que muchas veces requiere un gran esfuerzo físico. A continuación se muestra una imagen de como quedaron montados los equipos.

Se observo que parte del liquido que caía sobre la plancha de madera, filtraba a la mesa debajo. Se hizo necesario ubicar un balde en un costado de la mesa para recibir el liquido que generaba el equipo.

Se hace critica la limpieza de la cámara tras las pruebas de congelamiento debido a la posible corrosión inducida por el uso de la mezcla salina para refrigeración. Cada cierto periodo se debe limpiar la superficie de la cámara debido a lo anterior.

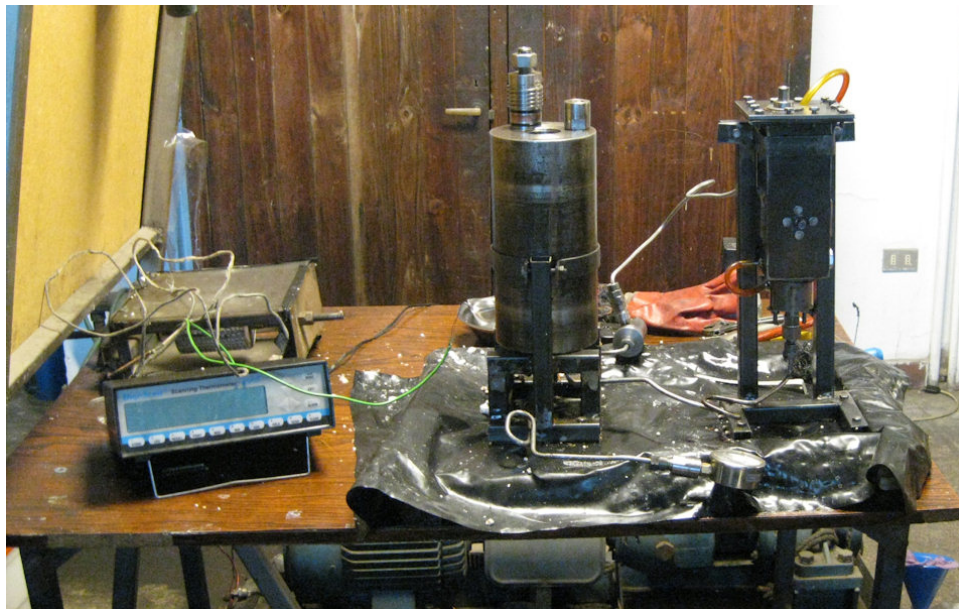


Imagen 4.8: Montaje final de los equipos.



Gráfico 4.9: Cámara de alta presión con camisa aislante instalada.

4.5. Pruebas de factibilidad

Para las pruebas de presión se probaron las cañerías y la válvula, comprobándose que pueden resistir una presión por sobre los $160[bar]$. En la prueba de presión de la cámara se pudo alcanzar una presión de $100[bar]$ en la zona de baja presión, lo que implicaría una presión de $250[MPa]$ en la zona de alta. Se decidió no seguir elevando mas la presión para no forzar la cámara induciendo alguna falla en ella. Para la segunda prueba de presión de la cámara, se dejó el sistema con presión durante 13 horas, partiendo desde $90[bar]$ y registrando $75[bar]$ tras dicho período. La pérdida fue de aproximadamente $1.1[\frac{bar}{hora}]$.

Al realizar las pruebas de presión en la cámara se observa que una cantidad no menor de aceite debe ser bombeada para alcanzar una presión de aproximadamente $80[bar]$. Generando una carrera promedio en el multiplicador de $13[mm]$, considerando que el líquido de prueba es una solución de agua con aceite soluble.



Imagen 4.10: Montaje usado en las pruebas de presión.

Se encontró que el punto inicial ideal de comienzo de la carrera del multiplicador de presión corresponde a una distancia de $25[mm]$ medida entre la cabeza del émbolo menor del multiplicador y el borde de la reducción de diámetro en la zona de alta presión. Para dicha posición existen 2 sellos o-ring y el sello tipo "bridgeman" del émbolo menor del multiplicador en posición de ejercer un sellado efectivo.

Cada cierta cantidad de pruebas el o-ring ubicado en el émbolo mayor del multiplicador se cortaba. Significando su recambio, teniendo que desmontar y desarmar la cámara de alta presión.

Durante la realización de las pruebas se pudo observar que la superficie de los sellos tipo "bridgeman" se presentaba brillante evidenciando su contacto contra la paredes de los cilindros que los contienen. Esto evidencia el funcionamiento real y correcto de este tipo de sellos.

La prueba de factibilidad de congelamiento fue realizada usando una solución de agua con aceite soluble. Las pruebas fueron realizadas a una temperatura aproximada de $-15^{\circ}C$ medidos en el multiplicador de presión. El resultado de dicha prueba fue un hielo en apariencia distinto al obtenido a presión ambiente, viéndose mucho mas compacto y sin evidencia de un crecimiento de cristales de gran

tamaño con alguna orientación determinada. El hielo observado era uniforme (Ver imagen 4.11).

Se detectó una expansión a partir del volumen inicial en la zona de alta presión, dicha expansión es de aproximadamente 2%. Dicha expansión puede confirmar que el hielo que se forma es hielo de tipo I. Este tipo de hielo tiene menor densidad que el agua líquida, por lo cual si se forma este tipo de hielo se espera un aumento del volumen total ocupado por el hielo resultante.



Imagen 4.11: Hielo obtenido en proceso HPSF.

A partir de las prueba de factibilidad de congelamiento se pudo determinar que el tiempo que demora la cámara en enfriarse hasta casi -16°C es de aproximadamente 2 horas.

La mezcla de hielo-sal prueba ser útil en enfriar la cámara y su contenido, siendo fácil y barato de producir.

Para la medición de la presión en la zona de alta se realizaron 4 mediciones (Ver figura 4.12), obteniéndose un diámetro promedio de indentación de $4.63[\text{mm}]$. Considerando que dichas mediciones fueron realizadas a una presión en la zona de baja de $80[\text{bar}]$, entonces la presión real en la zona de alta es de $178.56[\text{MPa}]$, en base a una escala empírica de deformación(Ver anexo B). La relación real de presión entre las zonas de baja y alta presión es de 22.3 veces.



Imagen 4.12: Probetas de medición de presión por deformación.

Debido al cambio de temperatura se pudo constatar un aumento significativo de la viscosidad del aceite hidráulico usado (*SHELL DONAX*).

A partir de los resultados de las pruebas de factibilidad es posible obtener parámetros para realizar una caracterización más acabada del proceso de congelamiento por cambio de presión en esta cámara. Dichos parámetros son:

Presión máxima de trabajo ¹	100[bar]
Relación real de presión	22.3
Tiempo mínimo de enfriamiento	2[horas]

Tabla 4.1: Parámetros para caracterización

4.6. Caracterización del proceso

En la prueba de caracterización del proceso se registraron los tiempos y temperaturas en los 2 puntos de medición y se congeló dentro de una membrana plástica una solución de agua con aceite soluble.

En la tabla 4.2 se presentan los datos obtenidos de tiempos y temperatura, se puede ver un gráfico de estos datos en la figura 4.13.

Tiempo [min]	T _{interna} [°C]	T _{tapa} [°C]
0	21,5	21,5
27	6,2	-8,5
50	-1	-12
63	-7,3	-15,9
78	-10,8	-15,8
102	-13	-17,6
118	-14,4	-18
140	-14	-17,2
180	-15,8	-17,8
190	-16	-17,8

Tabla 4.2: Resultados tiempos y temperatura

Del gráfico 4.13 se puede asumir que se toma un tiempo de aproximadamente 100 minutos para que la variación de la temperatura de la cámara sea de $0.02\left[\frac{^{\circ}C}{min}\right]$, lo que se ajusta dentro de los parámetros obtenidos. La presión se libera a los 190 minutos, demorándose la prueba un tiempo de 3 horas 10 minutos.

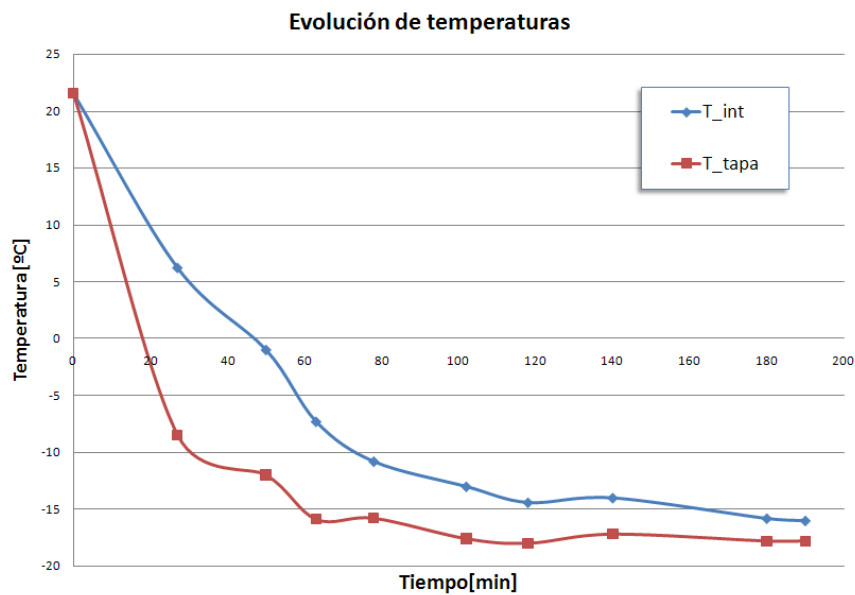


Gráfico 4.13: Evolución de temperaturas en el tiempo.

El hielo de solución de agua con aceite soluble fue sacado de la cámara y partido para ser observado (Ver figura 4.14). Este hielo fue depositado encima del borde de la cámara para la toma de fotografías, dado que ella se encontraba fría evitando un derretimiento de las muestras.

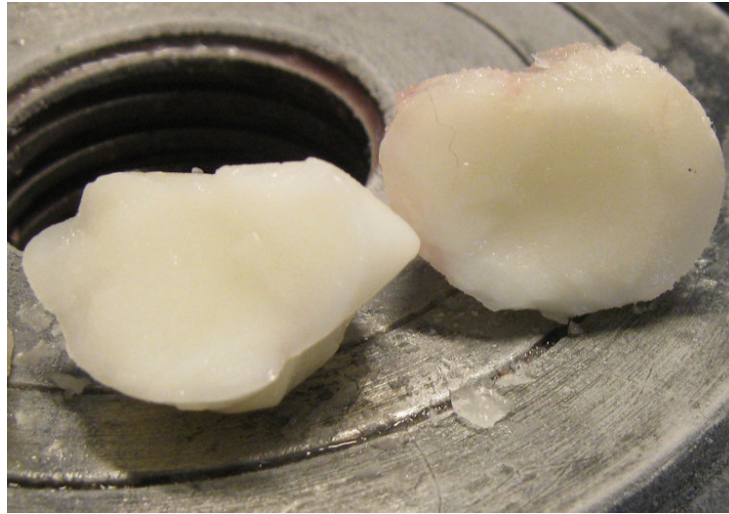


Imagen 4.14: Hielo de solución agua-aceite soluble.

Las muestras de hielo comparadas corresponden a frentes de fracturas (Ver figura 4.15), es decir se rompió el hielo generado en cada caso y se fotografiaron las nuevas paredes. Al comparar el hielo obtenido con el hielo generado bajo condiciones de presión ambiente, se evidencio claramente un comportamiento de crecimiento dendritico en este ultimo. Comportamiento no observado en el hielo generado por HPFS, que se ve uniforme en su extensión. Al fracturarse el hielo generado por HPFS se observo que el corte es uniforme, en cambio en el hielo generado a presión ambiente se observaron paredes lisas pero anguladas en sus cambios de dirección. Evidenciando que los cortes son en dirección de los cristales de hielo. Este fenómeno no es posible de ser observado fácilmente debido al tamaño de los cristales que se generan en un proceso tipo HPSF, por lo cual la superficie en los cortes de este tipo de hielo no presenta angulaciones evidentes.

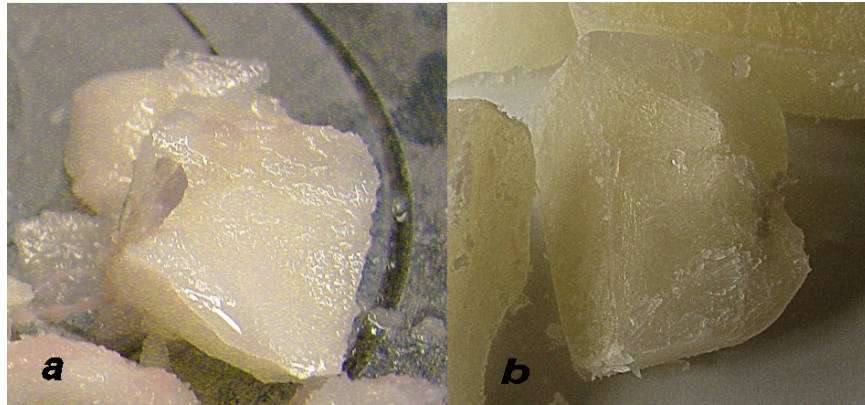


Imagen 4.15: Comparación de hielos. *a*) Hielo generado bajo congelamiento rápido, *b*) hielo generado bajo presión ambiente.

4.7. Pruebas en alimentos

Para esta prueba se congelaron bajo proceso HPSF trozos de nectarin y luego descongelados a presión ambiente. Estos fueron contrastados con trozos congelados y descongelados a presión ambiente.

Se fotografió los trozos procesados bajo HPSF al ser cortados, sacados de la cámara y descongelados (Ver gráfico 4.16). Los trozos congelados y descongelados a presión ambiente fueron fotografiados al ser cortados y después al estar descongelados (Ver gráfico 4.17). Para realizar una comparación entre las frutas se tomo un corte en las muestras al estar descongeladas (Ver gráfico 4.18). Los trozos descongelados fueron almacenados en un refrigerados antes de ser fotografiados

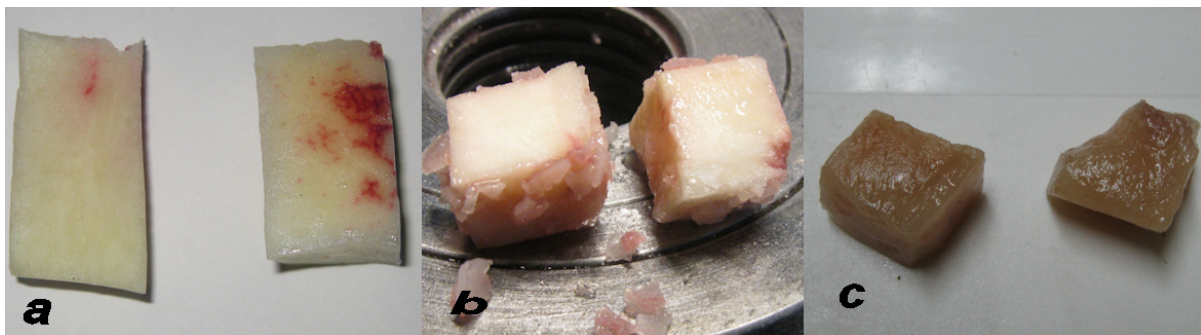


Imagen 4.16: Trozos de nectarines congelados bajo proceso HPSF. *a*) recién cortados, *b*) al ser extraídos de cámara. *c*) descongelados.

En el caso de los nectarines al ser recién extraídos de la cámara de alta presión, estos presentan un color rojizo debido al color del medio presión usado que es de color rojo.

Para las frutas congeladas por HPSF, los trozos congelados tienen un aspecto compacto (Ver figura 4.16 b)), es decir en apariencia más denso que en su estado natural. La textura de los trozos de fruta congelada no son totalmente rígidos, poseen cierta flexibilidad, a diferencia de frutas congeladas a presión ambiente. Es posible observar un gran cambio en la coloración de las muestras al ser descongeladas (Ver figura 4.16 c)). También se constató un cambio en la textura de la fruta, siendo la fruta descongelada más suave y menos firme que en estado natural.

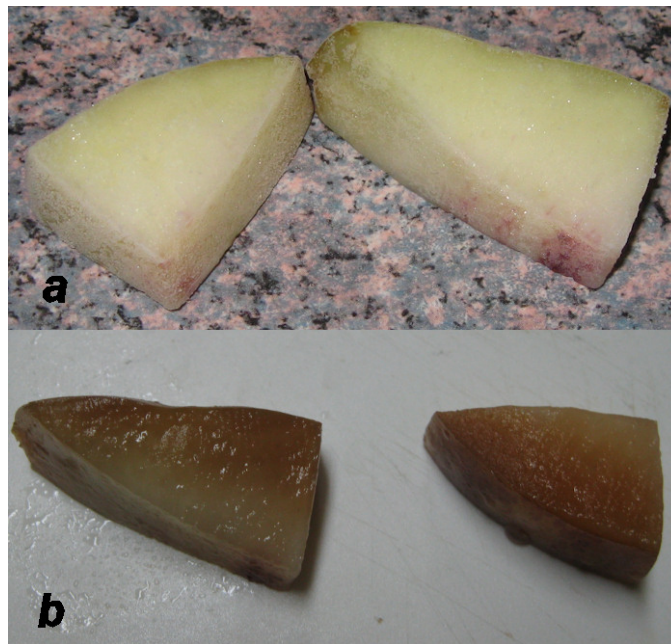


Imagen 4.17: Trozos de nectarines congelados a presión ambiente. a) recién cortados, b) descongelados.

Al comparar los trozos de fruta congelados por HPSF contra los congelados a presión ambiente, se observa una diferencia en las coloraciones, la coloración más lejana a la natural fue encontrada en la fruta congelada a presión ambiente. (Ver figura 4.18 b)). En relación a la textura de la fruta, la textura final que más se aproxima a la natural es encontrada en el trozo congelado por HPSF. Aun así esta textura es muy lejana a la natural.

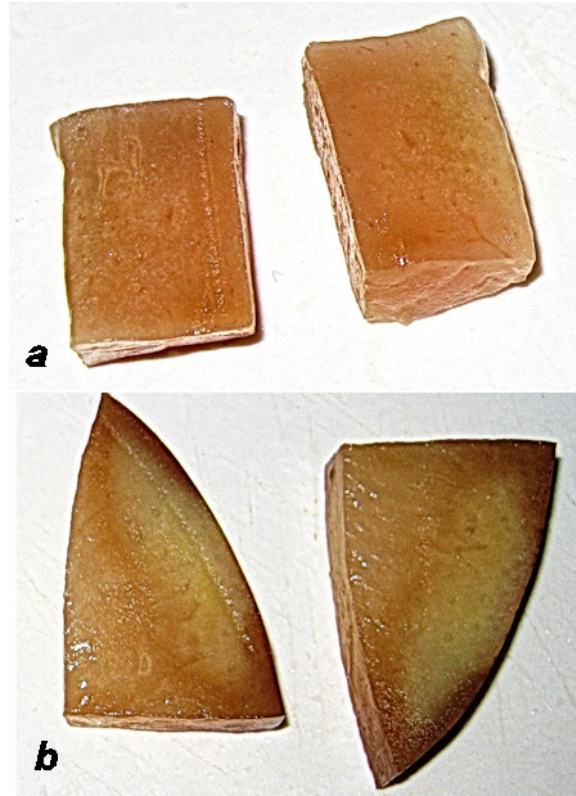


Imagen 4.18: Comparación de trozos descongelados según proceso de congelamiento . *a)* HPSF, *b)* presión ambiente.

Capítulo 5

Discusion

5.1. Diseño y construcción cámara y sistemas anexos

En el diseño de la cámara fue necesario integrar distintas fuentes para el cálculo de las dimensiones básicas, llegar a un diseño de la cámara y su comprobación según elementos finitos. Con esta herramienta fue posible además realizar estudios de sensibilidad de las dimensiones antes varios cambios que se debieron realizar sobre la marcha durante la construcción y montaje de la cámara.

Durante el proceso de construcción y montaje de la cámara se debió hacer algunas modificaciones en el diseño original, por diversos factores pasados por alto al momento de realizar el diseño preliminar. Estas modificaciones vistas desde otro punto de vista tienen la ventaja de poder permitir medir la temperatura en el émbolo menor del multiplicador de presión, que es representativo de la temperatura del metal más interior de la cámara. La abertura realizada en la tapa de la zona de alta presión se presenta apta para poder introducir elementos dentro de cámara. Como termocuplas, realizando medidas más precisas de la temperatura interior de la cámara. Utilizando un sistema de sello por deformación metálica.

En la cámara de alta presión se hace necesario la implementación de un sistema para hacer bajar el multiplicador de presión entre prueba y prueba. Usar un sistema mecánico usando la tapa de la zona de alta presión para hacerlo bajar, induce deformaciones tanto en la base de la tapa así como en el émbolo menor del multiplicador de presión. Provocando que las piezas se aprieten, añadiendo roces que terminan por inducir errores en la medición de la presión al interior de la cámara.

El problema del corte frecuente del sello del émbolo mayor del multiplicador de presión, puede deberse a problemas con los bordes de los surcos para el o-ring y por sobrepresiones para las cuales el sello se ve sobrexigido y falla. Este problema puede ser resuelto rehaciendo este émbolo y usando una configuración de sello doble, asegurando una mayor disponibilidad del equipo.

El conjunto caja-bomba de aceite cuenta con problemas en su leva, que constantemente produce polvo de metal debido al roce y el prisionero usado para sujetarlo tiene a fallar. La solución ante este problema sería cambiar el material usado en la leva y enanchar esta, dando espacio a un prisionero más

ancho.

Es necesario diseñar un sistema para mover la bomba de aceite, mejorando el acople a un taladro o instalando un motor adjunto. El uso de una manivela probó ser inefectivo.

Se debe agregar un sistema para el filtrado del aceite usado en el sistema de presión, debido a impurezas que puedan entrar al sistema y que pueden llegar a obstruir la bomba de aceite.

5.2. Modelo de enfriamiento

La mezcla de hielo en escamas con sal de mesa ($NaCl$), probó ser efectiva para enfriar por motivos económicos y de disponibilidad. La temperatura mínima a la cual se pudo llegar, medida en el émbolo del multiplicador, rondaba los $-16^{\circ}C$. Siendo que la temperatura de la mezcla alcanzaba los $-19^{\circ}C$. Esta diferencia de temperaturas se puede deber a pérdidas por parte de la camisa aislante térmica y por la parte baja de la cámara que no se encontraba aislada. También por pérdidas al sacar la tapa de la camisa aislante térmica para poner más mezcla refrigerante.

La mezcla refrigerante se puede mejorar usando otro tipo de sal que pueda generar en solución temperaturas menores a los $-20^{\circ}C$, cuidando de no producir un choque térmico en la cámara que pueda inducir fragilidades. Y además acelerando el proceso de enfriamiento de la cámara, debido que a mayor gradiente térmico mayor velocidad de transferencia de calor.

Se hace necesaria la construcción de un modelo teórico para determinar tiempos de enfriamiento y distribuciones de temperatura en la cámara. Para corroborar los datos registrados en los puntos de medición, y para confirmar que con que temperaturas medidas en los puntos de medición se puede asegurar una temperatura de aproximadamente $-20^{\circ}C$ al interior de la cámara.

5.3. Montaje de equipos

Se tuvo problemas importantes en lo que respecta a la firmeza de la instalación de los componentes en el panel de instalación, para evitar dicho problema se puede asegurar el tablero a la mesa usada brindando mayor firmeza.

Se debe de agrandar el espacio del tablero de instalación y procurar un mejor sello de las perforaciones, así evitando una caída de líquidos en la mesa. También se puede configurar de tal forma la capa plástica del tablero para que la casi totalidad del líquido generado caiga en un recipiente que los reciba.

Ante los problemas de corrosión encontrados por efecto de la mezcla refrigerante, se debe de encontrar una forma de proteger la cámara y su estructura soportante. En el caso de la estructura soportante esta se debe pintar con pintura anticorrosiva y para la cámara procurar la no aparición de óxidos.

5.4. Pruebas de factibilidad

La mezcla refrigerante usada solo permitió llegar a una temperatura de -16°C , siendo el ideal haber llegado a una temperatura de -20°C . Un cambio en la composición de la mezcla refrigerante permitiría poder alcanzar la temperatura requerida, corroborando de mejor manera el proceso HPSF para este equipo.

Según el orden en el cual fueron realizadas las pruebas se confirmó la presión real dentro de la cámara como parte de las pruebas finales realizadas. Esto significó una baja certeza de la presión con la cual se realizaron las pruebas preliminares, dado que durante esa etapa solo se valió de la relación de multiplicación teórica de 25 veces la presión ejercida en la zona de baja presión. En experiencias futuras sería interesante repetir las pruebas de factibilidad para la presión real en la cual debieron haber sido realizadas. Según lo determinado, las pruebas debieron haberse realizado a una presión de $89.6[\text{bar}]$

Una medición de presión por medio de deformación plástica de metales resulta útil para determinar la correlación entre las presiones medidas entre las distintas zonas. Resulta impráctico el uso de este método en cada prueba que se realice, ante lo cual se hace necesario a futuro la implementación de un método de medida de presión en tiempo real, dado que el método por deformación solo mide los peaks de presión durante la prueba. Existen métodos de medida de muy altas presiones por medio de dispositivos piezo-eléctricos o por medida del cambio de resistividad en una aleación metálica.

5.5. Caracterización del proceso

En las pruebas de caracterización es posible alargar el tiempo que se deja enfriando la cámara, pero mientras más tiempo pase menor será el grado de baja en la temperatura, debido a la poca diferencia de temperatura entre el interior de la cámara y la camisa aislante térmica. Este efecto se observa claramente en el gráfico 4.13.

Se puede mejorar la velocidad de enfriamiento y temperatura final de la cámara por medio del uso de una mezcla refrigerante de un mayor calor específico. Es decir que absorba mayor calor por unidad de peso, y que cuente con la capacidad de bajar más aun su temperatura en función de la concentración

de sales en la mezcla.

El uso de una solución de agua con aceite soluble, cumple con la misión de dar un buen medio para la observación del hielo que se forma. Se ignora cómo afecta en las propiedades del agua la presencia del aceite soluble. Sería conveniente encontrar algún tipo de tinte para el agua que no afecte sus propiedades, para un mejor estudio del hielo se forma dentro de la cámara.

Los hielos obtenidos según un proceso de HPSF en esta cámara prueban ser mas pequeños que los obtenidos a presión ambiente, pero se ignora el real tamaño de los cristales obtenidos. La observación de como se fractura el hielo puede llegar a dar leves indicios de su estructura.

Dado que observar hielo prueba ser muy complicado, entonces se hace necesaria la búsqueda de métodos indirectos de observación de los cristales formados. Algunos autores[3, 1], han solucionado este problema usando sustancias que no influyan grandemente en las propiedades del agua y den un "esqueleto" que pueda ser deformado por el crecimiento de los cristales de agua, y que dicha estructura remanente sea la que se observe. Se han obtenidos buenos resultados usando gelatinas[3].

Para caracterizar de mejor forma el hielo que se forma la cámara se hace necesaria la implementación de otras técnicas de observación de tipo micrográfico. Entre estas destaca la de SEM criogénico [3], que permite observar directamente la estructura

5.6. Pruebas en alimentos

Los resultados en frutas, que este caso fueron nectarines, no fueron los esperados. Aun así se presentan contrastes a los congelados a presión ambiente que sugieren una mejora en sus propiedades post congelamiento.

Para las frutas en estado congelado bajo HPSF, se ve que su textura no es rígida como la característica a la de un congelamiento a presión ambiente. Esta diferencia de rigidez se debe al tamaño de los cristales de agua dentro de las frutas, si los cristales son grandes, se observara una elevada rigidez.

Las desnaturalización de ambas muestras se puede deber a la velocidad de descongelamiento de las muestras, dado que una velocidad baja de descongelamiento[1] induce una recrystalización del hielo que puede dar pie a formación de cristales destructivos

Capítulo 6

Conclusiones, Comentarios y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

Tras la realización de esta memoria y sus trabajos asociados fue posible diseñar y construir una cámara de alta presión operativa a 200[MPa] junto a sus elementos anexos.

Se comprobó la factibilidad de realizar un proceso de congelamiento por cambio de presión en la cámara de alta presión, evidenciando su comportamiento durante dicho proceso.

Las pruebas de factibilidad fueron útiles para determinar los parámetros base para un proceso de congelamiento por cambio de presión. Para este equipo experimental los parámetros básicos a tener en cuenta son: tiempo mínimo de enfriamiento, presión máxima de trabajo y relación para la medición de presión

Se realizaron pruebas mostrativas de congelamiento rápido en alimentos, en este caso nectarines. Estas pruebas no dieron los resultados esperados al descongelar, pero si mejores que los obtenidos al congelar a presión ambiente.

Según los resultados obtenidos en las pruebas mostrativas, las frutas al estar congeladas se ajustan a lo esperado. La textura aparente de la fruta congelada por HPSF resulta ser menor rígida que la congelada en presión ambiente.

El tipo de hielo obtenido es hielo tipo I, aparentemente con un tamaño de grano muy pequeño. Esto sugerido por las observaciones cualitativas realizadas sobre trozos de hielo obtenidos en la cámara.

6.2. Comentarios y recomendaciones

Se debieron realizar distintas modificaciones al diseño original durante la construcción de la cámara, estos problemas fueron resueltos con éxito y forman parte de todo trabajo de innovación en ingeniería. Se recomienda el rediseño y reconstrucción del émbolo mayor del multiplicador de presión de la cámara, para evitar los problemas existentes de corte de sello.

La desnaturalización observada en las pruebas mostrativas, puede ser debida a como se realizo el descongelamiento de la fruta. Se puede deber a una recristalización de los cristales de hielo por una baja velocidad de descongelamiento. En experiencias futuras se recomienda implementar un método de descongelamiento rápido.

De los parámetros básicos para la operación de la cámara, el referente a tiempo de enfriamiento depende del tipo de refrigerante empleado. Esto obedece al gradiente térmico que se pueda generar y la capacidad calórica del refrigerante, que influyen en la tasa de transferencia de calor.

Se hace necesaria el rediseño de algunas piezas de la cámara y equipos anexos, entre los cuales se encuentran: la leva de la caja de aceite, el émbolo mayor del multiplicador de presión. Además se debe contemplar el cómo introducir dentro de la cámara una termocupla para medir temperatura interna, así como encontrar un método para medir la presión interna de la zona de alta.

Para poder corroborar el tamaño de los cristales generados se hace necesario un refinamiento en los métodos de observación de tamaño de los cristales, lo cual no fue posible durante este trabajo de memoria debido a falta de recursos.

Capítulo 7

Bibliografía

- [1] NORTON, T. et al. 2007 *Recent advances in the use of high pressure as an effective precessing technique in the food industry*. Springer Science.
- [2] BING LI. et al. 2001. *Novel methods for rapid freezing aon thawing of foods - a review*. Elevation.
- [3] FERNÁNDEZ, P.P. et al 2005. *High-pressure shift versus high-pressure assisted freezing: Effects on the microstructure of a food model*. Elsevier.
- [4] Norton, T. et al. 2008 *Simulation of high pressure freezing processes by enthalpy method*. Elsevier.
- [5] OTERO, L. SANZ, PEDRO. 2003. *Modelling heat transfer in high pressure food processing: a review*. Elsevier.
- [6] TCHIJOV, VLADIMIR. 2004. *Heat capacity of high-pressure ice polymorphs*. Elsevier.
- [7] ASME BOILER & PRESSURE VESSEL COMMITTEE. 2004. *ASME Boiler & Pressure vessel code*, Section 8 Division 2 and 3. The american society of mechanical engineers.
- [8] SHIEGLEY, J. et al. 2004. *Standard Handbook of Machine Design, 3rd Edition*, Chapters 21-25-39. McGraw-Hill Professional.
- [9] HALL, A.S. et al. 1961. *Schaum´s outline of theory and problems of machine design*, Chapter 12. McGraw-Hill.
- [10] SHIEGLEY, J. et al. 2007. *Shiegley´s Mechanical Engineering Design, Eighth Edition*. McGraw-Hill.
- [11] MARTIN, M.A. 2005. *Apuntes de conservación de alimentos, Conservación por aplicación de bajas temperaturas: Congelación*. Universidad autónoma de Madrid. (En línea) http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/mariamc/conservacion/tema10.htm
- [12] CHEFTEL, J.C. et al. 2001. *Pressure-assisted freezing and thawing of foods: a review of recent studies*. Taylor & Francis.

- [13] LEBAIL, A. et al 2001. *High pressure frezing and thawing of foods: a review*. Elsevier.
- [14] SPAIN, L, JAC PAAUWE. *High pressure technology*, pag 88-91. CRC Press.
- [15] JUN-CHUNG HUNG, CHINGHUA HUNG. *The design and development of a hydrostatic extrusion apparatus*. Elsevier.
- [16] TRACY HALL, H. *High-Pressure Techniques*. (en linea) <http://67.50.46.175/pdf/chapter2.pdf>

Anexo A

Memoria de Calculo Cámara de Alta Presión

A.1. Calculo Cámara

Para el diseño del estanque se hará uso del código ASME de estanques de presión[7], sección 8 división 3, referente al diseño y construcción de estanques de alta presión. El estanque a diseñar será de tipo multicapas contraídas una sobre la otra.

A.1.1. Esquema del estanque

A rasgos generales el estanque contará con paredes circulares y 2 tapas a sus costados, con un pistón en su interior que actúa como multiplicador de presión. El estanque será construido usando capas contraídas una sobre otra.

Con el fin de tener una idea de la estructura del estanque para tener en claro las partes de este se presenta el siguiente esquema de como está constituido(ver figura A.1).

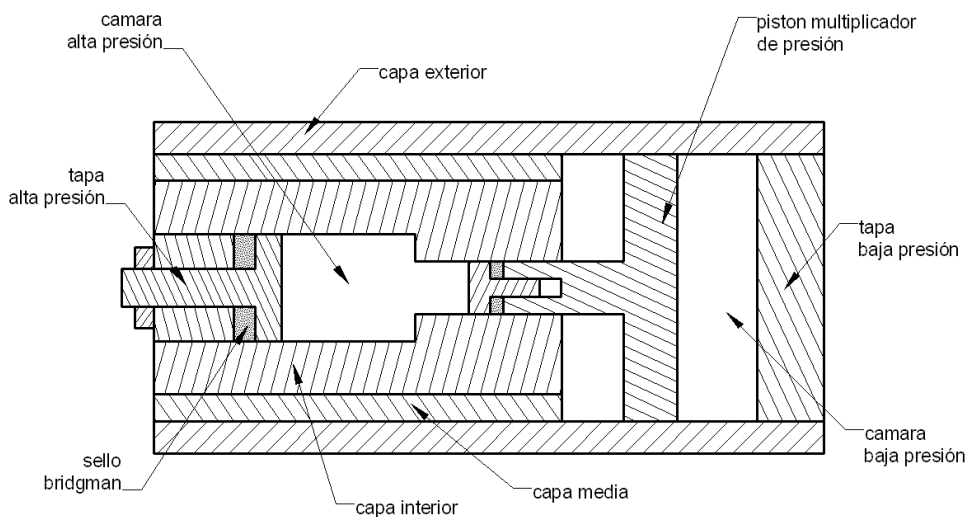


Figura A.1: Esquema del estanque, corte transversal.

El estanque se puede definir en 2 zonas una de alta presión que sera diseñara para presión de 200[MPa] y una de baja presión diseñada para 10[Mpa], ambas zonas dividas por un pistón que actuá como multiplicador de presión. En la cámara de baja presión ingresara aceite a presión que presionara este lado del pistón, que por efecto de reducción de área multiplicara la presión en el lado opuesto del pistón. Como el agua posee un comportamiento compresible a una presión de 200[MPa] se considera una carrera en el pistón. Se considerara que las tapas del estanque seran atornillas dentro de las cámaras.

A.1.2. Paredes

El espesor de las paredes circulares se calcula según Código ASME ([7]) Sección 8 división 3 KD 251.1

$$P_D = \sum \frac{2}{3}(S_y) \ln(Y)$$

$$Y = \frac{D_{ext}}{D_{int}}$$

Donde;

P_D es la presión de diseño;

S_y es la resistencia elástica del material de la capa;

Y es la relación entre diámetros, siendo la razón entre diámetro exterior e interior de esa capa;

D_{ext} es el diámetro exterior de la capa;

D_{int} es el diámetro interior de la capa.

El espesor se calcula ingresando relaciones entre diámetros de las capas de tal forma que la suma sea mayor que la presión de diseño.

De esta ecuación anterior se puede considerar que el factor 2/3 corresponde al inverso del factor de seguridad, es decir el factor ocupado es de 3/2. Para los cálculos de espesor de capas del estanque se considerara un factor de seguridad de 3, por lo tanto, el espesor se calcula

$$P_D = \sum \frac{1}{3}(S_y) \ln \left(\frac{D_{ext}}{D_{int}} \right) \quad (A.1)$$

Para este estanque se impone que su pared interior sera de acero AISI 4340, por lo tanto S_{y4340} sera de 800[MPa], con un modulo elástico de 210[GPa]. Para las 2 paredes mas externas, estas seran de acero AISI 1045 con S_{y1045} de 340[MPa], con un modulo elástico de 210[GPa].

Pared alta presión

Para las paredes de la cámara de alta presión se considera un diámetro interior de cámara de 0.04[m], un espesor de 0.02[m] para la primera capa, 0.01[m] para la segunda capa y 0.015[m] para la tercera capa. Entonces el diámetro exterior de la primera capa sera de 0.08[m], 0.1[m] para el diámetro exterior de la segunda capa, 0.13[mm] para el diámetro exterior de la tercera capa. Calculando A.1

$$P = \frac{1}{3}(340) \cdot \left(\ln\left(\frac{0,08}{0,04}\right) + \ln\left(\frac{0,1}{0,08}\right) \right) + \frac{1}{3}(800) \cdot \ln\left(\frac{0,13}{0,1}\right) [MPa]$$
$$P = 44,6 + 37,9 + 235,6 [Mpa] = 318,21 [MPa]$$

La presión que es capaz de soportar esta sección de la cámara con las dimensiones impuestas es de 318.21[MPa], lo cual es superior a la presión de diseño para esta parte que es de 200[MPa].

Pared cámara embolo menor

Para las paredes de la cámara del embolo menor se considera un diámetro interior de cámara de 0.02[m], un espesor de 0.03[m] para la primera capa, 0.01[m] para la segunda capa y 0.015[m] para la tercera capa. Entonces el diámetro exterior de la primera capa sera de 0.08[m], 0.1[m] para el diámetro exterior de la segunda capa, 0.13[mm] para el diámetro exterior de la tercera capa. Calculando A.1

$$P = \frac{1}{3}(340) \cdot \left(\ln\left(\frac{0,08}{0,02}\right) + \ln\left(\frac{0,1}{0,08}\right) \right) + \frac{1}{3}(800) \cdot \ln\left(\frac{0,13}{0,1}\right) [MPa]$$
$$P = 44,6 + 37,9 + 471,3 [Mpa] = 553,8 [MPa]$$

La presión que es capaz de soportar esta sección de la cámara con las dimensiones impuestas es de 553.8[MPa], lo cual es superior a la presión de diseño para esta parte que es de 200[MPa].

Pared baja presión

Para las paredes de la cámara del embolo mayor se considera un diámetro interior de cámara de 0.1[m], un espesor de 0.015[m] para la capa. Entonces el diámetro exterior de la capa sera de 0.13[m].
. Calculando A.1

$$P = \frac{1}{3}(340) \cdot \ln\left(\frac{0,13}{0,1}\right) [MPa] = 35,68 [MPa]$$

La presión que es capaz de soportar esta sección de la cámara con las dimensiones impuestas es de 35.68[MPa], lo cual es superior a la presión de diseño para esta parte que es de 16[MPa] (ver sección A.1.4).

A.1.3. Esfuerzos sobre paredes

residuales

Los esfuerzos residuales en el estanque provienen de la contracción de una capa sobre la otra, estos esfuerzos se calculan según lo indicado en la referencia [7], artículos KD-811 y KC-812. Como el estanque posee 3 capas se usaran la indicación de KD-812. Según KD-811 la presión de interferencia entre 2 capas se calcula como(KD-811.1)

$$P_{if} = \frac{\delta}{D_{if} \cdot A} \quad (A.2)$$

con

$$A = \frac{1}{E_I} \cdot \left(\frac{D_I^2 + D_{if}^2}{D_{if}^2 - D_I^2} + \nu_I \right) + \frac{1}{E_O} \cdot \left(\frac{D_{if}^2 + D_O^2}{D_O^2 - D_{if}^2} + \nu_O \right) \quad (A.3)$$

Donde;

P_{if} en la presión de interferencia presente entre ambas capas;

δ es la interferencia entre ambas capas;

D_{if} es el diámetro de la interferencia entre ambas capas;

D_I es el diámetro interior de la capa interior;

D_O es el diámetro exterior de la capa exterior;

E_I es el modulo de elástico de la capa interior;

E_O es el modulo elástico de la capa exterior;

ν_I el coeficiente de Poisson de para la capa interior;

ν_O el coeficiente de Poisson de para la capa exterior.

El esfuerzo residual para 2 capas se calcula según KD 811.2, para la capa interior ($D_I \leq D \leq D_{if}$)

$$\sigma_{tr} = -\frac{P_{if}Y_I^2}{Y_I^2 - 1} \cdot \left(1 + \frac{D_I^2}{D^2} \right) \quad (A.4)$$

$$\sigma_{rr} = -\frac{P_{if}Y_I^2}{Y_I^2 - 1} \cdot \left(1 - \frac{D_I^2}{D^2} \right) \quad (A.5)$$

para la capa exterior ($D_{if} \leq D \leq D_O$)

$$\sigma_{tr} = -\frac{P_{if}}{Y_O^2 - 1} \cdot \left(1 + \frac{D_O^2}{D^2}\right) \quad (\text{A.6})$$

$$\sigma_{rr} = -\frac{P_{if}}{Y_O^2 - 1} \cdot \left(1 - \frac{D_O^2}{D^2}\right) \quad (\text{A.7})$$

con

$$Y_I = D_{if}/D_I$$

$$Y_O = D_O/D_{if}$$

A.1.4. Multiplicador de presión

relación de áreas y presión en embolo mayor

El multiplicador de presión cumple la función de incrementar la presión en uno de sus extremos, se aplica una presión en el lado que posee un embolo de gran área para pasar esa fuerza a un embolo de menor área, consiguiendo un incremento de presión proporcional a la razón de las áreas de los émbolos. El diámetro del embolo menor es de $0.02[m]$, su área (A_{men}) es de $0.00125[m^2]$. El diámetro del embolo mayor (A_{may}) es de $0.1[m]$, su área es de $0.03141[m^2]$. Dividiendo ambas áreas para obtener la razón de multiplicación de presión.

$$\frac{A_{may}}{A_{men}} = 0,00125/0,03141 = 25$$

Entonces si se aplica una presión en el embolo mayor esta se vera multiplicada 25 veces en el embolo menor. Como se desea alcanzar $200[MPa]$ en la camara de alta presión, entonces esta presión que de proporcionar el embolo menor, entonces la presión a aplicar en el embolo mayor sera.

$$P_{emay} = \frac{200}{25}[MPa] = 8[Mpa]$$

La presión necesaria en el embolo mayor es de $8[MPa]$, para fines de calculo se impone que la presión en el embolo mayor sera de $16[MPa]$

Carrera del multiplicador

A una presión de $200[Mpa]$, el agua es compresible, por lo cual existirá una reducción del volumen de esta, esta disminución se estima en un 5%. Entonces la carrera del embolo menor del multiplicador

sera igual al 5 % del volumen de la camara mas el volumen inicial de la camara del embolo menor. Considerando la camara con un diámetro de 0.04[m] y un largo de 0.05[m], su volumen es de $6,28 * 10^{-5}[m^3]$; con un camara de embolo menor de 0.02[m] de diámetro y un largo de 0.02[m], su volumen es de $6,28 * 10^{-6}[m^3]$. El volumen combinado de ambos es de $6,91 * 10^{-5}[m^3]$. El volumen que debe avanzar el embolo menor ($V_{carrera}$) corresponde al 5 % del volumen antes calculado, esto es $3,45 * 10^{-6}[m^3]$. Luego el largo de la carrera sera.

$$L_{carrera} = \frac{V_{carrera}}{0,01^2 * \pi} = 0,011[m]$$

Dimensiones multiplicador

Las dimensiones del multiplicador son:

- diámetro embolo mayor = 0.1[m]
- diámetro embolo menor = 0.02[m]
- espesor embolo mayor = 0.015[m]
- largo embolo menor = 0.05[m]

La confirmación de las dimensiones del pistón son realizadas según elementos finitos, esto se ve en detalle en la sección A.2.3

A.1.5. Tapas

Para poder realizar el diseño de las tapas se debe de calcular el espesor de la tapa tal que resista la presión sobre ella y se debe calcular el largo del hilo tal que este resista el esfuerzo sobre el.

El espesor mínimo de las tapas se calcula según el código ASME para estanques de presión sección 8 división 2 articulo D-7, se usa este articulo debido a que en la sección 8 división 3, referente a estanques de alta presión, no existe una forma analítica de como calcular el espesor de tapas. Las tapas a usar seran planas, estas se calculan según la siguiente ecuación (AD-702).

$$T = d \cdot \sqrt{\frac{C \cdot P}{S}} \quad (A.8)$$

Donde;

T es el espesor mínimo de la tapa;

d es diámetro de la tapa;

P es la presión interna de diseño;

C es un factor que depende de la forma como se disponga la tapa en el estanque;

S es el valor del límite elástico de la tapa.

El valor del factor C se impone como 0.3, se impone este valor debido a que no se encontró un valor apropiado para tapas con hilo, por lo tanto se absorbe esta incertidumbre imponiendo un factor C de valor elevado. Para el límite de elasticidad S se asumirá un factor de seguridad de valor 3.

La carga axial W sobre la tapa se calcula a partir de la presión interna de diseño, la carga axial es la razón entre presión y el área sobre la cual actúa la presión.

El largo del hilo se calcula suponiendo que este se comportara como una viga en voladizo tal como se modela en la referencia [9], los esfuerzos en el hilo se calculan como

$$S_b = \frac{3W \cdot h}{2\pi n r_m b^2} \quad (\text{A.9})$$

$$S_s = \frac{W}{2\pi n r_m b} \quad (\text{A.10})$$

Donde;

S_b es el esfuerzo de flexión sobre el hilo;

S_s es el esfuerzo de corte sobre el hilo; W es la carga axial sobre la tapa;

h es la altura del hilo;

n es el número de vueltas del hilo que están siendo afectadas por la carga;

b es el ancho de la base del hilo;

r_m es el radio medio de la tapa considerando el hilo.

El tipo de hilo a usar será hilo cuadrado, debido a que este tipo se recomienda para aplicaciones donde el hilo está expuesto a cargas elevadas (tornillos de potencia). Las dimensiones del hilo en función del paso se obtiene a partir de lo indicado en la referencia [10], Capítulo 8, figura 8-3. El paso a usar se impone de $0.005[m]$, por lo tanto $h = 0.0025[m]$ y $b = 0.0025[m]$. En base a este estado de esfuerzos se compara según el criterio de Von Mises para corroborar el diseño.

Alta presión

Para la tapa ubicada en la cámara de alta presión, considerando un diámetro de $0.05[m]$ y una presión de diseño de $200[MPa]$, calculando A.8.

$$T = 0,05 \cdot \sqrt{\frac{0,3 \cdot 200}{800/3}} [m] = 0,0168 [m]$$

El espesor mínimo para la tapa de alta presión es de 16.8[mm]

La carga axial sobre la tapa, considerando un diámetro de acción de 0.04[m] y una presión de diseño de 200[MPa], es de.

$$W = \frac{200 \cdot 10^6}{(0,04/2)^2 \pi} [N] = 2,51 \cdot 10^6 [N]$$

La carga axial sobre la tapa es de 2.51*10⁶[N]

Para el hilo sobre los costados de la tapa, se considera un diámetro exterior de 0.05[m], por lo que el radio medio del hilo será de 0.0475[m], y un número de vueltas *n* igual a 5 (25[mm] espesor tapa), calculando A.9 y A.10

$$S_b = \frac{3 \cdot 2,51 \cdot 10^6 \cdot 0,0025}{2\pi \cdot 5 \cdot 0,0475 \cdot 0,0025^2} [Pa] = 202,1 [MPa]$$

$$S_s = \frac{2,51 \cdot 10^6}{2\pi \cdot 5 \cdot 0,0475 \cdot 0,0025} [Pa] = 67,3 [MPa]$$

calculando Von Misses

$$\sigma_{Vm} = \sqrt{0,5 \cdot [(202,1 - 67,3)^2 + 202,1^2 + 67,3^2]} [Mpa] = 178,2 [Mpa]$$

El esfuerzo máximo es de 178.2[Mpa], lo cual da un margen de seguridad de 4.77 considerando el límite elástico del material de 800[Mpa]. Según lo anterior el diámetro exterior de la tapa será de 0.05[m], con un espesor de 25[mm].

Baja presión

Para la tapa ubicada en la cámara de baja presión, considerando un diámetro de 0.1[m] y una presión de diseño de 16[MPa], calculando A.8.

$$T = 0,1 \cdot \sqrt{\frac{0,3 \cdot 16}{800/3}} [m] = 0,0118 [m]$$

El espesor mínimo para la tapa de alta presión es de 11.8[mm]

La carga axial sobre la tapa, considerando un diámetro de acción de 0.1[m] y una presión de diseño de 16[MPa], es de.

$$W = \frac{16 * 10^6}{(0,04/2)^2 \pi} [N] = 1,25 * 10^5 [N]$$

La carga axial sobre la tapa es de $1.25 * 10^5 [N]$

Para el hilo sobre los costados de la tapa, se considera un diámetro exterior de 0.105[m], por lo que el radio medio del hilo será de 0.1025[m], y un número de vueltas n igual a 6 (30[mm] espesor tapa), calculando A.9 y A.10

$$S_b = \frac{3 * 1,25 * 10^5 * 0,0025}{2\pi * 5 * 0,1025/2 * 0,0025^2} [Pa] = 58,5 [MPa]$$

$$S_s = \frac{2,51 * 10^6}{2\pi * 5 * 0,1025/2 * 0,0025} [Pa] = 19,5 [MPa]$$

calculando Von Misses

$$\sigma_{Vm} = \sqrt{0,5 * [(58,5 - 19,5)^2 + 58,5^2 + 19,5^2]} [Mpa] = 51,6 [Mpa]$$

El esfuerzo máximo es de 51.6[Mpa], lo cual da un margen de seguridad de 16.4 considerando el límite elástico del material de 800[Mpa]. Según lo anterior el diámetro exterior de la tapa será de 0.105[m], con un espesor de 30[mm].

A.2. Estudio según elementos finitos

El estudio de elementos finitos presentado en esta sección, fue realizado usando las presiones de diseño consideradas para la cámara y sus componentes, usando las dimensiones principales obtenidas en la sección A.1. El objetivo de este estudio es confirmar si la cámara y sus componentes es capaz de resistir el estado de esfuerzos impuesto por la presión que sera aplicada en su interior.

A.2.1. Paredes Cámara

Las paredes de la cámara fueron probadas realizando un modelo simplificado, sin considerar los hilos para la ubicación de las tapas. La porción de la pieza a mallar corresponde a un sexto del total y se aplicaran relaciones de simetría para evaluar el estado total de esfuerzos sobre las paredes de la cámara. El mallado para el estudio fue hecho considerando elementos sólidos tetraédricos con un tamaño de elementos de $3[mm]$. Existe un afinado de la malla usada ubicada en la superficie interior de los cilindros de la zona de alta presión, comprende 3 capas con un tamaño de elementos de $1[mm]$. El mallado se puede ver en la figura A.2

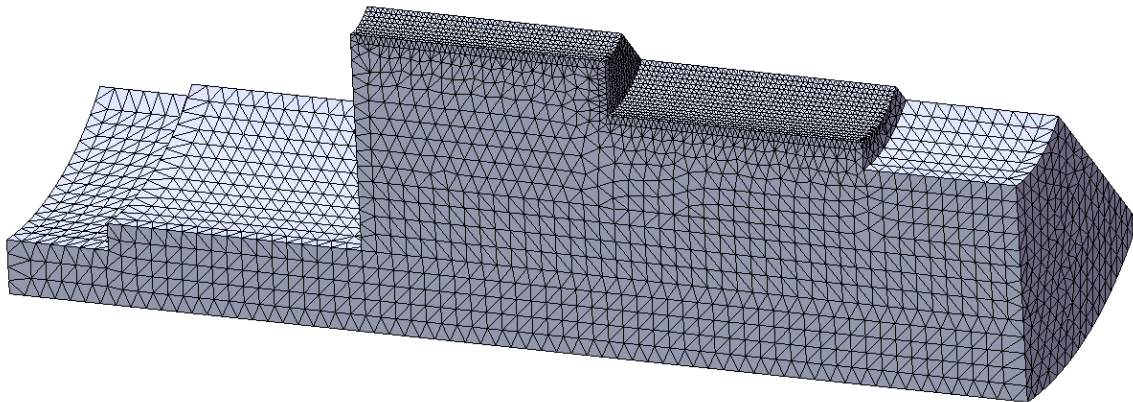


Figura A.2: Mallado para las paredes de la cámara.

Las cargas aplicadas fueron dos(ver figura A.3), una sobre la zona de alta presión que corresponde a $200[MPa]$ que en la figura aparece en color amarillo, la segunda carga corresponde a $20[MPa]$ en rojo. Las restricciones usadas fueron de simetría en las caras laterales en color verde agua en la figura, la segunda restricción es de tipo rodillo/deslizamiento.

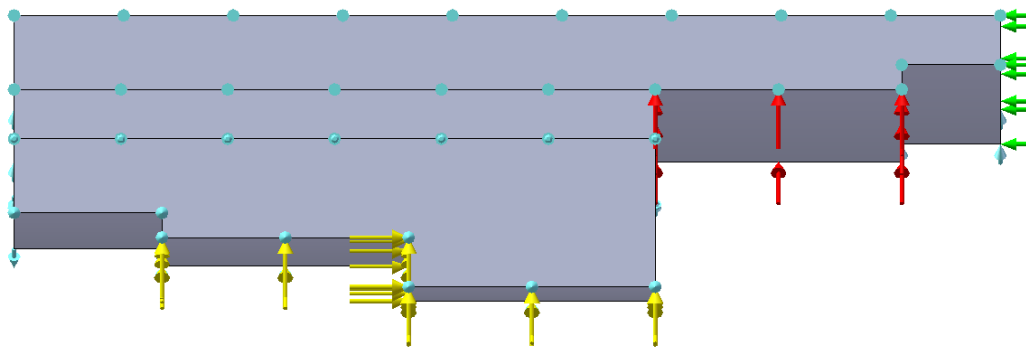


Figura A.3: Cargas sobre las paredes de la cámara.

Los resultados del estado de esfuerzos al realizar el análisis según elementos finitos se presentan en la figura A.4. En la figura A.5 se muestra un detalle en el lugar donde se presentan los mayores esfuerzos para esta pieza. Los esfuerzos presentes en la cámara no superan los $562 [MPa]$.

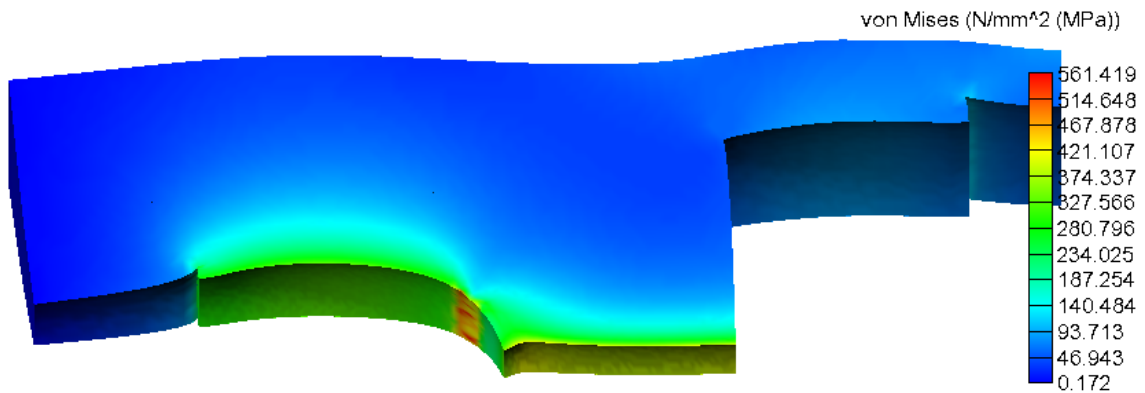


Figura A.4: Estado esfuerzos pared cámara.

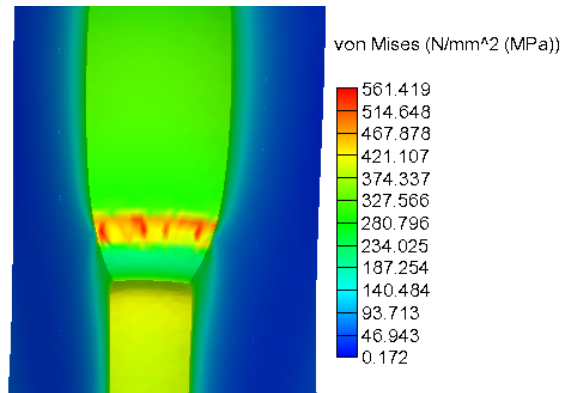


Figura A.5: Estado esfuerzos pared cámara, detalle.

A.2.2. Tapas Cámara

Para la tapa de baja presión, se estudia en su totalidad considerando las 3 aberturas que posee. La porción de la pieza a mallar corresponde a un sexto del total y se aplicaran relaciones de simetría para evaluar el estado total de esfuerzos sobre esta parte de la tapa de alta presión. El mallado para el estudio fue hecho considerando elementos sólidos tetraédricos con un tamaño de elementos de 2.85[mm]. El mallado se puede ver en la figura A.6

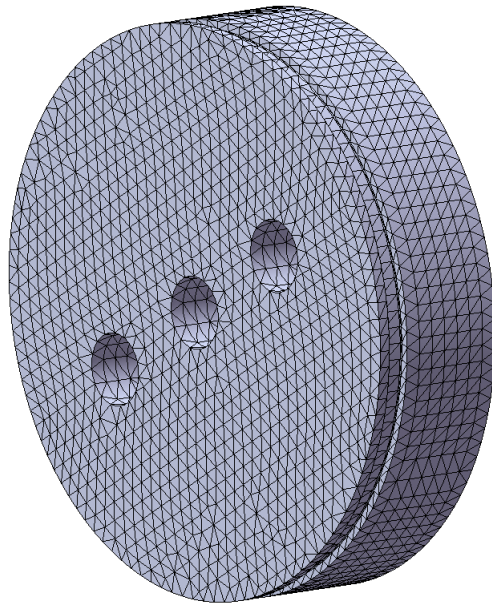


Figura A.6: Mallado para la tapa baja presión.

La carga y restricción aplicada se muestra en la figura A.7. La carga aplicada corresponde a $20[MPa]$, rojo en la figura. La restricción usada es de tipo fija, verde en la figura.

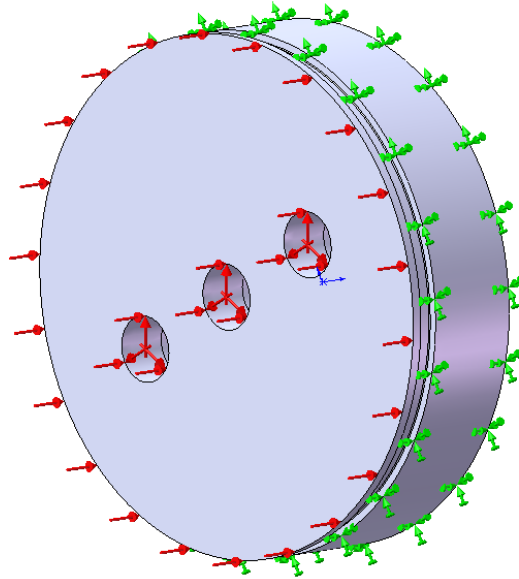


Figura A.7: Cargas y restricciones para la tapa baja presión.

Los resultados del estado de esfuerzos al realizar el análisis según elementos finitos se presentan en la figura A.8. El mayor esfuerzo registrado según este estudio es de casi $139[MPa]$, concentrándose en la zona donde se ubica el o-ring de sello.

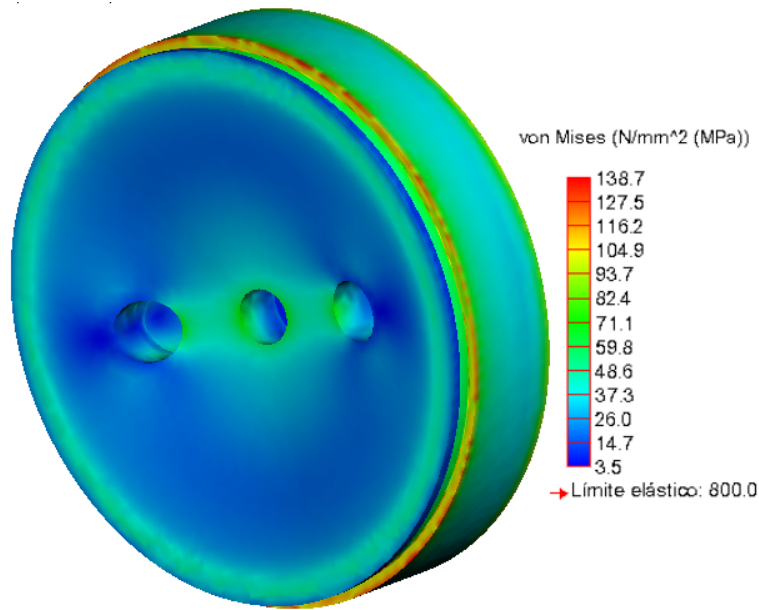


Figura A.8: Estado esfuerzos tapa baja presión.

Para la tapa de alta presión se divide el estudio para el pistón y el cuerpo que lleva el hilo. Para el pistón de la tapa de alta presión, el mallado para el estudio fue hecho considerando elementos sólidos tetraédricos con un tamaño de elementos de 1.22[mm]. El mallado se puede ver en la figura A.9

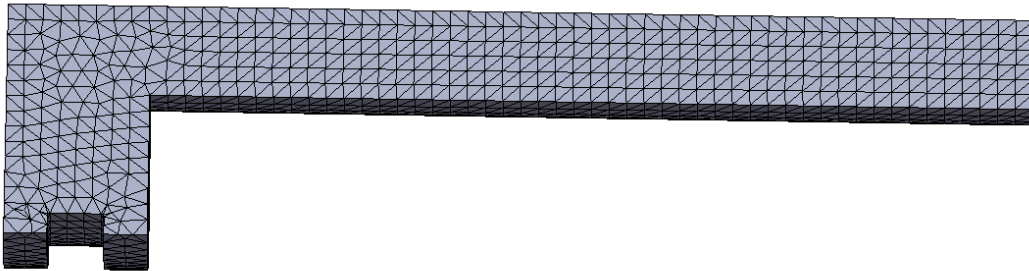


Figura A.9: Mallado para pistón tapa alta presión.

La carga y restricciones aplicadas se muestra en la figura A.10. La carga aplicada corresponde a 200[MPa], rojo en la figura. Existe una restricción de simetría sobre los lados de la pieza en color verde en la figura, una restricción de tipo deslizamiento en color amarillo en la figura y una restricción de tipo bisagra en color azul en la figura.

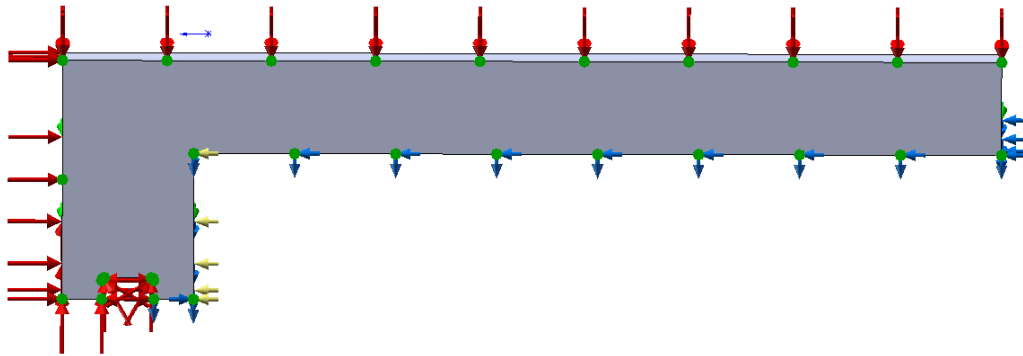


Figura A.10: Cargas y restricciones para pistón tapa alta presión.

Los resultados del estado de esfuerzos al realizar el análisis según elementos finitos se presentan en la figura A.8. Según estos resultados los esfuerzos presentes en el pistón de la tapa de alta presión no superan los $426[MPa]$.

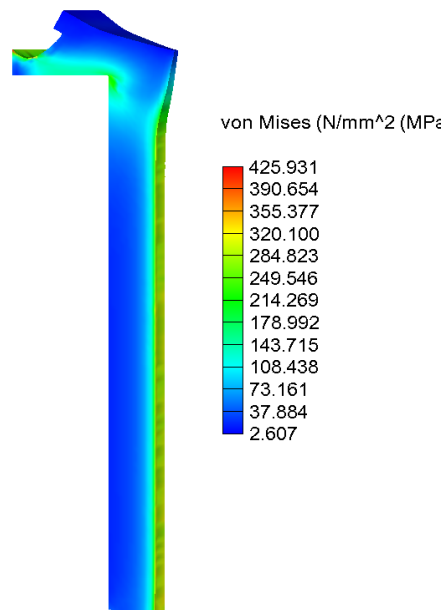


Figura A.11: Estado esfuerzos pistón tapa alta presión.

Para la tapa de alta presión, no se consideran los hilos que esta posee. La porción de la pieza a mallar corresponde a un sexto del total y se aplicaran relaciones de simetría para evaluar el estado total de esfuerzos sobre esta parte de la tapa de alta presión.

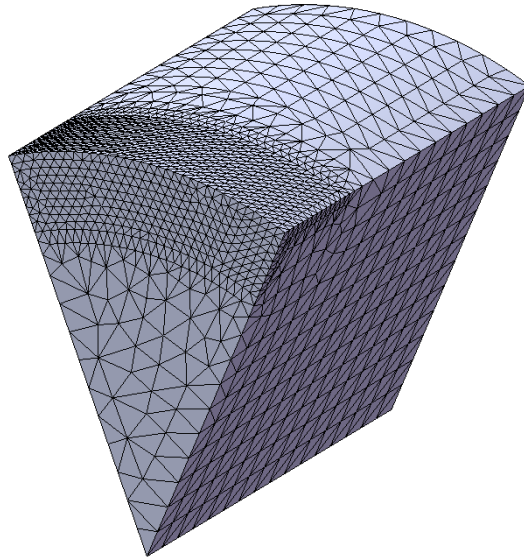


Figura A.12: Mallado para cuerpo tapa alta presión.

El mallado para el estudio fue hecho considerando elementos sólidos tetraédricos con un tamaño de elementos de $1[mm]$. Existe un afinado de la malla usada ubicada en la esquina superior de la tapa, que comprende 3 capas con un tamaño de elementos de $0.6[mm]$. El mallado se puede ver en la figura A.12.

La carga y restricciones aplicadas se muestra en la figura A.13. La carga aplicada corresponde a $200[MPa]$, rojo en la figura. Existe una restricción de simetría sobre los lados de la pieza en color verde en la figura, una restricción de tipo fijo en color amarillo en la figura.

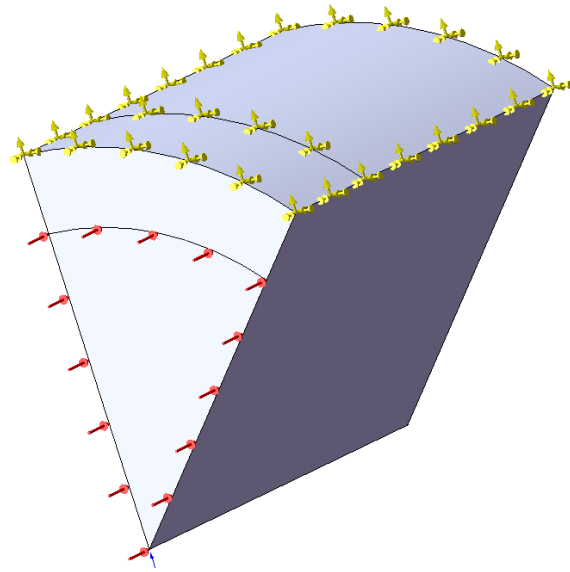


Figura A.13: Cargas y restricciones para cuerpo tapa alta presión.

Los resultados del estado de esfuerzos al realizar el análisis según elementos finitos se presentan en la figura A.14. Según estos resultados los esfuerzos presentes en la tapa de alta presión no superan los $324[MPa]$.

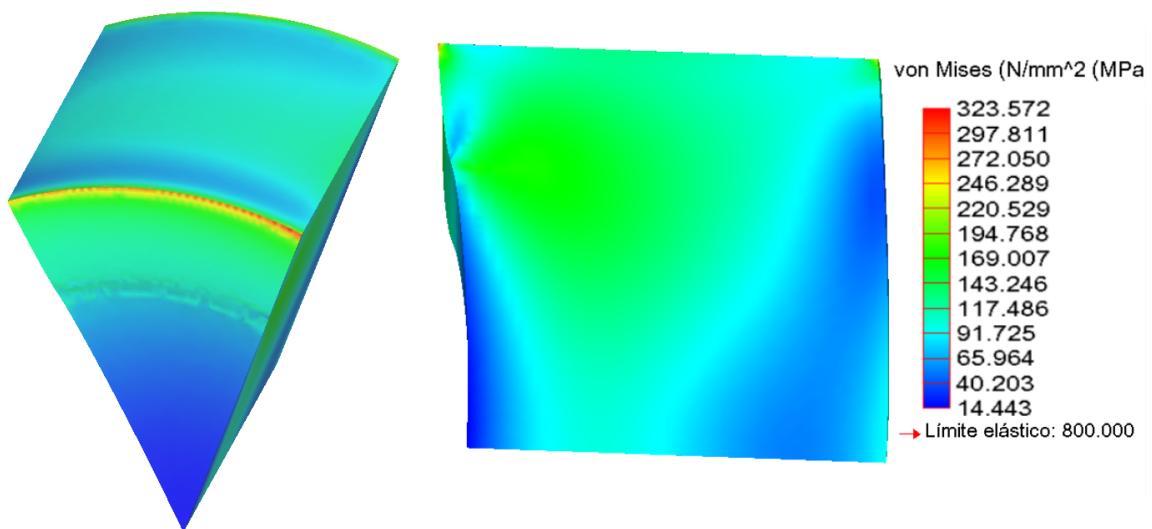


Figura A.14: Estado esfuerzos cuerpo tapa alta presión.

A.2.3. Pistón Multiplicador

Para el pistón multiplicador, la porción de la pieza a mallar corresponde a un sexto del total y se aplicaran relaciones de simetría para evaluar el estado total de esfuerzos sobre el multiplicador de presión. El mallado para el estudio fue hecho considerando elementos sólidos tetraédricos con un tamaño de elementos de $1.25[mm]$. El mallado se puede ver en la figura ??

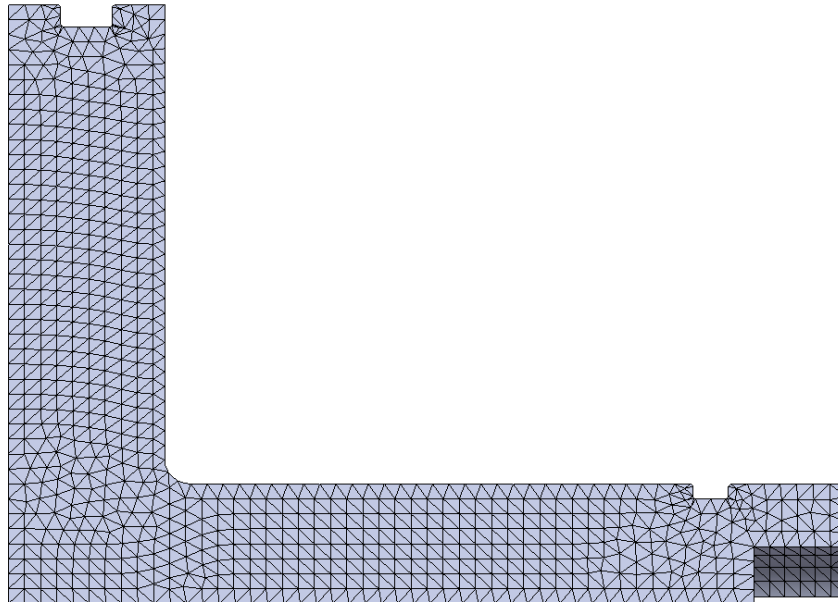


Figura A.15: Mallado para el multiplicador de presión.

La cargas y restricciones aplicadas se muestran en la figura A.16. La primera carga aplicada corresponde a $250[MPa]$ en amarillo, segunda carga corresponde a $20[MPa]$ en rojo . Existe una restricción de simetría sobre los lados de la pieza en color verde en la figura, una restricción de tipo bisagra en color azul en la figura.

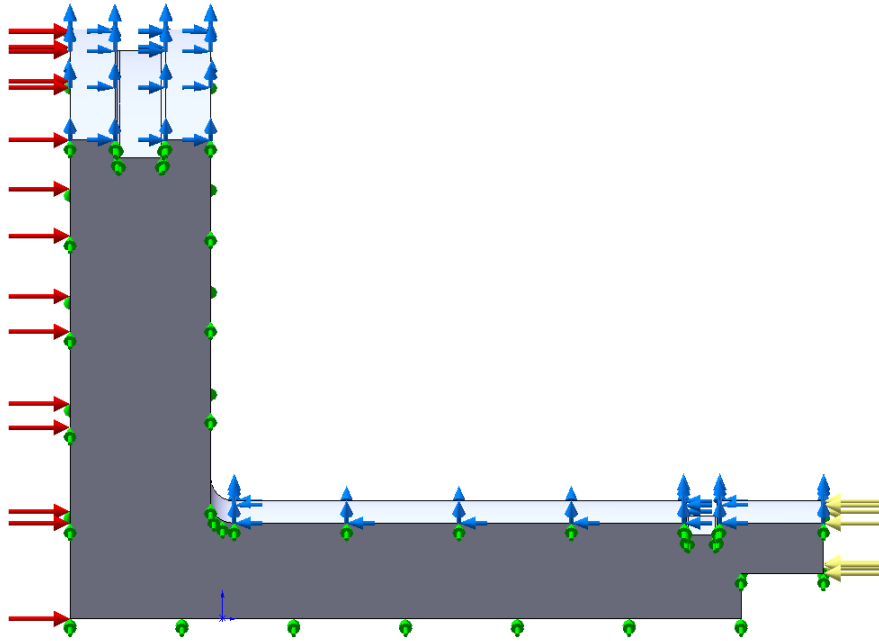


Figura A.16: Cargas y restricciones para el multiplicador de presión.

Los resultados del estudio de esfuerzos se muestran en la figura A.17. Se muestra un corte transversal del multiplicador, en esta figura queda claro que los esfuerzos no superan los $634[MPa]$, no superando el límite elástico del material.

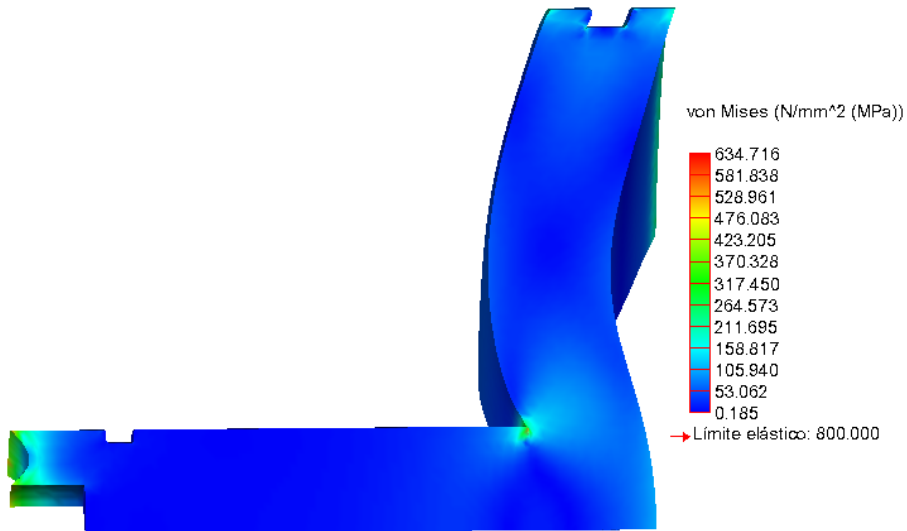


Figura A.17: Corte del multiplicador de presión mostrando estado de esfuerzos internos.

Los esfuerzos se concentran en la base del embolo menor y en la parte superior de este, en la figura A.18 se ve en detalle, mostrando el volumen de la pieza que se encuentra con esfuerzos por sobre 200 $[MPa]$.



Figura A.18: Detalle concentración de esfuerzos máxima.

A.2.4. Conjunto Cámara

Para el estudio de la cámara, se incluyen las tapas, como si fueran un todo junto con las paredes, dejando un espacio en donde se encuentra la interface con las tapas, para representar el traslape con estas. La porción del conjunto a mallar corresponde a un sexto del total y se aplicaran relaciones de simetría para evaluar el estado total de esfuerzos. El mallado para el estudio fue hecho considerando elementos sólidos tetraédricos con un tamaño de elementos de $2[mm]$. El mallado se puede ver en la figura A.19

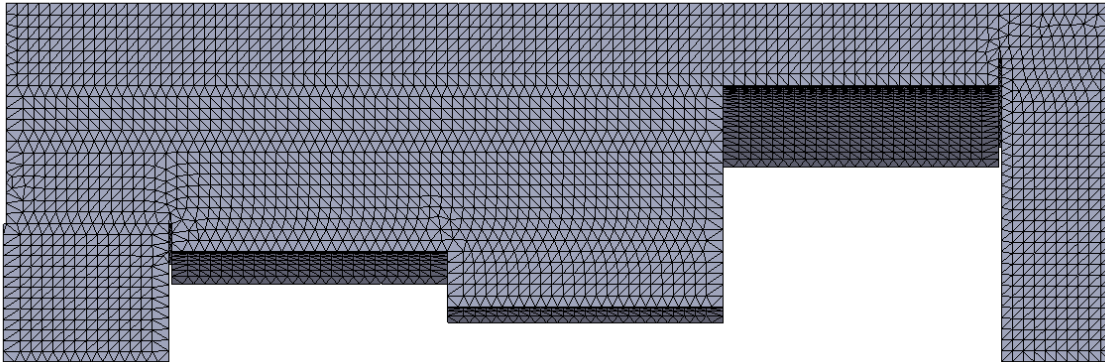


Figura A.19: Mallado para el conjunto cámara.

La cargas y restricciones aplicadas se muestran en la figura A.20. La primera carga aplicada corresponde a $200[MPa]$ en rojo, segunda carga corresponde a $20[MPa]$ en amarillo. Existe una restricción de simetría sobre los lados de la pieza en color verde en la figura, una restricción de tipo deslizamiento en color azul en la figura.

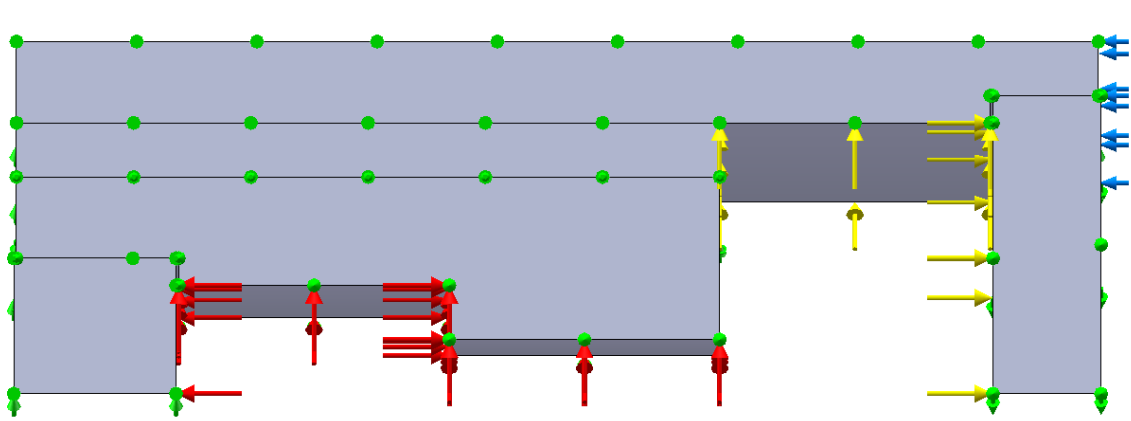


Figura A.20: Mallado para el conjunto cámara.

Los resultados del estudio de esfuerzos se muestran en la figura ???. Se muestra un corte transversal del multiplicador, en esta figura queda claro que los esfuerzos no superan los $770[MPa]$.

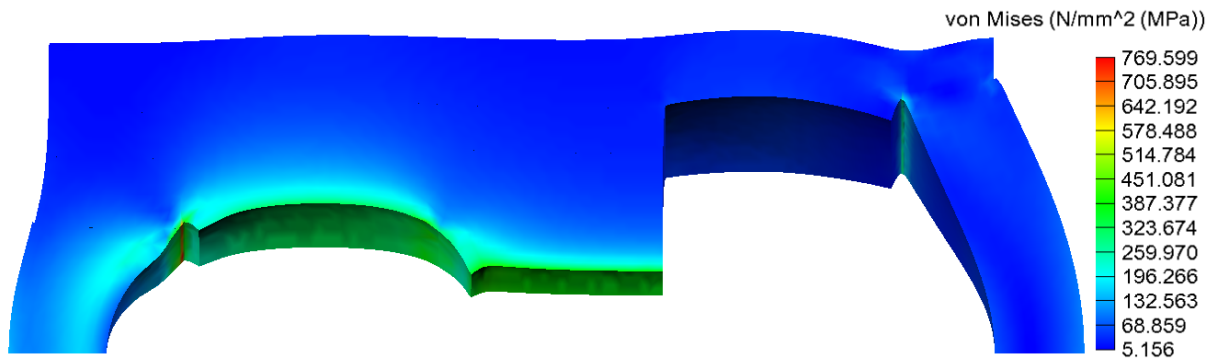


Figura A.21: Concentración de esfuerzos conjunto cámara.

El mayor esfuerzo es registrado en la interface entre la cámara y la tapa de alta presión, esto se puede deber al hecho que no se considera la forma en que se distribuyen los esfuerzos al existir un hilo en esa parte. En la figura /refeefconjdet se muestra un detalle de los esfuerzos en dicha parte, mostrandose los esfuerzos por sobre los 300[MPa].

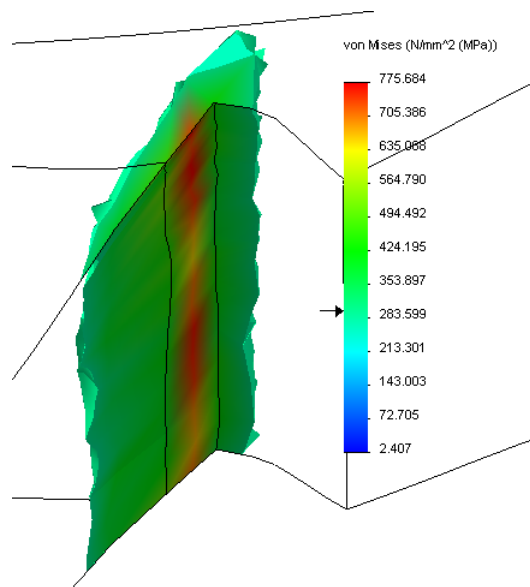


Figura A.22: Concentración de esfuerzos conjunto cámara, detalle.

A.3. Cálculo calor a extraer de la cámara

El calor a extraer de la cámara se calcula considerando la diferencia de temperatura que se debe lograr, el volumen a enfriar y las propiedades físicas de los materiales enfriados.

A.3.1. Volúmenes y masas

Los volúmenes a considerar son correspondientes al agua, metal y aceite. El volumen de agua se calcula en función de las dimensiones de la cámara interior de alta presión y la porción del recorrido del embolo menor del multiplicador de presión que esta ocupado por agua. El largo de cámara menor es de $50[mm]$ y el radio es de $20[mm]$, la porción estimada de recorrido del embolo menor es de $20[mm]$ y su radio es de $10[mm]$. El volumen entonces es de:

$$V_{agua} = 50 \cdot \pi \cdot (20)^2 + 20 \cdot \pi \cdot (10)^2 [mm^3]$$
$$V_{agua} = 69115,03 [mm^3] = 6,9115 \cdot 10^{-05} [m^3]$$

Multiplicando por la densidad del agua se obtiene la masa a enfriar.

$$m_{agua} = 6,9115 \cdot 10^{-05} \cdot 1000 [Kg]$$
$$m_{agua} = 0,06911 [Kg]$$

El volumen de aceite se calcula en base al diámetro del embolo mayor del multiplicador de presión y la distancia máxima permitida entre la tapa inferior y la cara inferior del embolo mayor del multiplicador de presión. El radio del embolo es de $0.05[m]$ y el largo es de $0.04[m]$. El volumen entonces es de:

$$V_{aceite} = 0,04 \cdot \pi \cdot (0,05)^2 [m^3]$$
$$V_{aceite} = 31,416 \cdot 10^{-05} [m^3]$$

Multiplicando por la densidad del aceite se obtiene la masa a enfriar. La densidad considerada es estimada.

$$m_{aceite} = 31,416 \cdot 10^{-05} \cdot 850 [Kg]$$
$$m_{aceite} = 0,267 [Kg]$$

El volumen del metal se determina usando una herramienta del programa de diseño mecánico utilizado *SolidEdge* que indica el volumen de cada una de las piezas o del conjunto. El volumen de la cámara es de $0,00304[m^3]$, se considera la densidad del metal (Acero) como $7840[\frac{Kg}{m^3}]$. La masa de metal a enfriar es de

$$m_{aceite} = 0,00304 \cdot 10^{-05} \cdot 7840[Kg]$$

$$m_{aceite} = 23,88[Kg]$$

A.3.2. Calor a extraer

La diferencia de temperatura a considerar es entre la temperatura ambiente y la temperatura ideal en la cual desarrollar el proceso *HPSPF*, entonces la temperatura inicial se estima como $20^{\circ}C$ y la final como $-20^{\circ}C$. La diferencia de temperatura es de $-40[K]$. Para seguir calculando se requieren los calores específicos de cada material. El calor específico del agua es de $4[\frac{KJ}{Kg \cdot K}]$, el calor específico del aceite es de $5[\frac{KJ}{Kg \cdot K}]$, el calor específico del aceite es de $0,48[\frac{KJ}{Kg \cdot K}]$. El calor a extraer por material es de:

$$C_{agua} = 0,06911 \cdot 4 \cdot -40[KJ] = 11,05[KJ]$$

$$C_{aceite} = 0,267 \cdot 5 \cdot -40[KJ] = 53,4[KJ]$$

$$C_{agua} = 23,88 \cdot 0,48 \cdot -40[KJ] = 458,53[KJ]$$

Sumando

$$C_{extraer} = 11,05 + 54,4 + 458,53[KJ]$$

$$C_{extraer} = 523[KJ]$$

El calor aproximado a extraer de la cámara para baja su temperatura a $-20^{\circ}C$ es de $523[KJ]$.

Anexo B

Diseño y utilización de medidor de presión por deformación

El método usado para medir la presión interna de la zona de alta presión, consiste en una escala empírica a base de la deformación ejercida sobre una pieza de metal. Este principio es usado en medición de presión de gases en piezas de artillería, de donde nace la idea para medir presiones muy elevadas usando un método similar.

La deformación medida es la producida por un indentador tipo "Brinell", que posee un rodamiento de acero de diámetro 10[mm]. El parámetro a medir es el diámetro de la indentación producida. El indentador esta alojado dentro de un cilindro de acero 4340, con un pistón de diámetro 15[mm]. Posee 2 sellos tipo o-ring para evitar la filtración de agua hacia dentro de la cámara dentro indentador, lo cual arruinaría la medición (Ver imagen B.1). El metal usado para realizar las indentaciones es acero 1020 en barra trefilada de diámetro 14[mm].



Imagen B.1: Cilindro indentador.

Si el diámetro del pistón es de 15[mm] y la presión que sera ejercida sobre este es de 200[MPa], entonces la fuerza de indentación sera de 35342,9[N], equivalentes a 3606,4[Kg]. Para pasar de la carga

Carga [Kg]	diámetro identación [mm]
2500	4.2
3000	4.4
3500	5.0
4000	5.75
4500	6.4

Tabla B.1: identaciones según carga conocida

aplicada a la presión aplicada sobre el pistón, dicha carga en kilogramos debe ser multiplicada por 55456,65.

Para obtener una escala para medir la presión dentro de la cámara, se realizaron identaciones a distintas cargas conocidas sobre el metal seleccionado, procurando que las piezas a indentar provengan de la misma barra. Las identaciones serán realizadas con las siguientes cargas, 2500, 3000, 3500, 4000 y 4500[Kg], en una maquina para pruebas de compresión *Instrom* facilitada por el IDIC del Ejercito de Chile.

En la siguiente tabla se indican las identaciones realizadas con carga conocida.

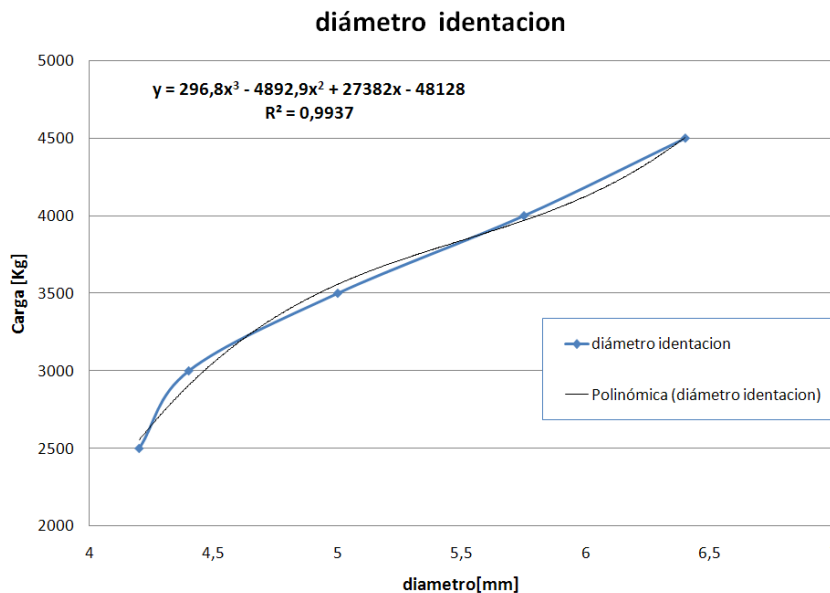


Gráfico B.2: Diámetro de indentacion en función de la carga.

Graficando los datos de la tabla B.1, y utilizando la herramienta de Excel de línea de tendencia se encuentra que los datos se pueden ajustar a un polinomio de grado 3, entonces la ecuación para la carga aplicada es

$$F = 296,8d^3 - 4892,9d^2 + 27382d - 48128$$

Donde F es la carga en $[Kg]$ y d es el diámetro de la indentación en $[mm]$. Para pasar la expresión anterior a términos de presión para la cámara, se debe multiplicar por el factor antes mencionado de 0,05545.

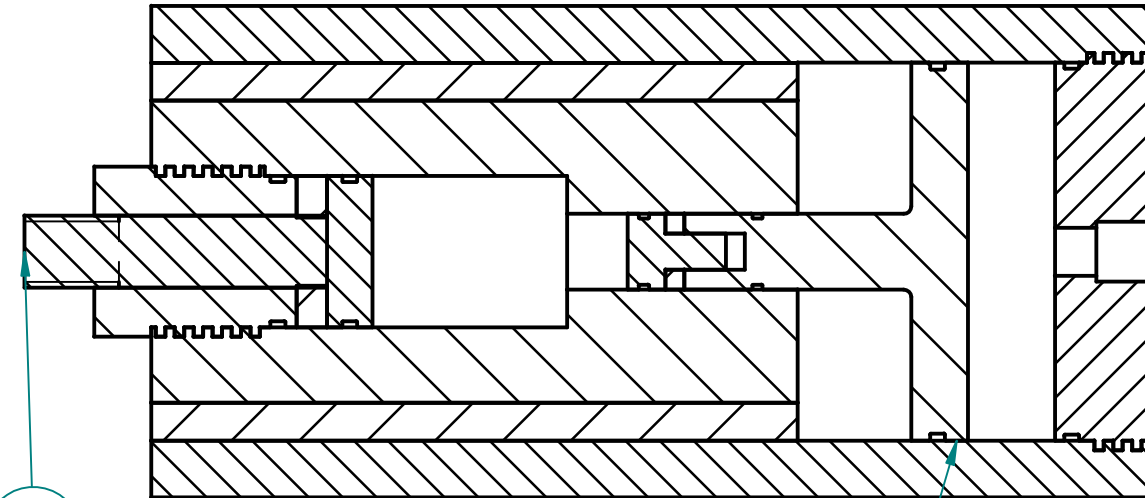
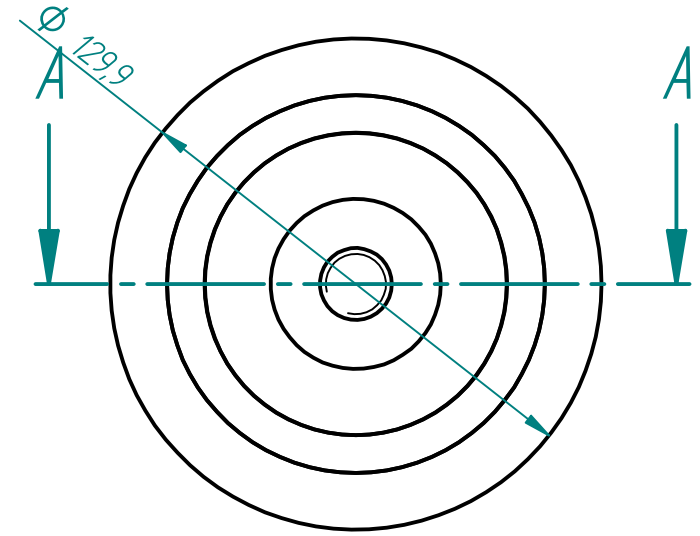
$$P = 16,47d^3 - 271,34d^2 + 1518,51d - 2669,02$$

Donde P es la carga en $[MPa]$ y d es el diámetro de la indentación en $[mm]$. Esta expresión será usada para medir la presión al interior de la zona de alta presión de la cámara.

Anexo C

Planos Cámara de Congelamiento

Camara alta presión para congelamiento por cambio de presión

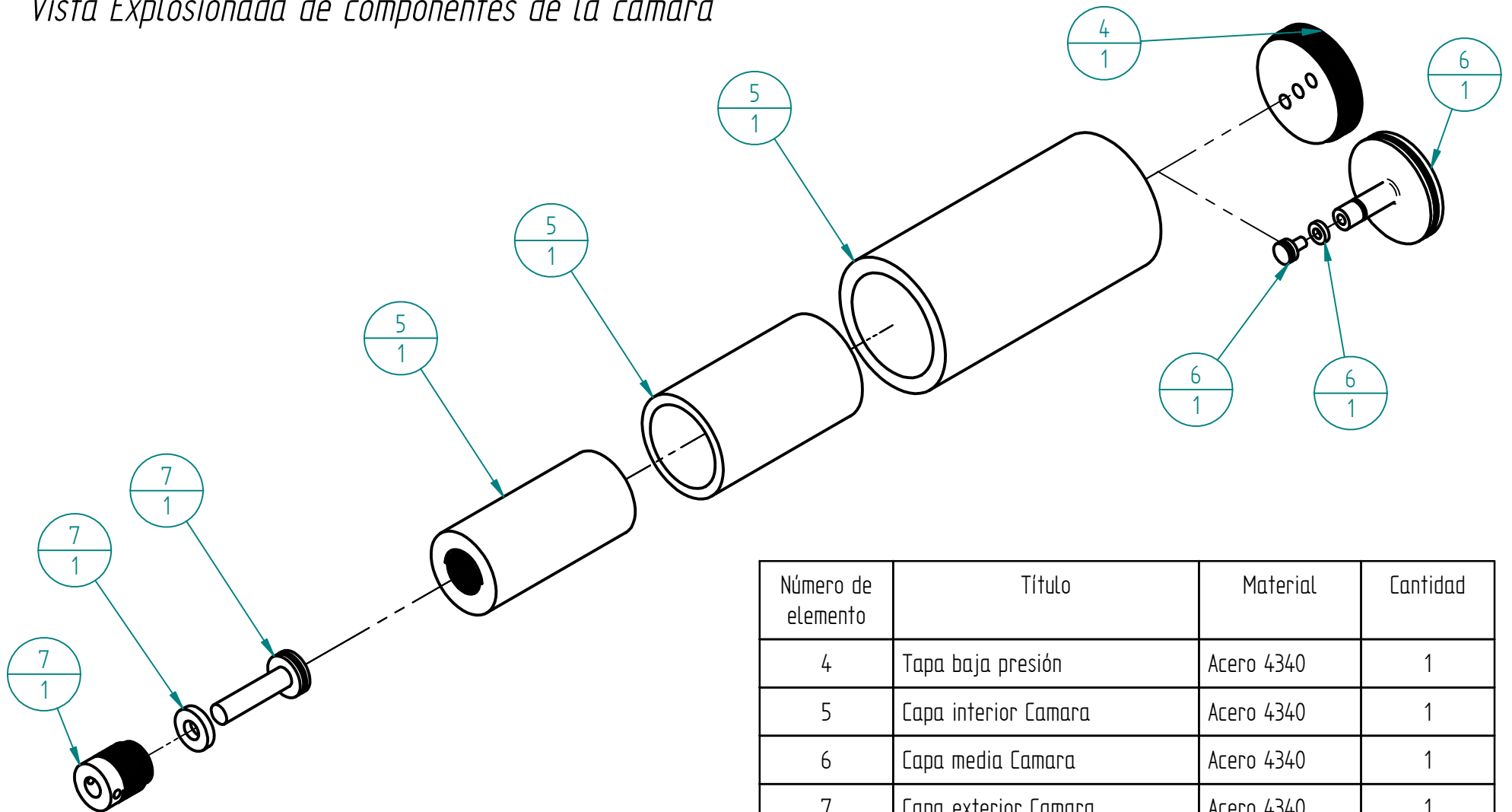


CORTE A-A

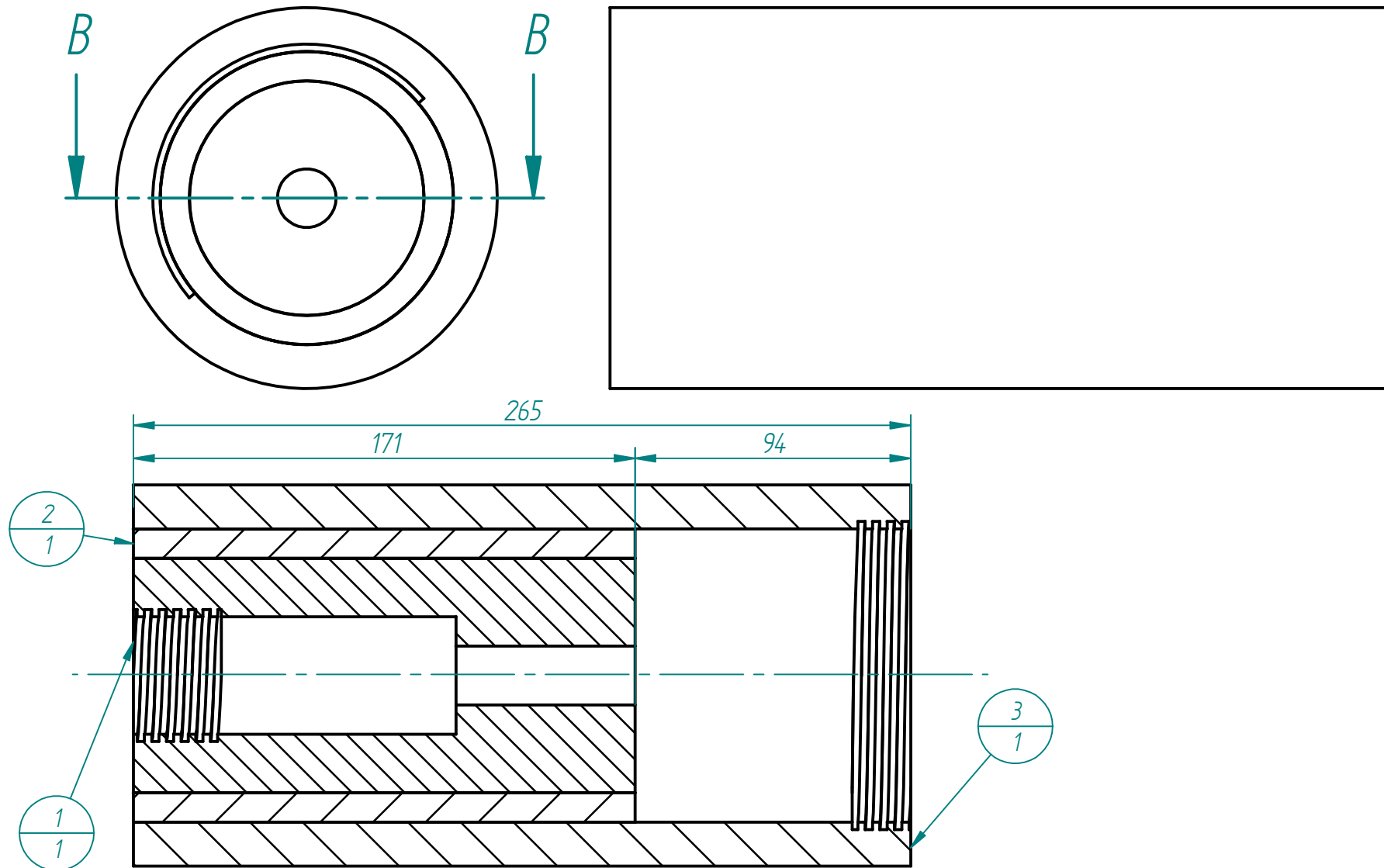
Conjunto Camara

Número de elemento	Título	Material	Cantidad
4	Tapa baja presión	Acero 4340	1
5	Conjunto Camisa Camara		1
6	Multiplicador de presión		1
7	Conjunto tapa de alta presión		1

Vista Explosionada de componentes de la camara



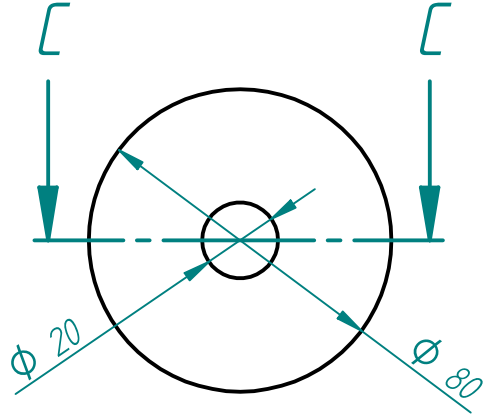
Número de elemento	Título	Material	Cantidad
4	Tapa baja presión	Acero 4340	1
5	Capa interior Camara	Acero 4340	1
6	Capa media Camara	Acero 4340	1
7	Capa exterior Camara	Acero 4340	1
8	Multiplicador de presión	Acero 4340	1
9	Anillo Sello Bridgeman	Bronce	1
10	Piston de sello	Acero 4340	1
11	Tapa alta presión	Acero 4340	1
12	Anillo sello Bridgeman	Bronce	1
13	Piston sello tapa	Acero 4340	1



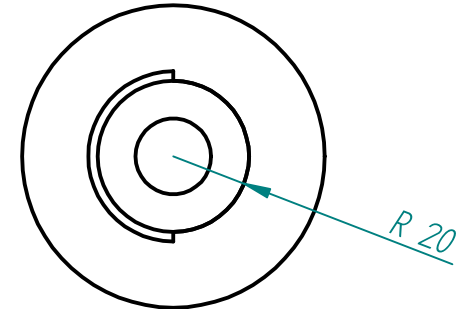
CORTE B-B

Conjunto camisa de la camara de alta presión

Número de elemento	Título	Material	Cantidad
1	Capa interior Camara	Acero 4340	1
2	Capa media Camara	Acero 4340	1
3	Capa exterior Camara	Acero 4340	1

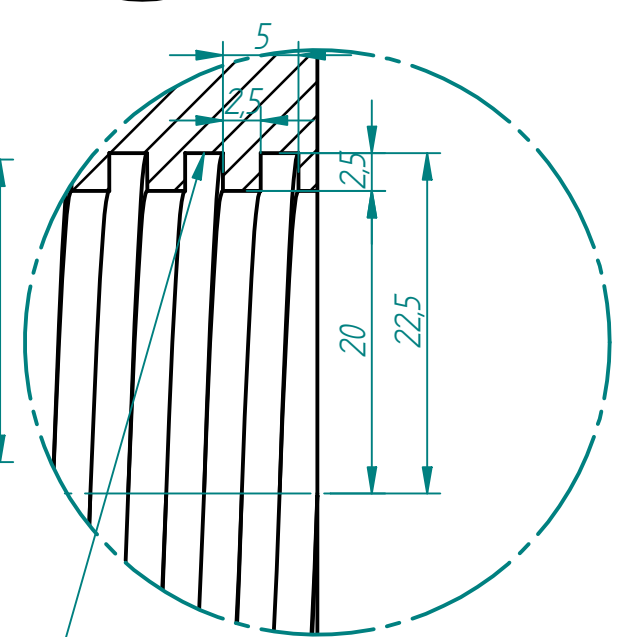
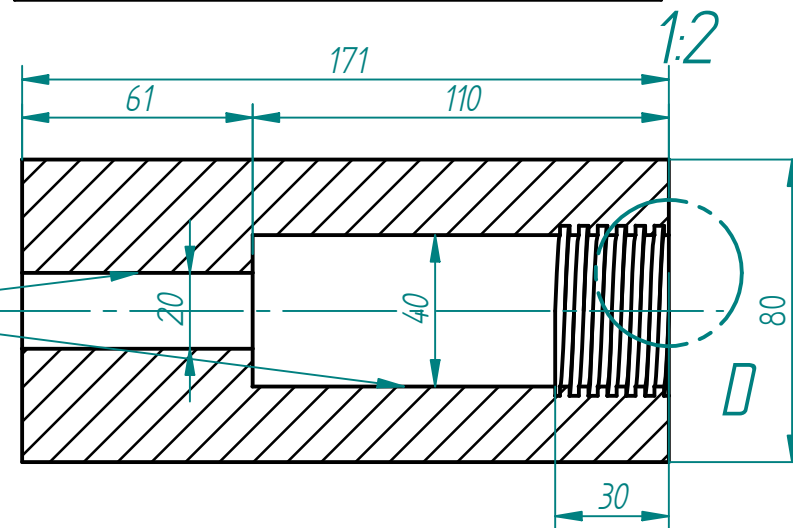


Capa interna camisa
camara



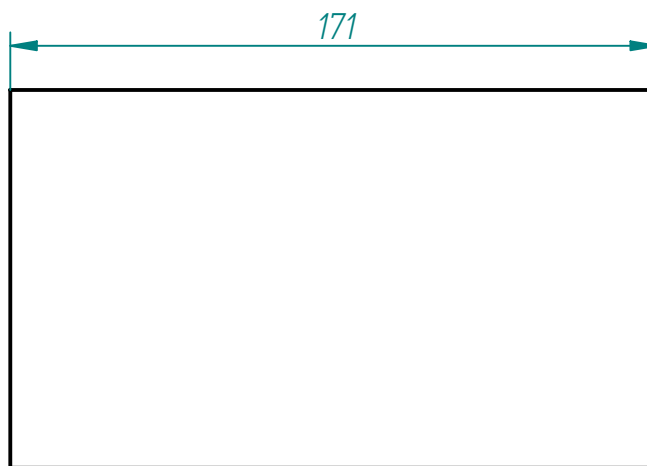
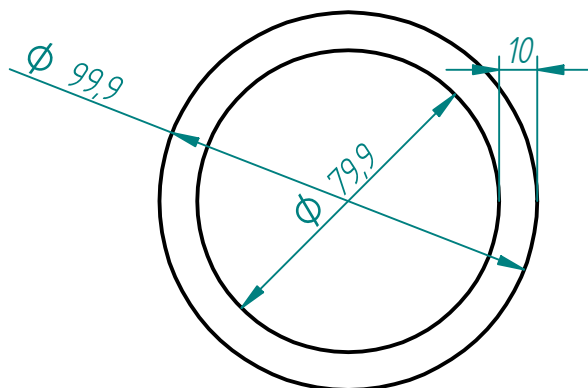
terminacion superficial que
asegure rugosidad menor a $50\mu\text{m}$

CORTE C-C



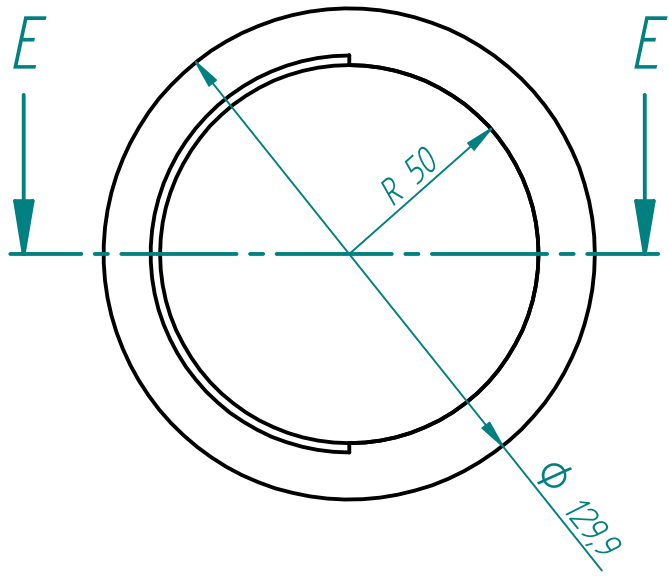
DETALLE D
2:1

Hilo cuadrado, tamaño hilo 2.5mm, extension hilo
30mm

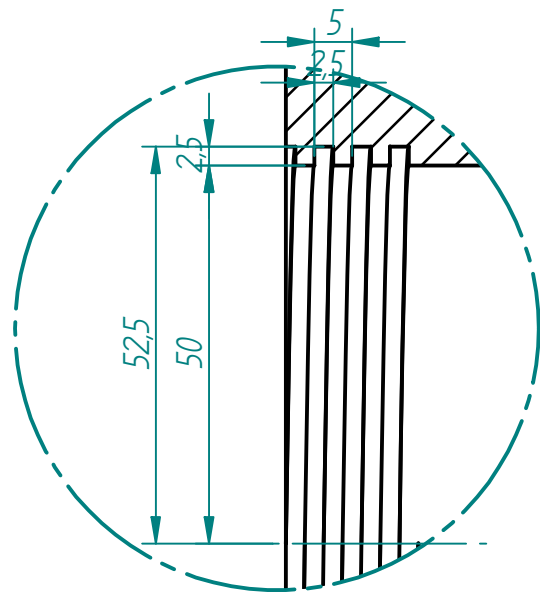


capa media camisa camara

1:2



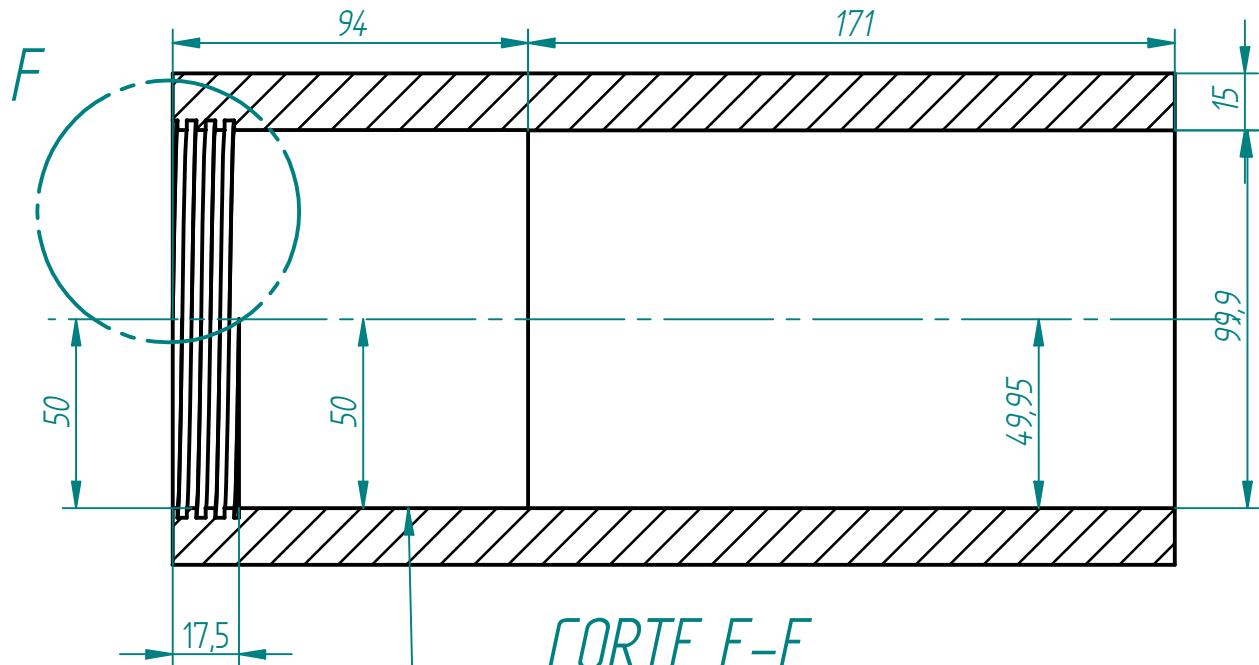
1:2



DETALLE F

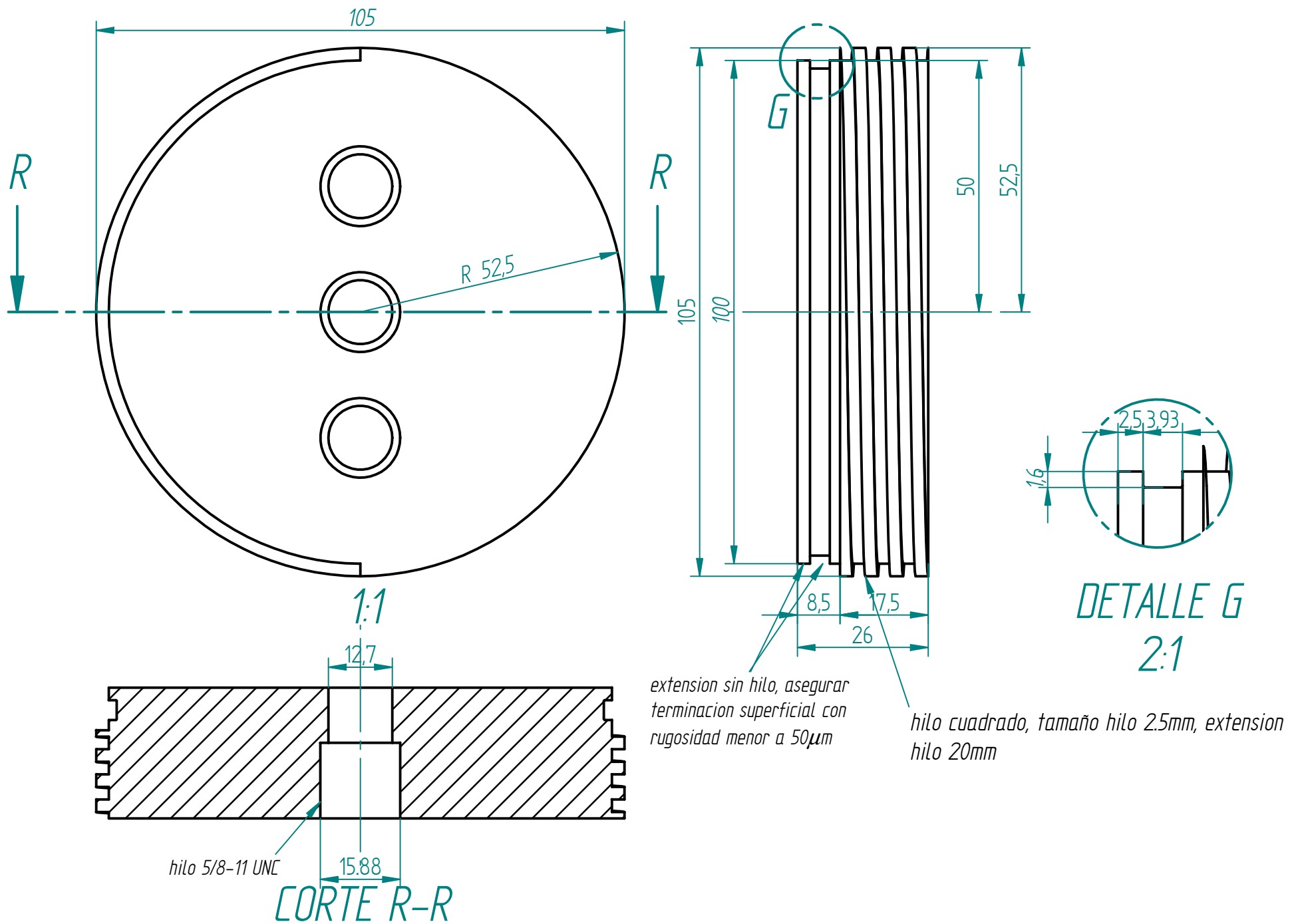
1:1

capa exterior camisa camara



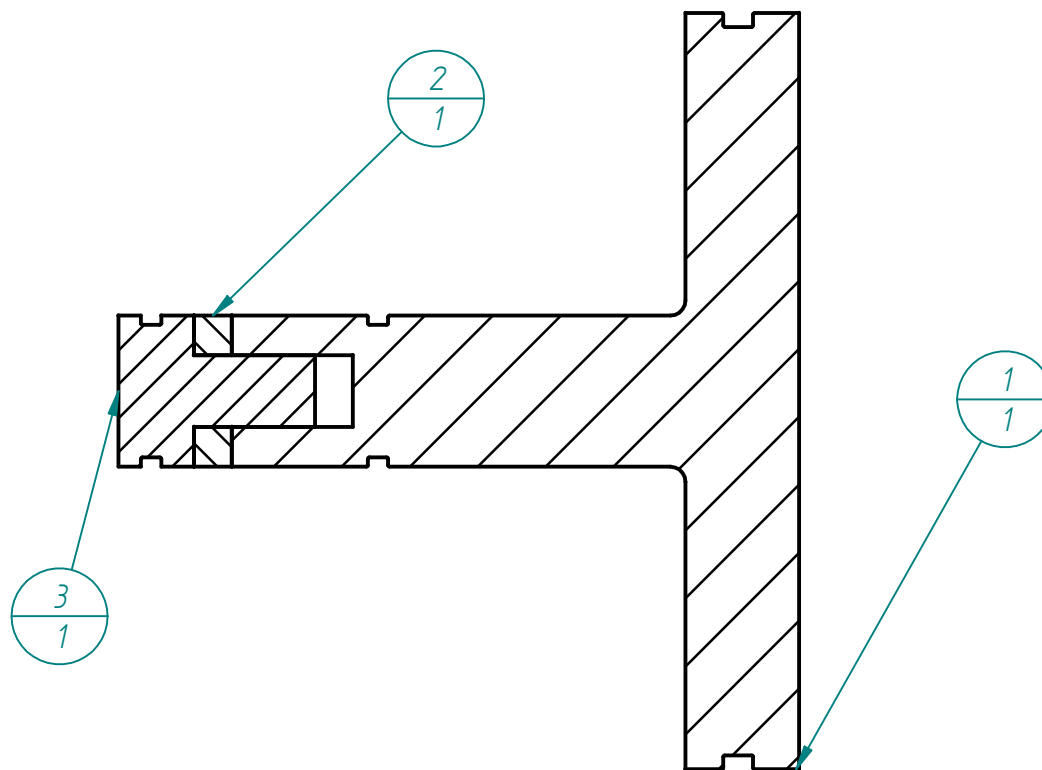
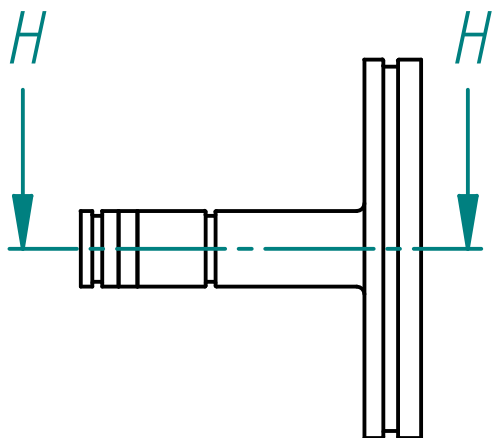
CORTE E-E

cilindrar a 100mm despues de ensamblaje con otras capas, asegurar terminacion superficial con rugosidad menor a 50µm

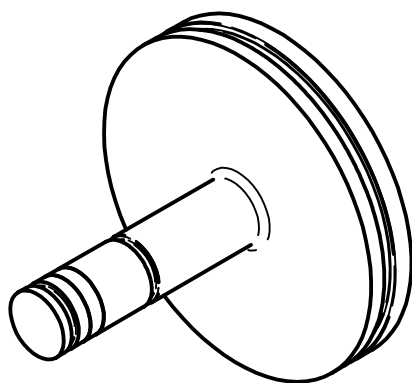


Tapa baja presión

SOLID EDGE ACADEMIC COPY



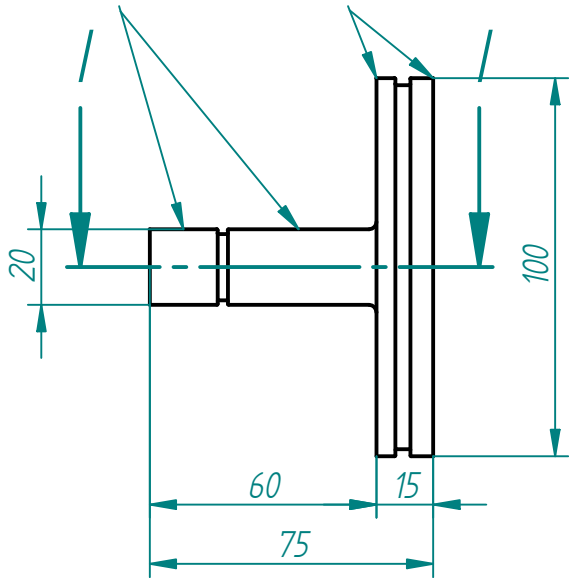
CORTE H-H



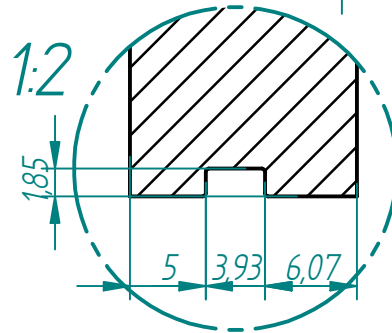
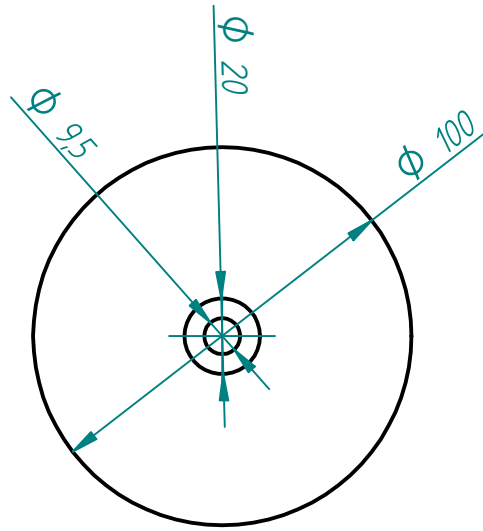
Conjunto Multiplicador de presión

Número de elemento	Título	Material	Cantidad
1	Multiplicador de presión	Acero 4340	1
2	Anillo Sello Bridgeman	Bronce	1
3	Piston de sello	Acero 4340	1

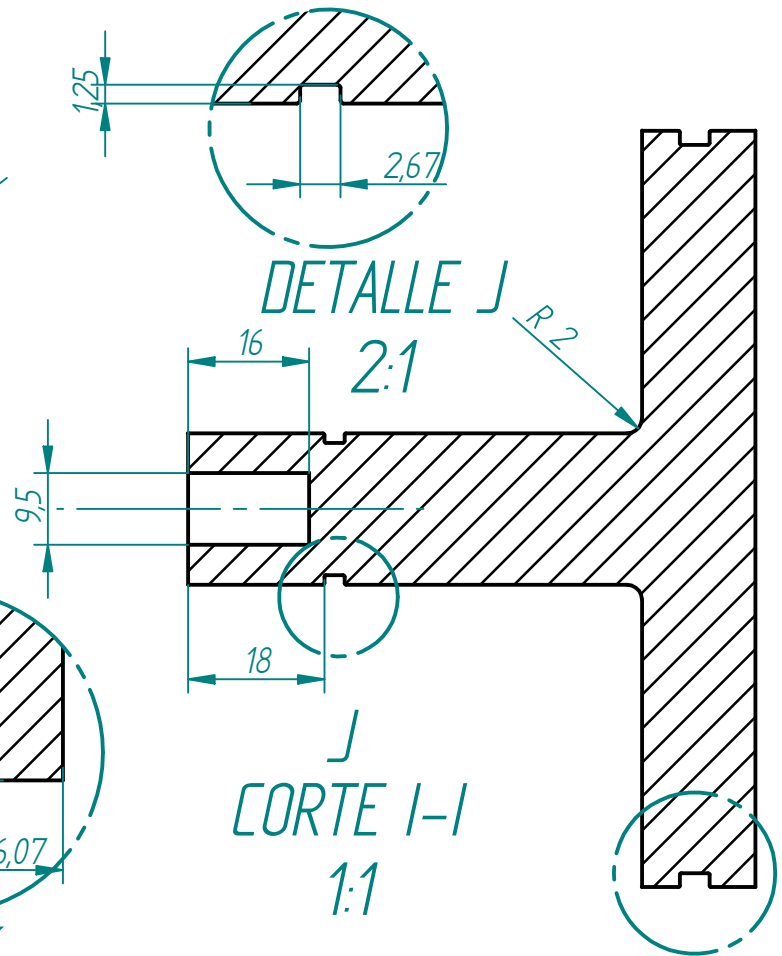
asegurar terminacion superficial con rugosidad menor a $50\mu\text{m}$



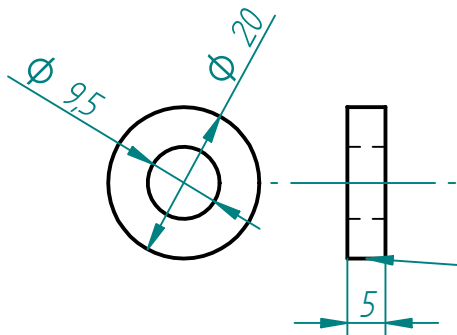
Cuerpo multiplicador de presión



DETALLE K
2:1



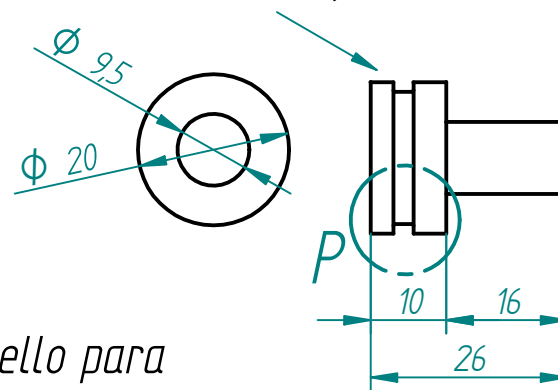
J
CORTE I-I
1:1



Anillo sello Bridgeman para multiplicador de presión

asegurar terminacion superficial con rugosidad menor a $50\mu\text{m}$

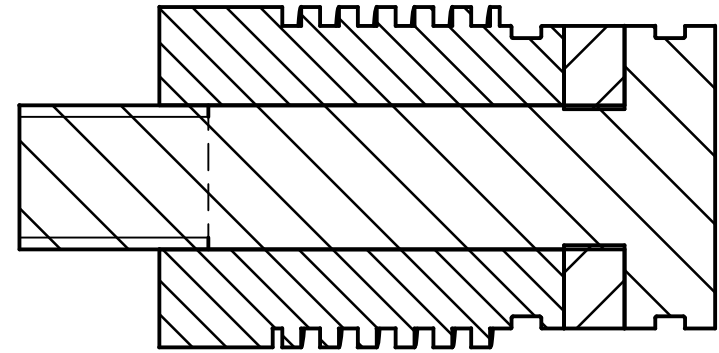
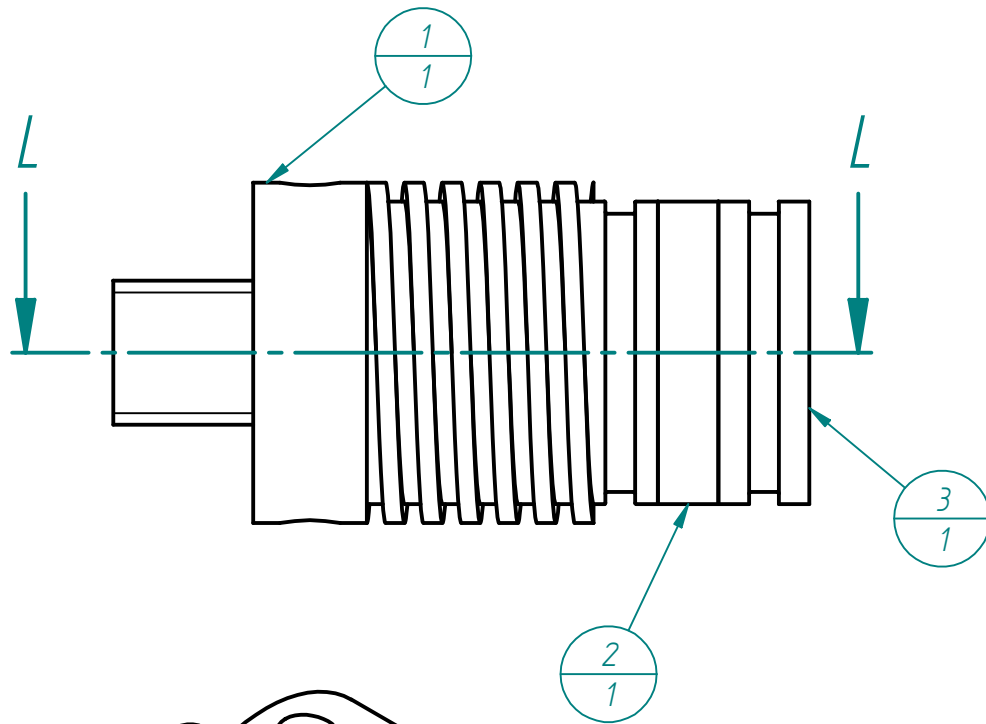
asegurar terminacion superficial con rugosidad menor a $50\mu\text{m}$



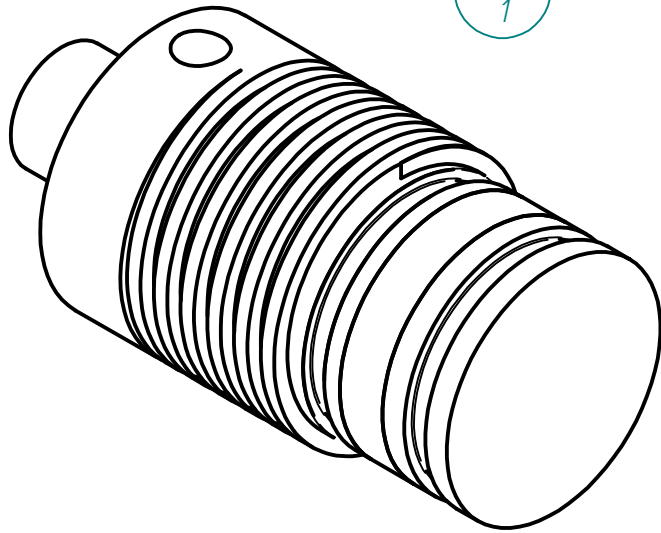
K

DETALLE P

Piston de Sello para multiplicador de presión

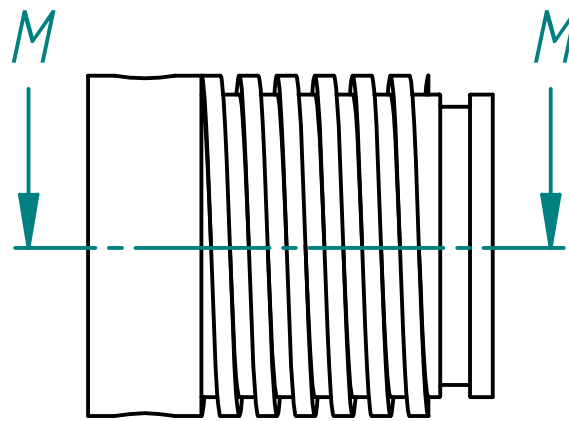
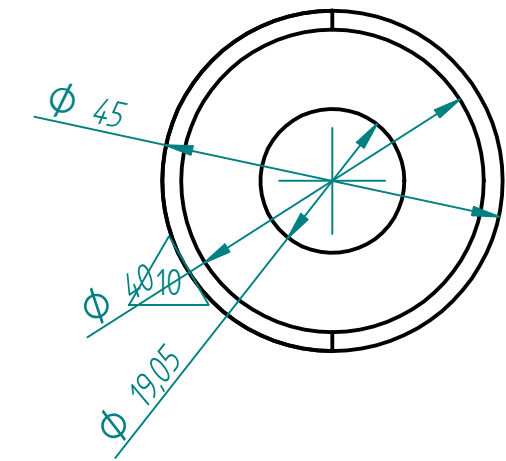


CORTE L-L

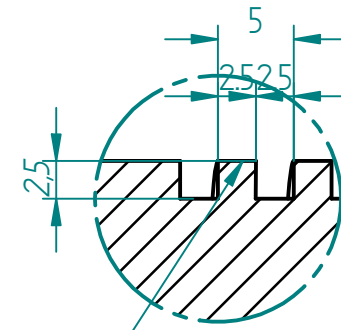


Conjunto Tapa de alta presión

Número de elemento	Título	Material	Cantidad
1	Tapa alta presión	Acero 4340	1
2	Anillo sello Bridgeman	Bronce	1
3	Piston sello tapa	Acero 4340	1

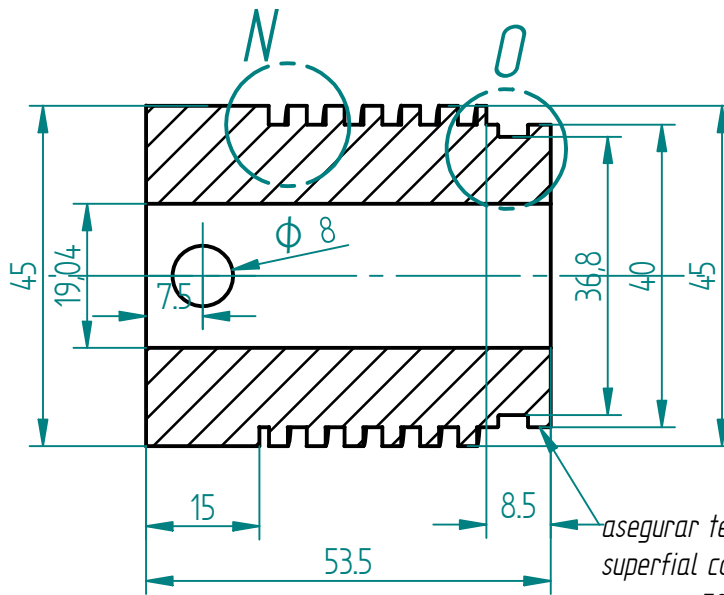
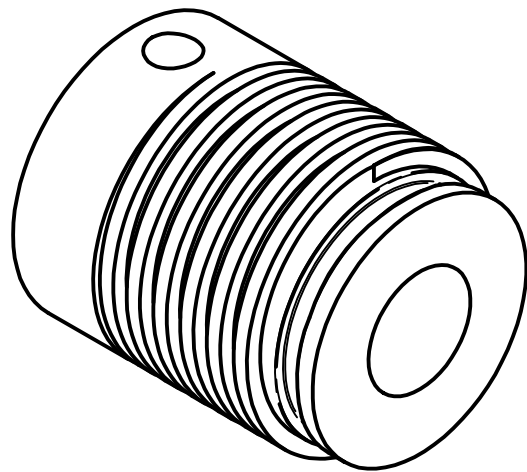


1:1



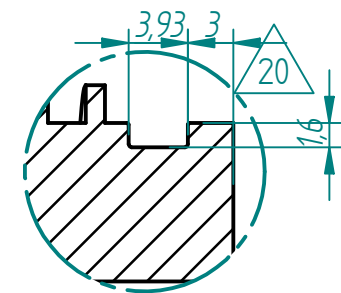
DETALLE N
2:1

hilo cuadrado, tamaño hilo 2.5mm,
extensión hilo 30mm



CORTE M-M

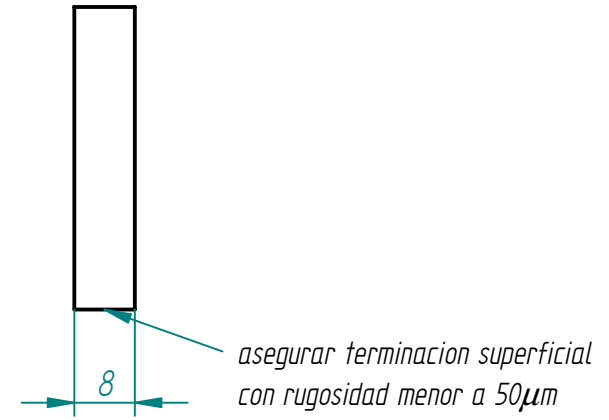
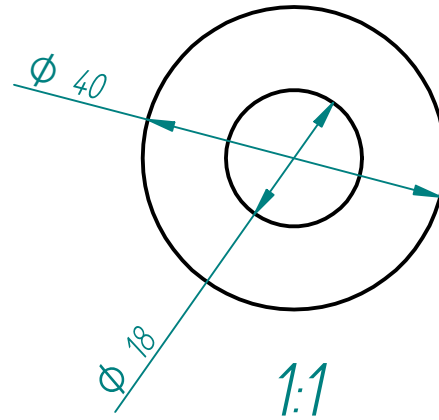
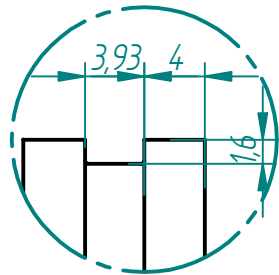
asegurar terminacion
superfial con rugosidad
menor a $50\mu\text{m}$



DETALLE O
2:1

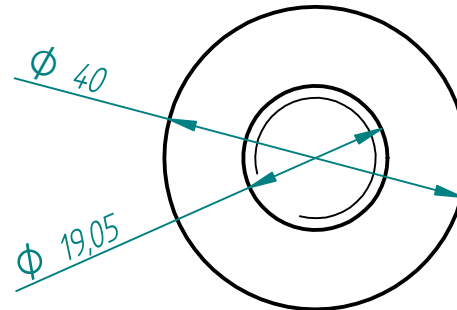
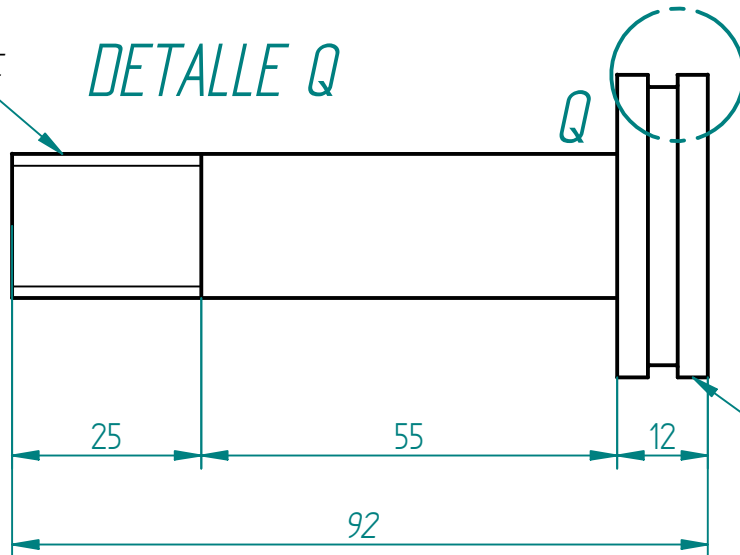
Tapa de alta presion

Anillo sello Bridgeman para
tapa de alta presión



hilo 3/4-10 UNC

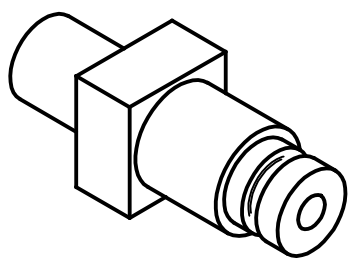
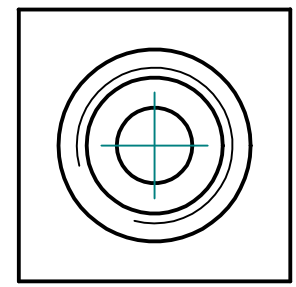
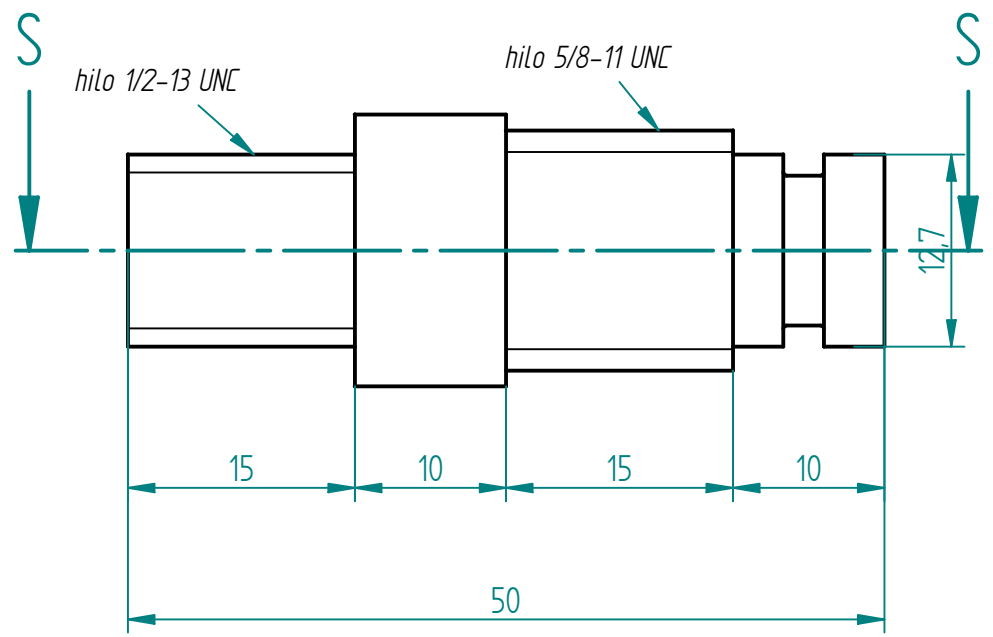
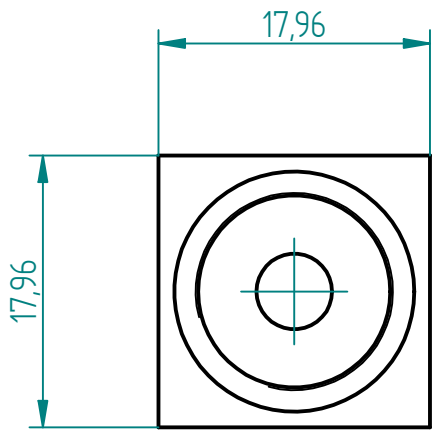
DETALLE Q



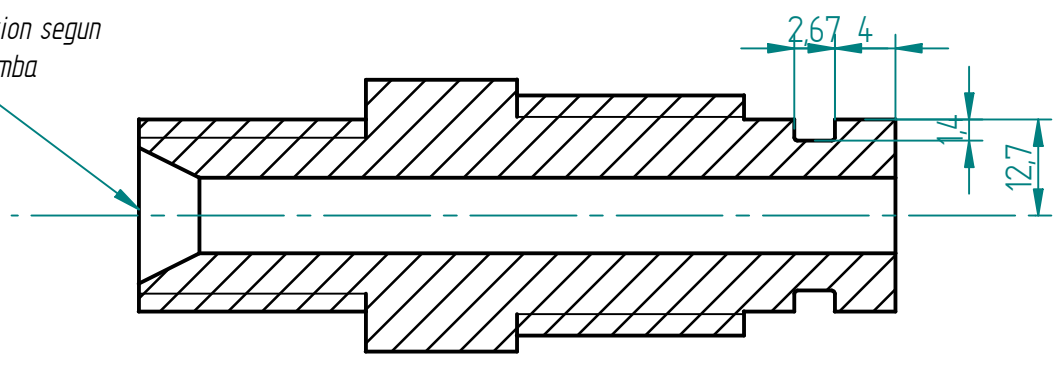
piston de sello para tapa
de alta presión

asegurar terminacion superficial
con rugosidad menor a $50\mu\text{m}$

1:1



*definir conexion segun
tuberia a bomba*



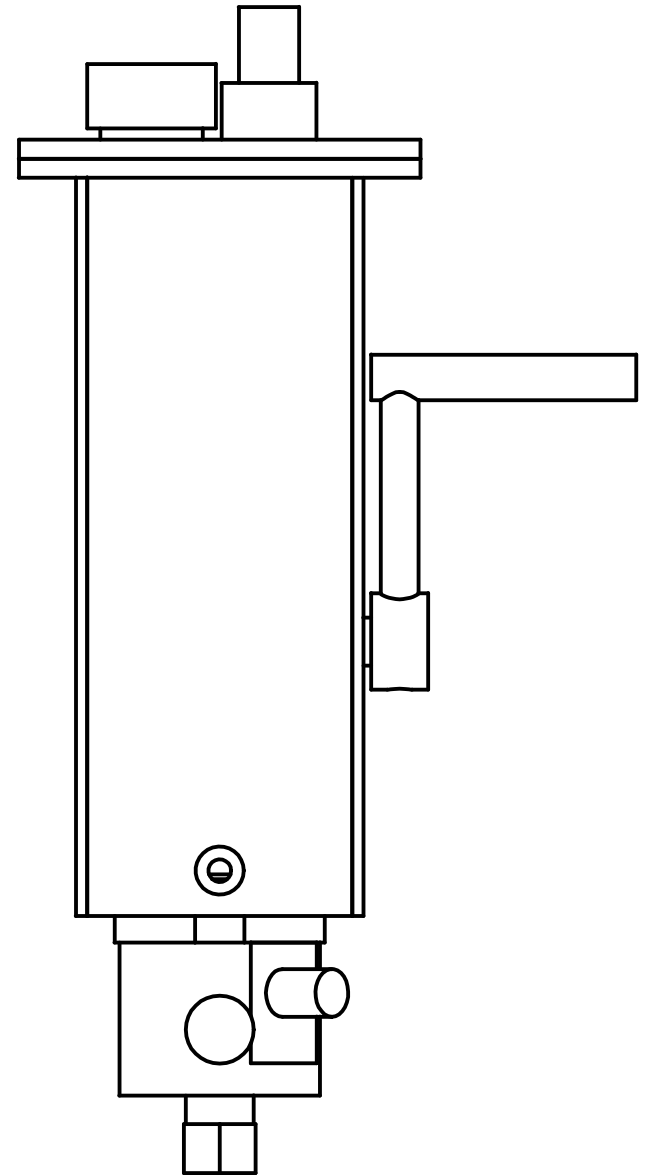
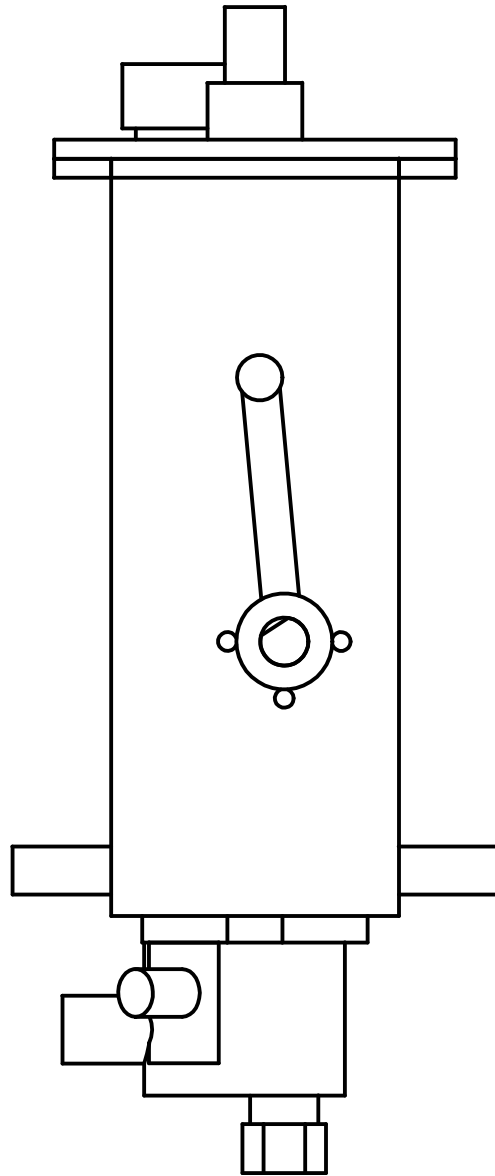
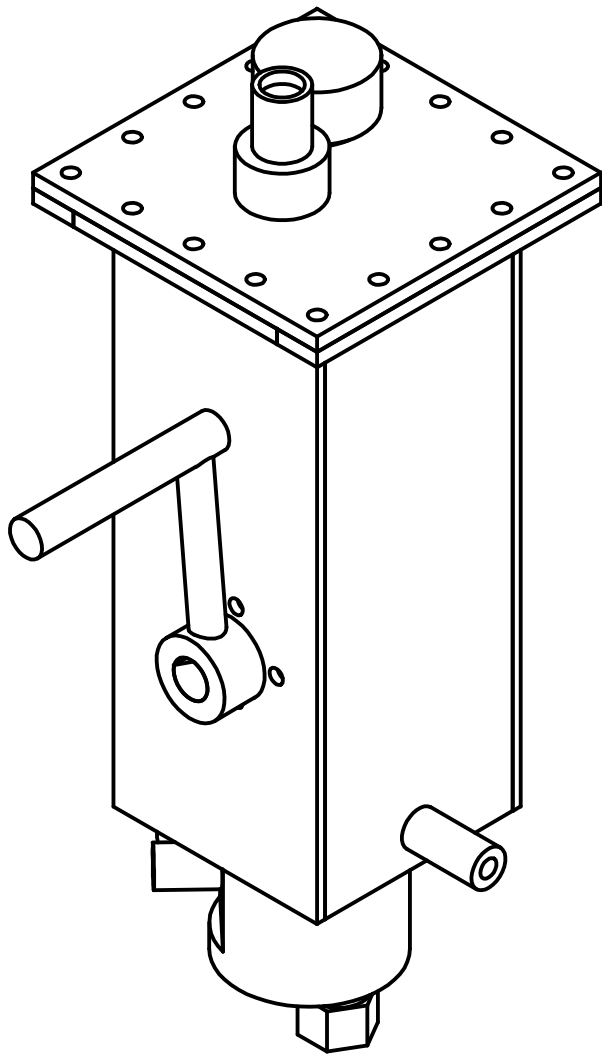
1:1

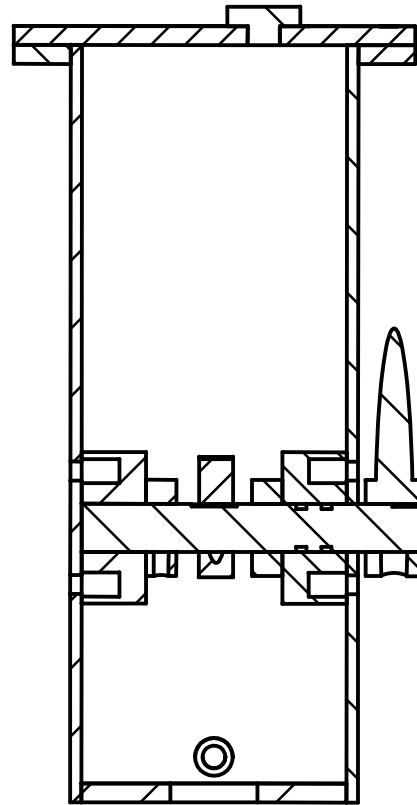
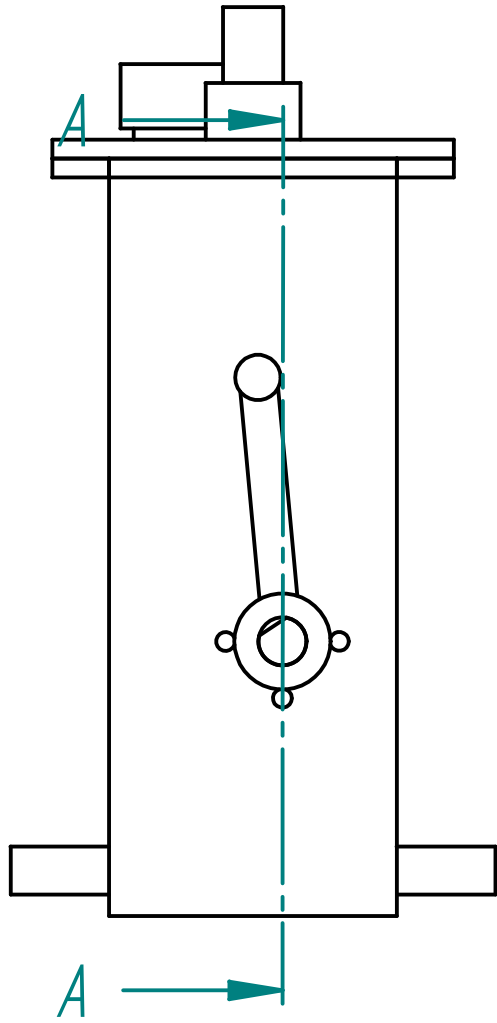
CORTE S-S

Anexo D

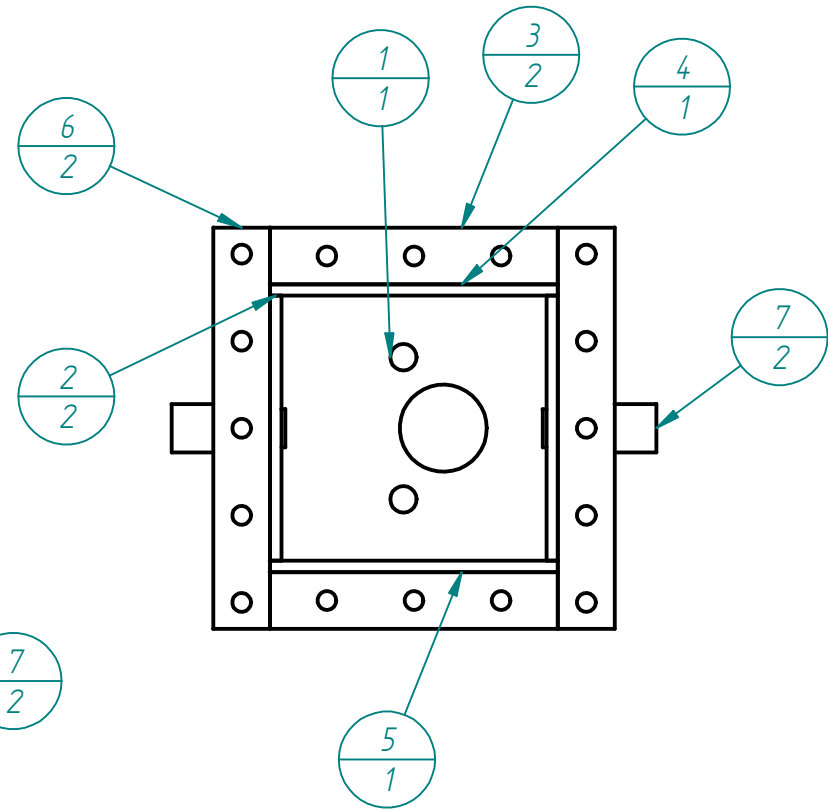
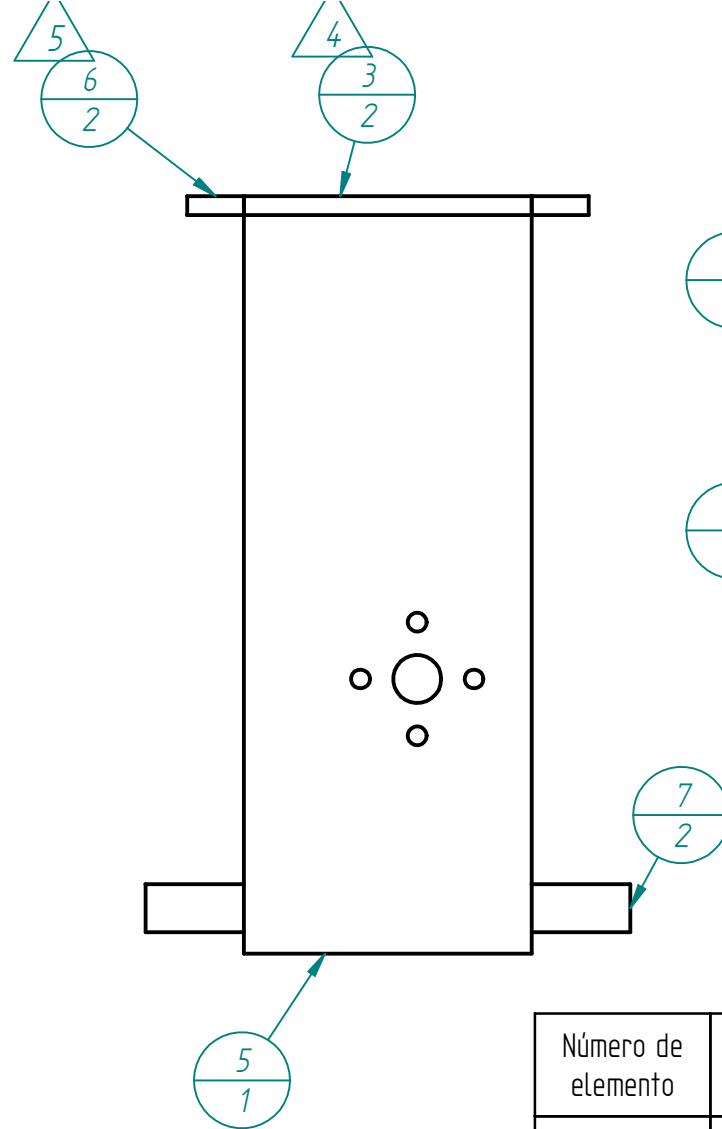
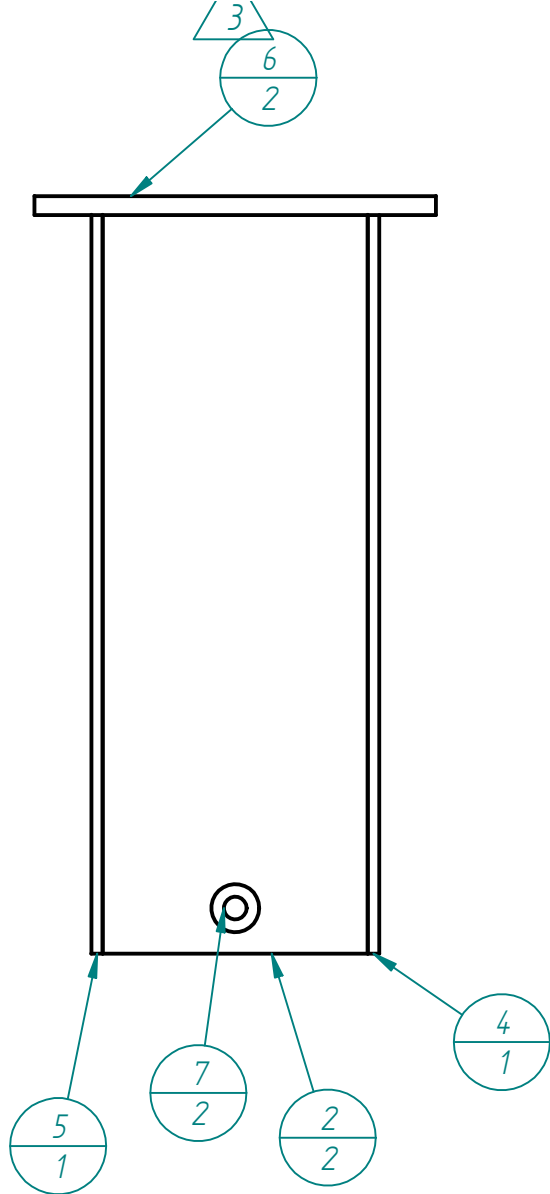
Planos Sistema presion

D.1. Conjunto caja de aceite y bomba

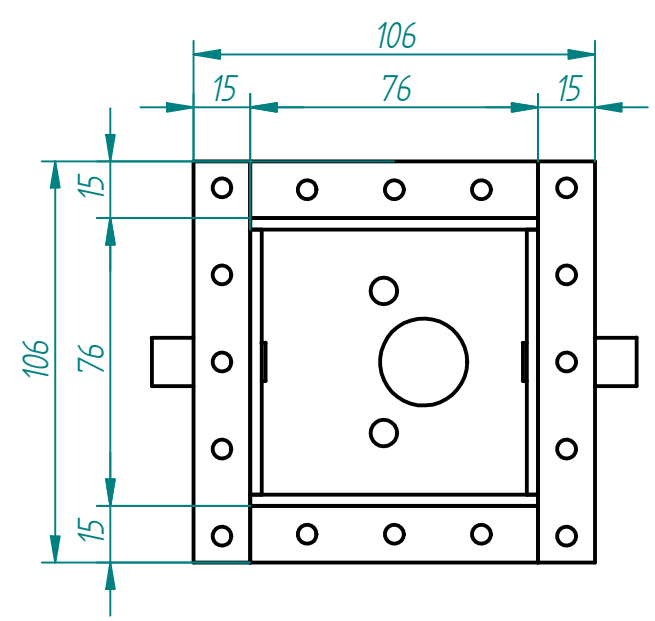
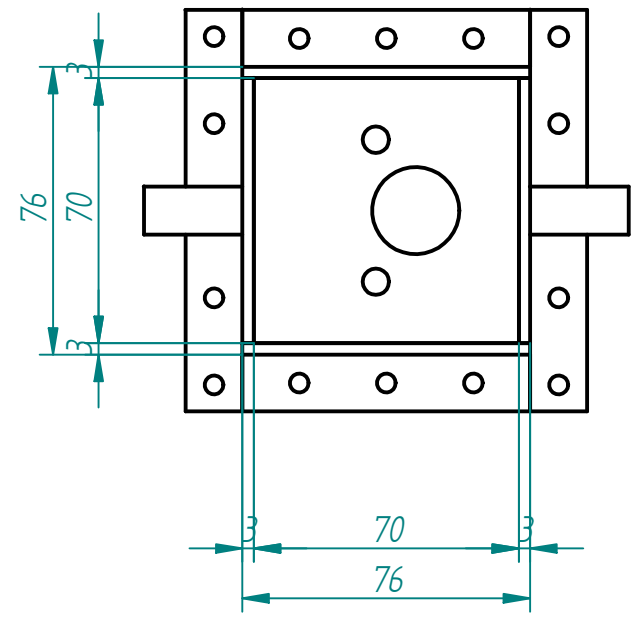
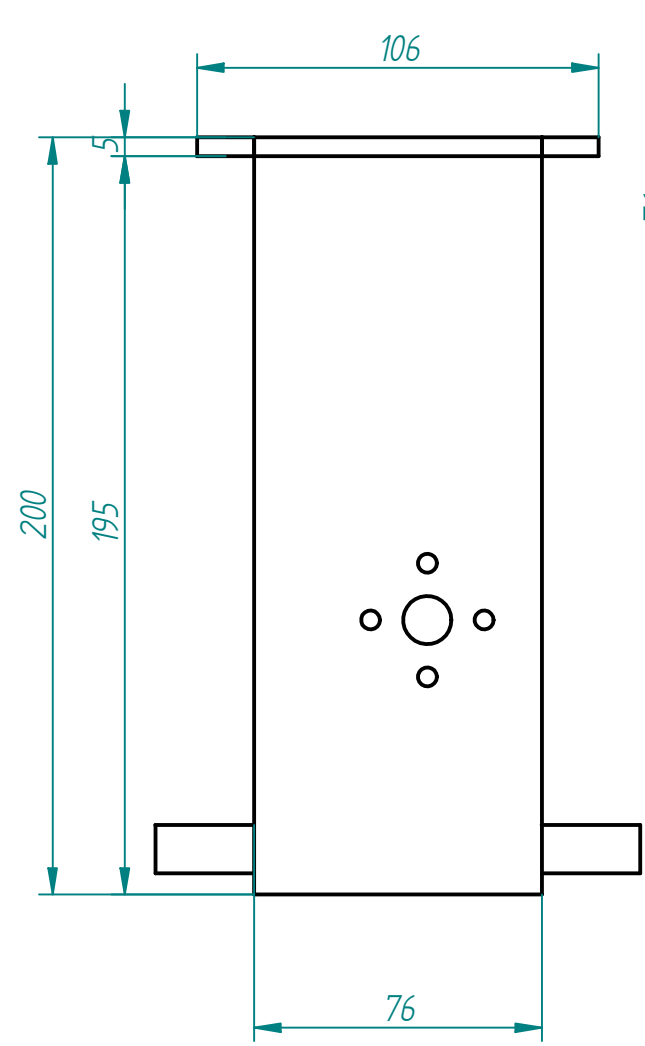
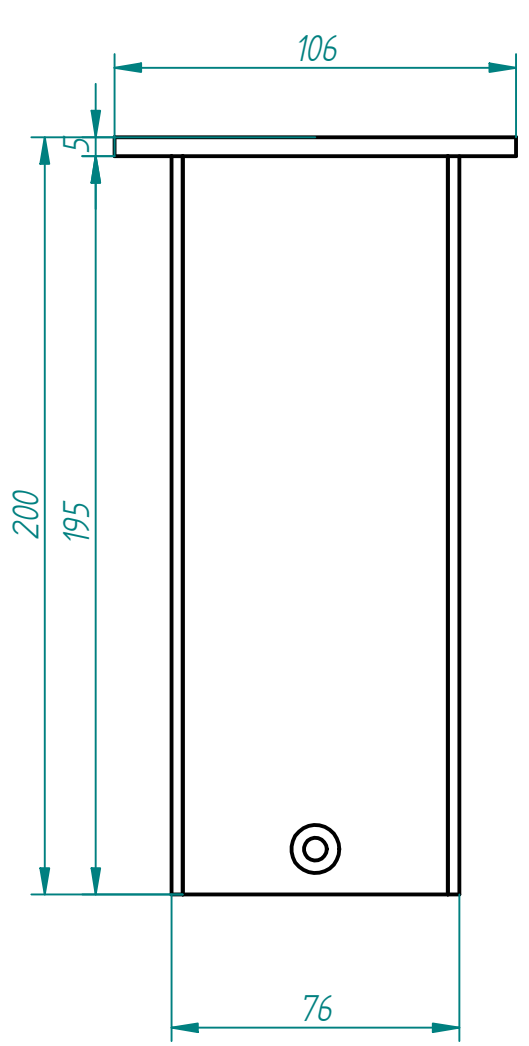


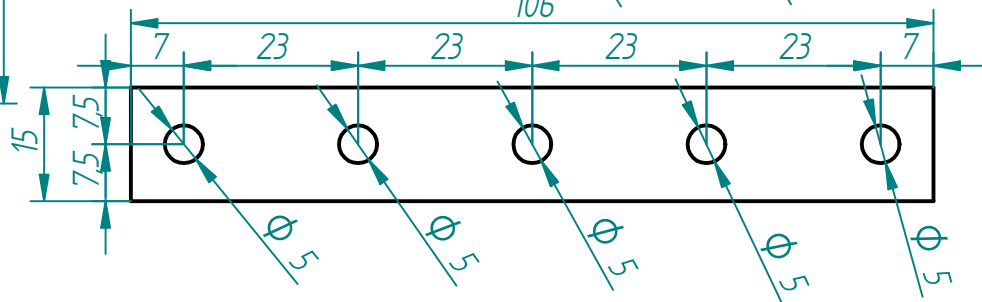
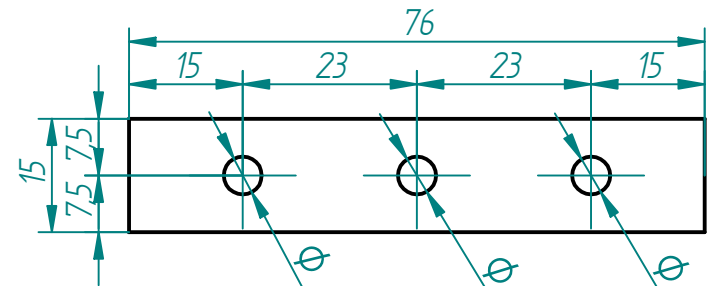
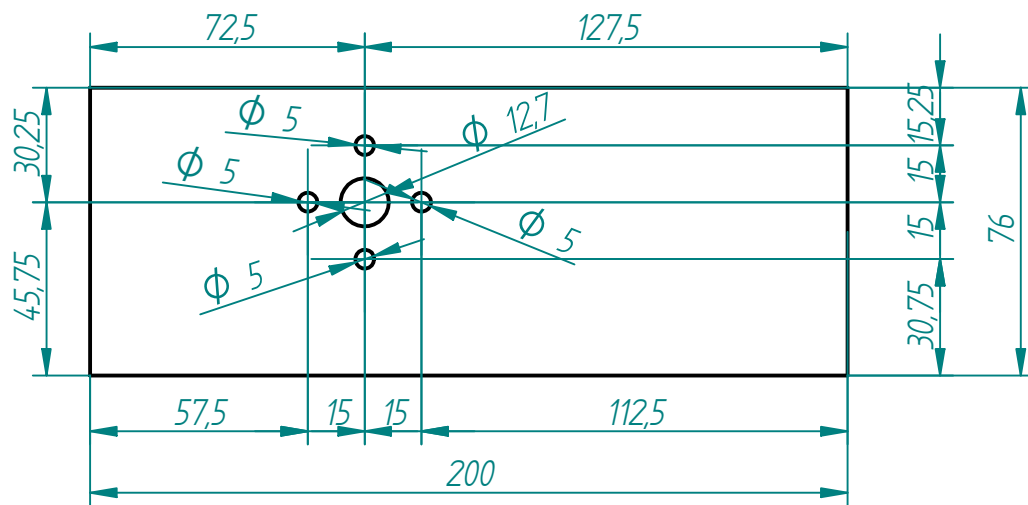
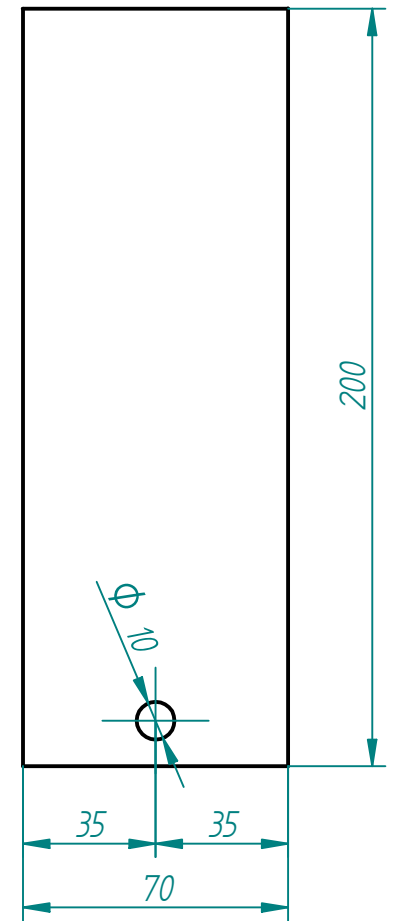
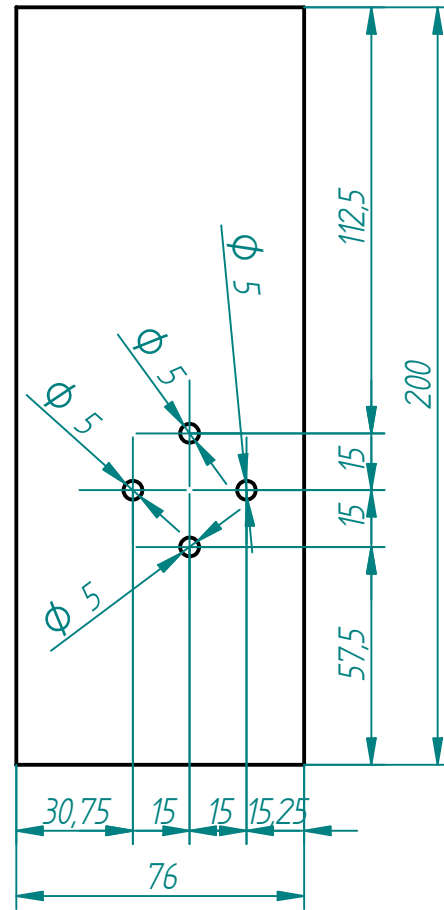
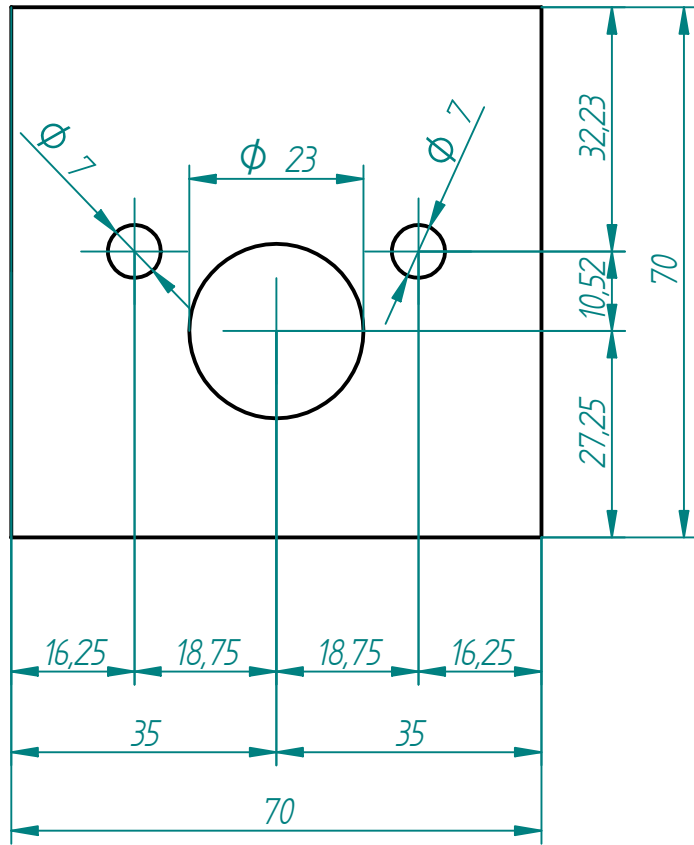


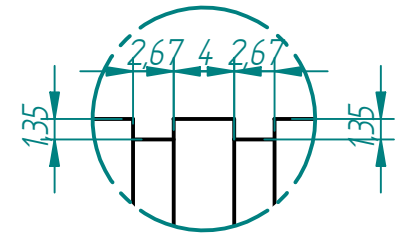
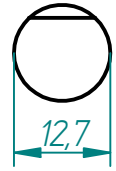
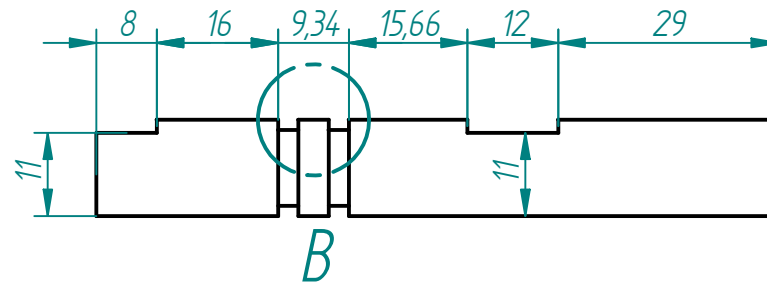
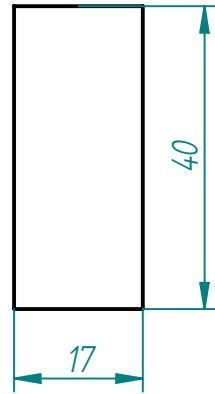
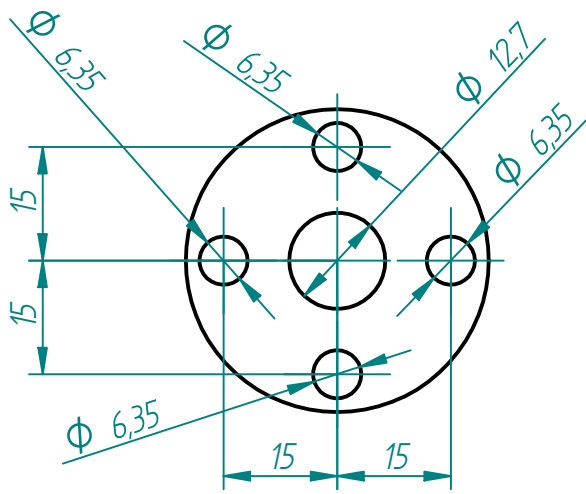
CORTE A-A



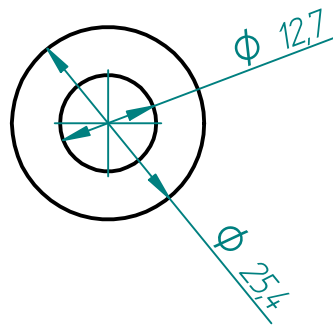
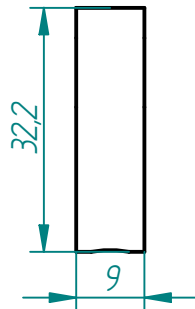
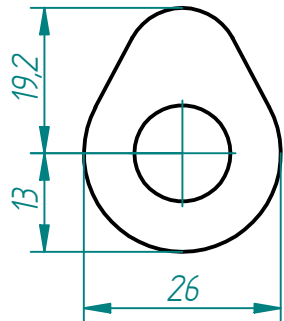
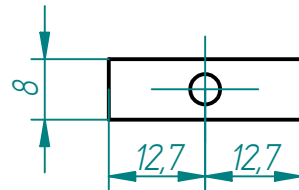
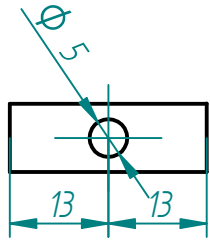
Número de elemento	Título	Material	Cantidad
1*	Base caja aceite	Acero 1020	1
2	Costado caja aceite	Acero 1020	2
3*	Pestaña caja de aceite 2	Acero 1020	2
4	Costado Caja aceite 2	Acero 1020	1
5	Costado caja aceite 1	Acero 1020	1
6	Pestaña caja de aceite 1	Acero 1020	2
7	Salida caja de aceite	Verificar	2

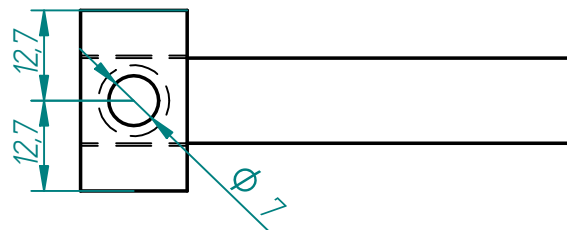
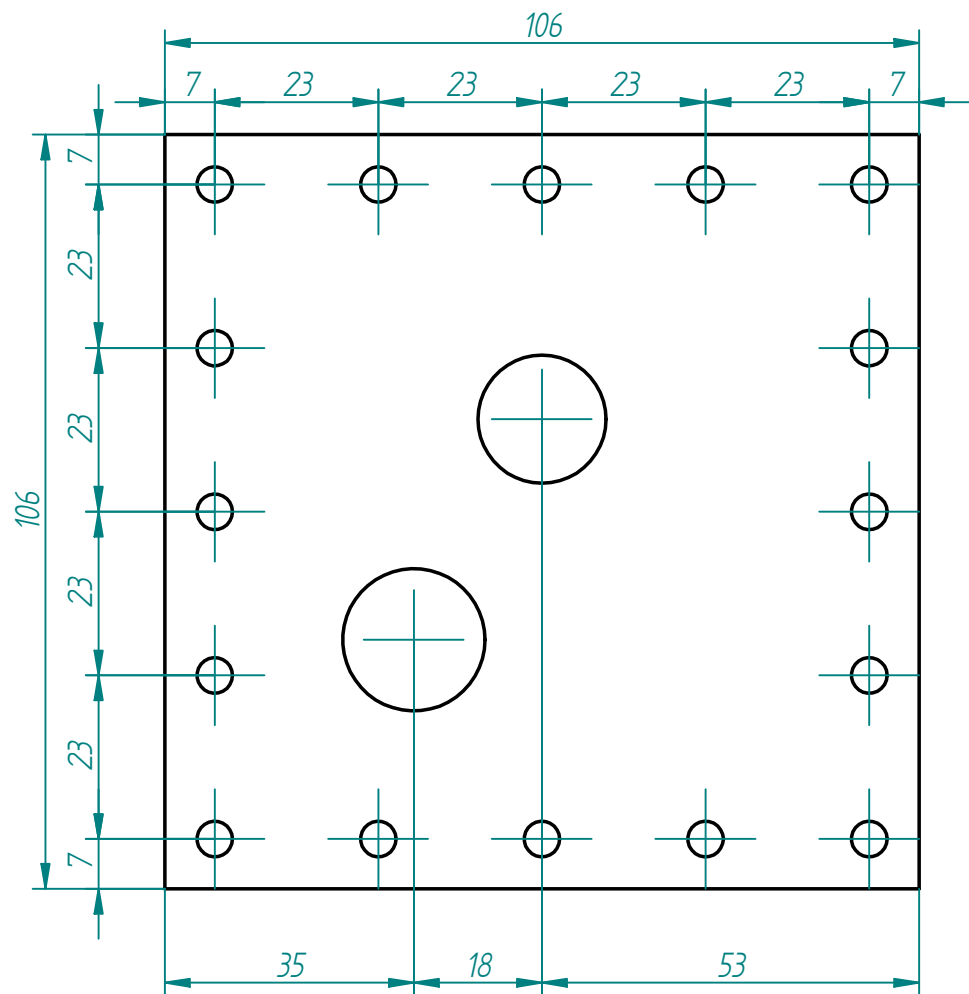
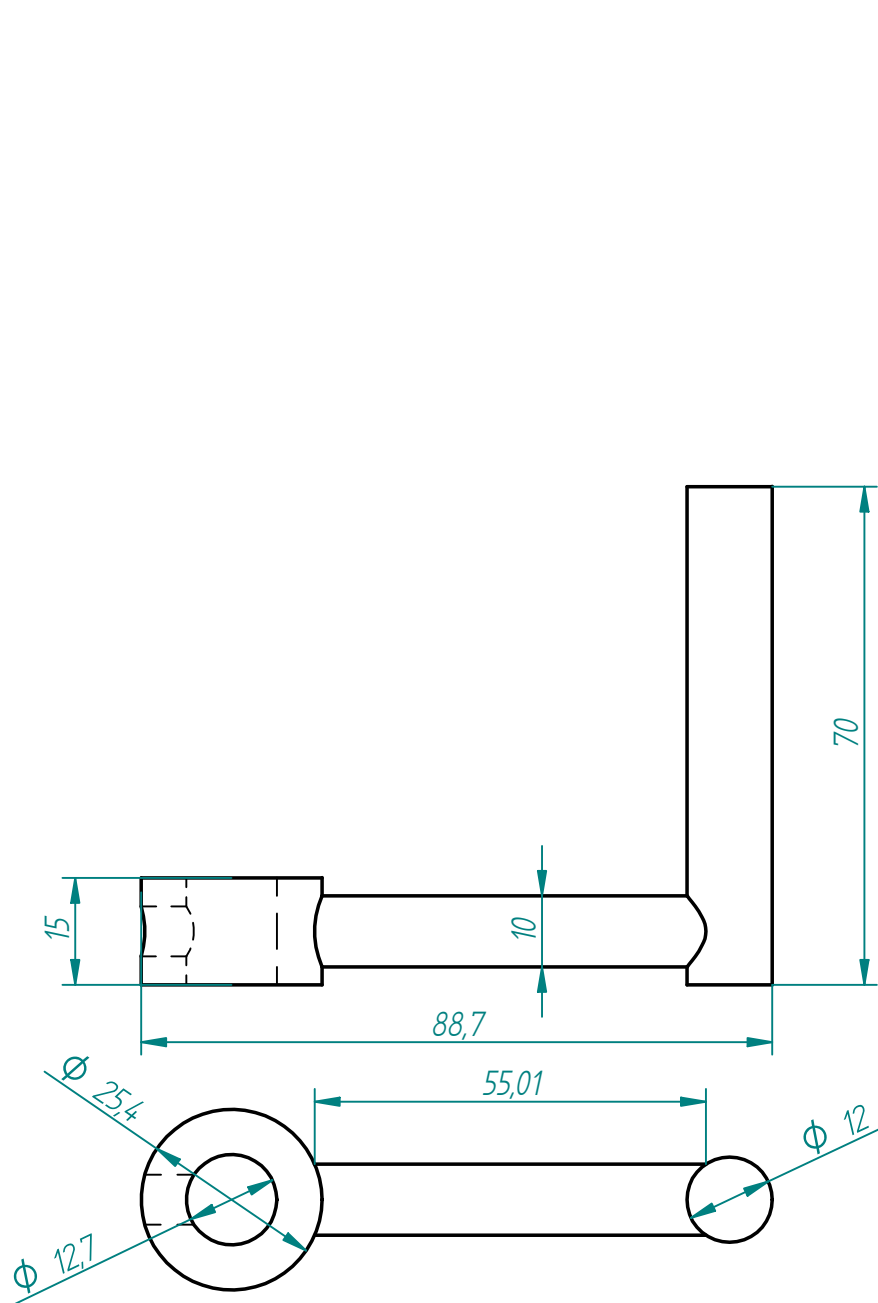






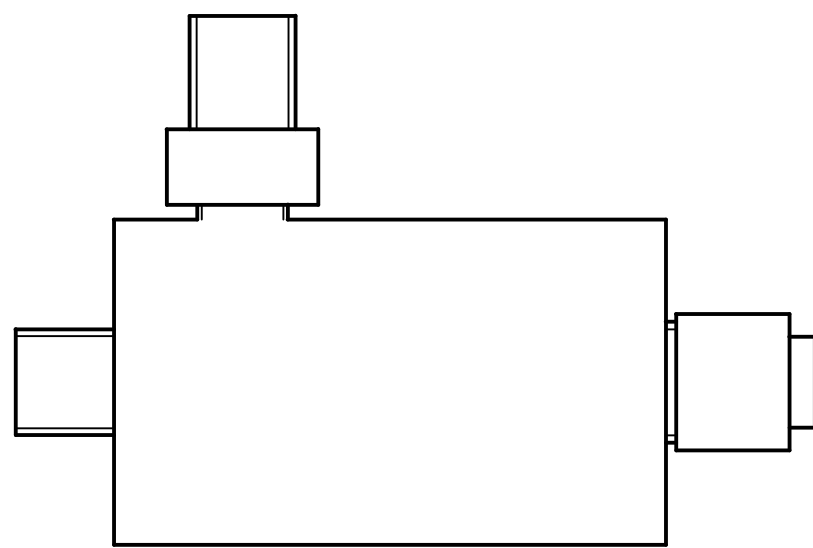
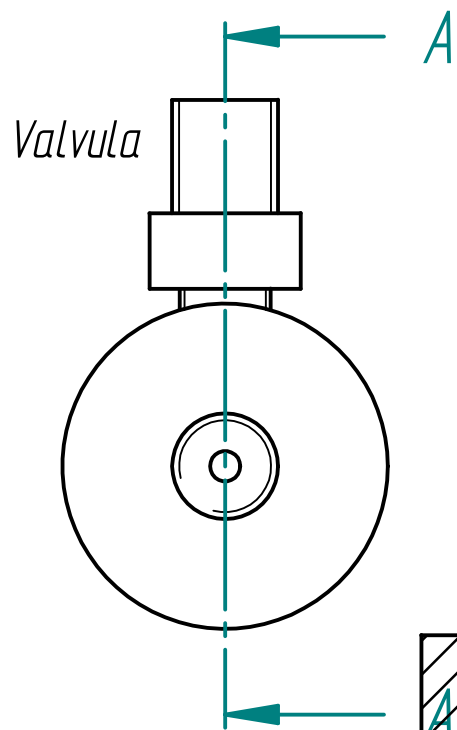
DETALLE B



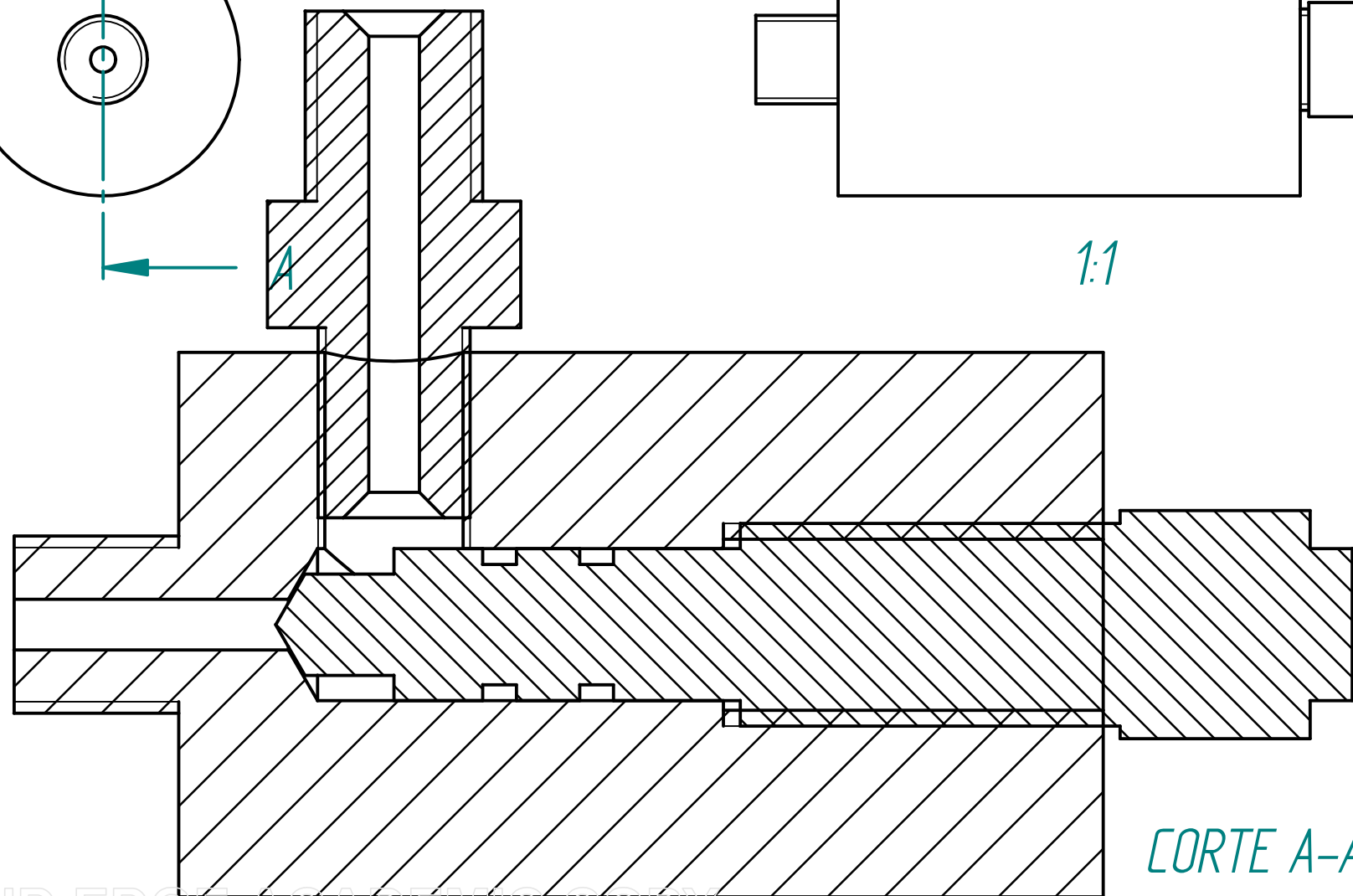


SOLID EDGE ACADEMIC COPY

D.2. Planos valvula



1:1



CORTE A-A

