

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA**

**“REDISEÑO DE SISTEMA PARA CONTROL DE ATMÓSFERAS EN  
PRENSA UNIAXIAL”**

**Memoria para optar al Título de:  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

**ALUMNO : Andrés Rodrigo Troncoso Fernández  
PROFESOR GUIA: Yuneski Masip Macia.**

**2017**

## 1 RESUMEN

La Pulvimetalurgia es una alternativa para producción de materiales, en la cual, las partes o piezas, se fabrican a partir de polvos, obtenidos por diferentes procesos, los cuales posteriormente son comprimidos con o sin temperatura. Algunas de las ventajas de este proceso es el poco desperdicio de material, la gran complejidad en la forma de las piezas y el hecho que se pueda trabajar con materiales de alto punto de fusión como por ejemplo el tungsteno, filamento dentro de las ampollitas que son confeccionados por esta técnica. *“Varias de las grandes mejoras e innovaciones del siglo pasado se han realizado gracias al desarrollo de la pulvimetalurgia (PM); el éxito de esta técnica se debe a que abre la posibilidad de fabricar piezas de alta calidad de formas complejas con dimensiones cercanas a las del producto final y con mejores propiedades mecánicas, por su mayor homogeneidad y control del tamaño de los granos; factores esenciales para lograr la formación de enlaces fuertes entre las partículas y en consecuencia, incrementos en la dureza y tenacidad de los materiales.”*<sup>1</sup> [1]

Dentro del proceso, es común el empleo de prensas de compactación, en particular de prensas uniaxiales. Cuando los polvos compactados son de materiales reactivos con la atmósfera, el control de la misma es fundamental. Un ejemplo de ello es la oxidación que a menudo sufren los polvos, especialmente cuando la compactación se hace a temperaturas superiores a la ambiente y que generalmente es evitada mediante el uso de atmósferas inertes como la de argón.

Esta memoria forma parte de un proyecto de investigación relativo a nuevos materiales base cobre, fabricados mediante aleado mecánico y compactación uniaxial en caliente, dentro del cual, se han encontrado serias deficiencias en el control de la atmósfera en el horno de la prensa. Por lo anterior, el principal objetivo de esta tesis es mejorar el estado actual del horno para la realización de compactación uniaxial en caliente bajo atmósfera controlada de polvos metálicos obtenidos mediante el proceso de aleado mecánico.

---

<sup>1</sup> Revista Metal Actual, número 14, Año 2012.

INDICE

Contenido

<b>1 RESUMEN .....</b>	<b>- 2 -</b>
1.1 OBJETIVOS. ....	- 9 -
1.1.1 <i>Objetivo General:</i> .....	- 9 -
1.1.2 <i>Objetivos Específicos:</i> .....	- 9 -
1.2 MOTIVACIONES. ....	- 9 -
<b>2. ANTECEDENTES TEÓRICOS.....</b>	<b>- 10 -</b>
2.1 PULVIMETALURGIA. ....	- 10 -
2.2 PRODUCCIÓN DE POLVOS METÁLICOS.....	- 12 -
2.3 ALEADO METÁLICO. ....	- 14 -
2.4 MEZCLADO Y COMBINADO DE POLVOS.....	- 17 -
2.4.1 TABLA COMPARATIVA ENTRE PM Y OTROS PROCESOS DE CONFORMADO.....	- 19 -
<b>2.5 COMPACTACIÓN DE POLVOS.....</b>	<b>- 20 -</b>
2.5.1 COMPACTADO POR TROQUEL. ....	- 21 -
2.5.2 COMPACTACIÓN POR TROQUEL EN CALIENTE. ....	- 22 -
2.5.3 COMPACTADO ISOSTÁTICO EN FRÍO. ....	- 24 -
2.5.4 EL PRENSADO ISOSTÁTICO EN CALIENTE. ....	- 24 -
<b>3 HORNOS INDUSTRIALES (INDUSTRIA METAL-MECÁNICA).....</b>	<b>- 25 -</b>
3.1 TIPOS DE HORNO. ....	- 26 -
3.2 HORNO SEGÚN TIPO DE CALENTAMIENTO.....	- 27 -
3.3 TIPOS DE HORNO SEGÚN ATMOSFERA.....	- 28 -
3.4 HORNOS QUE UTILIZAN PRENSAS.....	- 28 -
<b>4 PROTOCOLO DE OPERACIÓN ACTUAL.....</b>	<b>- 30 -</b>
<b>5 EQUIPOS DISPONIBLES.....</b>	<b>- 33 -</b>
5.1 PRENSA.....	- 33 -
5.2 HORNO ACTUAL.....	- 33 -

## REDISEÑO DE SISTEMA PARA CONTROL DE ATMÓSFERAS EN PRENSA UNIAXIAL

5.3 TAPA ACTUAL.....	- 35 -
5.4 HERRAMENTAL (MATRIZ).....	- 36 -
<b>6 DISEÑO CONCEPTUAL.....</b>	<b>- 38 -</b>
6.1 ETAPA DE DEFINICIÓN.....	- 38 -
6.1.1 <i>Identificación del Cliente</i> .....	- 38 -
6.1.2 <i>Determinación de los Requerimientos del Cliente</i> .....	- 38 -
6.1.3 <i>Determinación de la Importancia de los Requerimientos del Cliente:</i> .....	- 39 -
6.1.4 <i>Problemas del Diseño Actual</i> .....	- 40 -
6.2 ETAPA PRELIMINAR DEL DISEÑO.....	- 41 -
6.2.1 <i>Generación de Conceptos</i> .....	- 41 -
6.2.2 <i>Tormenta de ideas (Brain-Storming)</i> .....	- 41 -
6.2.3 <i>Evaluación de Conceptos</i> .....	- 42 -
6.2.4 <i>Matriz de Decisión</i> .....	- 43 -
<b>7 DISEÑO EN DETALLE.....</b>	<b>- 44 -</b>
7.1 DISEÑO MECANISMO SELLADO TAPA SUPERIOR.....	- 45 -
7.2 DISEÑO DE LA BRIDA.....	- 47 -
7.2.1 <i>Brida Tipo Integral</i> .....	- 47 -
7.3 EMPAQUETADURAS O EMPAQUES.....	- 49 -
7.4 PRESIÓN INTERIOR DEL HORNO.....	- 49 -
7.4 CARGAS POR PERNOS Y REACCIÓN DE LA EMPAQUETADURA.....	- 51 -
7.4.1 <i>En la condición de operación</i> .....	- 52 -
7.4.2 <i>Condición de empaquetamiento</i> .....	- 54 -
7.5 NÚMERO DE PERNOS.....	- 54 -
7.5.1 <i>Determinación del Área Apernada</i> .....	- 55 -
7.5.2 <i>Procedimiento para Determinar el Número de Pernos</i> .....	- 55 -
7.6 DETERMINACIÓN DE LOS MOMENTOS EN LOS BRAZOS DE LA BRIDA.....	- 56 -
7.7 CÁLCULOS DE ESFUERZO EN LA BRIDA.....	- 59 -
7.8 CÁLCULO DEL ESPESOR POR CARGAS INTERNAS (PRESIÓN INTERNA).....	- 60 -

## REDISEÑO DE SISTEMA PARA CONTROL DE ATMÓSFERAS EN PRENSA UNIAXIAL

7.8.1 Cálculo de Presión.....	- 61 -
7.9 CÁLCULO DEL ESPESOR POR CARGAS INTERNAS.....	- 63 -
7.10 SOPORTE TAPA AL CUERPO PRINCIPAL. ....	- 68 -
7.11 SISTEMA NUEVA ALIMENTACIÓN DE ARGÓN. ....	- 69 -
8 MATERIALES CUERPO PRINCIPAL.....	- 71 -
8.1 Fibra Cerámica Moldeable.....	- 71 -
8.2 Manta de Fibra Cerámica. ....	- 72 -
8.3 Plancha de Acero Galvanizada.....	- 73 -
8.4 Plancha de Acero al Carbono A36. ....	- 74 -
<b>9 PÉRDIDAS DE CALOR EN EL HORNO. ....</b>	<b>- 75 -</b>
9.1 PÉRDIDAS DE CALOR EN PAREDES CILÍNDRICAS. ....	- 75 -
9.2 PÉRDIDA DE CALOR EN PAREDES PLANAS.....	- 77 -
9.2.1 Pérdidas de Calor en la base. ....	- 78 -
9.2.2 Pérdidas de Calor en la tapa. ....	- 79 -
9.2.3 Pérdidas de Calor Total Paredes Planas.....	- 80 -
9.3 PÉRDIDA DE CALOR TOTAL.....	- 80 -
9.4 ANÁLISIS PÉRDIDAS DE CALOR ANTES Y DESPUÉS DE LAS MODIFICACIONES.....	- 81 -
<b>10 PRESUPUESTO. ....</b>	<b>- 83 -</b>
<b>11 CONCLUSIONES. ....</b>	<b>- 87 -</b>
<b>12 NOMENCLATURA GENERAL.....</b>	<b>- 90 -</b>
<b>13 BIBLIOGRAFÍA. ....</b>	<b>- 92 -</b>

INDICE DE TABLAS.

Tabla 1: Composición argón ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 2: Método eliminación por pares. .... - 39 -

Tabla 3: Ponderación en orden decreciente, Método por eliminación. .... - 39 -

Tabla 4: Matriz decisión..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 5: Medidas bridas normalizadas, 16.5 B ASME..... - 48 -

Tabla 6: extracto tabla UA 49-2..... - 53 -

Tabla 7: ASTM A193, requerimientos mecánicos..... - 55 -

Tabla 8: Propiedades térmicas. [16]..... - 73 -

Tabla 9: Propiedades térmicas, plancha acero. [17]..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 10: Extracto tabla propiedades de los metales. [29]..... - 74 -

INDICE DE IMÁGENES.

Ilustración 1: Ejemplos de partes sinterizadas, Kalpakjian Ed 5 capítulo 17..... - 11 -

Ilustración 2: Esquema de aleado mecánico, Kalpakjian Ed 5 capítulo 17 ..... - 14 -

Ilustración 3: Resumen de procesos y operaciones comprendidas en la fabricación de partes mediante metalurgia de polvos. Kalpakjian Ed 5 capítulo 17..... - 15 -

Ilustración 4: Forma de las partículas en la metalurgia de polvos y procesos por los cuales se producen. Los polvos de hierro se elaboran por medio de muchos de estos procesos, Kalpakjian Ed 5 capítulo 17..... - 16 -

Ilustración 5: Varios dispositivos de mezclado y combinado: (a) Tambor rotatorio, (b) Doble cono rotatorio, (c) Mezclador de tornillo y (d) Mezclador de paletas. .... - 18 -

Ilustración 6: ejemplo de proceso de fabricación de cojinetes sinterizados autolubricados, empleado compactación en verde y sinterizado. [4]..... - 20 -

Ilustración 7: Esquema compactado por troquel. [5] ..... - 21 -

Ilustración 8: Esquema de compactado en caliente por troquel..... **¡Error! Marcador no definido.**

## REDISEÑO DE SISTEMA PARA CONTROL DE ATMÓSFERAS EN PRENSA UNIAXIAL

<i>Ilustración 9: Diagrama esquemático del prensado isostático en frío, aplicado para el formado de un tubo.</i>	- 24 -
<i>Ilustración 10: Esquema de prensado isostático en caliente.</i>	- 25 -
<i>Ilustración 11: Hornos de Tratamiento Térmico. [9]</i>	- 26 -
<i>Ilustración 12: Horno Tratamiento Térmico [9]</i>	- 26 -
<i>Ilustración 13: Clasificación de los hornos.</i>	- 27 -
<i>Ilustración 14: Horno de Vacío con Prensa en caliente [10]</i>	- 29 -
<i>Ilustración 15: Prensa en caliente con vacío integrado [11]</i>	- 29 -
<i>Ilustración 16: opción de mayor capacidad, 100 toneladas y dado de 24"x24"x30" [11]</i>	- 30 -
<i>Ilustración 17: Prensa Hidráulica [13]</i>	- 33 -
<i>Ilustración 18: Horno de resistencia eléctrica para compactación en caliente. [13]</i>	- 34 -
<i>Ilustración 19: Controlador de temperatura del horno. [13]</i>	- 34 -
<i>Ilustración 20: Modelación horno actual, SolidWorks 2014.</i>	- 35 -
<i>Ilustración 21 Tapa actual, Modelada SolidWork 2014.</i>	- 35 -
<i>Ilustración 22: Foto actual de la tapa del horno.</i>	- 35 -
<i>Ilustración 23: Fijación actual horno. [13]</i>	- 36 -
<i>Ilustración 24: Ilustración 18: Matriz de compactación de acero H-13 [13]</i>	..... <b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<i>Ilustración 25: Modelación Diseño.</i>	- 44 -
<i>Ilustración 26: Modelación Diseño otra vista.</i>	- 44 -
<i>Ilustración 27: Mecanismo de sellado entre la tapa superior y el embolo.</i>	- 45 -
<i>Ilustración 28: Empaquetadura comercial.</i>	- 45 -
<i>Ilustración 29: vista ppal rondana.</i>	- 46 -
<i>Ilustración 30: Vista en 3D rondana</i>	- 46 -
<i>Ilustración 31: Corte tapa superior.</i>	- 46 -
<i>Ilustración 32: Sellos normalizados. [26]</i>	- 46 -
<i>Ilustración 33: Unión hembra macho, Tabla B16.5 [23]</i>	- 47 -
<i>Ilustración 34: Unión brida hembra macho, [21]</i>	- 47 -
<i>Ilustración 35: Detalle bridas integrales, [25]</i>	- 48 -
<i>Ilustración 36: Empaquetadura espirometálica, Sinsef empresa Chilena [24]</i>	- 49 -

## REDISEÑO DE SISTEMA PARA CONTROL DE ATMÓSFERAS EN PRENSA UNIAXIAL

<i>Ilustración 37: Medidas Horno Actual.</i> .....	- 50 -
<i>Ilustración 38: Condiciones sometidas, brida.</i> .....	- 52 -
<i>Ilustración 39: Datos del apernado.</i> .....	- 56 -
<i>Ilustración 40: tapa diseñada</i> .....	- 56 -
<i>Ilustración 41: calculo momentos en la brida.</i> .....	- 57 -
<i>Ilustración 42: Rendimiento de soldaduras.</i> .....	- 62 -
<i>Ilustración 44: Fijación al cuerpo principal.</i> .....	- 69 -
<i>Ilustración 43: Fijación cuerpo principal visto desde abajo.</i> .....	- 69 -
<i>Ilustración 45: Corte vista superior horno actual, Modelado SolidWorks 2014</i> .....	- 71 -
<i>Ilustración 46: fotografía contenedor de la fibra cerámica. [15]</i> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<i>Ilustración 47: Propiedades físicas y composición química [16]</i> .....	- 73 -
<i>Ilustración 48: Manta térmica. [16]</i> .....	- 73 -
<i>Ilustración 49: Planchas de metal, CINTAC [18]</i> .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<i>Ilustración 50: propiedades A36 [28]</i> .....	- 74 -

### INDICE GRÁFICOS.

<i>Gráfico 1: Valores del factor A, que se utilizan en las fórmulas para recipientes sujetos a presión externa ...</i> -	64 -
<i>Gráfico 2: Zoom gráfico 1</i> .....	- 65 -
<i>Gráfico 3: Valores del factor B</i> .....	- 66 -
<i>Gráfico 4: Zoom gráfico 3</i> .....	- 67 -



## **1.1 Objetivos.**

A continuación se presentará los objetivos del presente trabajo.

### **1.1.1 Objetivo General:**

Mejoramiento del horno para la realización de compactación uniaxial en caliente bajo atmósfera controlada de polvos metálicos obtenidos mediante el proceso de Aleado Mecánico.

### **1.1.2 Objetivos Específicos:**

- Estudiar la situación actual del horno.
- Modificar el diseño actual de elementos para que permitan un eficiente funcionamiento y desempeño en el proceso.
- Comparar el rendimiento del horno antes y después de las mejoras.

## **1.2 Motivaciones.**

Dos grandes motivaciones tengo para enfrentar esta memoria; Primero, el desafío personal como futuro ingeniero de plantear, desarrollar e implementar un problema real con una solución tangible, y segundo realizar una memoria que sea un aporte para las investigaciones donde estén involucrados procesos mecánicos que deben ser estudiados de forma minuciosa, requiriendo parámetros muy precisos en términos de control y diseño. Adicionalmente, hay una motivación adicional, que es colaborar con las investigaciones donde se está trabajando con un metal tan importante para Chile, como lo es el cobre.

## 2. ANTECEDENTES TEÓRICOS.

### 2.1 Pulvimetalurgia.

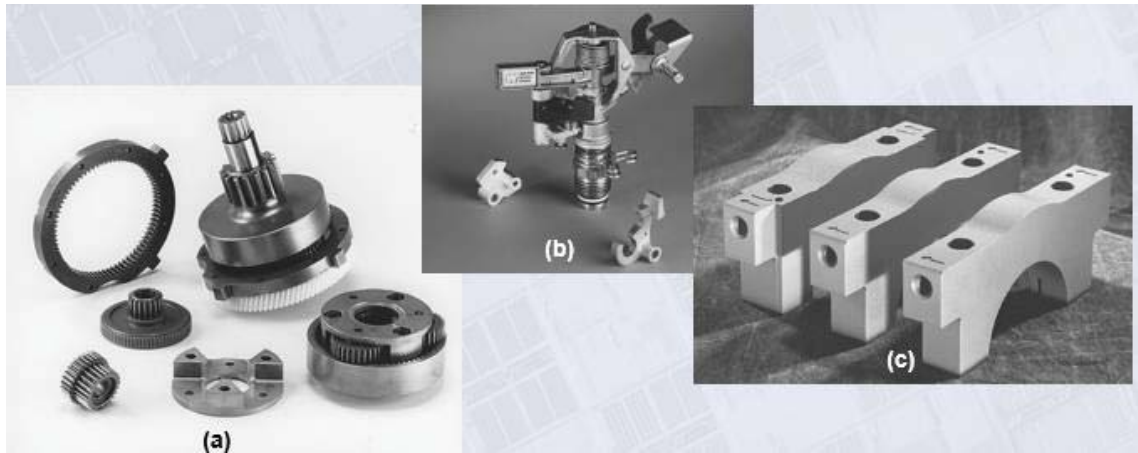
En el proceso los polvos metálicos se compactan para darles forma deseadas, con frecuencia complejas y se sinterizan (se calientan sin que se fundan) para dar forma a una pieza sólida. Los egipcios emplearon este proceso por primera vez alrededor del año 3000 A.C para fabricar herramientas de hierro. Uno de sus primeros usos en la época moderna fue a principios del siglo XX, a fin de hacer filamentos de tungsteno para focos. La disponibilidad de una amplia variedad de composiciones de polvos metálicos, la capacidad de producir partes en formas netas (formado de formas netas) y la economía general de la operación, proporcionan a este proceso único sus numerosas aplicaciones, atractivas y crecientes.

Por medio de las técnicas de metalurgia de polvos se fabrica una amplia gama de partes y componentes: (a) pequeños balines para bolígrafos; (b) componentes automovilísticos (que en la actualidad constituyen cerca del 70% del mercado de la metalurgia de polvos), como anillos para pistones, varillas de conexión, placas de frenos, engranes, levas y bujes; (c) aceros para herramientas, carburos de tungsteno cermets como materias para herramientas y matrices; (d) escobillas de grafito impregnadas con cobre para motores eléctricos; (e) materiales magnéticos; (f) filtros metálicos y rodamiento impregnados con aceite de porosidad controlada; (g) espumas metálicas (h) implantes quirúrgicos, y (i) muchos otros para aplicaciones aeroespaciales, nucleares e industriales.

En la ilustración; 1 (a) ejemplos de partes comunes fabricadas por medio de procesos de metalurgia de polvos. (b) palanca superior de disparo para un rociador comercial de riego; (c) cojinetes.<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> Kalpakjian edición 5, capítulo 17.



*Ilustración 1: Ejemplos de partes sinterizadas, Kalpakjian Ed 5 capítulo 17*

Las ventajas de este proceso en comparación a otros son las siguientes:

- Virtualmente ilimitadas opciones de aleaciones, componentes y propiedades asociadas.
- Es un proceso económico en lotes grandes (100.000 partes).
- Gran control de las dimensiones y propiedades físicas.
- Gran utilización del material, solo cerca del 3% se pierde.

Algunas de las desventajas de este proceso son las siguientes.

- Alto costo de equipo y herramientas.
- Alto costo de polvos metálicos.
- Dificultades de almacenamiento y manejo de polvos metálicos.
- Limitaciones en la geometría del dado ya que el polvo de metal no escurre dentro del dado.
- Componentes grandes no pueden ser producidos en gran escala.

## **2.2 Producción de polvos metálicos.**

El proceso de metalurgia de polvos consta de las siguientes operaciones en secuencia,

1. Producción de polvos
2. Mezcla
3. Compactación
4. Sinterizado
5. Operaciones de acabado.

Existen diversos métodos para producir polvos metálicos, la mayoría de los cuales se pueden elaborar mediante más de un método. La elección depende de los requisitos del producto final. La microestructura, las propiedades de la usa y de la superficie, la pureza química, la porosidad, la forma y la distribución del tamaño de las partículas depende del proceso específico que se usó. Estas características son importantes, ya que afectan de manera significativa el flujo y la permeabilidad durante la compactación y en las otras operaciones de sinterizado, en el siguiente punto de la presente memoria se muestra una tabla con algunos de estos métodos para la obtención de polvos. En la ilustración 4 se muestran los distintos tamaños y formas de las partículas de polvo.

**2.2.1 Métodos Producción de Polvos Metálicos.**

<b>Proceso</b>	<b>Como se obtiene el polvo</b>	<b>Tamaño partícula</b>
Atomización	Produce una corriente de metal líquido cuando se inyecta metal fundido por un pequeño orificio. La corriente se divide con chorros de gas inerte o aire (atomización por gas o agua)	Partículas esféricas se pueden hacer con una gran velocidad ya que el agua presente en la cámara de atomización enfría estas partículas, se requiere un secado posterior para la utilización del producto.
Reducción	Reducción de óxidos metálicos (eliminación del oxígeno) utiliza gases, entre ellos hidrogeno y monóxido de carbono como agentes reductores	Partículas esponjosas, porosas y tienen forma esférica o anulares.
Deposición electrolítica	Soluciones acuosas o sales fundidas	Polvos producidos de los más puros existentes.
Carbonillos	Se forman al dejar que el hierro o el níquel reaccionen con el monóxido de carbono, después los productos de las reacciones se descomponen en hierro y níquel	Las partículas son pequeñas, densas, de alta pureza y tienen formas esféricas uniformes.
Trituración	Molido de bolas o esmerilado de materiales frágiles	Si los metales son frágiles las partículas son angulares, si son dúctiles tienen formas de hojuelas, las que no son tan buenas para la metalurgia de polvos.

*Tabla 1: Métodos de Producción de Polvos*

## 2.3 Aleado Metálico.

El Aleado Mecánico (AM) es un método de producción de polvos con microestructuras controladas extremadamente finas. Al realizar moliendas de distintos metales, en ausencia de un lubricante, tienden formar compuestos metálicos. Por otra parte, polvos duros como el carburo de wolframio que normalmente no forman compuestos pueden alearse para formar una solución sólida con un polvo blando como el cobalto mediante molienda en un molino de bolas.

El proceso por el cual ocurre el aleado mecánico, es las partículas de polvo metálico son repetidamente deformadas, fracturadas y soldadas en frío. Cada vez que dos bolas colisionan, atrapan partículas de polvos entre ellas. La fuerza del impacto deforma las partículas y crea nuevas superficies de átomos, como tales superficies se oxidan pronto la operación de molienda en la mayoría de los casos se realiza en atmósfera de gas inerte.

En las primeras etapas del proceso el polvo metálico es todavía blando con respecto a su estado final y su tendencia es a soldarse para formar grandes partículas. Como consecuencia se genera una amplia distribución de tamaños de partículas, algunas hasta 3 veces mayores en diámetros que las partículas originales, conforme el proceso de molienda continua, las partículas se endurecen y su habilidad para oponerse a la deformación sin fracturarse disminuye, por lo que en vez de tender a soldarse se comienza a fracturar y a formar partículas nanométricas.

Otras propiedades del aleado mecánico son, además de mejorar la homogeneidad, posibilitar que la distribución de fases y el tamaño de grano sean reducidos al orden de los nanómetros (nanocrystalinidad), dar lugar a una gran densidad de intercaras que pueden ser sintetizadas por otros métodos. Las propiedades de estos materiales pueden ser utilizadas directamente, o bien, como precursores para formar fases de equilibrio con una singular microestructura.<sup>3</sup>

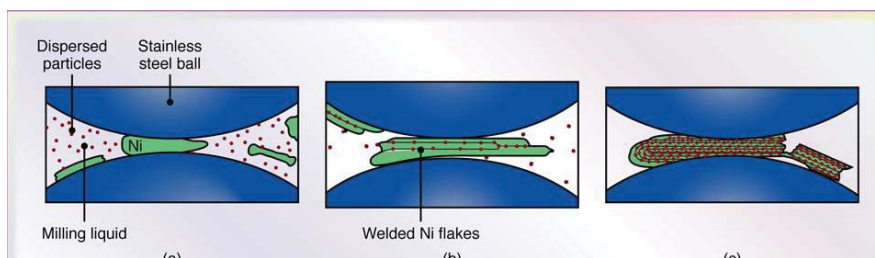


Ilustración 2: Esquema de aleado mecánico, Kalpakjian Ed 5 capítulo 17

<sup>3</sup> Biblioteca de la Ingeniería, Universidad de Sevilla. [3]

## REDISEÑO DE SISTEMA PARA CONTROL DE ATMÓSFERAS EN PRENSA UNIAXIAL

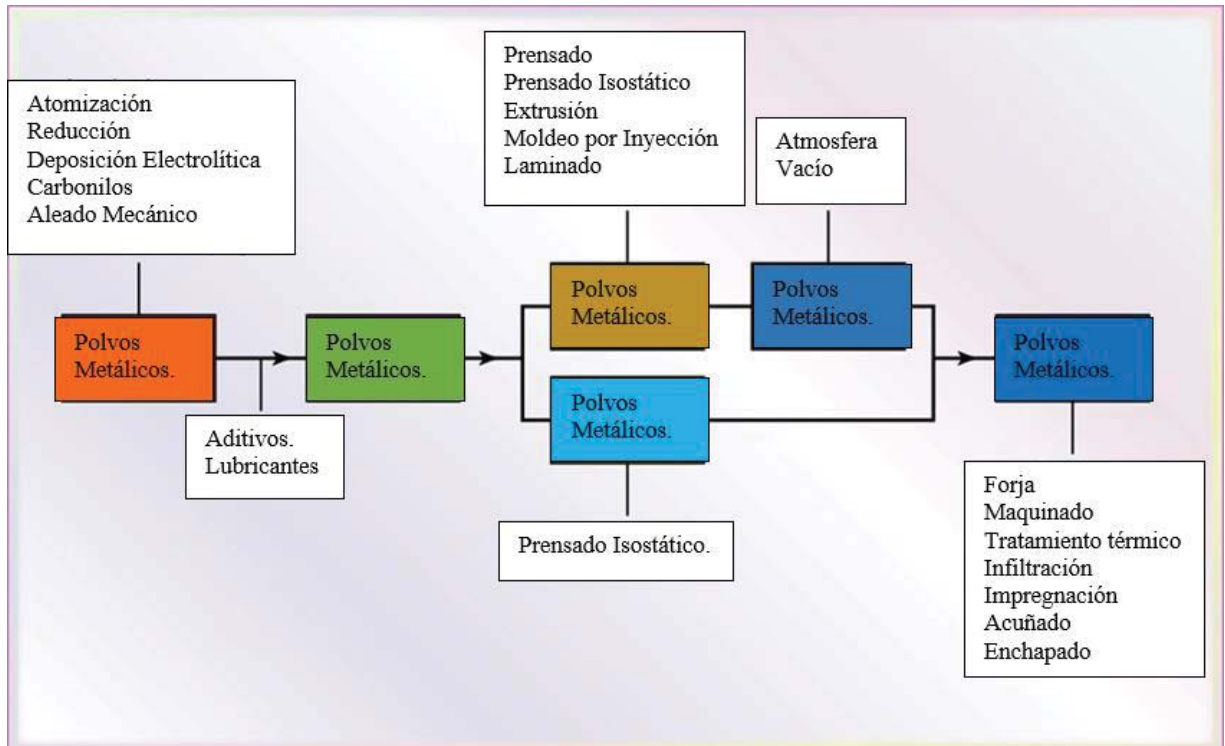


Ilustración 3: Resumen de procesos y operaciones comprendidas en la fabricación de partes mediante metalurgia de polvos. Kalpakjian Ed 5 capítulo 17

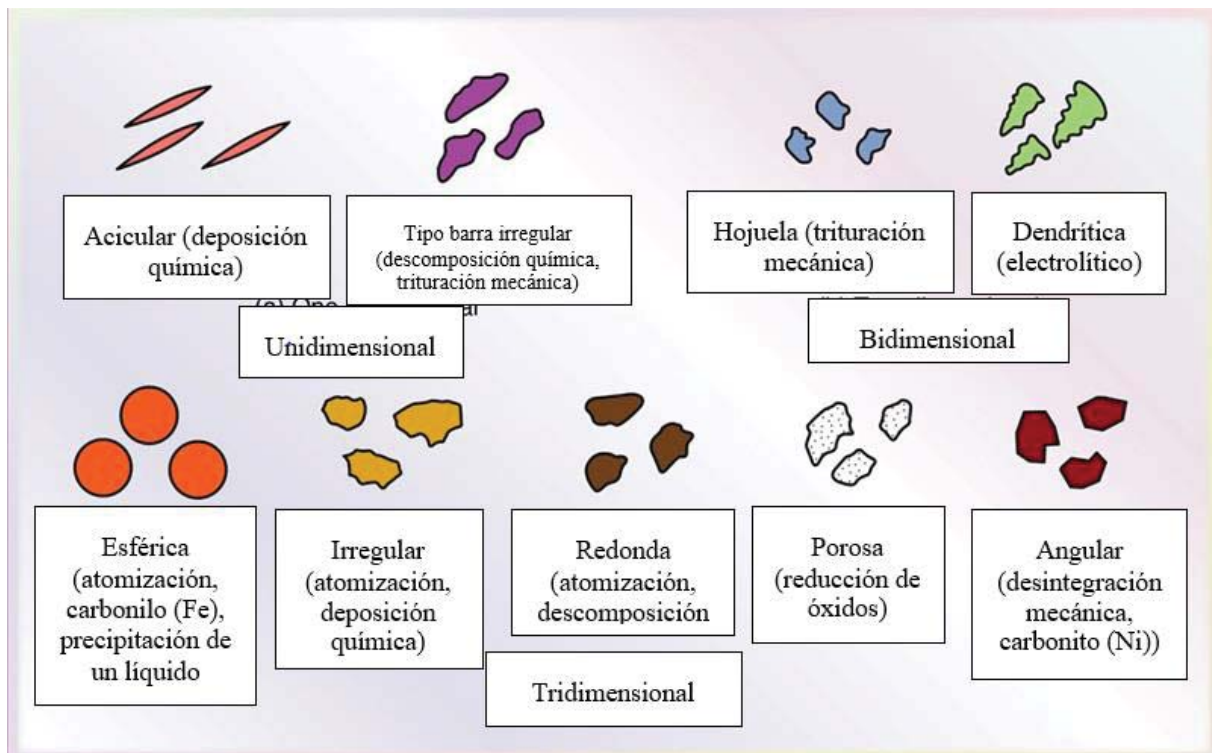


Ilustración 4: Forma de las partículas en la metalurgia de polvos y procesos por los cuales se producen. Los polvos de hierro se elaboran por medio de muchos de estos procesos, Kalpakjian Ed 5 capítulo 17



## 2.4 Mezclado y Combinado de Polvos.

En el proceso de consolidación (compactación y sinterizado) de los polvos, para lograr buenos resultados los polvos metálicos necesitan homogeneizarse perfectamente antes del proceso. Por lo anterior, es que existen los procesos previos de mezclado y combinación utilizados en este contexto. El mezclado se refiere a la mezcla de polvos de la misma composición química, pero posiblemente con diferentes tamaños de partícula. La combinación (aleado) se refiere a la mezcla de polvos de diferente composición química, una ventaja de esta tecnología es la oportunidad de combinar varios metales en aleaciones que sería difícil o imposible producir por otros medios.

El mezclado de polvos tiene por objetivo:

- Obtener uniformidad, ya que los polvos fabricados por los distintos procesos tienen diferentes tamaños y formas. La mezcla es aquella en la que todas las partículas de cada material se distribuyen uniformemente.
- Poder introducir polvos de distintos materiales, incluso metales, para impartir propiedades y características mecánicas especiales al producto. Existen dos categorías bien definidas, tales como aglutinantes y desfloculantes. Los aglutinantes tienen como función lograr una resistencia adecuada en las partes prensadas, pero no sinterizadas. Los desfloculantes inhiben la aglomeración de los polvos para mejorar sus características de flojo durante la alimentación.
- Para mezclar los lubricantes con los polvos, para mejorar sus características de flujo. Se obtiene una menor fricción entre las partículas metálicas, mejor flojo de los metales en polvo hacia los moldes, y una mayor vida de las matrices. Los lubricantes que se usan con frecuencia son ácido esteárico o estearato de zinc, en la proporción de 0,25 a 5% en peso. También para reducir la fricción se agrega aluminio en pequeñas cantidades.

El mezclado y la combinación se realizan por medios mecánicos, utilizando tambores rotatorios, o fijos, pero con paletas mezcladoras. El mezclado de los polvos se debe hacer bajo condiciones controladas, para evitar contaminaciones o deterioro. El deterioro se debe a mezclado excesivo, que puede modificar la forma de las partículas y endurecerlas por trabajo, dificultando así la

siguiente operación de compactación. Los polvos se pueden mezclar en aire, en atmósferas inertes (para evitar la oxidación) o en líquidos (lubricantes).<sup>4</sup>

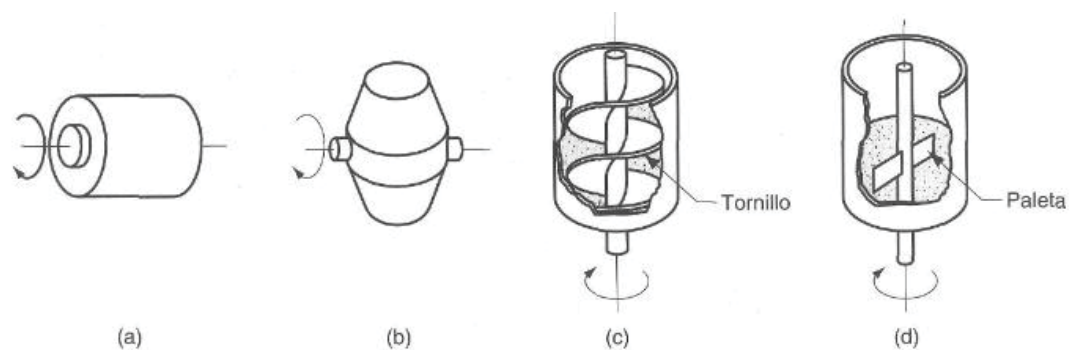


Ilustración 5: Varios dispositivos de mezclado y combinado: (a) Tambor rotatorio, (b) Doble cono rotatorio, (c) Mezclador de tornillo y (d) Mezclador de paletas.

---

<sup>4</sup> Tema n°7 Facultad de ciencias exactas y tecnología, Universidad de Tucumán, autor Daniel Borkosky.[4]

### 2.4.1 Tabla comparativa entre PM y otros procesos de conformado.

	Proceso	-Ventaja sobre la metalurgia de polvos.	-Limitaciones comparadas con la metalurgia de polvos.
1	Fundición	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Un gran rango de formas y tamaños</li> <li>-Generalmente bajo costo del molde y set up.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Un poco de desperdicio de material durante el proceso.</li> <li>-Se requiere de un acabado posterior.</li> <li>-Puede que no sea útil para aleaciones con alto punto de fusión.</li> </ul>
2	Forja	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Alta tasa de producción sobre piezas grandes.</li> <li>-Altas propiedades mecánicas a través del control del grano.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Requiere cierto mecanizado posterior.</li> <li>-Desperdicio de material</li> <li>-Pobre control dimensional, y mal acabado superficial.</li> </ul>
3	Extrusión	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Grandes producciones de piezas largas.</li> <li>-Secciones transversales completas pueden ser producidas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Solo se pueden realizar secciones constantes.</li> <li>-Bajo control dimensional.</li> </ul>
4	Mecanizado	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Amplia gama de partes y tamaños</li> <li>-Bajo tiempo de ejecución.</li> <li>-Flexibilidad</li> <li>-Buen control dimensional y acabado superficial.</li> <li>-Herramientas simples.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Desperdicio de material en forma de viruta.</li> <li>-Baja productividad.</li> </ul>

Tabla 2: Tabla comparativa

Un ejemplo de esta vía de fabricación se muestra en la figura 6 para cojinetes autolubricados.

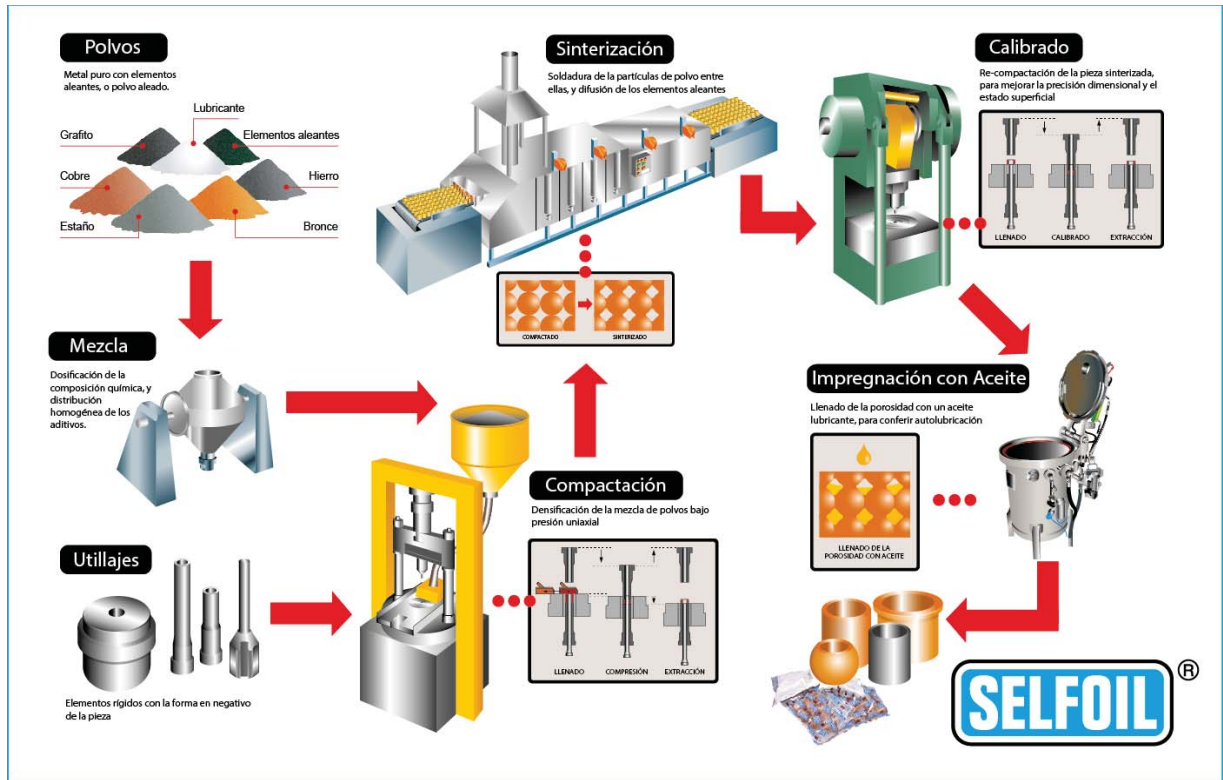


Ilustración 6: ejemplo de proceso de fabricación de cojinetes sinterizados autolubricados, empleado compactación en verde y sinterizado. [4]

## 2.5 Compactación de Polvos

La operación más importante en la metalurgia de polvos es la compactación. La habilidad para obtener una densidad presionada satisfactoria determina a menudo la factibilidad de manufactura de piezas a través de la metalurgia de polvos.

El propósito de la compactación es consolidar el polvo en la forma deseada tan cerca de las dimensiones finales como sea posible, teniendo en cuenta cualquier cambio dimensional que resulte del sinterizado; en esta etapa se puede también impartir un nivel y tipo de porosidad deseado y proporcionar una adecuada resistencia para la manipulación.

La compactación uniaxial, técnica empleada en este trabajo de investigación puede realizarse con o sin temperatura. Esto afectará la densidad del compacto. La densidad del artículo presado también depende de la forma de la pieza, el tamaño de partícula del polvo, la presión empleada

y el tiempo de permanencia dentro del horno de sinterización. A continuación se describen los rasgos principales de las técnicas de compactado en frío y en caliente utilizadas en este proyecto<sup>5</sup>[5].

### 2.5.1 Compactado por Troquel.

El compactado por troquel es el método más ampliamente utilizado. La secuencia usual de operaciones en el compactado por troquel consiste en llegar la cavidad del troquel con un volumen definido de polvo; la aplicación de presión requerida mediante el movimiento de punzones superior e inferior uno hacia el otro; la expulsión del comprimido verde por el accionar del punzón inferior.

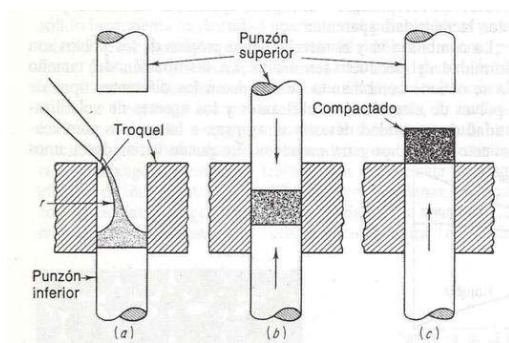


Ilustración 7: Esquema compactado por troquel. [5]

El diseño de los troqueles o moldes es bastante importante, estos se realizan en materiales seleccionados dependiendo de las características del proceso, generalmente de aceros para herramienta endurecidos, aceros rápidos, etc. En este ítem se deben considerar variables como la característica abrasiva del polvo metálico, ya que podrían desgastar bastante rápido la matriz. Además, debe seleccionarse el material cuidando las temperaturas de operación, si el compactado se realizará en caliente, la respuesta del material será distinta, para lo cual se debe escoger el correcto.

Las prensas más utilizadas en este proceso son las uniaxiales, en la que la presión se aplica al polvo en una sola dirección, mediante esta compresión uniaxial pueden obtenerse piezas en verde con dimensiones y acabados precisos, obteniéndose una alta productividad en la industria

<sup>5</sup> Sydney H. Avner. "Introducción a la Metalurgia Física" ED. Mc Graw Hill 1994.

mediante esta técnica. Un inconveniente de la compactación uniaxial es la baja relación longitud/diámetro que puede obtenerse en las piezas debido al gradiente de densidad que se produce entre el centro de la pieza las zonas más próximas al punzón [6].

### **2.5.2 Compactación por Troquel en Caliente.**

La industria de la metalurgia de polvos continúa creciendo porque los avances en materiales crudos y procesos de producción de partes permiten la manufactura de componentes con gran complejidad y altos niveles de desempeño.

Sin embargo los usuarios finales de partes de pulvimetalurgia están demandando altos niveles de propiedades mecánicas, disponibles solamente a través de partes con alta densidad. Tradicionalmente los métodos empleados para alcanzar altas densidades incluyen el uso de infiltraciones de cobre, doble compresión y doble sinterización y polvo forjado. Lo cual involucra el uso de procesos secundarios, lo que resulta en costos significativamente elevados y por lo tanto ofrecen, malos ahorros en costos de producción. El proceso de compactación en caliente es una técnica alternativa en la cual las piezas logran alcanzar densidades y propiedades mecánicas similares a las obtenidas en el proceso de doble compresión/ doble sinterización utilizando un proceso de compresión uniaxial.

El proceso de compactación en caliente consiste en aplicar presión y temperatura simultáneamente. Aunado el compactado y sinterizado tienen lugar al mismo tiempo, para tal efecto el proceso incorpora el uso de polvo caliente y herramental caliente en prensas de compactado uniaxial. Lo que ocasiona densidades mayores en las piezas compactadas. La ilustración 8 muestra esquemáticamente el proceso de compactación en caliente.

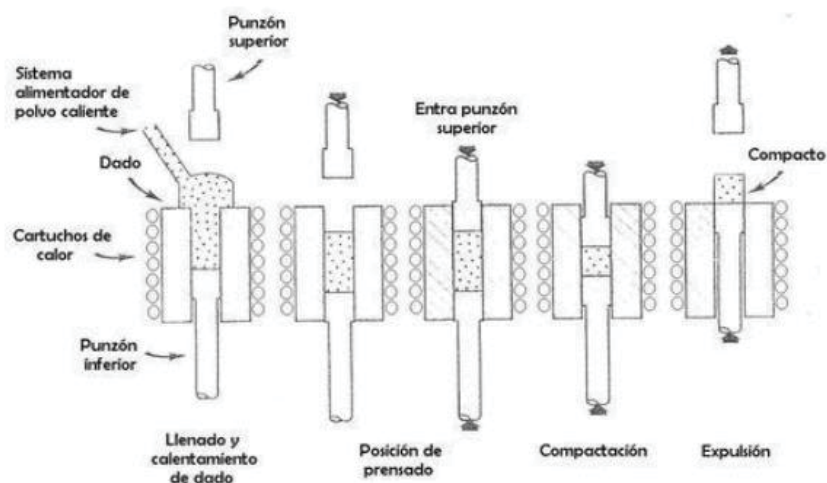


Ilustración 8: Esquema de compactado en caliente por troquel.

Aplicaciones exitosas del proceso de compactación en caliente necesitan que el polvo suministrado y el herramental estén calientes a las temperaturas adecuadas para tal efecto. El control de temperatura recomendado para el calentamiento del polvo y del herramental es de  $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ . El calentamiento del herramental es llevado a cabo usando cartuchos de calor empotrados en el dado.

Las temperaturas de polvo y dados usadas varían, de acuerdo a las propiedades finales que se deseen obtener teniendo en cuenta que por cada incremento en la temperatura de compactación se verá incrementada la densidad en verde.

Actualmente son 3 sistemas de distribución y calentamiento de polvo los que se encuentran disponibles en el mercado. Cada sistema es capaz de alimentar y calentar el polvo a la temperatura apropiada. Los tres sistemas de alimentación son:

- Cincinnati Inc. the temp system.
- Abbott Furnace Company thermal powder processor.
- Slotheater.<sup>6</sup>[6]

<sup>6</sup> ASM Handbook. Volumen 7, "Powder Metal Technologies and Applications". USA 1998

### 2.5.3 Compactado Isostático en Frío.

Los comprimidos crudos o en verde se pueden someter a una presión hidrostática para lograr una compactación más uniforme y, por lo tanto, densidad.

El prensado isostático en frío (CIP), el polvo metálico se coloca en un molde flexible, comúnmente fabricado con hule, neopreno, uretano, cloruro de polivinilo y otros elastómeros, después se presuriza el ensamble hidrostáticamente en una cámara, por lo general utilizando agua. La presión más común es de 400 MPa, aunque se pueden usar presiones de hasta 1000 [MPa]. Una aplicación común se da en revestimientos de cilindros automovilísticos, figura 9 [7].

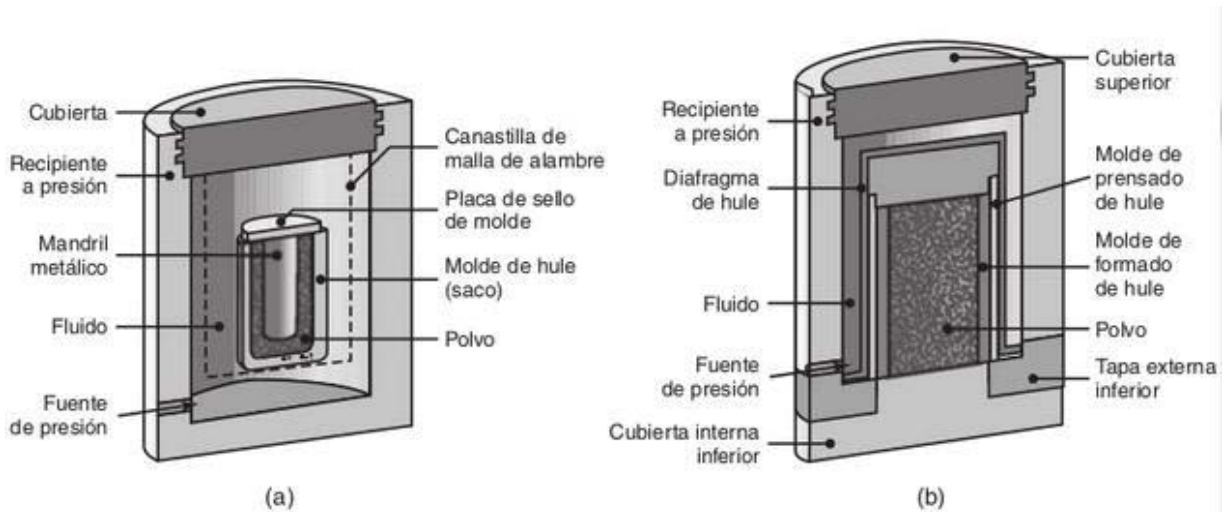


Ilustración 9: Diagrama esquemático del prensado isostático en frío, aplicado para el formado de un tubo [7].

### 2.5.4 El Prensado Isostático en Caliente.

El contenedor se fabrica de una hoja de metal de alto punto de fusión y el medio de presurización es gas inerte de alta temperatura o un fluido víteo. Las condiciones comunes para el HIP son presiones elevadas hasta de 100 MPa, aunque pueden ser tres veces mas altas, y a una temperatura de 1200°C. La ventaja principal del HIP es su capacidad para producir compactos que tienen casi 100% de densidad, buen enlace metalurgico de las particulas y buenas propiedades mecánicas, por lo que ha ganado una amplia aceptación en la fabricaion de piezas de alta calidad.



El proceso del HIP se utiliza principalmente en la fabricación de componentes de superaleaciones para las industrias aeronáuticas y aeroespaciales .

- Debido a la uniformidad de la presión en todas direcciones y la ausencia de fricción en las paredes de la matriz, produce compactos totalmente densos con una estructura y densidad de granos uniformes, sin considerar la forma de la pieza.
- El HIP tienen la capacidad de manejar partes muchos más grandes que los otros procesos de compactado.
- Las limitaciones del HIP son las siguientes, tiene tolerancias dimensionales más amplias que las obtenidas por otros procesos de compactado
- El costo del equipo y tiempo de producción son superiores a los requeridos en otros procesos.
- Solo se aplica a cantidades relativamente pequeñas de producción; por lo general menos de 10000 partes o piezas por año [7].

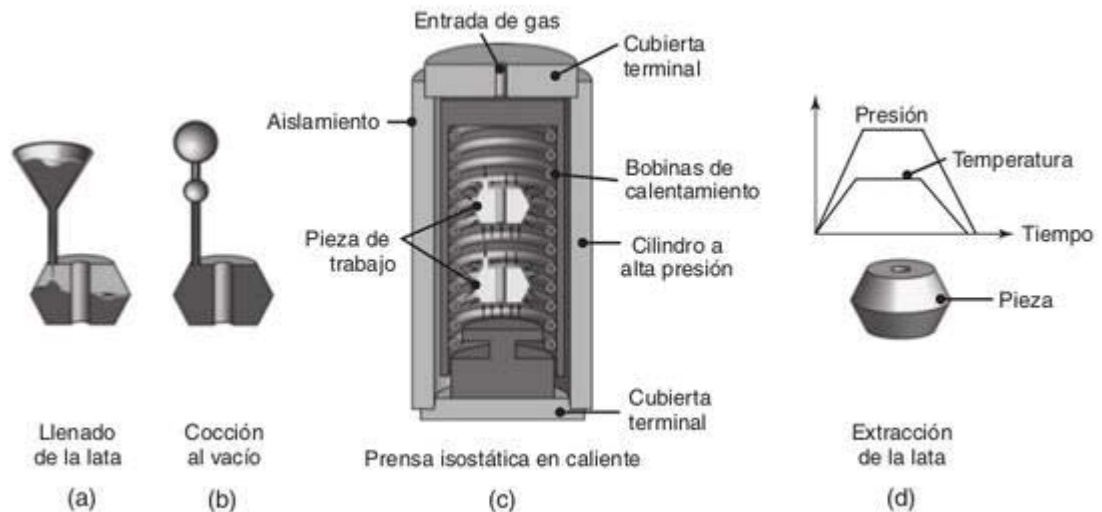


Ilustración 10: Esquema de prensado isostático en caliente.[7].

### 3 Hornos Industriales (Industria Metal-Mecánica).

El horno es el elemento principal de los tratamientos térmicos. Es un instrumento constituido por una caja susceptible de calentamiento y que permite el control y regulación del tiempo, de la temperatura, de la atmosfera y de las velocidades de calentamiento y de enfriamiento.



*Ilustración 11: Hornos de Tratamiento Térmico. [9]*



*Ilustración 12: Horno Tratamiento Térmico [9]*

### **3.1 Tipos de Horno.**

Los hornos se pueden dividir en varios tipos según el criterio de clasificación que se adopte. Se pueden clasificar a partir del procedimiento de calentamiento, por la atmósfera o por la solera del horno. Esquemáticamente se puede hacer la división como a continuación:

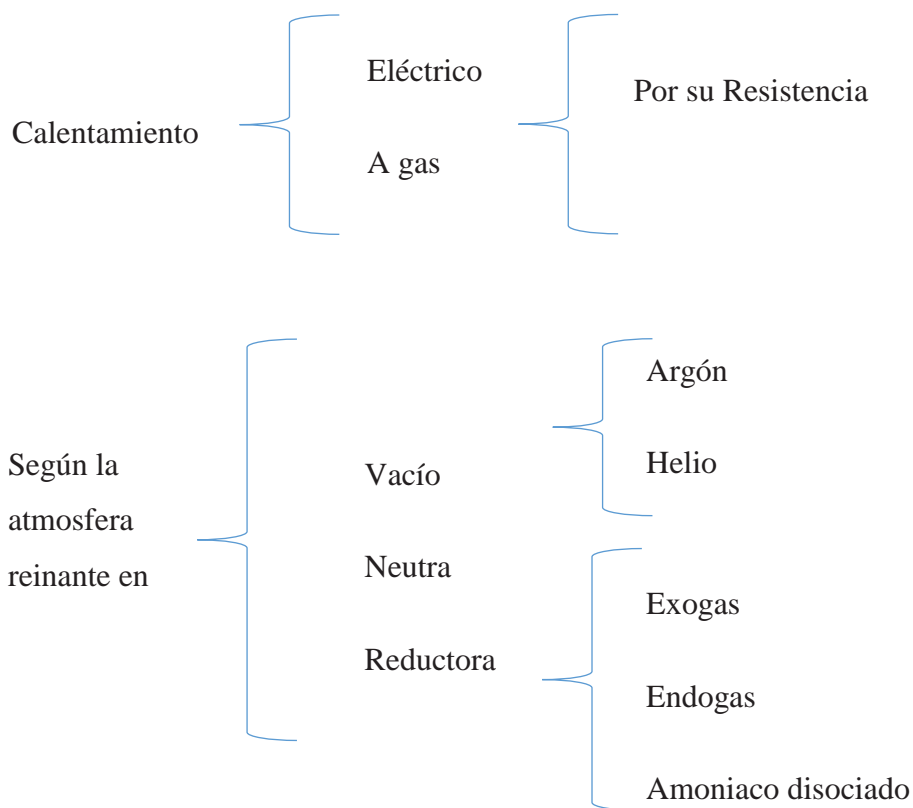


Ilustración 13: Clasificación de los hornos.

Los fallos estructurales asociados con el uso de altas temperaturas suelen presentarse en el tratamiento térmico. Una atmósfera químicamente inadecuada dentro del horno, puede tener efectos adversos sobre la composición química y, en consecuencia, sobre las propiedades físicas de la capa de material. El oxígeno en la atmósfera del horno, causa la oxidación de la superficie de la pieza que se trata térmicamente [8].

### 3.2 Horno Según Tipo de Calentamiento.

En esta clase de hornos el sistema de calentamiento que se acopla al horno depende de la temperatura a conseguir y ésta es función de la naturaleza del material a tratar térmicamente.

El calentamiento por gas, tiene como ventaja la economía y como inconveniente la dificultad de control de la temperatura. Por ello, apenas se emplea en calentamiento para tratamientos térmicos.

El método más utilizado es por el sistema de resistencia eléctrica, que aprovecha el calor generado por la Ley de Joule. La disposición de las resistencias da nombre a los hornos, que son de tipo mufla o caja. Los hornos tipo caja tienen las resistencias instaladas a lo largo de las paredes interiores y por lo tanto en contacto con la atmósfera del horno. Y las muflas contienen las resistencias envueltas en fibra cerámica moldeable, las cuales hacen de pared.

El control de la temperatura de los hornos se realiza mediante termopares. Estos consisten en sendas varillas metálicas que tienen un extremo soldado y otro unido a una unión fría conectada a un milivoltímetro. Se genera una fuerza electromotriz por efecto Peltier y por efecto Thomson. Dado que el potencial es función de la temperatura que se encuentra la unión soldada, la lectura de potencial se traduce fácilmente en grados de temperatura [8].

### **3.3 Tipos de Horno Según Atmosfera.**

Se entiende por atmósfera, la masa gaseosa encerrada dentro del horno, que está en contacto con las piezas a tratar. Las atmósferas pueden tener carácter neutro, oxidante o reductor. El papel desempeñado por la atmósfera controlada es doble, por una parte evita que se produzcan reacciones perjudiciales, como son la oxidación y la descarburación de las piezas que se están tratando. Por otra parte, permite realizar las reacciones previstas, a saber, la reducción de óxidos superficiales y la eliminación de gases absorbidos. Las atmósferas neutras de argón, helio y nitrógeno apenas se emplean, debido al precio de estos gases y a las trazas de oxígeno que suelen contener [8].

### **3.4 Hornos que Utilizan Prensas.**

La empresa Easy Fashion (China), tiene en el mercado una prensa uniaxial, que puede alcanzar temperaturas hasta de 2.600°C y puede trabajar en condición de vacío o alguna atmósfera inerte. Está elaborada para trabajar en el sinterizado de aleaciones duras, cerámicas funcionales y polvos metálicos a alta temperatura. Posee refrigeración de agua para controlar en enfriamiento, tiene integrado un termopar para el control de la temperatura. El aislamiento es de grafito y carbón. Altamente automatizado, sensores y funcionamiento seguro.



*Ilustración 14: Horno de Vacío con Prensa en caliente [10]*

Otra alternativa la empresa Thermal Technology la que tiene en el mercado la siguiente alternativa, la maquina está compuesta por una cámara de vacío, una presa hidráulica, aislamiento de grafito, una bomba de vacío y control programable. También tiene disponible una opción para intercambiar las zonas de calor dentro de la cámara, tiene cuatro zonas. La capacidad de presión varía entre 10-250 ton dependiendo del modelo. Las siguientes imágenes muestran algunas de las opciones que hay en el mercado.



*Ilustración 15: Prensa en caliente con vacío integrado [11]*



*Ilustración 16: opción de mayor capacidad, 100 toneladas y dado de 24"x24"x30" [11]*

## 4 Protocolo de Operación Actual.

Los polvos que se emplean como referencia para esta tesis, son fabricados mediante el proceso de aleado mecánico, algo que por cierto, complica su compactación por dos motivos; en primer lugar se trata de polvos fuertemente endurecidos por deformación y además, su microestructura puede ser alterada rápidamente al ser expuesta a altas temperaturas por tiempos prolongados. Por lo anterior, una condición especial para las prensas requeridas en este caso es que alcancen altas presiones y que posean hornos que puedan trabajar adecuadamente, preferiblemente a bajas temperaturas y atmósferas controladas.

Actualmente, una vez obtenidos los polvos se procede a su compactación en caliente, también llamada sinterización en frío debido a que el proceso emplea altas presiones pero bajas temperaturas. El primer paso para obtener los compactos es llenar la matriz de compactación con los polvos para luego poner dicha matriz dentro del horno, donde se proporcionará la temperatura para promover la consolidación. El horno, una vez cargado con la matriz se introduce en la prensa hidráulica, donde se proporcionará la presión necesaria para la consolidación.

Para realizar una adecuada compactación se realiza la siguiente metodología:

1. Se conecta el horno de calentamiento a la red eléctrica.
2. Se ingresa solo el cuerpo exterior de la matriz.
3. Se lubrica con estereato de zinc el punzón inferior, y se ingresa al centro removible.
4. Se ingresa al horno, el centro removible.
5. Se programa la temperatura de compactación que se desea dentro de la matriz y se espera para obtener la temperatura.
6. En seguida se verifica la temperatura dentro de la matriz, con un termopar.
7. Se da paso al gas inerte (argón) y se vierte el polvo dentro de la matriz.
8. Se espera un tiempo de 4 minutos para que el polvo alcance la temperatura
9. Se introduce el punzón superior de la matriz lubricado con estereato de zinc
10. Se alinea la guía de punzón encima de la matriz.
11. Se introduce el punzón intermedio entre cilindro de la prensa y el punzón superior de la matriz.
12. Se tapa el horno.

## REDISEÑO DE SISTEMA PARA CONTROL DE ATMÓSFERAS EN PRENSA UNIAXIAL

13. Se cierra la válvula de paso de aceite en la bomba hidráulica y se comienza a hacer descender el cilindro hidráulico.
  14. Se alinea el punzón intermedio con el cilindro hidráulico.
  15. Cuando se llega al contacto cilindro hidráulico-punzón intermedio, se regula la segunda válvula de paso para que baje lentamente el cilindro.
  16. Se llega a la presión final de compactación y se espera un tiempo de 2 minutos.
  17. Se abren las dos válvulas de paso para que el punzón vuelva a su posición inicial y el aceite retorne a la bomba.
  18. Se retira la tapa del horno, el punzón intermedio y la guía de punzón.
  19. Se retira la matriz de compactación.
  20. Se cierra el paso de argón.
  21. Se monta la matriz de compactación sobre plataforma.
  22. Se vuelven a cerrar las válvulas de paso la primera por completo mientras que la segunda se deja abierta con media vuelta en sentido anti-horario.
  23. Se hace descender el cilindro hidráulico y se alinea el cilindro contra el punzón superior de la matriz.
- Por último, se retira la muestra de la matriz [13].



## 5 Equipos Disponibles.

En este ítem se presentarán los equipos que son utilizados actualmente en el laboratorio.

### 5.1 PRENSA

Para el posterior prensado se utiliza una prensa hidráulica que está fabricada de una estructura de acero con perfiles canal o C, en la cual se encuentra una bomba ENERPAC PUJ1200-E que contiene un cilindro hidráulico ENERPAC de simple efecto modelo RC-756 con capacidad de 75 [Ton] de aplicación de carga y carrera máxima de 15.2 [cm] (6 pulgadas) y regulador de velocidad ENERPAC modelo V82 mostrada en la ilustración número 17. La presión de compactación que se emplea normalmente, alcanza los 900 MPa. [12]



*Ilustración 17: Prensa Hidráulica [13]*

### 5.2 Horno Actual

El horno utiliza energía de la red eléctrica para proporcionar el calor necesario en la realización del proceso en caliente. Funciona a través de resistencias eléctricas las cuales están recubiertas por fibra cerámica moldeable describiendo un cilindro dentro del cual se aloja la matriz.

## REDISEÑO DE SISTEMA PARA CONTROL DE ATMÓSFERAS EN PRENSA UNIAXIAL

El espacio interno cuenta con un aislante térmico, evitando hacer ineficiente el proceso y minimizar las pérdidas energéticas con flujos de calor hacia el exterior. La temperatura se controla a través de un termopar alojada en el interior del horno por medio de una perforación. [13]

El horno tiene la capacidad térmica de alcanzar  $1000^{\circ}\text{C}$ , aunque las temperaturas máximas de operación serán de aproximadamente  $300^{\circ}\text{C}$ , por lo que el equipo cumple con los requerimientos necesarios para llevar a cabo el proceso. Además, cuenta con un actuador eléctrico on/off, en el cual se puede controlar la temperatura de compactación, indicando el valor deseado, retroalimentado a través del termopar.

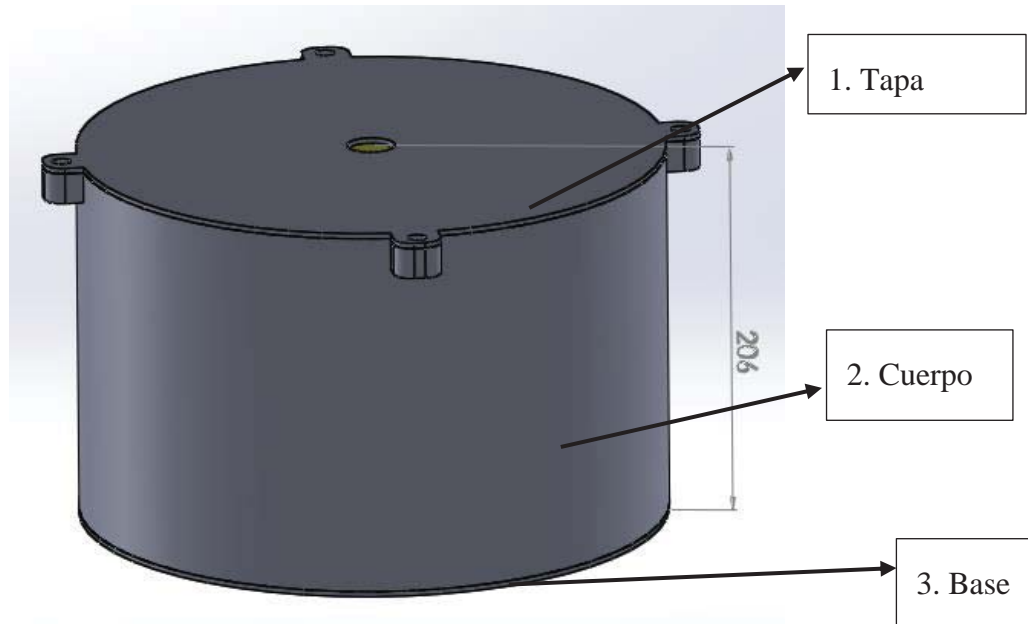


*Ilustración 18: Horno de resistencia eléctrica para compactación en caliente. [13]*



*Ilustración 19: Controlador de temperatura del horno. [13]*

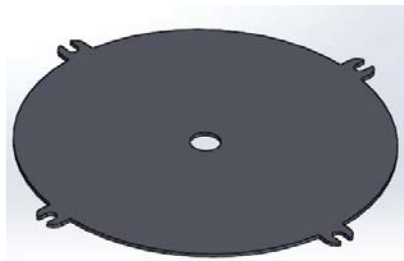
La consolidación comienza cuando los polvos son compactados a una presión de  $900\text{ [MPa]}$  a una temperatura de  $300^{\circ}\text{C}$  dentro de la matriz de compactación, la cual se llenará con argón para así evitar la oxidación. Para ver más en detalle el horno se divide en las siguientes partes.



*Ilustración 20: Modelación horno actual, SolidWorks 2014.*

### 5.3 Tapa Actual.

Va soportada sobre el horno y fijada por medio de 4 pernos para conservar la posición. Además contiene un orificio central de 26 [mm] por el cual ingresa y se retira el punzón que actúa como intermediario de fuerza entre el cilindro de la prensa y el punzón superior de la matriz. El material de la tapa es acero inoxidable 304;



*Ilustración 21 Tapa actual, Modelada SolidWork 2014.*



*Ilustración 22: Foto actual de la tapa del horno.*

La manera de sujeción de la tapa al horno es por medio de cuatro pernos que van sobre unas platinas con ranura cuya disposición es de una cada 90°. En el cuerpo central del horno hay 4 cubos de acero soldados a este que contienen hilo por el centro y van soldados con la misma disposición que en la tapa. La misma posee un cordón de teflón el cual cubre todo el perímetro de la tapa y realiza el sello actual.



*Ilustración 23: Fijación actual, mariposas.*

#### **5.4 Herramental (Matriz).**

Para compactar los polvos, se usa una matriz de material norma AISI H13, fabricada de un acero aleado al cromo, molibdeno, vanadio de alta resistencia al desgaste, resistencia y tenacidad en caliente. Su mayor utilización es en fabricación de herramientas para forja y estampa en caliente de aleaciones ligeras, moldes e insertos para inyección de metales base aluminio, plomo, zinc, etc. Estas herramientas fabricadas con el acero anterior, son sometidas a elevados esfuerzos para extrusión de metales ligeros sobre todo mandriles para prensado de tubos. Cuchillas para corte en caliente y frío. Además, herramientas de extrusión en caliente, troqueles de presión, insertos de matrices, moldes, husillos de extrusión, etc. [12]. Las dimensiones de la matriz corresponden a 100 [mm] de diámetro exterior, 40.02 [mm] diámetro interior y 100 [mm] de altura, un centro removible de 40 [mm] de diámetro exterior, 13.01 [mm] diámetro interior y 100 [mm] de altura y un punzón superior de 13 [mm] de diámetro con 80 [mm] de altura y su punzón inferior de 13 [mm] de diámetro y 30 [mm] de altura.



*Ilustración 24: Ilustración 18: Matriz de compactación de acero H-13 [13]*

## **6 Diseño Conceptual.**

El proceso para la generación de un diseño conceptual está compuesto por dos etapas: la etapa de definición, que consiste en establecer el problema o necesidad a resolver mediante requerimientos del cliente y traducir estos a términos medibles de ingeniería. La segunda etapa es la denominada preliminar del diseño y consiste en un proceso creativo para la generación de conceptos que satisfagan el problema.

### **6.1 Etapa de definición.**

La metodología que emplearemos para esta primera etapa será el despliegue de funciones de calidad (QDF por sus siglas en inglés). El QFD tiene como objetivo primordial, integrar los requerimientos y expectativas de los clientes, al proceso del diseño.

#### **6.1.1 Identificación del Cliente**

En general este tipo de sistemas de compactación son utilizados con fines de investigación, por lo tanto se podría afirmar que el cliente sería aquella persona que tenga la necesidad de consolidar materiales metálicos mediante la compactación en caliente, empleando altas presiones y bajas temperaturas, comparando con el proceso convencional de compactación en verde y sinterización.

#### **6.1.2 Determinación de los Requerimientos del Cliente**

En función del paso anterior, se presenta un listado de los requerimientos que debe cumplir el sistema para satisfacer las necesidades del cliente:

- A.- Que opere a temperaturas elevadas (1000 °C)
- B.- Que opere bajo presiones altas (900 [MPa])
- C.- Que pueda operar con una atmósfera interna de gas argón u otro gas ~~o con vacío.~~
- D.- Que sea de operación segura.
- E.- Que pueda ser portátil.
- F.- Que sea económica.

### 6.1.3 Determinación de la Importancia de los Requerimientos del Cliente:

Para la determinación de la importancia se procederá al método de eliminación por pares, este método se basa en comparar cada elemento de la primera columna contra cada elemento de la primera fila, colocando un “+” si es de mayor importancia y “-“si es de menor importancia; al final el requerimiento que se sume mayor cantidad de “+” será el de mayor importancia.

	A	B	C	D	E	F	$\Sigma(+)$	%	Ponderación
A	/	-	-	-	+	+	2	13,3	7
B	+	/	-	-	+	+	3	20	8
C	+	+	/	-	+	+	4	26,7	9
D	+	+	+	/	+	+	5	33,3	10
E	-	-	-	-	/	+	1	6,67	6
F	-	-	-	-	-	/	0	0	5
Total							15	100	

Tabla 3: Método eliminación por pares.

PONDERACION		Requerimiento.
10	D	Que sea de operación segura
9	C	Que se pueda operar con una atmosfera interna de gas argón o con otro gas
8	B	Que opere bajo presiones altas
7	A	Que opere bajo a temperaturas elevadas
6	E	Que pueda ser portátil
5	F	Que sea económica.

Tabla 4: Ponderación en orden decreciente, Método por eliminación.

Los números asignados denotan el grado de importancia de los requerimientos del cliente, así pues, el 10 denota el requerimiento de mayor importancia, mientras el 5 denota el de menor.

#### 6.1.4 Problemas del Diseño Actual.

El principal problema existente en el diseño actual del horno es el constante flujo de argón durante el proceso de sinterizado. Un porcentaje de calor se lo lleva el gas, tampoco hay un control tan riguroso de la cantidad de oxígeno que queda contenido dentro del horno ya que podría existir un volumen que no es desplazado por el flujo de argón que ingresa al horno dejando una porción de aire durante el proceso de sinterizado. Este gas, que al tener oxígeno, oxida el metal afectando las propiedades posteriores de este. Además, el flujo constante de argón es un gasto innecesario de gas, siendo también contaminante del medio ambiente en grandes cantidades.

Actualmente el argón en la AChS DS 594 no figura como un gas nocivo [19] pero si en grandes cantidades puede ser dañino para la salud, puesto que grandes masas de argón desplazan al oxígeno circundante y a bajas concentraciones de este, la pérdida de consciencia y la muerte pueden ocurrir en segundos sin ninguna advertencia. Esto a su vez requiere la presencia de un asfixiante simple en una concentración del 33% en la mezcla de aire y gas. Cuando el asfixiante simple alcanza una concentración del 50%, se pueden producir síntomas apreciables. Una concentración del 75% es fatal en cuestión de minutos. El efecto de la exposición de argón en concentraciones excesivas puede resultar en mareos, náuseas, vómitos y pérdida de consciencia. La muerte puede resultar de errores de juicio, confusión, o pérdida de la consciencia, que impiden el auto-rescate. En lo que respecta a efectos ambientales no se conocen efectos negativos causados por el argón ni se esperan consecuencias ambientales adversas. El argón se da naturalmente en el medio ambiente. El gas se disipará rápidamente en áreas bien ventiladas. [20].

Las fugas ocurren en la tapa y es básicamente generado por el precario sistema de sellado. Según la ESA<sup>7</sup> “*el objetivo primordial de un cierre es contener el fluido para proteger así el entorno inmediato de la contaminación (y viceversa)*” [21]. Las principales fugas existentes son las siguientes: perímetro de la tapa que es solamente una plancha de acero de 3 mm que carece de algún elemento sellante, además la fijación actual sobre el cuerpo principal tampoco tiene una

---

<sup>7</sup> European Sealing Association



superficie plana dejando espacios entre la tapa y el horno permitiendo así que los gases circulen libremente, la otra fuga es entre el pistón y la tapa, mismo motivo.

## **6.2 Etapa Preliminar del Diseño.**

En esta etapa se pretende llegar a una solución siendo un concepto que satisfaga la necesidad. Este incluye los sistemas básicos de funcionamiento y/o forma general del producto.

### **6.2.1 Generación de Conceptos.**

Debido a que existen varias estrategias para la generación de conceptos e ideas, se decidió hacer uso de la tormenta de ideas (Brain-Storming) por su facilidad y eficacia con este método se pretende generar la mayor cantidad de ideas para la solución del problema (como llevar a cabo la función), para después por medio de las técnicas de evaluación de Ullman y una matriz de decisión, obtener un concepto general del diseño propuesto.

### **6.2.2 Tormenta de ideas (Brain-Storming)**

#### Propuesta 1

Fabricar una máquina completa basada en una prensa hidráulica con capacidad de presión máxima de 75 [Ton]. Esta prensa deberá tener toda la zona de compactación sellada de tal forma que hacia el interior de esta se pueda trabajar con un gas inerte, así como también se localice alguna clase de horno.

#### Propuesta 2

Utilizar los equipos actuales, una vez dispuestos los polvos en la matriz extraer el oxígeno del horno por medio de una bomba de vacío, luego inyectar argón para de manera posterior empezar el proceso de sinterizado. Este nuevo funcionamiento requiere hermeticidad en la nueva cámara tanto como en la condición de vacío como en la sobrepresión generada por el aumento de temperatura del gas dentro del horno. La condición de hermeticidad del horno será brindada por un rediseño de la tapa, además será necesario reforzar el exterior de nuestro horno actual con una plancha de acero que pueda resistir los esfuerzos asociados a estas nuevas condiciones, se utilizará la prensa hidráulica actual para transmitir la presión necesaria al composite. La cámara

deberá contar con sellos de alta temperatura en cada una de sus conexiones para impedir la circulación de los gases dentro de la cámara hacia el exterior.

### Propuesta 3

Fabricar un sistema de dado sellado al vacío, el cual sea colocado en la prensa hidráulica actual. Bajo este esquema se no se puede usar el horno de resistencia actual, y se debe encontrar otra alternativa para suministrar el calor necesario.

### **6.2.3 Evaluación de Conceptos.**

La evaluación de conceptos se realizará por medio de la técnica de Ullman, la cual consiste en pasar por los conceptos generados por una serie de filtros e irlos eliminando de acuerdo a los siguientes criterios.

- Factibilidad
- Disponibilidad de la tecnología
- Filtro pasa – no pasa.
- Matriz de decisión.

La evaluación de conceptos se lleva cabo por medio de una serie de tablas, donde del lado izquierdo aparecen los conceptos a evaluar y en el lado derecho el criterio de evaluación. La metodología seguida en cuanto al concepto de factibilidad es:

1. Es factible.
2. No es factible
3. Tal vez es factible.

Una vez realizado este análisis, los requerimientos que pasaron la etapa anterior se evalúan en cuanto a su disponibilidad tecnológica, los criterios son los siguientes:

1. Tecnología desarrollada.
2. Tecnología disponible.
3. Tecnología al alcance.

Finalmente se evalúan considerando el cumplimiento de los requerimientos de cliente:

1. Cumple.
2. No Cumple.

Por último, los conceptos que aprueben la evaluación se reunirá en una lista final para poder valorar en una matriz de decisión. La matriz de decisión es la tabla, la cual ofrece de las 3 propuestas aquella que cumple con los requerimientos del cliente y cual es más factible de poder realizar.

#### 6.2.4 Matriz de Decisión.

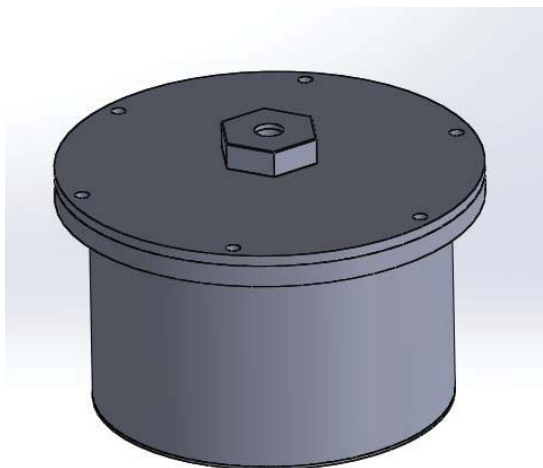
De acuerdo a las evaluaciones anteriores, ahora se califican las dos propuestas que pasaron la evaluación anterior para encontrar cual es la apropiada para este diseño. De acuerdo a esta evaluación, la **Propuesta 2** es la que cumple de mejor forma los requerimientos planteados en un inicio, por lo cual se procederá a realizar el diseño a detalle de esta opción.

<b>Requerimiento.</b>	<b>Importancia Relativa</b>	<b>Propuesta 2</b>	<b>Propuesta 3</b>
Que sea de operación segura	10	10	10
Que se pueda operar con una atmosfera interna de gas argón o con vacío	9	10	10
Que opere bajo presiones altas	8	10	10
Que opere bajo a temperaturas elevadas	7	10	10
Que pueda ser portátil	6	9	9
Que sea económica.	5	8	6
<b>Puntos Totales</b>		<b>57</b>	<b>55</b>

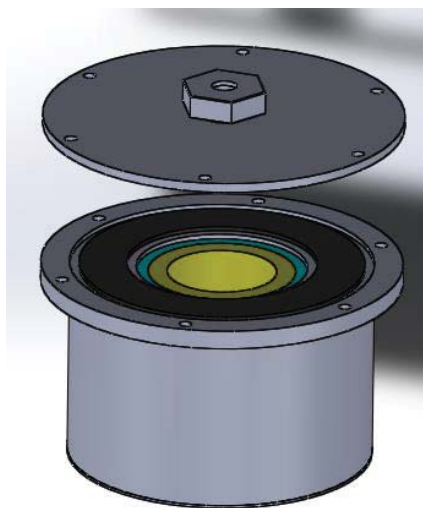
Tabla 5: Matriz Decisión

## 7 DISEÑO EN DETALLE.

En este ítem se dará una solución a los problemas que señalamos en el punto 6.1.4. Se desarrollará parte a parte para su mejor comprensión. Primeramente se plantea la idea general del diseño que muestra la figura, siguiendo lo explicado en la Propuesta 2.



*Ilustración 25: Modelación Diseño.*



*Ilustración 26: Modelación Diseño otra vista.*

## 7.1 Diseño Mecanismo Sellado Tapa Superior.

La tapa superior durante el proceso no es sometida a ninguna condición de esfuerzo, por lo cual la principal labor del mecanismo de sellado entre el émbolo y el vástago, como en el perímetro de la tapa, es retener el gas argón. La geometría general de la tapa consiste de una placa con guía longitudinal para el émbolo. Las dimensiones generales de esta pieza vienen dictadas por el diámetro exterior del soporte así como el diámetro del émbolo. En lo que refiere al mecanismo de sellado el diseño consiste en una tuerca que presiona un juego de rondanas intercaladas por unos O-ring de alta temperatura (ver figura 27). El funcionamiento de sellado se basa en la deformación de estas rondadas una vez que la tuerca es girada, estos sellos ejercen presión sobre el émbolo de la prensa impidiendo que se filtre el gas por este el juego que existe entre el orificio y el émbolo. El espacio entre las rondanas está diseñado de manera tal que se pueda colocar cualquier O-ring normalizado entre 2 y 5 mm de ancho, y 23 mm de diámetro.

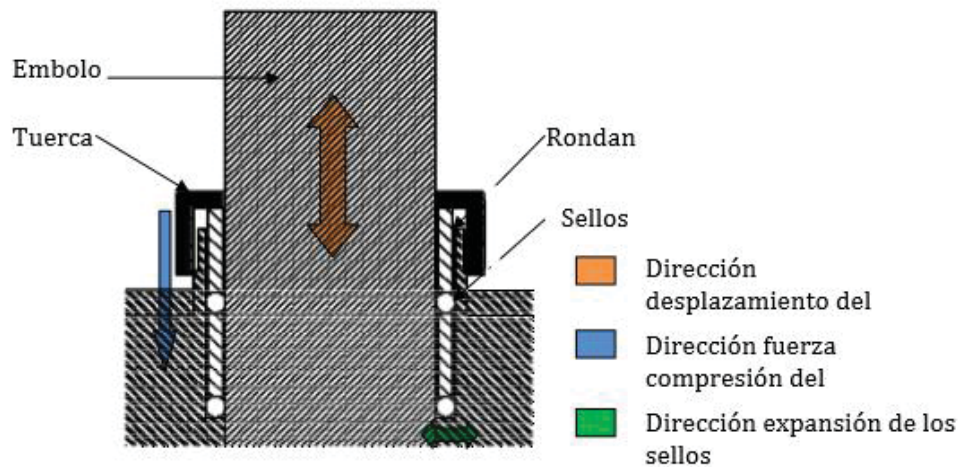


Ilustración 27: Mecanismo de sellado entre la tapa superior y el émbolo.

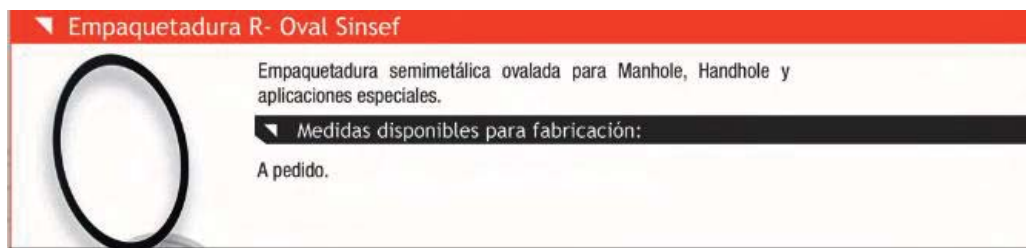


Ilustración 28: Empaquetadura comercial.

## REDISEÑO DE SISTEMA PARA CONTROL DE ATMÓSFERAS EN PRENSA UNIAXIAL

Las rondanas tienen un espesor de 10 mm

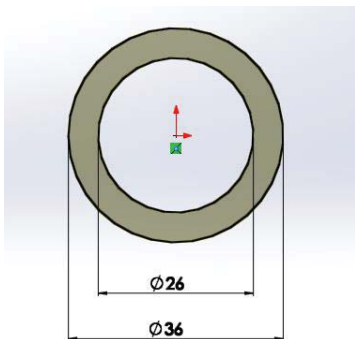


Ilustración 29: vista ppal. rondana.

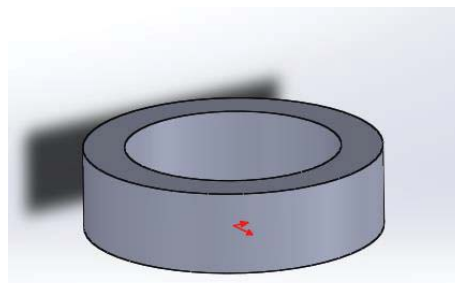


Ilustración 30: Vista en 3D rondana

A continuación se muestra un corte del diseño modelado en SolidWorks 2014

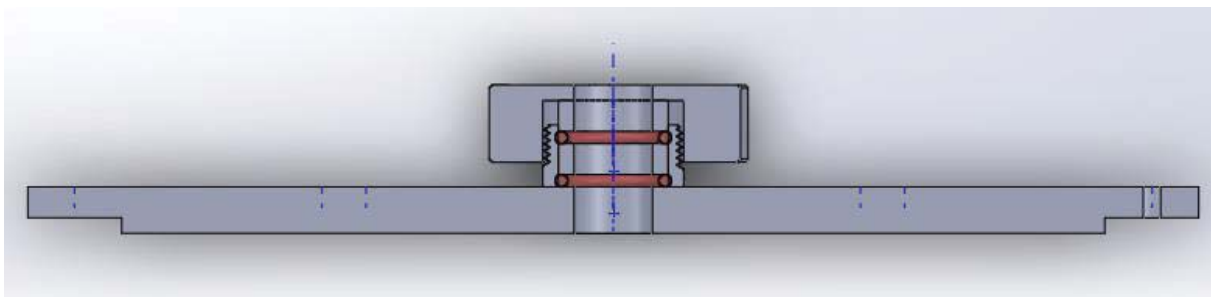


Ilustración 31: Corte tapa superior.

Alternativa de sellos normalizados.

 <b>3.53</b> <b>± 0.10</b>	Parker N°	DI mm	DE mm	Parker N°	DI mm	DE mm	Parker N°	DI mm	DE mm	Parker N°	DI mm	DE mm	Parker N°	DI mm	DE mm	Parker N°	DI mm	DE mm
	2-201	4.34	11.40	2-215	26.57	33.63	2-229	59.92	66.98	2-243	104.37	111.43	2-257	148.82	155.88	2-271	234.54	241.60
	2-202	5.94	13.00	2-216	28.17	35.23	2-230	63.09	70.15	2-244	107.54	114.60	2-258	151.99	159.05	2-272	240.89	247.95
	2-203	7.52	14.58	2-217	29.74	36.80	2-231	66.27	73.33	2-245	110.72	117.78	2-259	158.34	165.40	2-273	247.24	254.30
	2-204	9.12	16.18	2-218	31.34	38.40	2-232	69.44	76.50	2-246	113.89	120.95	2-260	164.69	171.75	2-274	253.59	260.65
	2-205	10.69	17.75	2-219	32.92	39.98	2-233	72.62	79.68	2-247	117.07	124.13	2-261	171.04	178.10	2-275	266.29	273.35
	2-206	12.29	19.35	2-220	34.52	41.58	2-234	75.79	82.85	2-248	120.24	127.30	2-262	177.39	184.45	2-276	278.99	286.05
	2-207	13.87	20.93	2-221	36.09	43.15	2-235	78.97	86.03	2-249	123.42	130.48	2-263	183.74	190.80	2-277	291.69	298.75
	2-208	15.47	22.53	2-222	37.69	44.75	2-236	82.14	89.20	2-250	126.59	133.65	2-264	190.09	197.15	2-278	304.39	311.45
	2-209	17.04	24.10	2-223	40.87	47.93	2-237	85.32	92.38	2-251	129.77	136.83	2-265	196.44	203.50	2-279	329.79	336.85
	2-210	18.64	25.70	2-224	44.04	51.10	2-238	88.49	95.55	2-252	132.94	140.00	2-266	202.79	209.85	2-280	355.19	362.25
	2-211	20.22	27.28	2-225	47.22	54.28	2-239	91.67	98.73	2-253	136.12	143.18	2-267	209.14	216.20	2-281	380.59	387.65
	2-212	21.82	28.88	2-226	50.39	57.45	2-240	94.84	101.90	2-254	139.29	146.35	2-268	215.49	222.55	2-282	405.26	412.32
	2-213	23.39	30.45	2-227	53.57	60.63	2-241	98.02	105.08	2-255	142.47	149.53	2-269	221.84	228.90	2-283	430.66	437.72
	2-214	24.99	32.05	2-228	56.74	63.80	2-242	101.19	108.25	2-256	145.64	152.70	2-270	228.19	235.25	2-284	456.06	463.12

Ilustración 32: Sellos normalizados. [26]

## 7.2 Diseño de la Brida.

La brida es una parte esencial en recipientes a presión, intercambiadores de calor y tanques de almacenamiento ya que permite el desarme y remoción o limpieza de partes internas. Estas también son utilizadas para hacer uniones entre tuberías y otras conexiones [21]. La conexión de la tapa con el resto del cuerpo se realiza por medio de una brida como lo muestra la figura 23:

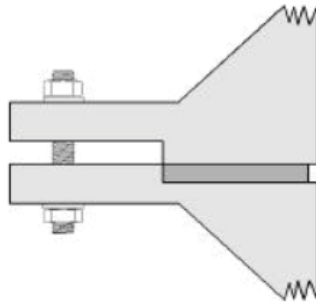


Ilustración 34: Unión brida hembra macho, [21]

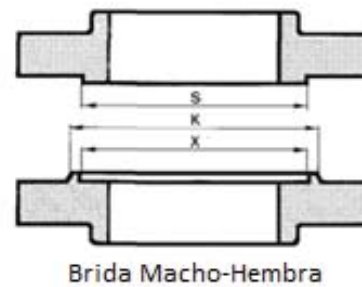


Ilustración 33: Unión hembra macho, Tabla B16.5 [23]

### 7.2.1 Brida Tipo Integral.

La brida tipo integral será el tipo de brida que utilizaremos para el diseño, este tipo son soldadas a la pared de la tubería o del recipiente, esto hace que se consideren como el equivalente a una estructura continua.

REDISEÑO DE SISTEMA PARA CONTROL DE ATMÓSFERAS EN PRENSA UNIAXIAL

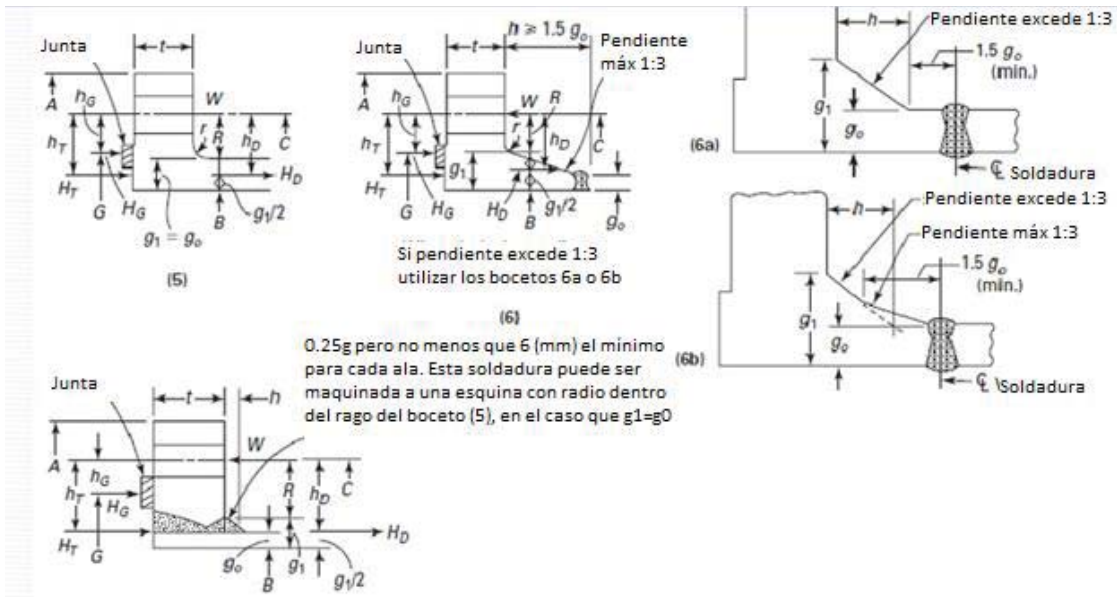


Ilustración 35: Detalle bridas integrales, [25]

La tabla B 16.5 de la norma ASME exige que tiene que tener cierto tipo de medidas, las cuales se muestran en la tabla 10, ahora bien, no hay una medida que se acomode, ya que al ser diseñadas para tuberías solo hay normalizadas para diámetros nominales, por lo tanto, no hay ninguna tenga las medidas que se buscan, aun así se utilizará la tabla para normar el espacio donde irá la junta.

Dimensions in mm.										
DN	R	S	T	U	W	X	Y	Z	K	L
1/2	34.9	18.3	35.1	25.4	36.5	19.9	36.5	23.8	44	46
3/4	42.4	23.8	42.9	33.3	44.4	25.4	44.4	31.8	52	54
1"	50.8	30.2	47.8	38.1	52.4	31.8	49.2	36.5	57	62
1"1/4	63.5	38.1	57.2	47.6	65.1	39.7	58.7	46.0	67	75
1"1/2	73.0	44.4	63.5	54.0	74.6	46.0	65.1	52.4	73	84
2"	92.1	57.2	82.6	73.0	93.7	58.8	84.1	71.4	92	103
2"1/2	104.8	68.3	95.2	85.7	106.4	69.8	96.8	84.1	105	116
3"	127.0	84.1	117.5	108.0	128.6	85.7	119.1	106.4	127	138
3"1/2	139.7	96.8	130.2	120.6	141.3	98.4	131.8	119.1	140	151
4"	157.2	109.5	144.5	131.8	158.8	111.1	146.0	130.2	157	168
5"	185.7	136.5	173.0	160.3	187.3	138.1	174.6	158.8	186	197
6"	215.9	161.9	203.2	190.5	217.5	163.5	204.8	188.9	216	227
8"	269.9	212.7	254.0	238.1	271.5	214.3	255.6	236.5	270	281
10"	323.8	266.7	304.8	285.8	325.4	268.3	306.4	284.2	324	335
12"	381.0	317.5	362.0	342.9	382.6	319.1	363.5	341.3	381	392
14"	412.8	349.2	393.7	374.6	414.3	350.8	395.3	373.1	413	424
16"	469.9	400.0	447.5	425.4	471.5	401.6	449.3	423.9	470	481
18"	533.4	450.8	511.2	489.0	535.0	452.4	512.8	487.4	533	544
20"	584.2	501.6	558.8	533.4	585.8	503.2	560.4	531.8	584	595
24"	692.2	603.2	666.8	641.4	693.7	604.8	668.3	639.8	692	703

Tabla 6: Medidas bridas normalizadas, 16.5 B ASME.



### 7.3 Empaquetaduras o Empaques.

Las empaquetaduras son los elementos que impiden las fugas en las uniones entre bridas. Están caracterizados por dos constantes:

- $y$ : Esfuerzo de deformación
- $m$ : Factor de empaque.

-----¿?Que dependen del material y la forma del empaque, se usan para los cálculos de las condiciones de asentamiento y operación. El empaque a utilizar será una tipo R espirométrica normanda, las medidas que nos aporta el fabricante están a continuación. [25]

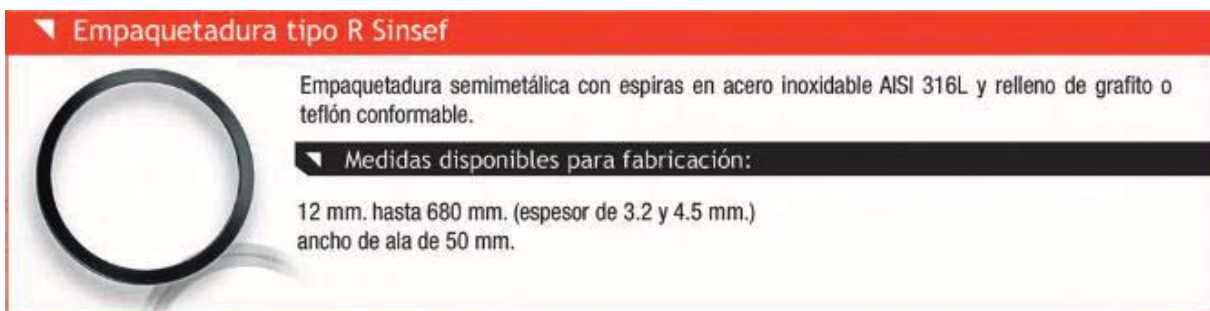


Ilustración 36: Empaquetadura espirométrica, Sinsef empresa Chilena [24]

Se asumirá que es un empaque auto energizante, que son aquellos empaques que necesitan una cantidad insignificante de fuerza de apriete en los pernos para poder producir el sello. Para calcular el apriete de los pernos, no se considerará la acción del empaque.

### 7.4 Presión Interior del Horno.

El cálculo de la presión interna del horno es necesario para el posterior cálculo de la fuerza a la que se someterán los pernos. Para ello necesitamos saber el volumen dentro del horno y la masa de argón que entra al horno.

$$P_1 * V_1 = R * T * m \quad (1)$$

$P_1$ : Presión inicial

$V_1$ : volumen

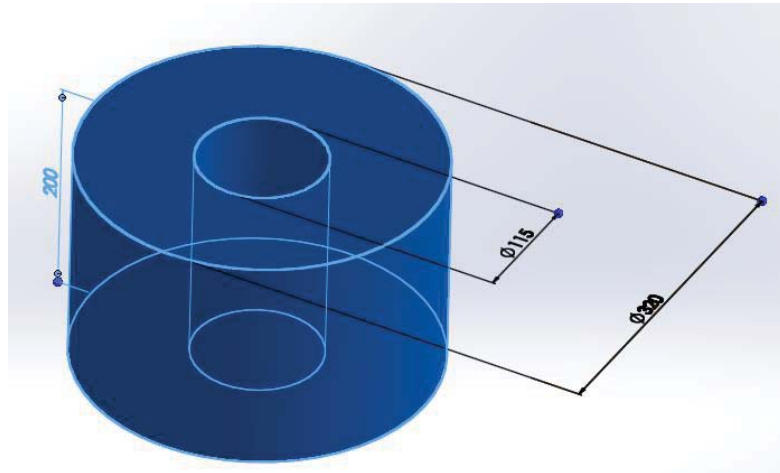
R: constante del gas argón

T: temperatura

m: masa.

Obtención del volumen:

En el punto 5.3 se muestran las dimensiones de la matriz que va dentro del horno, diámetro 100 [mm], y altura 100 [mm], las medidas del horno actual son las siguientes:



*Ilustración 37: Medidas Horno Actual.*

Por lo tanto el volumen queda definido por el espacio libre entre estos dos sólidos.

$$V_t = V_H - V_h \quad (2)$$

Siendo:

$V_t$ : Volumen total

$V_H$ : Volumen horno actual

$V_h$ : Volumen herramental.

$$V_t = 200 * \frac{115^2}{2} * \pi - 100 * \frac{100^2}{2} * \pi$$

$$V_t = 1,2919 [mm^3] = 0,0012919 [m^3]$$

Obtención de la masa:

$$m = \frac{P_1 * V_1}{R * T}$$

$$m = \frac{101325 [Pa] * 1,2919 [mm^3]}{0,20813 \left[ \frac{kJ}{kgK} \right] * 298 K}$$

$$m = 0,00211 [kg]$$

Al alcanzar la temperatura de trabajo lo único que cambiará será la presión generada por el aumento de esta.

$$P_t = \frac{0,20813 \left[ \frac{kJ}{kgK} \right] * 673 K * 0,00211 [kg]}{0,0012919 [m^3]}$$

$$P_t = 288772 [Pa]$$

Esta es la presión que alcanza el interior del horno una vez alcanzada la temperatura de trabajo (400 °C)

#### **7.4 Cargas por Pernos y Reacción de la Empaquetadura.**

Desde el punto 7.4 hasta el 7.7 se calcularán las bridas de acuerdo al apéndice 2 de ASME Sec. VIII div. 1. La cual exige realizar un cálculo para obtener la carga de los pernos sobre la brida, para ello la brida es sometida a distintas condiciones, la primera es durante la operación en donde se considera la presión de trabajo, la segunda condición es la de la empaquetadura, condición en la cual solo se considera la carga que tiene la junta deformada sobre la brida.

- En el montaje entre bridas apernadas, la carga del perno está balanceada solo por la reacción del empaque.

- Cuando se encuentra en operación, la carga está balanceada por la reacción del empaque y la fuerza hidrostática debida a la presión. [25]

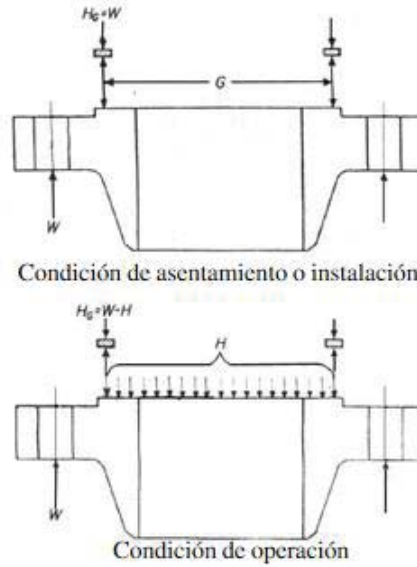


Ilustración 38: Condiciones sometidas, brida.

#### 7.4.1 En la condición de operación

La carga requerida en el perno queda expresada en la siguiente relación:

$$W_{m_1} = \frac{\pi}{4} * G^2 * P + 2 * b * \pi * G * m * P \quad (3)$$

En donde los valores de m están tabulados y dependen del material, están tabulados en la tabla UA-49.2, la ilustración es un extracto de ella.

MATERIALES DE EMPAQUE Y CUBIERTAS DE CONTACTO

Factores de Empaque (m) para condiciones de operación y esfuerzo de asentamiento de diseño mínimo (y). NOTA: Esta tabla da una lista de muchos materiales de empaque y cubiertas de contacto comúnmente usados con valores de diseño sugeridos de m y que han resultado generalmente satisfactorios al usar el ancho de asentamiento efectivo del empaque dado en la Tabla UA-49.2. Los valores de diseño y otros detalles dados en esta tabla son solo sugeridos y no son obligatorios				Hace referencia a la Tabla UA-49.2	
Material de empaque	Factor de empaque	Esfuerzo de asentamiento de diseño mínimo	Bocetos y notas	Use boceto de cubierta	Use columna
De tipo autoenergizante: Anillos O, metálicos, elastómero y otros tipos considerados como autoenergizantes	0	0	-	-	-

Tabla 7: extracto tabla UA 49-2

Siendo:

y: factor de empaque

m: Esfuerzo asentamiento de diseño mínimo.

G: diámetro medio del empaque.

P: presión de trabajo.

b: Ancho efectivo del asentamiento.

$W_{m_1}$ : Carga a la que está sometida el perno.

H: Carga del empaque sobre la brida.

$H_p$ : Carga de la deformación del empaque sobre la Brida.

Si reemplazáramos,  $H_p = 0$  puesto que el valor de “m” dentro de la expresión es 0, el valor de  $W_{m_1}$  queda definido por:

$$W_{m_1} = \frac{\pi}{4} * G^2 * P \quad (4)$$

Reemplazando;

$$W_{m_1} = \frac{\pi}{4} * \left(\frac{250}{1000}\right)^2 * 288772$$

Obtenemos;

$$W_{m_1} = 14167,87[Pa * m^2]$$

Presión que deben soportar los pernos por unidad de área gracias a la presión hidrostática y la deformación de la junta.

#### 7.4.2 Condición de empaquetamiento.

Para que un empaque funcione adecuadamente debe someterse a una presión de deformación mínima “y” [psi] que le permita adaptarse a la rugosidad de la cara de la brida, la relación que define esta condición está definida por: [25]

$$W_{m_2} = b * \pi * G * y \quad (5)$$

Como;

$$y = 0$$

Entonces;

$$W_{m_2} = 0$$

#### 7.5 Número de Pernos.

El objetivo de este ítem es determinar la cantidad de pernos que son necesarios para asegurar el funcionamiento de la brida una vez que esté operando. En el primer lugar se determinará el área apertada para luego dividirla por el área de la raíz de los pernos seleccionados para así obtener si la cantidad de pernos a utilizar. Como las presiones de trabajo son relativamente bajas en comparación a la carga que puede aguantar un perno, es probable que la cantidad de pernos sea pequeña, de todas maneras uno de los criterios que se buscan es un apriete homogéneo para prevenir las fugas que puedan existir entre la unión tapa-brida.

### 7.5.1 Determinación del Área Apernada.

$$A_b = \frac{W_{m1}}{S_b} \quad (6)$$

$S_b$  = Esfuerzo admisible del perno a la temperatura de operación.

Grado	Res. a la tensión (lb/plg <sup>2</sup> ) min	Lim. elástico (lb/plg <sup>2</sup> ) min.	Elongación %	Reducción	Dureza Máx.
B7	125,000	105,00	16	50	321H o 35HRC
B7M	100,000	80,000	18	50	235HB o 99HRB
B16	125,000	105,00	18	50	321H o 35HRC
B8, B8M	75,000	30,000	30	50	321HB o 96HRB

Tabla 8: ASTM A193, requerimientos mecánicos.

Utilizaremos el valor más crítico de la norma con  $S_b = 80 \left[ \frac{klb}{plg^2} \right]$ , y en SI  $S_b = 551581 [kPa]$

$$A_b = \frac{14.167,87}{551.581}$$

$$A_b = 0,0000257 [m^2]$$

Esta es el área que debe ser cubierta por los pernos para asegurar la fijación.

### 7.5.2 Procedimiento para Determinar el Número de Pernos.

$$N_{Per} = \frac{A_b}{A_i} \quad (7)$$

Donde  $A_i$  = Área de raíz del perno.

Como el área apernada es pequeña los pernos el número de pernos será bajo, de todas maneras se realizará el cálculo para mayor seguridad. Se utilizarán pernos 1/2'' de área basal 0,126'' que en SI son  $8,129016e-5 [m^2]$

$$N_{Per} = \frac{0,0000257}{0,00008129}$$

$$N_{per} = 0,316(-)$$

Tamaño del perno a [pulg]	Serie de hilos ordinarios		Serie de 8 hilos	Dimensiones de la tuerca		Mínimo			Radio máximo del filete r [pulg]	Diámetro de la llave [pulg]
	Hilos por pulgada	Área de raíz [pulg <sup>2</sup> ]	Área de raíz [pulg <sup>2</sup> ]	Sobre planos [pulg]	Sobre esquinas [pulg]	Espacio entre pernos [pulg]	Distancia radial R [pulg]	Distancia de borde E [pulg]		
1/2	13	0.126	-	7/8	0.969	1 1/4	13/16	5/8	1/4	1 1/2
5/8	11	0.202	-	1 1/16	1.175	1 1/2	15/16	3/4	5/16	1 3/4
3/4	10	0.302	-	1 1/4	1.383	1 3/4	1 1/8	13/16	3/8	2 1/16

Ilustración 39: Datos del apertado.

Como se mencionó al principio del punto 7.5 la cantidad de pernos calculados es bajo en comparación con los que fueron dispuestos en la etapa de diseño, recordar que aparte de buscar la óptima fijación se busca homogenizar el apriete sobre toda la brida, es por ello que para asegurar una buena estanqueidad se dispondrán 6 pernos cada 60° como muestra la figura 40. [25]

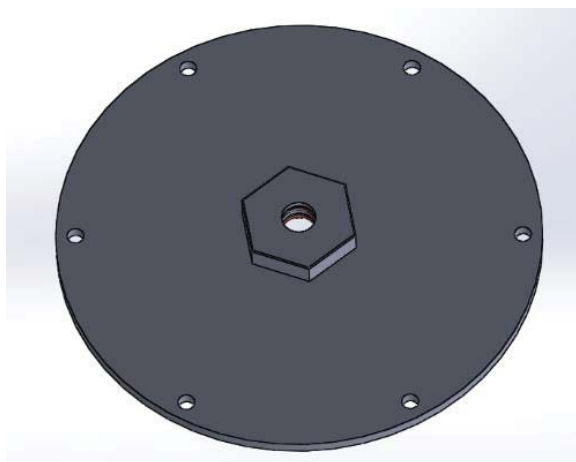


Ilustración 40: tapa diseñada

### 7.6 Determinación de los Momentos en los Brazos de la Brida.

Se calcularán de los momentos de las bridas de acuerdo al apéndice 2 de ASME Sec. VIII div.

1. Las múltiples cargas axiales en la brida producen momentos flectores. El brazo de acción de estos momentos es determinado por la posición relativa del círculo de pernos con respecto a la posición de la carga que produce el momento.



En las bridas integrales el momento se calcula así:

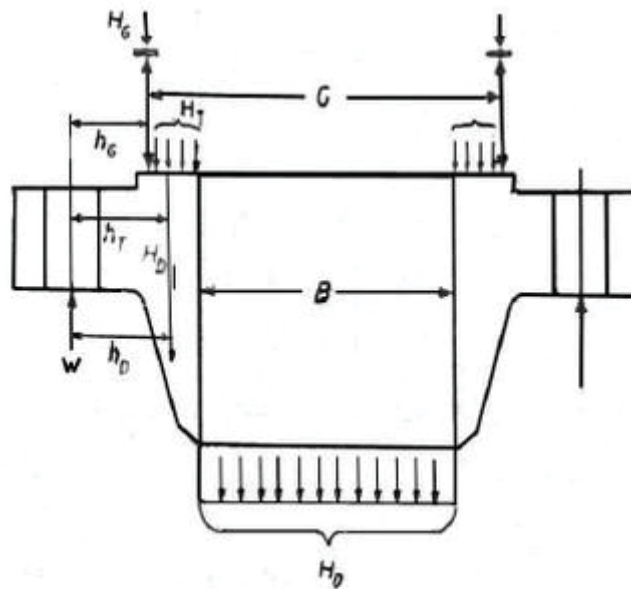


Ilustración 41: calculo momentos en la brida.

Las cargas axiales sobre la brida quedan definidas por:

$$H_D = 0,7854 * B^2 * P \quad (8)$$

$$0,7854 * 0,33^2 * 288772$$

$$H_D = 0,7854 * 0,33^2 * 288772$$

$$H_D = 24698,6864 [N]$$

$$H_T = H - H_D \quad (9)$$

$$H_T = \frac{\pi}{4} * G^2 * P - H_D$$

$$H_T = 14.167,87 - 24.698,6864$$

$$H_T = -10.530,816 [N]$$

$$H_G = W - H \quad (10)$$

$$H_G = 14.167,87 - 14.167,87$$

$$H_G = 0 [N]$$

La junta no genera cargas axiales sobre la brida como se menciona en el punto 7.4.1

Y los brazos de Palanca por:

$$h_D = R + \frac{g_1}{2} \quad (11)$$

$$h_D = 20 + \frac{5}{2}$$

$$h_D = 22,5 [mm]$$

$$h_T = \frac{R + g_1 + h_G}{2} \quad (12)$$

$$h_T = \frac{20 + 5 + 100}{2}$$

$$h_T = 62,5 [mm]$$

$$h_G = \frac{C - G}{2} \quad (13)$$

$$h_G = \frac{175 - 125}{2}$$

$$h_G = 25 [mm]$$

Por lo tanto los momentos quedan definidos por

$$M_D = H_D h_D \quad (14)$$

$$M_T = H_T h_T \quad (15)$$

$$M_G = H_G h_G \quad (16)$$

Así el momento total en la condición de operación será:

$$M_o = M_D + M_T + M_G \quad (17)$$

$$M_o = 53802,42 \text{ [Nm]}$$

Para el momento en la condición de asentamiento se usa:

$$M_A = W * \frac{(C - G)}{2} \quad (18)$$

$$M_A = 14167,87 * \frac{(175 - 125)}{2}$$

$$M_A = 354196 \text{ (Nm)}$$

Los momentos a los cuales está sometida la brida son del orden de los 50 [kNm], y la resistencia a la fluencia del acero utilizado (A36) es del orden 250 [MPa], por lo que no habría problemas de ruptura.

## 7.7 Cálculos de Esfuerzo en la Brida.

Los esfuerzos en la brida deben ser determinados para la condición de operación y asentamiento. En los cálculos se utiliza un momento modificado  $M_{FA}$  ó  $M_{FO}$  para tener en cuenta un mayor valor de la separación mínima entre pernos. El momento modificado que se introduce en las fórmulas de esfuerzos se halla con las siguientes relaciones:

- Para la condición de operación

$$M_{FO} = \frac{M_o * C_f}{B} \quad (19)$$

Siendo:

$$C_f = \sqrt{\frac{\text{Espacio real entre pernos}}{\text{Espacio normal entre pernos}}} \quad (20)$$

$$\text{Espacio normal entre pernos} = (2d + t) \quad (21)$$

$$\text{Para la condición de asentamiento } M_{FA} = \frac{M_A * C_f}{B} \quad (22)$$

Dónde:

B: diámetro interno de la brida.

M<sub>o</sub>: Momento de operación

M<sub>A</sub>: Momento de asentamiento.

Reemplazando en las fórmulas anteriores tenemos lo siguiente, para la operación:

$$M_{FO} = 445570,96 \text{ [N/m]}$$

Donde el asentamiento:

$$M_{FA} = 42750,911 \text{ [N/m]}$$

Al igual caso que en los momentos, los esfuerzos por unidad de longitud son del orden de los 500 [kN/m], y el acero A36 tiene capacidad de 250 [MPa], por lo que no hay problemas de ruptura.

## 7.8 Cálculo del Espesor por Cargas Internas (Presión Interna).

La finalidad de este ítem es encontrar el espesor necesario para que nuestro horno no falle por ruptura bajo las condiciones a las que está sometido, el horno estará sometido a una presión

interior de 288772 [Pa] en operación. A continuación se calcula el espesor necesario según la norma ASME sección VIII, la presión de diseño (P) que viene dada por la que resulte mayor de las siguientes ecuaciones. Ambas muestran la relación entre la presión de operación y el peso del fluido, en el caso que el fluido sea menos denso que el agua, se utiliza el peso específico del agua [25]. Ahora, la diferencia radica en que tienen diferentes factores asociados, por lo cual se debe utilizar el mayor valor de estas relaciones, mayor presión, mayores esfuerzos asociados.

$$P = (P_o + P_H) * 1,1 \quad (23)$$

$$P = P_o + P_H + 30 \left[ \frac{lb}{pulg^2} \right] \quad (24)$$

Donde;

$P_H = P_e(h)$ ; (h) Altura

$P_e$ =Peso específico del producto.

$H$ =Altura de la columna de producto.

$P_o$ = Presión de operación.

### 7.8.1 Cálculo de Presión.

$$P = \left( 288772 + 9786 * \frac{200}{1000} \right)$$

$$P = 290729,2 [Pa]$$

Con la otra fórmula:

$$P = 288772 + 1957,2 + 30 \left[ \frac{lb}{pulg^2} \right]$$

Transformamos el último miembro de nuestra fórmula

$$P = 288772 + 1957,2 + 206843$$

$$P = 497522,2 [Pa]$$

Las presiones de diseño antes calculadas, serán sustituidas en la ecuación:

$$t = \frac{PR}{SE - 0,6 * (P)} \quad (25)$$

R: Radio

S: Fluencia de un A36

t: Espesor

E: Rendimiento de la soldadura, el rendimiento de la soldadura lo obtenemos desde la norma, ver figura 42:



	EFICIENCIA DE SOLDADURAS VALORES DE "E"	NORMAS		
		FIGURA No. 1		
	TIPOS DE UNIONES NORMA UW-12	EFICIENCIA DE LA UNION CUANDO LA JUNTA ESTA RADIOGRAFIADA		
		AL 100 %	POR PUNTOS	SIN
	UNION TRASLAPADA CON FILETE SENCILLO SIN TAPON DE SOLDADURA	---	---	0.45

Ilustración 42: Rendimiento de soldaduras.

$$t = \frac{497522,2 * 0,163}{250000000 * 0,45 - 0,6 * 497522,2}$$

$$t = 0,00072277 [m]$$

Se utilizará una plancha comercial de 2 [mm] de acero A36 para el cuerpo exterior, ya que en el mercado se encuentra con mayor facilidad.

Especificaciones Generales			
<b>Espesores:</b>	2.00 a 12.00 mm.	<b>Anchos:</b>	1000 y 1500mm.
<b>Largos:</b>	2.0 - 2.5 - 3.0 y 6.0 mts. Largos especiales a pedido.	<b>Calidades:</b>	A36
<b>Formato entrega:</b> A granel y bultos de 2000 Kg. Aprox.			

Ilustración 43: Catálogo Cintac [18]

## 7.9 Cálculo del Espesor por Cargas Internas.

El horno también está sometido a una condición de vacío cuando es retirado el oxígeno del interior. En este ítem se realizarán los cálculos necesarios para que el horno no colapse.

1.- Se supone un valor de “t” y se calculan las relaciones L/Do y Do/t.

$$\frac{L}{D_0} = \frac{200}{326} = 0,625 [mm]$$

$$\frac{D_0}{t} = \frac{326}{2} = 163 [mm]$$

Con estos valores se ingresa en la siguiente gráfica.

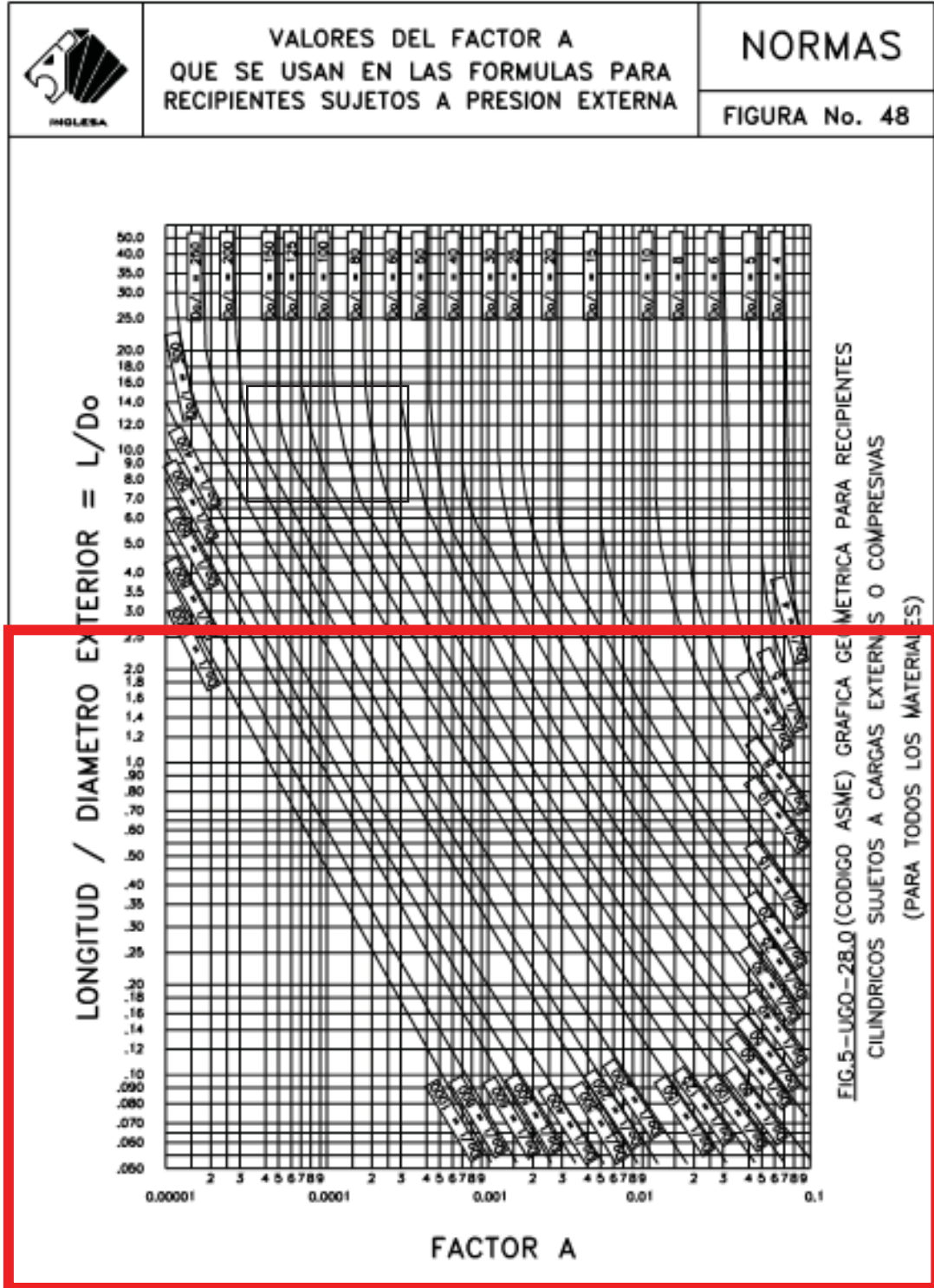


Gráfico 1: Valores del factor A, que se utilizan en las fórmulas para recipientes sujetos a presión externa

Lo que interesa del gráfico es la parte encerrada en rojo, se ve con mayor claridad en el siguiente extracto.



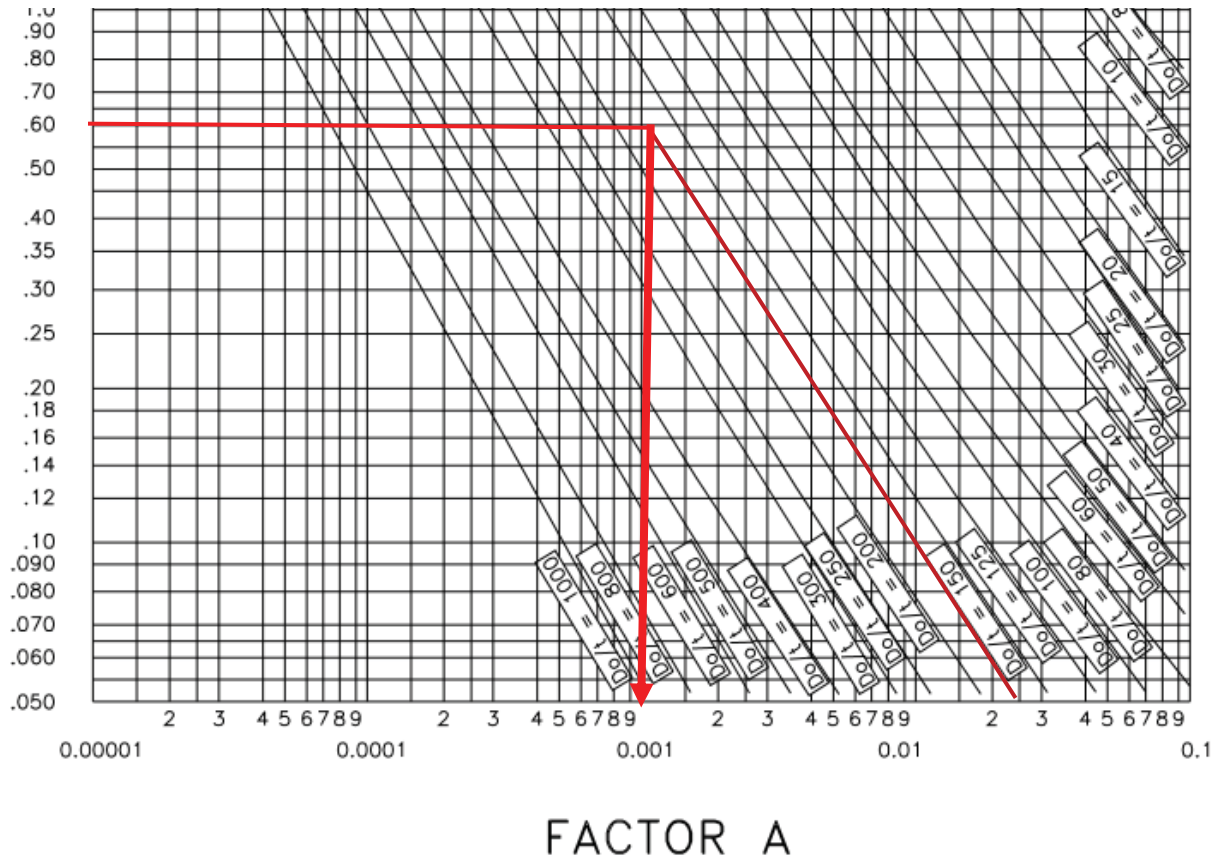
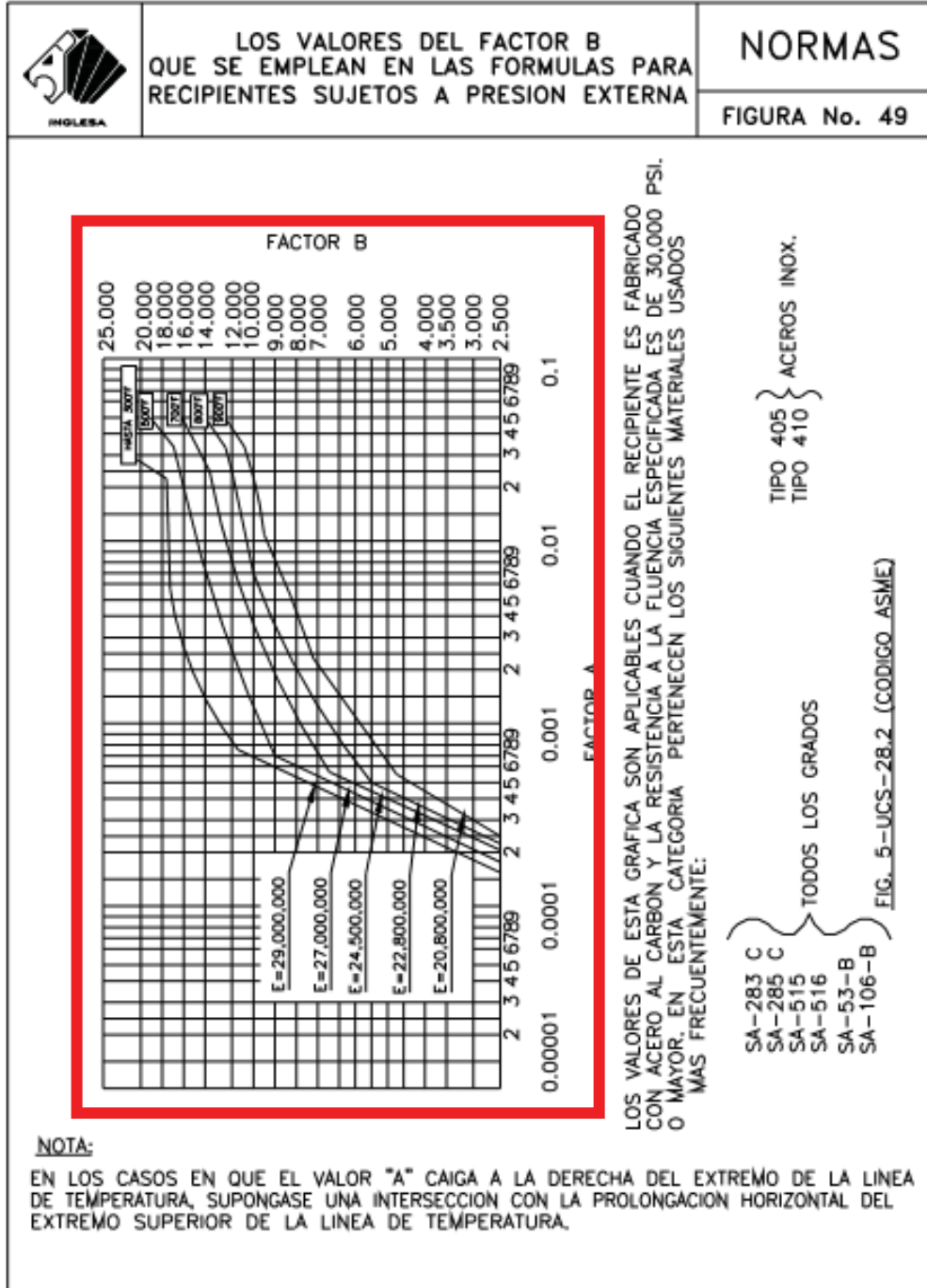


Gráfico 2: Zoom gráfico 1

2.- Con el valor de  $L/Do$  se entra a la gráfica mostrada en la gráfica No. 2, si  $L/Do$  es mayor que 50, se entra con este valor. Así mismo, si  $L/Do$  es menor que 0.5, se usa este resultado para entrar a la gráfica.

3.- A la altura del valor  $L/Do$ , se desplaza horizontalmente hacia la derecha hasta encontrar la línea representativa del valor  $Do/t$ , de esta intersección, se mueve verticalmente hacia abajo y se determina el valor del factor “A” que es de aproximadamente de 0,0012.

4.- Se entra en la gráfica 3, para el material utilizado con el valor del factor “A” hasta la línea representativa de la temperatura de diseño, desde esta intersección se mueve horizontalmente hacia la derecha y se lee el valor de “B”.



**NOTA:**

EN LOS CASOS EN QUE EL VALOR "A" CAIGA A LA DERECHA DEL EXTREMO DE LA LINEA DE TEMPERATURA, SUPONGASE UNA INTERSECCION CON LA PROLONGACION HORIZONTAL DEL EXTREMO SUPERIOR DE LA LINEA DE TEMPERATURA.

Gráfico 3: Valores del factor B

## REDISEÑO DE SISTEMA PARA CONTROL DE ATMÓSFERAS EN PRENSA UNIAXIAL

Se realiza el mismo procedimiento que en el gráfico anterior, la operación es a la temperatura de 400 °C, o sea 752 F.

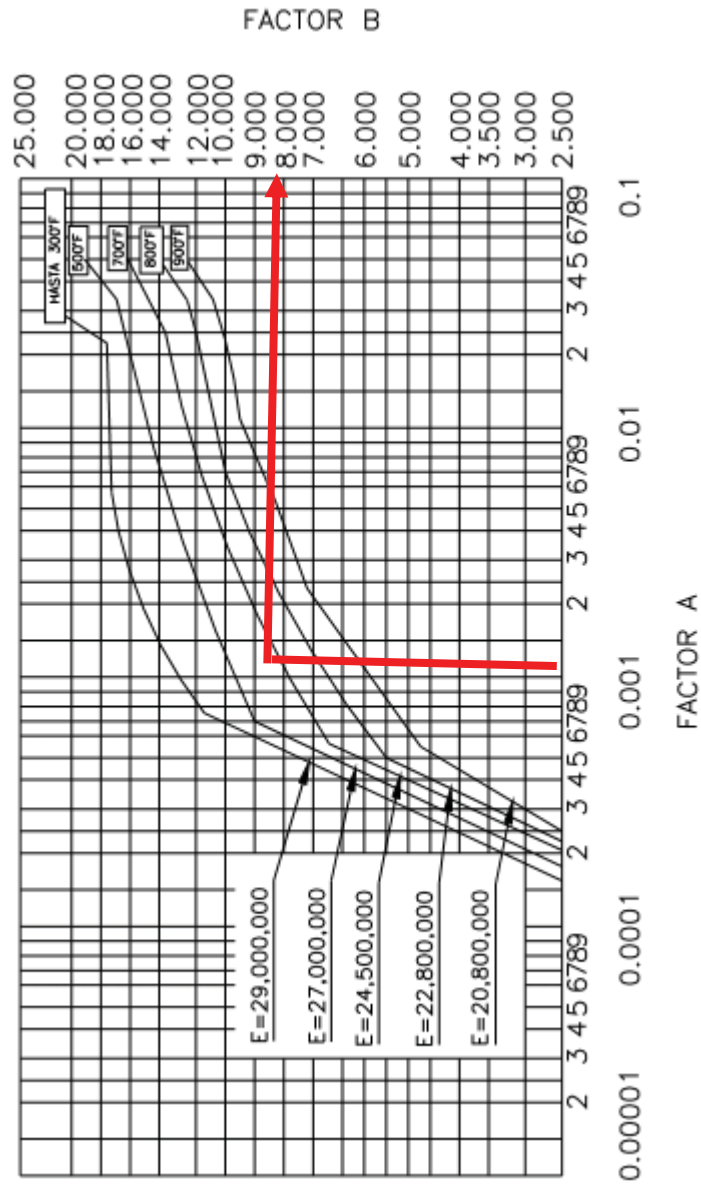


Gráfico 4: Zoom gráfico 3

Por lo tanto el valor del factor B es aproximadamente de 8500.

5.- Con el valor de “B”, se calcula la máxima presión exterior de trabajo permitida por medio de la ecuación:

$$P_a = \frac{4 * B}{3 * \frac{D_0}{t}} \quad (26)$$

Si el valor de “A” estuviera a la izquierda de la línea de temperatura indicada en el punto No. 4, el valor de la máxima presión exterior de trabajo permisible es calculado por medio de la ecuación:

$$P_a = \frac{2 * A * E}{3 * \frac{D_0}{t}} \quad (27)$$

Por lo tanto se reemplazará en la primera ecuación.

$$P_a = \frac{4 * 8500}{3 * \frac{326}{3}}$$

$$P_a = 104,3 [Pa]$$

La presión hidrostática es la siguiente está, definida por  $P_H = P_e(h)$ ;

$$P = \left( 9786 * \frac{200}{1000} \right)$$

$$P_H = 1957,2 [Pa]$$

Como la presión hidrostática es mayor a la exterior no hay colapso del horno por fuerzas externas.

### **7.10 Soporte Tapa al Cuerpo Principal.**

La función de esta pieza es fijar la tapa y va soldada al cuerpo principal. La geometría general de la tapa consiste de una placa con guía longitudinal para el émbolo. Las dimensiones generales de esta pieza vienen definidas por el diámetro exterior del cuerpo principal así como el diámetro del émbolo. Rectificada en conjunto con la tapa, esta va fijada por medio de seis pernos

dispuestos cada 60°, los cuales no van sometidos a ningún esfuerzo y su utilidad es solo la fijación de estos dos componentes, ver la figura 44 y 43.

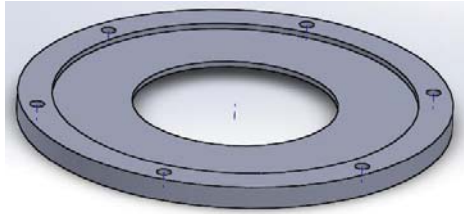


Ilustración 44: Fijación al cuerpo principal.

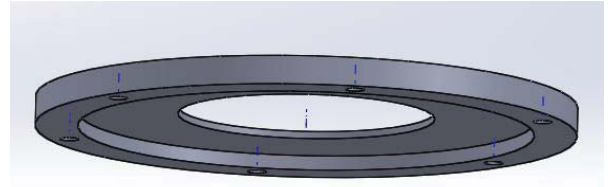
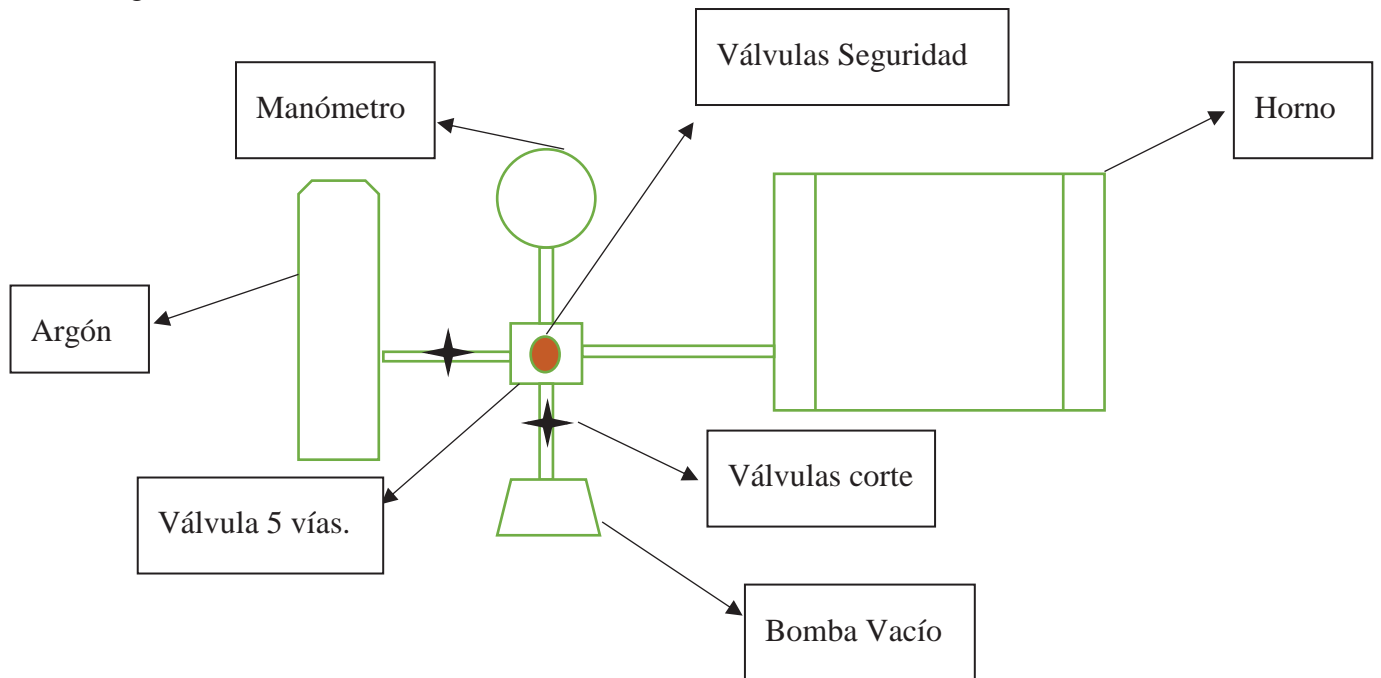


Ilustración 45: Fijación cuerpo principal visto desde abajo.

### 7.11 Sistema Nueva Alimentación de Argón.

El nuevo funcionamiento demanda cambios en el sistema de alimentación del argón, el siguiente esquema muestran los cambios, con la finalidad de alimentar adecuadamente el Argón hacia el horno.



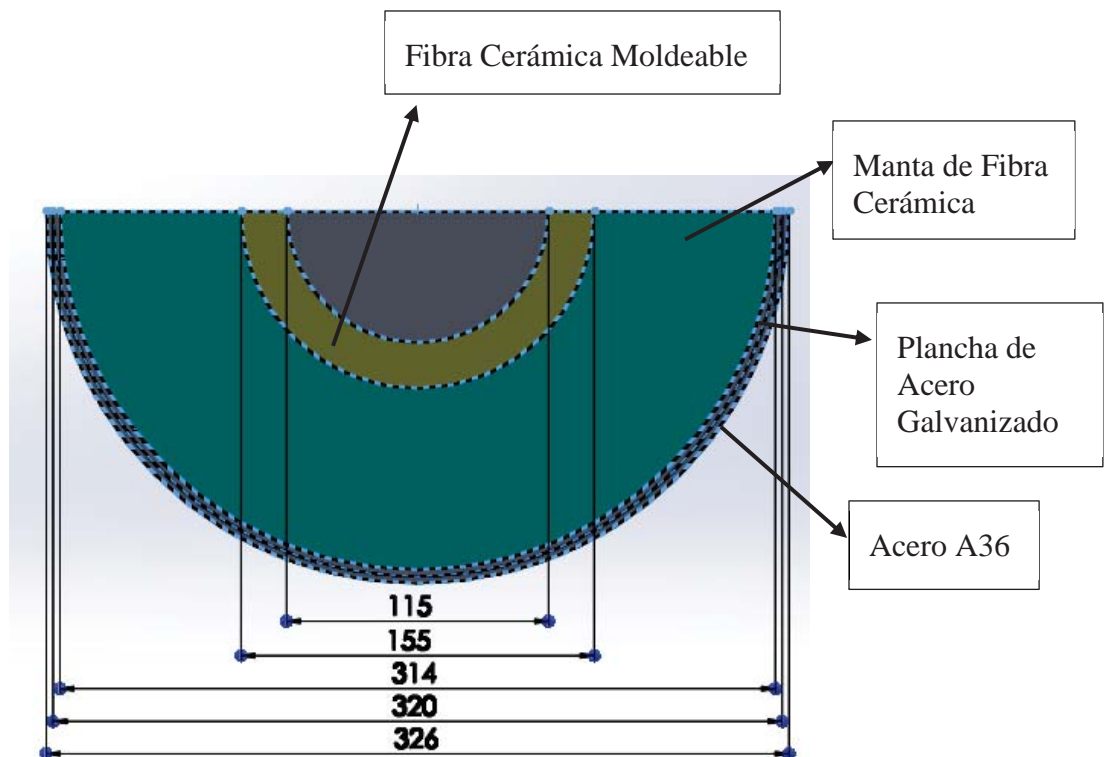
Esquema 1: Nueva alimentación de argón.

## REDISEÑO DE SISTEMA PARA CONTROL DE ATMÓSFERAS EN PRENSA UNIAXIAL

El rediseño del sistema de alimentación consta de una válvula de 5 vías. Como se trabaja con presiones dentro del horno es tema de interés la seguridad en la operación. Debido a esto en la primera vía, se conecta una válvula de seguridad para el caso de ocurrencia de algún fallo inesperado en el sistema. Si ocurriese la válvula liberará las sobrepresiones generadas en el horno. La segunda vía es utilizada por una bomba de vacío la que extrae el oxígeno al inicio del proceso. En la tercera se conecta un manómetro de vacío o vacuómetro el cual marcará las presiones dentro del horno y así poder monitorear el proceso, y por último la conexión al horno.

## 8 Materiales Cuerpo Principal.

Esta parte del horno está constituida por cuatro partes principalmente, que son las mostradas en la figura 45. En los siguientes apartados se mostrarán algunas propiedades de interés para el desarrollo posterior de las pérdidas de calor. Como fue mencionado anteriormente, es válido destacar que algunos de los materiales y dimensiones del horno se han mantenido respecto al diseño anterior. Principalmente los tipos de aislantes y materiales que componen el cuerpo del horno.



*Ilustración 46: Corte vista superior horno actual con dimensiones en mm, Modelado SolidWorks 2014*

### 8.1 Fibra Cerámica Moldeable.

La máquina consta de un émbolo que corre a través del horno para ejercer presión. Los polvos están dentro de una matriz contenida en un horno que los mantiene la temperatura deseada.

Dentro del horno hay una capa de fibra cerámica moldeable de 20 [mm] de espesor, donde se fijaran las resistencias eléctricas para la generación de calor en la cámara del horno.

Este tipo de fibra posee baja conductividad eléctrica y térmica, además de ser resistente a choques térmicos y se adhiere fácilmente a las superficies metálicas. Está compuesta principalmente de Alúmina de alta pureza y Sílice. Algunas de las propiedades físicas y químicas son las siguientes;

<b>Composición Química (%)</b>		
$Al_2O_3$	$SiO_2$	otros
40-42	55-57	2-3

<b>Propiedades</b>		
-Límite Máximo de Uso .....	(°C)	1200
-Densidad.....	(Kg/m <sup>3</sup> )	
	húmedo	1150
	seco	680
-Conductividad Térmica .....	(W/m.K)	
	260 °C	0,07
	538 °C	0,14
	815 °C	0,17
-Contracción Térmica .....		
(%)	1093 °C	2,8

Ilustración 47: Especificaciones del rotulado de la fibra cerámica. [15]

## 8.2 Manta de Fibra Cerámica.

Luego de la fibra cerámica moldeable existe una manta de fibra de cerámica que tiene la finalidad de aislar térmicamente. Esta posee un espesor de 79,5 [mm] y tiene las siguientes particularidades;

- Baja conductividad térmica y energía térmica almacenada.
- Elevada resistencia a los choques térmicos y ataques químicos.
- Buenas características acústicas y protección contra fuego.



**PROPIEDADES FÍSICAS**

Color .....Blanco  
 Densidad(kg/m<sup>3</sup>).....64-192  
 Espesor .....3-51  
 Temperatura Máxima de Uso (°C)..... 1100  
 Uso Límite ..... 1260  
 Punto de Fusión (°C) ..... 1760  
 Diámetro de las Fibras (μ,medio) ..... 2,8  
 Largo de Fibras (cm,medio).....10-25

**COMPOSICION QUIMICA TIPICA**

(% peso, después de quemado)

Alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ..... 47  
 Sílice (SiO<sub>2</sub>) ..... 53  
 Otros .....trazos

Ilustración 48: Propiedades físicas y composición química [16].

Temperatura media, 8 pcf	BTU.in/ft <sup>2</sup> . h.°F	W/mK
500°F (260°C)	0.44	0.06
1000°F (538°C)	0.87	0.12
1500°F (816°C)	1.45	0.21
1800°F (982°C)	1.83	0.26
2000°F (1093°C)	2.09	0.30

Tabla 9: Propiedades térmicas. [16]



Ilustración 49: Manta térmica. [16]

**8.3 Plancha de Acero Galvanizada**

El espesor de las paredes exteriores es de 3 mm, no soporta cargas, tiene la función de contener los elementos interiores o refractarios y dar forma al horno. Sus propiedades son mostradas a continuación,

Conductividad Térmica W/mK	
127°C	56,7
327°C	48,0
527°C	39,2
727°C	30,0

Tabla 10: Propiedades térmicas, plancha acero. [17]



Ilustración 50: Planchas de metal, CINTAC [18]

### 8.4 Plancha de Acero al Carbono A36.

Este es la plancha que ubica para reforzamiento y el espesor elegido es de 3 [mm], y posee las siguientes las propiedades,

## Planchas de Acero Carbono

### ASTM A36



**Estado de Suministro**  
Laminado.

**Tolerancia**  
ASTM A6.

**Características**  
Acero estructural de buena soldabilidad, adecuado para la fabricación de vigas soldadas para edificios, estructuras remachadas, y atornilladas, bases de columnas, piezas para puentes y depósitos de combustibles.

**Aplicaciones**  
Construcción de puentes, estanques, estructuras para industrias, edificios, torres y aplicaciones estructurales en general.

Composición Química (Valores Típicos)				
%C	%Mn	%Si	%P	%S
≤ 0,26	0,80 -1,20	≤ 0,40	≤ 0,04	≤ 0,05

Ilustración 51: propiedades A36 [28]

Acero al carbono	0,5% C	7833	465	54	1,474	55	52	48	45	42	35	31	29
	1% C	7801	473	43	1,172	43	43	42	40	36	33	29	28
	1,5% C	7753	486	36	0,970	36	36	36	35	33	31	28	28

Tabla 11: Extracto tabla propiedades de los metales. [29]

## 9 PÉRDIDAS DE CALOR EN EL HORNO.

En este ítem se verá cómo afectan a rendimiento actual del horno las modificaciones realizadas en el presente trabajo, se analizará en las paredes cilíndricas, en donde las pérdidas de calor existentes son radiación interior, la conducción de las distintas capas del horno y por último la convección externa (será utilizado el mismo valor del anexo 1). Además, se verá lo que ocurre en las paredes planas del horno constituidas por la tapa y la base en estas superficies los mecanismos de transferencia de calor son radiación interior, conducción y la convección externa (anexo 1), a la temperatura máxima que puede alcanzar el horno, finalmente compararlas con los cálculos anteriores del horno (anexo 1) y concluir sobre los resultados.

### 9.1 Pérdidas de Calor en Paredes Cilíndricas.

La pérdida de calor total está definida por la siguiente relación la que a continuación se separará por mayor comodidad.

$$Q_{cil} = \frac{th - ta}{\frac{1}{h_{rad} * A} + \frac{\ln(\frac{r2}{r1})}{2\pi * L * k1} + \frac{\ln(\frac{r3}{r2})}{2\pi * L * k2} + \frac{\ln(\frac{r4}{r3})}{2\pi * L * k3} + \frac{\ln(\frac{r5}{r4})}{2\pi * L * k4} + \frac{1}{he * A}} \quad (28)$$

Resistencia térmica interior es debido a la radiación, ya que en el vacío es el único mecanismo de transferencia de calor que puede ocurrir. De ahí, siguiendo los cálculos propuestos por Cengel [30], se determina el coeficiente de transferencia de calor por radiación, definido como:

$$h_{rad} = \varepsilon * \sigma * (T_s^2 + T_{alred}^2) * (T_s + T_{alred}) \quad (29)$$

Es materia de discusión la emisividad interna del horno, ya que como se trabaja con distintos materiales es difícil dar una estimación sobre cuál será la real, para los cálculos posteriores se considerará el caso más desfavorable, una emisividad igual a la de un cuerpo negro, es decir,  $\varepsilon=1$ .

$$\sigma = 5,67 * 10^{-8} \left[ \frac{W}{m^2 * K^4} \right]$$

La temperatura superficial y la dentro del horno se asumirán iguales por el prolongado tiempo de operación del horno.

$$T_{alred} = T_s = 673 \text{ K}$$

$$A = 2\pi * L * r$$

$$L = 0,2 \text{ [m]}$$

$$r1 = 0,0575 \text{ [m]}$$

$$r2 = 0,0775 \text{ [m]}$$

$$r3 = 0,157 \text{ [m]}$$

$$r4 = 0,16 \text{ [m]}$$

$$r5 = 0,163 \left[ \frac{W}{m * ^\circ C} \right]$$

$$k1 = 0,183 \left[ \frac{W}{m * ^\circ C} \right]$$

$$k2 = 0,22 \left[ \frac{W}{m * ^\circ C} \right]$$

$$k3 = 56,7 \left[ \frac{W}{m * ^\circ C} \right]$$

$$k4 = 40 \left[ \frac{W}{m * ^\circ C} \right]$$

$$t_h = 1273,15 \text{ K}$$

$$t_a = 293 \text{ K}$$

$$h_e = 25 \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right]$$

El valor de  $h_e$  es obtenido del anexo 1.

**Resistencia térmica interior por medio de la radiación.**

$$h_{rad} = 1 * 5,67 * 10^{-8} \left[ \frac{W}{m^2 * K^4} \right] * (673^2 + 673^2) * (673 + 673)$$

$$h_{rad} = 69,13 \text{ [W/(m}^2 * ^\circ\text{C)]}$$

$$\frac{1}{h_{rad} * A} = \frac{1}{69,13 * 0,0722} = 0,2 \left[ \frac{W}{^\circ\text{C}} \right]$$

**Resistencia por fibra cerámica moldeable.**

$$\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi * L * k_1} = \frac{\ln\left(\frac{0,0775}{0,0575}\right)}{2\pi * 0,2 * 0,183} = 1,298 \left[\frac{K}{W}\right]$$

**Resistencia por manta térmica de fibra cerámica.**

$$\frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi * L * k_2} = \frac{\ln\left(\frac{0,157}{0,0775}\right)}{2\pi * 0,2 * 0,22} = 2,554 \left[\frac{K}{W}\right]$$

**Resistencia plancha galvanizada.**

$$\frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2\pi * L * k_3} = \frac{\ln\left(\frac{0,16}{0,157}\right)}{2\pi * 0,2 * 56,7} = 0,000236 \left[\frac{K}{W}\right]$$

**Resistencia plancha acero A36**

$$\frac{\ln\left(\frac{r_5}{r_4}\right)}{2\pi * L * k_3} = \frac{\ln\left(\frac{0,163}{0,16}\right)}{2\pi * 0,2 * 40} = 0,000369 \left[\frac{K}{W}\right]$$

**Convección externa.**

$$\frac{1}{h_e * A} = \frac{1}{25 * \pi * 0,32 * 0,2} = 0,198594 \left[\frac{K}{W}\right]$$

Reemplazado obtenemos,

$$Q_{cil} = \frac{1273,15 - 298,15}{0,2 + 1,298 + 2,554 + 0,000236 + 0,000369 + 0,198594}$$

$$Q_{cil} = 229,29[W]$$

**9.2 Pérdida de Calor en Paredes Planas.**

A continuación se desarrollaran las pérdidas de calor en las paredes planas, es decir, a través de la base y la tapa.

**9.2.1 Pérdidas de Calor en la base.**

$$Q_{base} = \frac{th - ta}{\frac{1}{h_{rad} * A1} + \frac{L}{k3 * A2} + \frac{1}{h2 * A2}} \quad (30)$$

Siendo;

$$A1 = \pi * r1^2 \quad (31)$$

$$A1 = \pi * 0,0575^2 = 0,02 [m^2]$$

$$A2 = \pi * r2^2 \quad (32)$$

$$A2 = \pi * 0,0775^2 = 0,018 [m^2]$$

**Radiación interior.**

$$\frac{1}{h_{rad} * A1} = \frac{1}{69,13 * \pi * 0,02} = 4,34 \left[ \frac{K}{W} \right]$$

**Resistencia Plancha Galvanizada.**

$$\frac{L1}{k3 * A2} = \frac{0,003}{56,7 * 0,018} = 0,002804 \left[ \frac{K}{W} \right]$$

**Convección Exterior.**

$$\frac{1}{he * A1} = \frac{1}{25 * \pi * 0,02} = 2,12 \left[ \frac{K}{W} \right]$$

Reemplazando se tiene;

$$Q_{base} = \frac{1273,15 - 298,15}{4,43 + 0,002804 + 2,12}$$

$$Q_{base} = 152,6 [W]$$

### 9.2.2 Pérdidas de Calor en la tapa.

$$Q_{tapa} = \frac{th-ta}{\frac{1}{h_{rad} * A3} + \frac{L1}{k4 * A4} + \frac{L2}{k5 * Aemb} + \frac{1}{he * A4}} \quad (33)$$

Para obtener las áreas se resta el orificio por donde entra el émbolo  $remb = 13 [mm]$

$$A3 = \pi * (r1^2 - remb^2) \quad (34)$$

$$A3 = \pi * (0,0575^2 - 0,013^2) = 0,0098 [m^2]$$

$$A4 = \pi * (r2^2 - remb^2) \quad (35)$$

$$A4 = \pi * (0,0775^2 - 0,013^2) = 0,018 [m^2]$$

$$Aemb = \pi * remb^2 \quad (36)$$

$$Aemb = \pi * (0,013^2) = 0,00053 [m^2]$$

$$L1 = 5 [mm]$$

$$L2 = 15 [cm]$$

$$k5 = 33,4 \left[ \frac{W}{m * ^\circ C} \right]$$

#### Radiación Interior.

$$\frac{1}{h_{rad} * A3} = \frac{1}{69,13 * 0,0098} = 1,47 \left[ \frac{K}{W} \right]$$

#### Resistencia Acero A36

$$\frac{L1}{k3 * A4} = \frac{0,005}{40 * 0,018} = 0,007 \left[ \frac{K}{W} \right]$$

#### Resistencia Émbolo.

$$\frac{L2}{k5 * Aemb} = \frac{0,15}{33,4 * \pi * (0,013^2)} = 8,45 \left[ \frac{K}{W} \right]$$

**Convección Externa.**

$$\frac{1}{h_e * A_4} = \frac{1}{25 * 0,018} = 2,2 \left[ \frac{K}{W} \right]$$

Reemplazando se obtiene;

$$Q_{tapa} = \frac{1273,15 - 298,15}{1,47 + 0,007 + 8,45 + 2,2}$$

$$Q_{tapa} = 80,3 [W]$$

**9.2.3 Pérdidas de Calor Total Paredes Planas**

$$Q_{paredes\ planas} = Q_{tapa} + Q_{base} = 80,3 + 152,6 = 232,9 [W]$$

**9.3 Pérdida de calor total**

Como se mencionó anteriormente, las pérdidas de calor totales en el horno, vienen dadas por:

$$Q_{paredes\ planas} + Q_{cilindricas} = 232,9 + 229,9 [W]$$

$$Q_{Total} = 462 [W]$$



### 9.4 Análisis Pérdidas de Calor Antes y Después de las Modificaciones

En este ítem se presentan los cálculos antes de las modificaciones realizadas, que fueron obtenidos por Carlos Medina [13] en un trabajo de tesis previo, y se comparan con los presentados en este trabajo.

Pérdidas de Calor	Antes de las modificaciones	Después de las modificaciones
$Q_{cilindricas}$	169,32[W]	229,29[W]
$Q_{tapa}$	138,097[W]	80,3 [W]
$Q_{base}$	88,3[W]	152,6 [W]
$Q_{paredes\ planas}$	232,9[W]	462 [W]
$Q_{flujo\ de\ argón}$	468,809[W]	0
$Q_{Total}$	871,029[W]	462 [W]

Ilustración 52: Tabla Comparativa

Se observa que en el caso de las pérdidas de calor en paredes planas, en particular en la base, la cual no fue modificada hay un cambio de magnitud en la pérdida de calor, la que cambia de un 88,3 [W] a un 152,6 [W], el cambio de magnitud es debido a que cambian las condiciones de operación del horno y junto con ello los mecanismos de transferencia de calor dentro de este. Antes de modificar el horno existía convección interior de  $h_i = 10,08 \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right]$  [13], luego al realizar vacío dentro del horno, cambia el mecanismo de transferencia de calor a radiación, con un coeficiente de transferencia de calor de  $h_{rad} = 69,13 \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right]$ .

## REDISEÑO DE SISTEMA PARA CONTROL DE ATMÓSFERAS EN PRENSA UNIAXIAL

En el caso de las paredes cilíndricas las dimensiones son las mismas y solo se agrega una plancha de acero A36 que al tener una conductividad térmica de  $k = 40 \left[ \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$ , es poco el calor que puede retener dentro del horno en comparación a los otros materiales empleados.

Finalmente, se debe destacar que el flujo de calor total o pérdida total de calor en el horno es aproximadamente un 53% menor en el nuevo diseño comparado con el anterior, ya que el efecto que produce el flujo de argón que antes existía, ahora no ocurre gracias a la tapa y el funcionamiento en condición estanque.

## 10 Presupuesto.

A continuación, se presentarán los precios referenciales y el origen de ellos, en primera instancia se detallarán los elementos comerciales y luego los fabricados, para finalmente en una tabla resumen mostrar el detalle. Para el sistema de alimentación de argón se necesitaran mangueras aguanten vacío, en el mercado existe la siguiente opción de la empresa Tinner [31];



*Ilustración 53: Manguera de Vacío [31]*

Para la medición de la presión se necesita un manómetro de doble escala, cotizado en Ali Express [32]



Dial Indicador de Presión de Aire de vacío manómetro Doble Escala

*Ilustración 54: Manómetro doble escala*

Los elementos espirometricos son cotizados en la empresa Sincef [24], y son los que muestran las ilustraciones 28 y 36. Las tuercas y pernos se cotizan en Enerpac [33]



*Ilustración 55: Pernos y tuercas [33]*

Para generar el vacío dentro del horno se cotizó la siguiente bomba de vacío la cual se puede conectar a la red eléctrica 220 [V], 60 [Hz]



*Ilustración 56: Bomba vacío [34]*

Para controlar el flujo de los distintos gases se utilizará la siguiente válvula de 5/2 vías, cotizada en la empresa Festo. Máxima presión de trabajo 10 [bar], mínima de 0 [bar]



*Ilustración 57: Válvula 5/2 Festo [35]*

Las válvulas de corte cotizadas son de la empresa Decayeux las siguientes:



Ilustración 58: Válvulas corte de suministro [36]

La válvula de seguridad seleccionada es de la empresa SercoMax y es la que muestra la figura, tiene presión máxima de 8 [bar]



Ilustración 59: Válvula de seguridad. [37]

Para los elementos no comerciales, fueron cotizados en la fundición Metalúrgica Rancagua S.A, ubicada en la sexta región, ruta H-30, #3370, Lo Miranda, el detalle precio de todos los componentes a utilizar del presente trabajo se muestran en la tabla número 1. La cantidad de argón que se utilizará es  $m = 0,00422$  [kg] (doble del calculado en el punto 7.4, ver conclusión), mientras que en el proceso actual es de:

$$\dot{m} = \dot{Q} * \delta$$

En donde  $\dot{m}$  = masa de argón por unidad de tiempo

$$\dot{Q} = \text{Caudal de argón estanque indura } 10 \left[ \frac{L}{min} \right]$$

$$\delta = \text{densidad del argón a temperatura ambiente } 1,624 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right] [13]$$

$$\dot{m} = 0,00016 \left[ \frac{Kg}{s} \right]$$

REDISEÑO DE SISTEMA PARA CONTROL DE ATMÓSFERAS EN PRENSA UNIAXIAL

Y en 2,5 horas que es aproximadamente lo que dura el proceso se tiene un consumo de  $\dot{m} = 2,88 \left[ \frac{Kg}{5 \text{ horas}} \right]$ , lo que significa que se utiliza un 341% de menos argón durante el proceso, en otras palabras, se deben comprar con menor frecuencia los estanques necesarios para el proceso, la cantidad depende de la cantidad de ensayos realizados en el laboratorio.

N° Orden	Denominación	Cantidad	Costos Mano de obra						Sub total	Sub total	Total
			Mecánica de Banco		Máquinas de herrami		Soldadura				
			H.H	\$	HH	\$	HH	\$			
1	Manómetro	1	0	0	0	0	0	0	0	7500	7500
2	Tuerca especial	1	1	5000	2	16000	0	0	21000	10000	31000
3	Reformzamiento Horno A36	1	0,5	2500	1,5	12000	0	0	14500	10000	24500
4	Tapa Horno	1	1	5000	1,5	12000	0	0	17000	20000	37000
5	Base Brida	1	0,5	2500	1,5	12000	0	0	14500	45000	59500
6	Pernos Hexágonoles 1/2"	6	0	0	0	0	0	0	0	7200	7200
7	Junta espirométrica	1	0	0	0	0	0	0	0	12000	12000
8	O-ring espirométricos	2	0	0	0	0	0	0	0	7000	7000
9	Rondanas	2	0,5	2500	0,5	4000	0	0	6500	5000	11500
10	Bomba Vacío	1	0	0	0	0	0	0	0	15000	15000
11	Tuercas Hexagonales 1/2"	6	0	0	0	0	0	0	0	7200	7200
14	Válvula 4 vías	1	0	0	0	0	0	0	0	8000	8000
23	Válvula Corte	2	0	0	0	0	0	0	0	12000	12000
24	Manguera	1	0	0	0	0	0	0	0	16000	16000
25	Válvula Seguridad	1	0,2	1000	0	0	0	0	1000	20000	21000
<b>Total Fabricación</b>										276400	

Tabla 12: presupuesto, los precios pueden variar dependiendo de donde se cotice.

## 11 Conclusiones.

Para el desarrollo este trabajo se ha estudiado la situación actual del horno, lo que determinó que el proceso actual tiene deficiencias en cuanto a la utilización del gas y el sellado de este. Bajo algunos criterios de selección se han modificado tanto el horno como el funcionamiento del sistema, principalmente los componentes modificados son la tapa, el cuerpo central y que además se integró un sistema para extraer y suministrar el gas argón dentro del sistema.

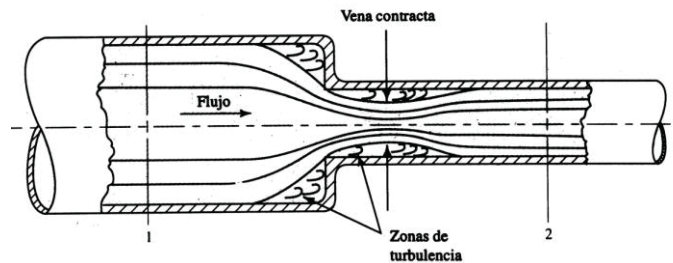


Ilustración 60: Zonas turbulentas [38]

El fin del nuevo sistema de operación es eliminar las turbulencias que se pueden generar las que pueden dejar volúmenes de oxígeno atrapados dentro del horno, gas que no es beneficioso para el proceso, ya que los óxidos se alojan en los límites de grano así modificando las propiedades que podría tener el composite en las condiciones óptimas. Con los cambios, se asegura la extracción previa del oxígeno para luego inyectar el argón, de esta forma se asegura un mayor control de lo que pasa dentro del horno durante el proceso (ilustración 60) el funcionamiento es de la siguiente manera, en el esquema 1 se abre el paso de argón (partículas rojas) para que desplace oxígeno dentro de la cámara de compactación (partículas azules), por medio de una bomba de vacío extrae la mezcla de argón y oxígeno dentro de cámara la compactación (ver esquema 2), se apaga la bomba de vacío, y esperar que el manómetro marque 1 atm para cerrar el paso de argón (esquema 3). Con este nuevo procedimiento se tiene mayor control de que ocurre dentro del horno. Se ha cumplido con todos los objetivos propuestos al principio

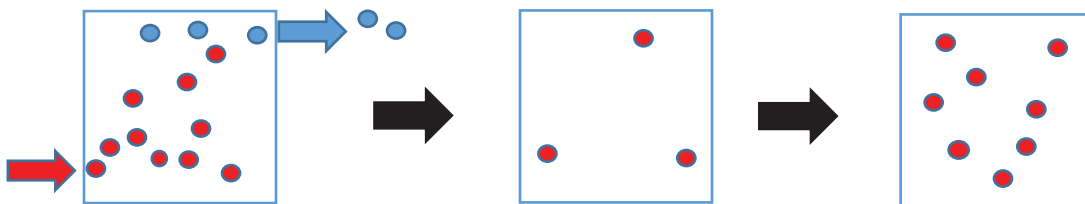


Ilustración 63:  
esquema 1

Ilustración 62:  
Esquema 2

Ilustración 61:  
Esquema 3

## REDISEÑO DE SISTEMA PARA CONTROL DE ATMÓSFERAS EN PRENSA UNIAXIAL

Se decide rediseñar componentes en vez de crear un sistema por la economía asociada a dicha decisión. Una vez que se ha rediseñado se ha comparado con el funcionamiento anterior, el cambio con mayor relevancia realizado es que cambia de un flujo constante de argón a una situación estanque. En términos de transferencia de calor el horno antes de ser modificados tiene pérdidas de calor totales iguales a:  $871,029[W]$  [13], la mayor cantidad de éstas pérdidas se las lleva el flujo constante de argón, con una magnitud de  $Q_{flujo\ de\ argón} = 468,809[W]$  [13], ver gráfico 5.

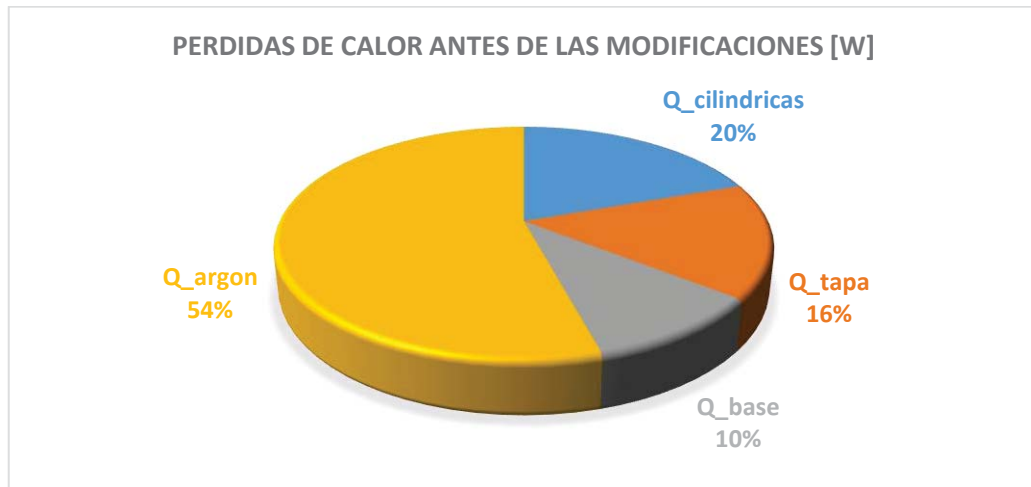


Gráfico 5: Perdas de calor antes modificaciones

Con los cambios realizados las pérdidas de transferencia de calor son reducidas en un 53 % en comparación a la situación actual del horno.

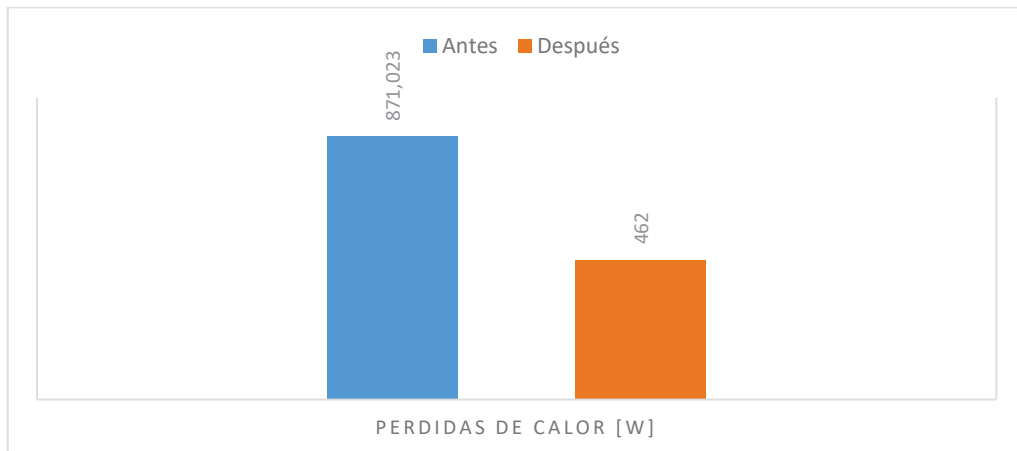
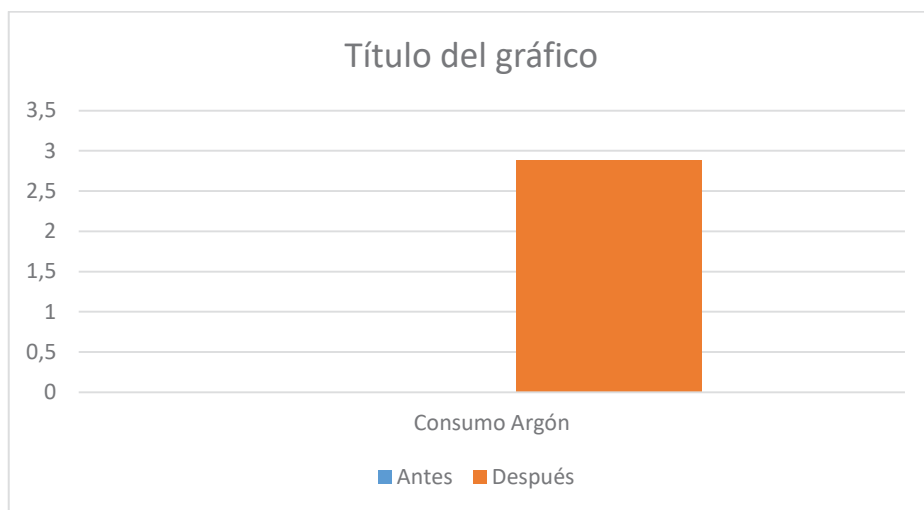


Gráfico 6: Comparación pérdidas de calor.



Otro punto a señalar es el ahorro de argón, al no existir flujo continuo es menor la cantidad de argón que se utilizará, la cantidad de argón que se utilizará es  $m = 0,00422 [kg]$ , mientras que en el proceso actual es de,  $\dot{m} = 0,00016 \left[ \frac{Kg}{s} \right]$ , en 2,5 horas que es aproximadamente lo que dura el proceso se tiene un consumo de  $\dot{m} = 2,88 \left[ \frac{Kg}{5 \text{ horas}} \right]$



lo que significa que se utiliza un 341% de menos argón durante el proceso, en otras palabras, se deben comprar con menor frecuencia los estanques necesarios para el proceso, la cantidad depende de la cantidad de la frecuencia de ensayos realizados en el laboratorio.

El protocolo de operación también se ve modificado, entre el punto 7 y 8 del epígrafe 4 del presente trabajo se debe hacer lo siguiente: después abrir el paso del argón se posiciona la tapa nueva, se colocan los pernos, se aprieta la tuerca especial para luego cortar el flujo de argón, generar el vacío con la bomba, una vez que se alcanza la condición de vacío (ver manómetro) apagar la bomba y abrir el paso del argón hasta que el manómetro marque 1 atm. Cerrar la admisión de argón y seguir el protocolo de operación desde el punto ocho en adelante.

Por último la mantención necesaria para el sistema es mínima, solo se debe ver el estado de los elementos sellantes, como O-rings y empaquetaduras, el estado de las manqueras y sus abrazaderas para no tener pérdidas de presión durante el proceso.

## 12 Nomenclatura General

$P_1$ : Presión inicial

$V_1$ : volumen

R: constante del gas argón

T: temperatura

m: masa.

$V_t$ : Volumen total

$V_H$ : Volumen horno actual

$V_h$ : Volumen herramental.

y: factor de empaque

m: Esfuerzo asentamiento de diseño mínimo.

G: diámetro medio del empaque.

P: presión de trabajo.

b: Ancho efectivo del asentamiento.

$W_{m_1}$ : Carga a la que está sometida el perno.

H: Carga del empaque sobre la brida.

$H_p$ : Carga de la deformación del empaque sobre la Brida.

m: Factor de empaque.

$W_{m_x}$ : Carga requerida en el perno

$S_b$ : Esfuerzo admisible del perno a la temperatura de operación.

$A_b$ : Área apernada

$N_{Per}$ : número de pernos

$H_T, H_G, H_D$ : Cargas en la brida.

$h_D, h_g, h_T$ : Brazos de torque en la brida

$M_T, M_G, M_D$ : Momentos en la brida

$M_o$ : Momento operación.

$M_A$ : Momento asentamiento.

B: diámetro interno de la brida.

$P_H: P_e(H)$ .

## REDISEÑO DE SISTEMA PARA CONTROL DE ATMÓSFERAS EN PRENSA UNIAXIAL

$P_e$ =Peso específico del producto.

$H$ =Altura de la columna de producto.

$P_o$ : Presión de operación.

R: Radio

S: Fluencia

E: Rendimiento de la Soldadura.

$P_c$ : Pérdida de calor.

## 13 Bibliografía.

- [1] <http://www.metalactual.com/revista/14/Pulvimetalurgia.pdf>
- [2] <http://www.selfoil.com/index.php/proceso-de-fabricacion>
- [3] Muñoz de Rivera, J. (2004) “Fabricación y optimización de aleaciones de aluminio aleado mecánicamente con Al12Si como aditivo de sinterización”. Proyecto de Investigación. Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla. España
- [4] <http://www1.herrera.unt.edu.ar/faceyt/typp/files/2012/05/Tema-n%C2%BA7-Metalurgia-de-Polvos.pdf>
- [5] Sydney H. Avner. “Introducción a la Metalurgia Física” 2 ED. Mc Graw Hill 1994.
- [6] Randall M. German. “Powder Metallurgy Science”, MPIF, 2 ED. New Jersey, 1994.
- [7] Serope Kalpakjian “Manufactura Ingeniería y tecnología Kalpakjian” ED 5, 2008
- [8] Molera Sola “Tratamiento Térmico de los Metales” ED 1, 1991.
- [9] <http://www.heat treatfurnaces.com/car.htm>
- [10] <http://www.ef-heat treat.com/2-3-vacuum-hot-press-furnace/170707>
- [11] <http://www.thermaltechnology.com/hot-press-system.html>
- [12] Outokumpu Fortinox S.A. (2013). Guía Aceros Herramientas.
- [13] Tesis Carlos Medina, PUCV
- [14] <http://termimex.com.mx/fibra-ceramica-a-granel-aislante.html>
- [15] <http://prug.espacios.net.mx/fibratecnew/espaniol/moldable-e.htm>
- [16] <http://www.diamoresa.com.ar/Manuales/Fibra%20ceramica.pdf>

- [17] ACENOR (2013). Catálogo planchas laminadas en caliente. Chile
- [18] [http://www.cintac.cl/pdf/Catalogo\\_2014\\_web.pdf](http://www.cintac.cl/pdf/Catalogo_2014_web.pdf)
- [19] <http://www.achs.cl/portal/trabajadores/Documents/ds-594.pdf>
- [20] <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/ar.htm>
- [21] [http://www.europeansealing.com/uploads/resources/publications/ESA-FSA-Guia-Juntas-y-Bridas-009\\_98\\_ESP.pdf](http://www.europeansealing.com/uploads/resources/publications/ESA-FSA-Guia-Juntas-y-Bridas-009_98_ESP.pdf)
- [22] Tesis Alejandro Fuentes, Instituto Politécnico Nacional, “Diseño de un sistema de compactación para materiales obtenidos por aleado mecánico.2011”
- [23] <http://www.biagini.com/allegati/Cata.Flange%20ANSI.pdf>
- [24] <http://www.sinsef.cl/pdf/catalogo%20Sinsef.pdf>
- [25] Código ASME, Sec. VIII Div. 1, apéndice 2.
- [26] <http://www.elhinel.com.ar/parker/Catalogo%20O-Ring.pdf>
- [27] [http://www.academia.edu/7116276/Dise%C3%B1o\\_y\\_C%C3%A1culo\\_de\\_Recipientes\\_a\\_Presi%C3%B3n](http://www.academia.edu/7116276/Dise%C3%B1o_y_C%C3%A1culo_de_Recipientes_a_Presi%C3%B3n)
- [28] [http://www.acerosotero.cl/planchas\\_acero\\_carbono\\_astm\\_a36.html](http://www.acerosotero.cl/planchas_acero_carbono_astm_a36.html)
- [29] <http://materias.fi.uba.ar/6731/Tablas/Tabla5.pdf>
- [30] Transferencia de Calor y Masa 4ta Edición Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar.
- [31] <http://neumatica-es.timmer-pneumatik.de/artikel/H-Schlaeuche/h-schlaeuche-12.html>
- [32] <https://es.aliexpress.com/item/Dial-Air-Pressure-Gauge-vacuum-gauge-Manometer-Double-Scale-Pressure-Measuring-calibrador-presion-manometro-aire-calibre/32656542468.html?spm=2114.43010208.4.67.8iOk3v>
- [33] <http://www.enerpac.com/es/tamanos-de-tuercas-y-pernos-hexagonales>

- [34] [https://es.aliexpress.com/af/5-way-valve.html?ltype=wholesale&d=y&origin=n&isViewCP=y&catId=0&initiative\\_id=SB\\_20161103182744&SearchText=5+way+valve&blanktest=0](https://es.aliexpress.com/af/5-way-valve.html?ltype=wholesale&d=y&origin=n&isViewCP=y&catId=0&initiative_id=SB_20161103182744&SearchText=5+way+valve&blanktest=0)
- [35] <http://www.directindustry.es/prod/festo/product-4735-1720514.html>
- [36] <http://www.chuchu-decayeux.com/es/produits/489-valvula-de-corte-1-4-de-giro-doble-macho-junta-plana-gas.html>
- [37] <http://www.suministros-industriales-ferreteria.com/ES/articulo/VALVULA-SEGURIDAD-3-8-10-BAR/CBE83118650FF981-192280DCFE56FB30.html>
- [38] [Guía UTFSM diseño de un banco para ensayos de pérdidas de carga. 2014 .](#)

ANEXOS

Anexo 1

4.2.3 Pérdidas de calor

4.2.3.1 *Pérdidas de calor por paredes cilíndricas.*

Se utiliza la siguiente fórmula [21]:

$$P_c = \frac{t_h - t_a}{\frac{1}{h_i * A_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi * L * k_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi * L * k_2} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2\pi * L * k_3} + \frac{1}{h_e * A_1}} = [W]$$

➤ Resistencia térmica por convección en el interior.

$$\frac{1}{h_i * A_1} = \frac{1}{10,8 \left[ \frac{W}{m^2 * ^\circ K} \right] * \pi * (0,115[m]) * (0,2[m])} = 1,281 \left[ \frac{^\circ K}{W} \right]$$

➤ Resistencia térmica de la fibra cerámica moldeable.

$$\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi * L * k_1} = \frac{\ln\left(\frac{0,0775}{0,0575}\right)}{2\pi * 0,2[m] * 0,183 \left[ \frac{W}{m * ^\circ K} \right]} = 1,298 \left[ \frac{^\circ K}{W} \right]$$

➤ Resistencia térmica de la manta de fibra de cerámica.

$$\frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi * L * k_2} = \frac{\ln\left(\frac{0,157}{0,0775}\right)}{2\pi * 0,2[m] * 0,22\left[\frac{W}{m * ^\circ K}\right]} = 2,554 \left[\frac{^\circ K}{W}\right]$$

➤ Resistencia térmica de la plancha galvanizada.

$$\frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2\pi * L * k_3} = \frac{\ln\left(\frac{0,16}{0,157}\right)}{2\pi * 0,2[m] * 56,7\left[\frac{W}{m * ^\circ K}\right]} = 0,000266 \left[\frac{^\circ K}{W}\right]$$

➤ Resistencia térmica por convección en el exterior.

$$\frac{1}{h_e * A_1} = \frac{1}{25\left[\frac{W}{m^2 * ^\circ K}\right] * \pi * (0,32[m]) * (0,2[m])} = 0,625 \left[\frac{^\circ K}{W}\right]$$

Por lo tanto se tiene:

$$P_c = \frac{1273,15 - 298,15}{1,281 + 1,298 + 2,554 + 0,000266 + 0,625} = 169,32 [W]$$

#### 4.2.3.2 Pérdida de calor por paredes planas.

Se utiliza la siguiente fórmula [21]:

$$P_p = \frac{t_h - t_a}{\frac{1}{h_i * A} + \frac{L_1}{k_1 * A_1} + \frac{1}{h_e * A}} = [W]$$

Tapa inferior:

➤ Resistencia térmica por convección en el interior.

$$\frac{1}{h_i * A_1} = \frac{1}{10,8\left[\frac{W}{m^2 * ^\circ K}\right] * \pi * (0,0575[m])^2} = 8,914 \left[\frac{^\circ K}{W}\right]$$



- Resistencia térmica plancha galvanizada.

$$\frac{L1}{k1 * A1} = \frac{0,003 [m]}{56,7 \left[ \frac{W}{m * ^\circ K} \right] * \pi * (0,0775 [m])^2} = 0,0028 \left[ \frac{^\circ K}{W} \right]$$

- Resistencia térmica por convección en el exterior.

$$\frac{1}{he * A} = \frac{1}{25 \left[ \frac{W}{m^2 * ^\circ K} \right] * \pi * (0,0775 [m])^2} = 2,119 \left[ \frac{^\circ K}{W} \right]$$

$$Ppinf = \frac{1273,15 - 298,15 [^\circ K]}{8,914 + 0,0028 + 2,119 \left[ \frac{^\circ K}{W} \right]} = 88,248 [W]$$

Tapa Superior:

A diferencia de la tapa inferior, en esta se encuentra la cavidad y el punzón que empuja al punzón interior para realizar la compactación.

- Resistencia térmica por convección en el interior.

$$\frac{1}{hi * A1} = \frac{1}{10,8 \left[ \frac{W}{m^2 * ^\circ K} \right] * ((\pi * (0,0575 [m])^2) - (\pi * (0,013 [m])^2))} = 9,395 \left[ \frac{^\circ K}{W} \right]$$

- Resistencia térmica acero inoxidable.

$$\frac{L1}{k1 * A1} = \frac{0,003 [m]}{27,78 \left[ \frac{W}{m * ^\circ K} \right] * ((\pi * (0,0775 [m])^2) - (\pi * (0,013 [m])^2))} = 0,00588 \left[ \frac{^\circ K}{W} \right]$$

- Resistencia térmica embolo acero H-13.

$$\frac{L2}{k2 * A2} = \frac{0,15 [m]}{33,4 \left[ \frac{W}{m * ^\circ K} \right] * (\pi * (0,013 [m])^2)} = 8,458 \left[ \frac{^\circ K}{W} \right]$$

- Resistencia térmica por convección en el exterior.

$$\frac{1}{he * A3} = \frac{1}{25 \left[ \frac{W}{m^2 * ^\circ K} \right] * ((\pi * (0,0775 [m])^2) - (\pi * (0,013 [m])^2))} = 2,181 \left[ \frac{^\circ K}{W} \right]$$

$$Ppsup = \frac{1273,15 - 298,15 [^\circ K]}{8,914 + 0,00588 + 8,458 + 2,181 \left[ \frac{^\circ K}{W} \right]} = 49,849 [W]$$

$$Pp = 88,248 + 49,849 = 138,097 [W]$$