

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA PARA LA ELABORACIÓN  
DE UN MATERIAL ALUMINIO COMPUESTO,  
VIA PULVIMETALURGIA”

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN**

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Presentado por:

Ramón Eduardo Unamuno Mosquera

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2017

## **AGRADECIMIENTOS**

Ing. Fredy Vargas Arcentales

Ing. Giovanni Rodas Valle

Ing. Emilio Ramírez Salazar

Jorge Amaya Rivas PhD.

Sr. Walther Mendoza López

Sr. Fernando Delgado Loza

Que colaboraron para la ejecución de este proyecto.

## **DEDICATORIA**

*Con todo el amor y la humildad de mi corazón dedico este trabajo a DIOS, promotor de mis buenas acciones. A mis padres Ramón y Elsy, a mi hermana Doménica, mis abuelos Ramón, Fausto, Ma. Inés y Ma. Luisa (+), pilares fundamentales de mi vida.*

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido desarrollado en la presente propuesta de la materia integradora corresponde exclusivamente al equipo conformado por:

Sr. Ramon Eduardo Unamuno Mosquera

Ana Rivas Ferrín PhD.

Eric Plaza Pirela PhD.

y el patrimonio intelectual del mismo a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) de la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.



Ramón Unamuno Mosquera

Autor



Ana Rivas Ferrín PhD.

Tutor



Eric Plaza Pirela PhD.

Tutor

## RESUMEN

En el proceso de manufactura de componentes metálicos en la industria, se buscan alternativas de materiales que sean más livianos, accesibles, con una adecuada resistencia mecánica y económicamente viables que puedan ser una alternativa para la sustitución de materiales de alta resistencia mecánica. El aluminio es una de estas alternativas con el cual se pueden crear nuevos compuestos que brinden una mayor resistencia mecánica y un menor peso. En este trabajo se diseñó y construyó un sistema de moldeo, para el reforzamiento del Aluminio mediante partículas duras. El molde compactará las muestras mediante el proceso de pulvimetalurgia, para la elaboración de probetas de Aluminio reforzado, unificando las fases de prensado y sinterizado. El sistema fue efectivo en el proceso de compactación, logrando homogenizar y compactar muestras de aluminio que provenían del polvo de Aluminio. Sin embargo, el proceso de prensado y calentado indujo la adhesión de la probeta al acero lo que dificultó su extracción del molde. La realización de ensayos utilizando como capa separadora teflón lograron mostrar mayor efectividad en el proceso de separación, pero será necesario un estudio posterior para determinar las variables de operación y métodos necesarios para separar la interfase del acero del molde y el Aluminio durante la compresión.

Palabras Claves: selección, diseño, mecanizado, calentamiento, refuerzo, interfase.

## **ABSTRACT**

*In the industry the process of manufacturing metal components, new alternatives are being searched, these must comply with main characteristics such as: lighter, more approachable, the appropriated endurance and of course economically viable. These options could work in order to be a replacement of components with a high mechanic resistance level such as steel. In this case, the aluminum is one of the best alternatives in which new components could be manufactured with it, offering a higher strength with a lower weight. As we know, in this project a molding system has been designed and built in order to reinforce the aluminum trough hard particles. The mold will be able to compact the samples trough a Powder Metallurgy process, to elaborate reinforced aluminum test tubes unifying the phases of pressing and sintering. The system showed an effective compaction process, being able to harmonize and compress the aluminum samples that come from the aluminum powder. However, the pressing and heating process induced the adhesion of the test tube to the steel, which made it difficult to remove from the mold. The performance of the test tubes while using Teflon as a separating layer, proved to be a more effective option in the separation process, but a further and deeper study will be necessary in order to determine the operation variables and methods required to separate the interface of the steel from the mold and the aluminum during compression phase.*

*Keywords: selection, design, machining, heating, reinforcement, interfase.*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA .....	VII
INDICE DE FIGURAS.....	VIII
INDICE DE TABLAS.....	X
ÍNDICE DE PLANOS .....	XI
CAPÍTULO 1 .....	1
1. Introduccion .....	1
1.1 Descripción del problema .....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo General.....	2
1.2.2 Objetivo Especificos .....	2
1.3 Marco teórico .....	3
1.3.1 Fabricación de muestras por proceso de Pulvimetalurgia .....	3
1.3.1.1 Mezclado Pulvimetalúrgico .....	4
1.3.1.2 Prensado Pulvimetalúrgico .....	4
1.3.1.3 Sinterizado.....	4
1.3.2 Acero inoxidable .....	5
1.3.2.1 Acero inoxidable Martensitico.....	5
1.3.2.1.1 Tratamientos térmicos para el acero inoxidable martensitico .....	6
1.3.3 Aceros para trabajos en caliente .....	6
1.3.4 Consideraciones de resistencia mecánica en las piezas que conforman el sistema de prensado.....	7

1.3.4.1 Ley de Pascal .....	7
1.3.4.2 Esfuerzos combinados y criterio de Von-Misses .....	7
1.3.5 Consideraciones de transferencia de calor en las piezas del sistema de moldeo .....	8
1.3.5.1 Conductividad térmica en régimen transitorio.....	8
1.3.5.2 Termo-fluencia.....	9
1.3.5.3 Defectos de creep .....	10
1.3.6 Herramientas para el calentamiento del sistema de moldeo .....	11
1.3.6.1 Termocupla tipo k .....	11
1.3.6.2 Resistencias térmicas de cartucho .....	12
1.3.6.3 Controlador de temperatura.....	12
1.3.7 Mecanizado de metales .....	13
1.3.7.1 Fresado frontal .....	13
1.3.7.2 Control numérico computarizado .....	14
1.3.7.3 Taladrado .....	15
CAPITULO 2.....	16
2.1. Dimensionamiento del molde.....	16
2.2 Selección de material.....	16
2.1.1 Dureza .....	17
2.1.2 Durabilidad.....	17
2.1.3 Tratamiento térmico para el acero AISI 420 y AISI H13 .....	18
2.1.4 Termo-conductor .....	19
2.1.5 Maquinabilidad.....	20
2.1.6 Compatibilidad .....	20
2.1.7 Disponibilidad .....	20
2.1.8 Resistencia a la corrosion.....	20
2.1.9 Costo .....	21
2.1.10 Disponibilidad .....	21
2.2 Diseño final de sistema de molde .....	21
2.2.1 Sistema de calentamiento del molde .....	22
2.2.2 Perfilado de la probeta.....	22

2.2.3 Ubicación del sensor de temperatura .....	22
2.3 Mecanización de las piezas del sistema .....	23
2.3.1 Perforaciones para alojamiento de resistencias eléctricas y sensor de temperatura .....	23
2.3.2 Fresado frontal del perfil de la probeta en el molde 'hembra' .....	25
2.3.3 Fresado frontal del perfil de la probeta en el molde 'macho' .....	27
2.4 Tratamiento térmico de las piezas del sistema .....	29
2.5 Ensamble del sistema.....	31
2.5.1 Ensamble de componentes del tablero controlador de temperatura.....	32
2.6 Metodología para elaboración de muestras.....	32
CAPITULO 3.....	40
3. RESULTADOS.....	40
3.1. Simulación del esquema de diseño .....	40
3.2 Selección de material.....	41
3.2.1 Termofluencia .....	41
3.2.1.1 Condiciones de termofluencia para el acero AISI 420 .....	41
3.2.1.2 Condiciones de termofluencia para el acero AISI H13 .....	43
3.3 Durabilidad.....	45
3.4 Resistencia a la corrosión.....	47
3.5 Matriz de decisión .....	47
CAPITULO 4 .....	49
4.1 Conclusiones .....	49
4.2 Recomendaciones .....	50

BIBLIOGRAFÍA

APÉNDICES

## **ABREVIATURAS**

AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAMPRO	Campo avanzado de mecanizado y prototipos
LEMAT	Laboratorio de ensayos metrológicos y de materiales
CNC	Control numérico computarizado
HSS	High speed Steel
SAE	Society of Automotive Engineers

## SIMBOLOGÍA

Cr	Cromo
Si	Silicio
Fe	Hierro
C	Carbono
Ni	Níquel
Co	Cobalto
Al	Aluminio
V	Vanadio
in	Pulgadas
°C	grados Celsius
min	minuto
mm	milimetro
mV	milivoltios
MPa	Megapascales
GPa	Gigapascales
F. S.	Factor de seguridad
$\sigma_m$	Esfuerzo ultimo de tensión
$\sigma_{0.2}$	Esfuerzo de fluencia
E	Módulo de Young
$\varepsilon$	Deformación
kg	kilogramo
kN	kilo Newton
ton	tonelada métrica
RPM	Revoluciones por minuto
mm/min	milímetros por minuto
HRC	Dureza Rockwell C
W	vatios
m	metro
psi	libra por pulgada cuadrada
K	kelvin
\$	Dólares de los Estados Unidos de América

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Proceso de elaboración de piezas mediante pulvimetalurgia .....	4
Figura 1.2. Mezcladora de polvo metálico .....	5
Figura 1.3. Proceso de prensado de piezas con un sistema de moldeo .....	7
Figura 1.4. Aleaciones de aceros inoxidables, según el contenido de Cr y Ni .....	7
Figura 1.5. Esfuerzos combinados en un elemento diferencial.....	9
Figura 1.6. Efectos de la transferencia de calor en régimen transitorio en una pared.....	10
Figura 1.7. Dislocaciones presentadas en la estructura cristalina, debido a termofluencia .....	11
Figura 1.8. Curva de velocidad de elongación en ensayo de creep.....	11
Figura 1.9. Termocupla tipo K.....	13
Figura 1.10. Resistencias de tipo cartucho .....	13
Figura 1.11. Esquema de fresado frontal.....	14
Figura 1.12. Posicionamiento de pieza en el centro de mecanizado .....	15
Figura 1.13. Taladro de pedestal, para uso industrial.....	16
Figura 2.1. Operación de taladrado, para alojamiento de resistencias eléctricas .....	24
Figura 2.2. Operación de taladrado, para alojamiento de resistencias eléctricas .....	24
Figura 2.3. Operación de taladrado, para alojamiento de resistencias eléctricas .....	24
Figura 2.4. Alojamiento de la resistencia eléctrica en el molde hembra, posterior a la operación de taladrado .....	25
Figura 2.5. Proceso de ranurado al molde hembra, realizado por el centro de mecanizado CNC, utilizando fresa frontal HSS, refrigerado con aceite soluble.....	26
Figura 2.6. Molde hembra, finalizado el proceso de mecanizado .....	27
Figura 2.7 Mecanización del molde macho el centro de mecanizado CNC .....	28
Figura 2.8. Molde macho, finalizado el proceso de mecanizado .....	28
Figura 2.10. Proceso de temple del molde macho en el horno.....	29
Figura 2.11. Proceso de temple del molde hembra en el horno .....	29
Figura 2.12. Diagrama de revenido para el acero AISI H13 .....	30
Figura 2.13. Esquema de tratamiento térmico para el acero AISI H13 .....	31

Figura 2.14. Prensa utilizada para la compactación del molde .....	33
Figura 2.15. Sistema montado en la prensa hidráulica .....	34
Figura 2.16. Sistema montado en la prensa hidráulica, ejerciendo presión sobre el sistema de moldeo, alcanzando la temperatura de 320 °C.....	34
Figura 2.17. Muestra 1 de aluminio, retirada del molde posterior al proceso de prensado y calentamiento .....	36
Figura 2.18. Muestra 2 de aluminio, retirada del molde posterior al proceso de prensado y calentamiento .....	36
Figura 2.19. Muestra 4 de aluminio en viruta, retirada del molde posterior al proceso de prensado y calentamiento .....	37
Figura 2.20. Muestra 5 de aluminio en viruta, retirada del molde posterior al proceso de prensado y calentamiento .....	37
Figura 2.21. Muestra 6 de aluminio con cobertura de teflón, separando la superficie del aluminio y el molde hembra .....	38
Figura 2.22. Muestra 6 de aluminio, retirada del molde posterior al proceso de prensado y calentamiento .....	38
Figura 2.23. Muestra de compuesto de aluminio con óxido de cerio al 2% .....	39
Figura 3.1a y 3.1b. Esquema del diseño del sistema de molde de probetas. a) hembra. b) Macho.....	40
Figura 3.2. Gráfica esfuerzo último de tensión (1), esfuerzo de fluencia (2), porcentaje de elongación (3), para el acero AISI H13, en función a la temperatura operativa .....	43
Figura 3.3. Gráfico deformación (%) vs tiempo (min), de velocidad de deformación de acero AISI 420 a 350 °C .....	45
Figura 3.4. Gráfico de deformación (%) vs. Tiempo (min) de velocidad de deformación de deformación de acero AISI 420 a 350 °C.....	46

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Especificaciones del proceso de tratamiento térmico para el acero inoxidable AISI 420 y AISI H13.....	18
Tabla 2.2. Rangos de conductividad térmica, para los aceros a usar en el sistema..	19
Tabla 2.3. Contenido químico en % de acero AISI 420 y AISI H13 .....	21
Tabla 2.4. Operación de taladrado, para alojamiento de resistencias eléctricas .....	24
Tabla 2.5. Operación de ranurado, para el perfilado de la probeta según la norma ASTM B 557M.....	26
Tabla 2.6. Operación de desbaste de material y perfilado de la probeta para el molde macho, según la norma ASTM B 557M.....	27
Tabla 2.7. Parámetros y procedimiento de elaboración de muestras de aluminio puro.....	35
Tabla 2.8. Parámetros y procedimiento de elaboración de muestras de compuesto de aluminio con óxido de cerio .....	39
Tabla 3.1. Valores de esfuerzo último de tensión, esfuerzo de fluencia y módulo de Young para acero martensítico AISI 420 a diferentes temperaturas.....	42
Tabla 3.2. Condiciones de simulación y resultados de Factor de seguridad para acero inoxidable martensítico AISI 420.....	42
Tabla 3.3. Valores de esfuerzo último de tensión, esfuerzo de fluencia y módulo de Young para acero AISI H13 a diferentes temperaturas .....	43
Tabla 3.4. Condiciones de simulación y resultados de Factor de Seguridad .....	44
Tabla 3.5. Contenido de cromo y carbono para los aceros candidatos .....	47
Tabla 3.6. Puntaje para la ponderación de los criterios, según su relevancia .....	48
Tabla 3.7. Matriz de selección calificada para los aceros candidatos.....	48

## ÍNDICE DE PLANOS

Molde macho .....	69
Molde hembra .....	70

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Descripción del problema

Existe una demanda creciente de partes y piezas con una alta relación resistencia mecánica/densidad para el diseño de productos más livianos, particularmente destinados en la industria automotriz. Esto se traduce en una reducción del peso de los productos, lo que trae consigo una disminución de emisiones contaminantes al ambiente por ahorro de combustible. Los compuestos de aluminio reforzados con nanopartículas que ofrecen una mayor resistencia mecánica y dureza, se perfilan como los más adecuados para trabajar en condiciones de elevada resistencia/peso. Por lo cual se requerirá realizar estos tipos de compuestos de aluminio para realizar el análisis de las propiedades mecánicas. La pulvimetalurgia se presenta como la solución más óptima para los objetivos planteados, ya que con ella se podrá realizar compuestos con no metales, los costos y tiempos de fabricación son relativamente bajos, en comparación con otros procesos de manufactura de metales. Sin embargo, para el estudio de sus propiedades mecánicas se requiere del diseño de un sistema de fabricación de muestras de aluminio compuesto, para sus posteriores ensayos y análisis.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Desarrollar un sistema para la elaboración de compuestos de Aluminio a través de un proceso de mezcla vía pulvimetalurgia, para la fabricación de materiales con alta relación resistencia/peso.

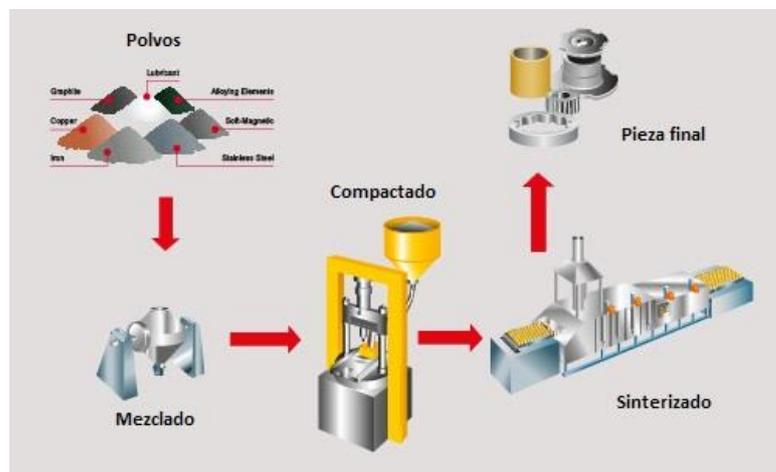
### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Diseñar y construir un sistema que permita la manufactura de muestras por proceso de pulvimetalurgia, integrando las etapas de compactado y sinterizado, para el estudio de las propiedades mecánicas de las muestras.
- Validar el sistema mediante pruebas de compactado mecánico en caliente de aluminio en polvo de mezclas de aluminio más cerio.

## 1.3 Marco teórico

### 1.3.1 Fabricación de muestras por proceso de Pulvimetalurgia

El proceso de pulvimetalurgia es uno de los métodos para la elaboración de piezas a base de polvos metálicos. Consiste en tres etapas esenciales, que se encuentran en secuencia en la Figura 1.1, que son: mezclado, prensado y sinterizado. Los cuales se detallan a continuación.



**Figura 1.1. Proceso de elaboración de piezas mediante Pulvimetalurgia.**

Fuente: Introducción a la Pulvimetalurgia, Revista de ingeniería.

#### 1.3.1.1 Mezclado Pulvimetalúrgico

Este proceso ayuda a la distribución homogénea de partículas, para evitar acumulaciones de partículas durante el proceso de prensado y mantener una densidad uniforme en todas las partes de la pieza a elaborar. El proceso de mezclado se realiza en envases giratorios como se puede ver en la Figura 1.2., aunque hay variedades de tamaños y formas de envases.



**Figura 1.2. Mezcladora de polvo metálico.**

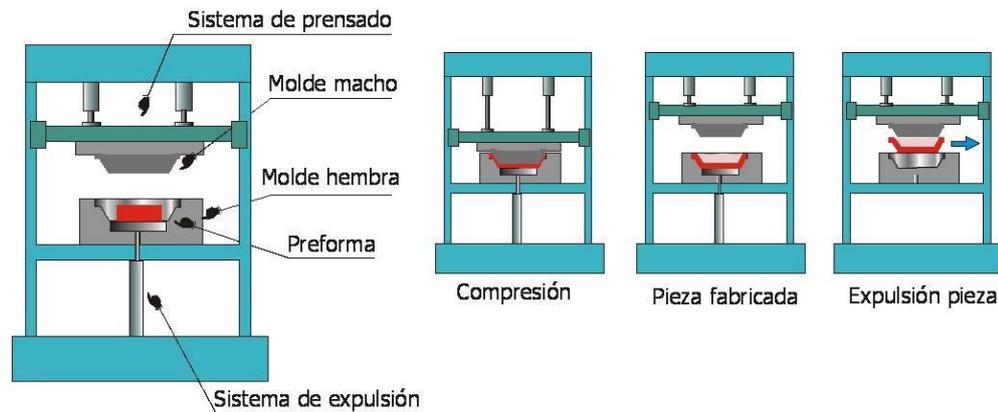
Fuente: "W" Series Powder Mixer Machine, Fullwell.

Para este proceso se agregan aditivos como defloculantes que permitan una mejor dispersión del polvo, evitando aglomeraciones. Adicionalmente, se emplean lubricantes que cuya función es mantener una circulación efectiva y promover la uniformidad de las partículas de polvo. Los aditivos, son introducidos dentro de la mezcladora en cantidades determinadas.

### ***1.3.1.2 Prensado Pulvimetalúrgico***

El compactado consiste en comprimir la mezcla de polvo en el molde, al mismo tiempo que se comprime con una prensa. Esto, con el objetivo de que las partículas entre ellas tengan suficiente contacto, para lograr porosidades específicas, además de lograr una densidad uniforme en toda la pieza.

Se requiere también que la pieza en verde (pieza compactada), tenga la resistencia suficiente para que sea manipulada hasta el posterior proceso de sinterizado.



**Figura 1.3. Proceso de prensado de piezas con un sistema de moldeo.**

Fuente: Los plásticos, departamento de tecnología I.E.A. Albarregas.

Un ejemplo, como en la Figura 1.3, nos muestra como la prensa ejerce presión sobre el molde macho, para el conformado de la pieza que se encuentra contenida en el molde hembra.

La densidad de la pieza y su resistencia mecánica dependerá de los alcances máximos de las presiones de compactación, a las que es sometido.

### **1.3.1.3 Sinterizado**

El sinterizado es el proceso posterior al prensado, donde la pieza en verde es sometida a elevada presión y temperatura, provocando la aglomeración de las partículas de polvo, cerrando los poros y el cierre de canales para obtener un material denso.

## **1.3.2 Materiales candidatos para la construcción del molde**

### **1.3.2.1 Acero inoxidable**

El acero inoxidable es una aleación de Fe y C, que contiene un mínimo de 11% de Cr. La principal ventaja de estos aceros es su resistencia a la corrosión, debido a una película fina de óxido de cromo que se forma en su superficie.

### 1.3.2.1 Acero inoxidable Martensítico

Estos aceros inoxidables contienen de 12 a 17 % de Cr y de 0,05 a 1% de C, como se puede observar en la Figura 1.4, donde por medio de un temple se obtiene una estructura martensítica a partir de una estructura austenítica, con el fin de modificar las propiedades de dureza y resistencia mecánica.

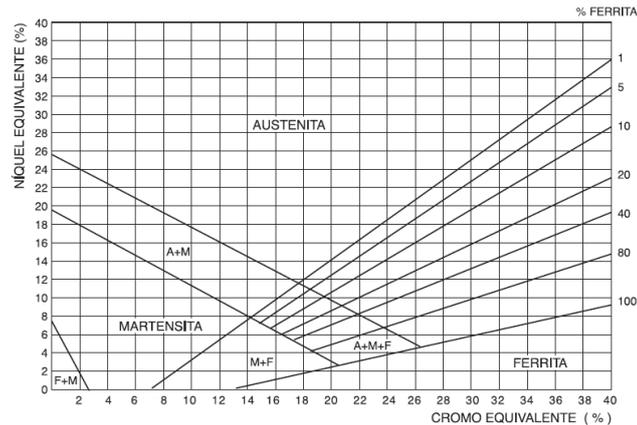


Figura 1.4. Aleaciones de aceros inoxidables, según el contenido de Cr y Ni.

Fuente: Aceros inoxidables, Universidad tecnológica de Pereira.

#### 1.3.2.1.1 Tratamientos térmicos para el acero inoxidable martensítico

Así, con el temple se busca aumentar la dureza, pero al mismo tiempo la ductilidad del material se reduce significativamente. Por tal motivo, al temple le prosigue el revenido; que consiste en el aumento gradual de temperatura cada cierto tiempo, hasta una temperatura máxima establecida, para dar cierto grado de tenacidad al material, obteniendo una apropiada combinación de propiedades mecánicas. Sin embargo, los aceros inoxidables martensíticos son más sensibles a las fallas de tratamiento térmico que los aceros de baja aleación; y su principal desventaja es el elevado costo de material y tratamiento térmico.

### 1.3.3 Aceros para trabajos en caliente

Los aceros aleados a partir del cromo-molibdeno-vanadio, son los idóneos para el trabajo a elevadas temperaturas. Poseen una moderada resistencia a la corrosión, poseen buena tenacidad e insensibilidad a la fatiga térmica. Entre ellas podemos

destacar los aceros AISI H11, AISI H13, AISI XM 19, AISI F53, AISI D2. Todos estos aceros se destacan por su buen desempeño en rodillos en trenes de laminación, extrusoras, fundiciones en alta presión.

#### **1.3.4 Consideraciones de resistencia mecánica en las piezas que conforman el sistema de prensado.**

Las piezas que conforman el sistema de prensado y calentamiento estarán sometidos a esfuerzos en ciertos puntos, por lo que se tienen que considerar los principios físicos, para su correcto diseño y dimensionamiento.

La aplicación de la fuerza sobre el sistema de molde macho hacia el material, para lograr las condiciones de equilibrio sobre el molde hembra, ejercerá la misma fuerza; pero para determinar las fuerzas en las paredes laterales en el molde hembra, se considerará la ley de Pascal.

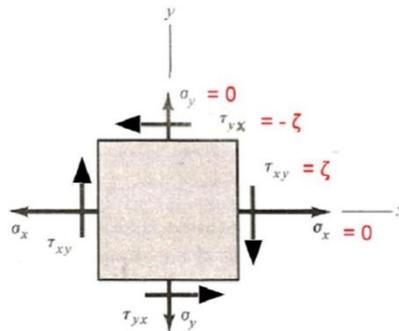
##### ***1.3.4.1 Ley de Pascal***

Esta ley postulada por el físico y matemático Balse Pascal, enuncia que “la presión ejercida sobre un fluido encerrado e incompresible se transmite por igual en todas las partes del recipiente que lo contiene”. Considerando esta ley, el polvo metálico ejercerá la misma presión en las paredes del molde hembra.

Para el análisis de la resistencia mecánica del material del sistema, se requiere el uso de criterios que consideren los esfuerzos debido a las fuerzas aplicadas a las piezas del sistema de moldeo. Para metales dúctiles se considerarán los criterios de Von Misses; que nos ayudarán a determinar el dimensionamiento y obtengamos un factor de seguridad conservador bajo las condiciones de operación del sistema, con el objetivo de sobredimensionar las piezas del sistema por encima de los requerimientos y evitar rupturas.

##### ***1.3.4.2 Esfuerzos combinados y criterio de Von-Misses***

En las superficies de las piezas de molde macho y hembra que conformarán la probeta, debido a las altas presiones ejercidas sobre estas piezas estarán sometidas a esfuerzos normales, como se puede apreciar en la Figura 1.5. con respecto a otros puntos cercanos de la superficie



**Figura 1.5. Esfuerzos combinados en un elemento diferencial.**

Fuente: Resistencia de materiales, Beer-Jhonston.

Este principio, junto con el de Von Mises, el mismo que determina el esfuerzo equivalente aplicado al material en condiciones reales, nos ayudan a determinar la resistencia del material en las condiciones operativas e indica las cercanías de la ruptura del material.

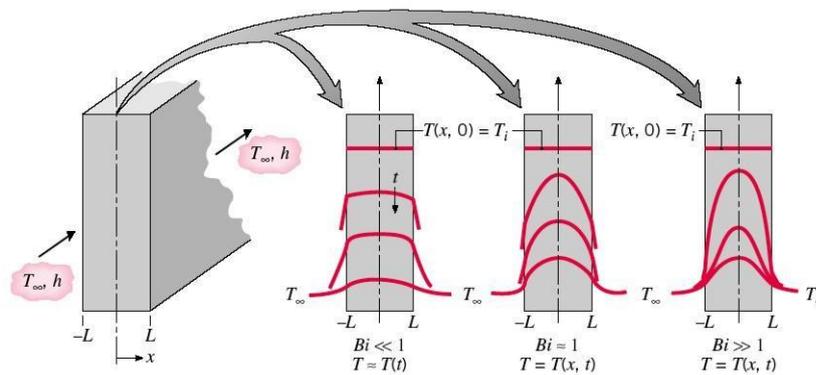
### **1.3.5 Consideraciones de transferencia de calor en las piezas del sistema de moldeo.**

El análisis de la conducción de calor es necesario para el proceso de diseño, ya que de esto dependen el tiempo de fabricación de la probeta; y además permite estimar las temperaturas que deben alcanzar las resistencias térmicas para llegar a temperaturas adecuadas en el material compuesto.

#### **1.3.5.1 Conductividad térmica en régimen transitorio**

La conducción de calor en régimen estacionario, nos garantiza el equilibrio termodinámico sea constante en un punto cualquiera de un material. El comportamiento térmico de un material en condiciones reales se ve afectada por la variación en el entorno ambiental, al modificar la energía térmica interna del sistema y su geometría. La variación de las condiciones ambientales provoca que el sistema no alcance el equilibrio, como se puede apreciar en las curvas de temperatura con respecto a la distancia en la Figura 1.6., por efecto de factores

como la acumulación o disipación de calor no uniforme en un material y pérdidas por convección alrededor del material.



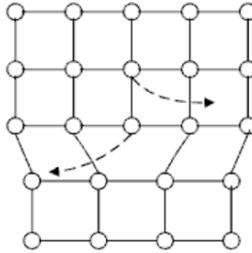
**Figura 1.6. Efectos de la transferencia de calor en régimen transitorio en una pared.**

Fuente: Fundamentos de transferencia de calor, Incropera.

### 1.3.5.2 Termofluencia

Al aplicar un esfuerzo menor que  $\sigma_y$  a temperatura ambiente, un sólido sufre deformación elástica. Pero si la temperatura del material incrementa a valores a partir del 30 % de su temperatura de fusión; al aplicar esfuerzos muy bajos estos metales pueden deformarse plásticamente, a esto se lo conoce como termofluencia.

La termo-fluencia es causada principalmente por la difusión, que provoca el movimiento de dislocaciones en un medio cristalino, donde se muestra un esquema en la Figura 1.7. Dichas dislocaciones se movilizan sobre un plano perpendicular al plano de deslizamiento y es suficiente con que la dislocación se mueva para considerar que el material se deforma plásticamente.



**Figura 1.7. Dislocaciones presentes en una estructura cristalina, debido a termo-fluencia.**

Fuente: Propiedades Mecánicas: fatiga y termofluencia, Universidad central José Simeón Cañas.

### ***1.3.5.3 Deformación por termofluencia o creep***

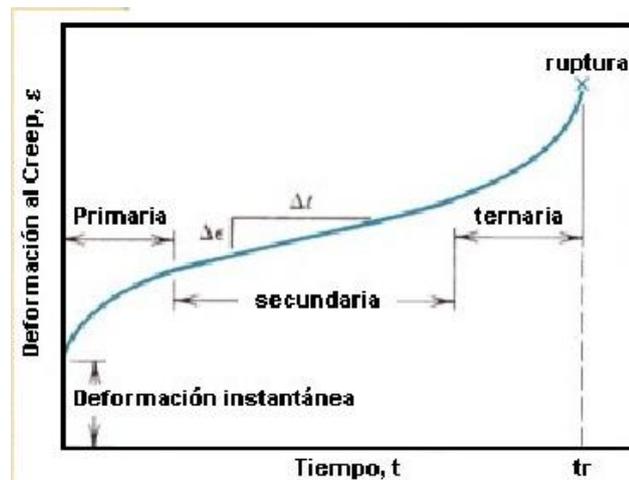
La evaluación de la deformación en función del tiempo cuando el material es sometido a una temperatura específica constante, caracteriza su comportamiento de termofluencia. En la Figura 1.8, se muestran las etapas de este proceso. En las primeras etapas del proceso de creep, el material se deforma de manera continua y luego disminuye con el tiempo, fase conocida como deformación primaria. Posteriormente, en la etapa de deformación secundaria, la velocidad de deformación en función del tiempo permanece prácticamente constante, incrementándose en la fase de deformación terciaria hasta causar la ruptura del material. De esta manera, el fenómeno de creep, se clasifica en tres etapas:

Etapa primaria: la velocidad de deformación disminuye, hasta llegar a un valor constante.

Etapa secundaria: la velocidad de deformación se mantiene constante.

Etapa terciaria: Aumento de velocidad hasta llegar a la fractura.

La deformación por termofluencia es significativa dentro de un rango de 30% a 60% de la temperatura de fusión del material en grados absolutos.



**Figura 1.8. Curva de velocidad de elongación en ensayo de termofluencia o creep**

Fuente: Propiedades mecánicas de los materiales, Ing. Fredy Llano.

Una de las maneras de disminuir la rapidez de velocidad de deformación, es modificar los elementos aleantes del acero, que retarden la deformación del mismo.

### **1.3.6 Herramientas para el calentamiento del sistema de moldeo**

Con el fin de lograr unificar el proceso de prensado y sinterizado, en un solo proceso integrado se requiere el calentamiento de las piezas del sistema de moldeo.

Las herramientas necesarias para ello son: las resistencias eléctricas que son elementos calefactores; controlador de temperatura, que son reguladores de la energía eléctrica transmitida hacia las resistencias eléctricas y la termocupla, que es un sensor de temperatura que permitirá medir la temperatura del ensayo.

#### **1.3.6.1 Termocupla tipo k**

La termocupla es un sensor de temperatura, conformado por dos alambres soldados en uno de sus extremos, donde al aplicar temperatura en esta unión se produce una pequeña variación de potencial en mV, acorde va aumentando la temperatura.

La termocupla tipo K, se muestra un modelo en la Figura 1.9., formado por alambres de chromel-alumel embebido en un tubo de cobre y níquel, se usa para temperaturas de entre  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , esta termocupla es la ideal para el diseño de nuestro sistema ya que puede operar dentro de los rangos de temperaturas necesarias.



**Figura 1.9. Termocupla tipo K**

#### ***1.3.6.2 Resistencias térmicas de cartucho***

Las resistencias de cartucho, como se ve en la Figura 1.10., son elementos calefactores, que generan energía calorífica para varios procesos. Algunas utilizan corriente alterna y directa. Por su diseño, estas resistencias son excelentes para trabajar en lugares estrechos, como moldes; alcanzando altas temperaturas, los cuales serán necesarias para el sistema de moldeo.



**Figura 1.10. Resistencias de tipo cartucho.**

### **1.3.6.3 Controlador de temperatura**

Los controladores de temperaturas son equipos indispensables para mantener temperaturas correctas en un proceso industrial, manteniéndose en un rango de error muy bajo. Para su funcionamiento es necesario que el mismo se conecte con un sensor de temperatura.

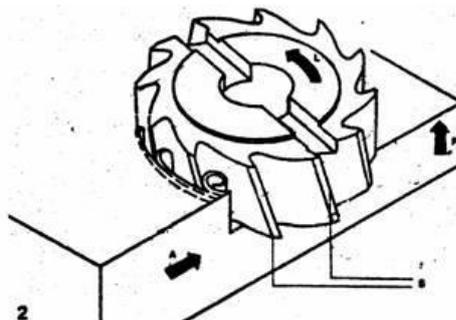
Para la fabricación del sistema de moldeo, la alternativa menos costosa, es la mecanización, por herramientas de corte.

## **1.3.7 Mecanizado de metales**

Para la fabricación de las piezas del sistema, por donde se tendrá el alojamiento de algunos elementos como la probeta a elaborar y las resistencias eléctricas, la eliminación del material mediante mecanizado, es el método más adecuado para elaborar piezas que exijan gran precisión, en comparación con otros procesos de fabricación. Para el perfilado de la probeta a elaborar, se requiere el uso de una de las operaciones de mecanizado, el fresado frontal.

### **1.3.7.1 Fresado frontal**

En el fresado frontal el eje de giro de la fresa gira perpendicularmente a la superficie de trabajo y el maquinado se efectúa en los bordes de los perfiles que están en contacto alrededor de la fresa, que es la herramienta de corte. Esta descripción se puede apreciar en la Figura 1.11.



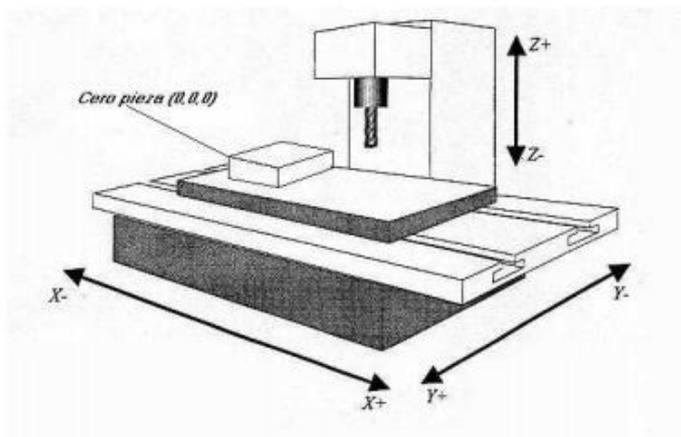
**Figura 1.11. Esquema de fresado frontal.**

Los parámetros para el fresado frontal, como la velocidad de corte que es la velocidad de giro de la fresa; y el avance de corte, que es la velocidad en sentido perpendicular a la pieza mecanizada. Estos parámetros están establecidos por los fabricantes del acero a mecanizar, los mismos que también recomiendan una herramienta de corte específica.

### **1.3.7.2 Control numérico computarizado**

Debido a sus siglas, los CNC están constituidos por fresadoras (centros de mecanizado) y tornos automatizados. Las ordenes enviadas a las máquinas, son indicadas mediante códigos numéricos (código G), que desplazan la herramienta de corte o el material base, con gran exactitud llegando a tolerancias de hasta milésimas de milímetros. Para nuestro proyecto, los perfiles a mecanizar, tienen que ser elaboradas en un centro de mecanizado, para que los mismos tengan menores tolerancias.

En la Figura 1.12, se puede observar, un ejemplo del posicionamiento de una pieza en un centro de mecanizado, con sus respectivos ejes de orientación.



**Figura 1.12. Posicionamiento de pieza en el centro de mecanizado.**

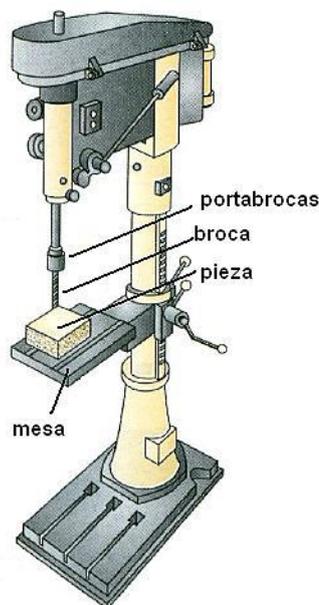
Fuente: Programación Automática de Máquinas CNC, Facultad de estudios superiores Cuautitlán.

Para el alojamiento de las resistencias de cartucho, intervengan en el sistema, se requiere de una geometría cilíndrica, muy similar a la geometría de las resistencias de cartuchos. Por este motivo, la operación de taladrado, es capaz de realizar estas operaciones, semejantes a esta geometría.

### **1.3.7.3 Taladrado**

El taladrado es una operación que consiste en hacer agujeros mediante el arranque de virutas, cuyas dimensiones como diámetro y profundidad han sido establecidas previamente. Este proceso se realiza en una máquina llamada taladro, como se ve un modelo en la Figura 1.12., su herramienta de corte es la broca.

Los parámetros de operación son el avance o velocidad con la cual la herramienta de corte se profundiza en el material y la velocidad de corte es la velocidad de giro de la broca.



**Figura 1.13. Taladro de pedestal, para uso industrial.**

Fuente: Centro avanzado de fabricación, taladrado.

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

El diseño del sistema se desarrolló en tres etapas: la primera abarcó la selección del material, donde se evaluaron las características de los aceros candidatos más resistentes a las condiciones de operación, utilizando para ello una matriz de decisión. La segunda etapa describe el diseño final del sistema, requeridos para la operación, y la tercera etapa es la manufactura de los componentes del sistema, mediante el mecanizado, donde se determinarán los parámetros de fabricación.

### 2.1. Dimensionamiento del molde

El dimensionamiento de la cavidad del molde (hembra) y la pieza saliente (macho), se realizó con base en lo establecido en la norma ASTM B 557M, para obtener una forma de probeta de tracción plana. Para ello, se utilizó software de dibujo que nos permitirá diseñar el molde en 3D.

Posteriormente, se realizó una simulación mediante elementos finitos, en las condiciones en la que estará sometido el molde ('hembra' y 'macho'), para evaluar las diferentes resistencias a la fluencia que podrá alcanzar cada uno.

### 2.2. Selección del material

Para la selección del material se consideraron los siguientes factores: fluencia, termo-fluencia, maquinabilidad, resistencia a la corrosión, dureza, disponibilidad, durabilidad, tratamiento térmico, termoconductor, costos y compatibilidad. Adicionalmente se realizó una simulación con cada material candidato para determinar el factor de seguridad. Con todos estos parámetros, se diseñó la matriz de decisión, con el fin de elegir el acero más apropiado.

Para estimar la respuesta mecánica del material sometido a las temperaturas de trabajo, se hizo una estimación de la deformación que sufriría el material a esas condiciones y a partir de ellos, se calculó el factor de seguridad. Esta parte del estudio se llevó a cabo utilizando datos de propiedades mecánicas del material en función de la temperatura reportadas en la literatura.

### **2.1.1 Dureza**

Es importante consultar a los fabricantes, el tratamiento térmico que se debe realizar al acero, para obtener una dureza final. Debido a que, para la aplicación del sistema de moldeo, se debe de obtener un rango de dureza determinada, esto conlleva a obtener una considerable resistencia a la compresión. Con el fin de que la zona de fluencia del acero, se sitúe dentro de los rangos establecidos por el fabricante.

### **2.1.2 Durabilidad**

Se aproximará el tiempo de vida de los moldes ‘macho’ y ‘hembra’ utilizando ecuaciones empíricas que nos ayudarán a aproximar el tiempo de ruptura del mismo, usando el fenómeno de creep, para aceros inoxidables martensíticos, utilizando la ecuación 2.1, de Baley-Norton representada por:

$$\varepsilon(t) = D^{-T} \sigma^p t^r \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Siendo  $T$  (*temperatura*),  $\sigma$  (esfuerzo),  $t$  (tiempo). Y los valores de  $D$ ,  $p$  y  $r$ , que son dependiente de la temperatura, se obtiene mediante las ecuaciones empíricas, donde se mostrarán con más detalle, más adelante.

### 2.1.3 Tratamiento térmico para el acero AISI 420 y AISI H13

El molde luego del mecanizado requiere un tratamiento térmico de temple para endurecerlo a través de la formación de martensita. En la tabla 2.1, se detallará las especificaciones del tratamiento para el acero inoxidable y el acero AISI H13.

**Tabla 2.1. Especificaciones del proceso de tratamiento térmico para el acero inoxidable AISI 420 y AISI H13.**

	<b>AISI 420</b>	<b>AISI H13</b>
<p>Recocido de alivio de tensiones</p> <p>Este tratamiento se aplica después de un mecanizado extenso, o en herramientas complicadas.</p>	<p>Temperatura de calentamiento: Max. 400 ° C</p> <p>Después de calentar a la temperatura de tratamiento, mantener durante un mínimo de 2 horas en una atmósfera inerte, seguido de enfriamiento lento en el horno a una velocidad de 20°C/h hasta 200°C y luego enfriamiento al aire.</p>	<p>Temperatura de calentamiento 600 - 650°C</p> <p>Enfriamiento lento en el horno.</p> <p>Para disminuir la tensión después de un mecanizado extenso, o en herramientas complicadas.</p> <p>Tiempo de permanencia Después del calentamiento a fondo: 1 – 2 horas en atmósfera neutra.</p>
<p>Temple</p>	<p>Temperatura máxima de temple: 1000 a 1020 ° C</p> <p>Seguido de enfriamiento en aceite, N<sub>2</sub>, baño de sal (400 a 450 ° C).</p> <p>Después del calentamiento total, sostenga de 15 a 30 minutos.</p> <p>Dureza obtenible: 51 a 53 HRC</p>	<p>Temperatura máxima de temple: 1020 - 1080°C</p> <p>Seguido de enfriamiento en aceite, baño de sales (500-550°C), y enfriar naturalmente al aire.</p> <p>Tiempo de permanencia en la temperatura de temple: 15 - 30 minutos.</p> <p>Dureza obtenible: 50 - 54 HRC temple al aire.</p>

Catálogo de acero Böhler M333 Y W302.

**Tabla 2.1. Especificaciones del proceso de tratamiento térmico para el acero AISI 420 y AISI H13 (continuación).**

Revenido	<p>Tiempo en el horno 1 hora por cada 20 mm (0.79 pulgada) de espesor de la pieza de trabajo, pero al menos 2 horas.</p> <p>Recomendamos el templado al menos dos veces. A tercera templado para aliviar tensiones 30 - 50 ° C.</p>	<p>Calentamiento lento en horno: 1 hora por cada 20 mm de espesor de la pieza, pero 2 horas como mínimo /enfriamiento al aire.</p> <p>Se recomiendan dos ciclos de revenido como mínimo. Resulta favorable un tercer revenido para reducir tensiones.</p>
----------	---	---

Catálogo de acero Böhler M333 Y W302

#### 2.1.4 Termo-conductor

La termo-conducción del acero a seleccionar, es importante debido a que el molde 'hembra' estará en contacto mediante dos resistencias eléctricas que llegarán a temperaturas de hasta 500 °C.

**Tabla 2.2. Rangos de conductividad térmica, para los aceros a usar en el sistema.**

	<b>Conductividad térmica (20 °C-500°C) (W/m K)</b>
<b>AISI 420</b>	25,8-26,8
<b>AISI H13</b>	24,3-27,3
<b>Al</b>	270

Fuente: Aceros Böhler, catálogos M 333 y W 302.

Según la Tabla 2.2, para el acero AISI H13, nos da un mayor rango de coeficientes de conductividad térmica con un valor mayor, por lo que estos significarían que el

proceso de calentamiento, puede tomar una menor duración en el proceso, en comparación con el acero AISI 420.

### **2.1.5 Maquinabilidad**

Los aceros inoxidable de grado martensítico y AISI H13, poseen un buen rango de maquinabilidad. Por lo que los parámetros de mecanizado y las herramientas de corte son sugeridos por los fabricantes en los respectivos catálogos.

### **2.1.6 Compatibilidad**

Según los fabricantes, el acero inoxidable martensítico es fabricado para moldes de plástico; y el acero AISI H13, para moldes, en los procesos de conformado.

### **2.1.7 Disponibilidad**

Los aceros inoxidable martensítico y AISI H13, se pueden obtener en algunas casas comerciales.

### **2.1.8 Resistencia a la corrosión**

Las propiedades del acero inoxidable siempre brindan una resistencia efectiva a la corrosión, ya que esta resistencia es debido a la formación de una capa de óxido de cromo en la superficie del acero; sin embargo, la poca presencia de carbono sobre el material, también contribuirá a la disminución de óxido. En la tabla 2.3., se presenta el contenido de cromo y carbono para estos aceros.

**Tabla 2.3. Contenido químico en % de acero AISI 420 y AISI H13.**

<b>AISI H13</b>	Cr 5,10	C 0,39	Si 1,10	Mn 0,40	Mo 1,40	V 0,95
<b>AISI 420</b>	Cr 14,50	C 0,27	Si 0,30	Mn 0,65	Mo 1,00	Ni 0,85

Fuente: Aceros Böhler, catálogos M 333 y W 302.

Las propiedades anti-corrosivas serán mejores en el acero inoxidable AISI 420; sin embargo, este porcentaje con el aumento de temperatura puede ir disminuyendo, y sus propiedades anti-corrosivas pueden verse afectadas.

Con el acero AISI H13, que es un acero especializado para las altas temperaturas sus propiedades no oxidantes se mantienen.

Con la presencia de cromo en los dos materiales, nos garantizará la existencia de la formación de óxido de cromo, que nos ayudará a la protección de las piezas contra la corrosión.

### **2.1.9 Costo**

El precio del acero AISI 420 y el AISI H13 en el mercado, es de \$ 15/ kg.

### **2.1.10 Disponibilidad**

Los aceros AISI 420 y AISI H13, se pueden obtener en algunas casas comerciales.

## **2.2 Diseño final de sistema de molde**

Se empleará el uso de una plancha de acero AISI H13, de dimensiones 120x100x30 mm; para el 'hembra' y una plancha de 100x30x30 mm para el 'macho'.

El diseño final del sistema de moldeo, se encuentra en la sección de planos.

### **2.2.1 Sistema de calentamiento de molde**

Al emplear resistencias eléctricas de tipo cartucho, se requerirán que las mismas estén muy cerca de la probeta a elaborar, por lo que estas resistencias estarán en el 'hembra'; por lo que permanecerán completamente inmóvil y más cercanas a la probeta.

Se requerirán hacer dos orificios transversales del molde 'hembra', por lo que se necesitarán hacer dos perforaciones que atraviesen a lo largo del mismo. Según las recomendaciones, se necesitará una tolerancia de 0,2 mm en el diámetro de la perforación, para que la resistencia pueda tener un mayor contacto con el molde y la conducción sea efectiva.

### **2.2.2 Perfilado de la probeta**

El contorno del perfil de la probeta, estarán en los 'macho' y 'hembra', esta se localiza en un lugar intermedio entre las dos resistencias eléctricas a usar, para obtener una mejor conductividad del calor.

Así mismo, para el molde 'macho' se realizará el perfilado, con una tolerancia para que la misma realice un juego.

### **2.2.3 Ubicación del sensor de temperatura**

Para el sistema controlador de temperatura, se requerirá crear un espaciado, para que una termocupla tipo k; pueda realizar mediciones de temperatura en el molde 'hembra' con el fin de obtener temperaturas óptimas, para que la probeta al ser calentada, y estar condiciones de ser manipulada. El orificio se creó en el molde hembra, para el alojamiento de una termocupla, tiene que estar muy cercano de la región donde la probeta se elaborará, a una distancia de 2 a 4 mm; sin embargo, no se requerirá tomar una medida entre estos valores, acorde la resistencia del molde sea buena, en las condiciones a trabajar, y para este caso, como se obtendrán 'aumentadores de esfuerzo' por el área que se disminuirá en una de las secciones, se recomendará tomar la medida a distanciar, con el factor de seguridad más conservador

## **2.3 Mecanización de las piezas del sistema**

El mecanizado de las piezas que conformarán el sistema de prensado y calentamiento de la probeta, se realizó en CAMPRO, que es uno de los laboratorios de la institución universitaria; encargada de la mecanización y conformado de prototipos. A continuación, se presenta en orden cronológico el proceso de mecanización para cada una de las piezas.

### **2.3.1 Perforaciones para alojamiento de resistencias eléctricas y sensor de temperatura.**

Las perforaciones en el molde hembra, se realizaron con un taladro de pedestal marca Harvey, modelo ZN5035B; de los cuales se taladró con varias brocas, incrementando el diámetro. En la tabla 2.4, se describe el proceso de taladrado.

**Tabla 2.4. Operación de taladrado, para alojamiento de resistencias eléctricas.**

Herramienta de corte	Parámetros de mecanizado	Detalle	Figura
Broca de punta	<p>Velocidad de giro de broca: 1036 RPM</p> <p>Avance: 10 mm/min</p>	Se perforó a una profundidad de 2 mm, como guía para la broca siguiente.	 <p>Figura 2.1</p>
5 mm de diámetro Broca con punta recubierta de titanio.	<p>Velocidad de giro de broca: 1036 RPM</p>	Se perforó a una profundidad de 45 mm, para desbistar material. Operación que se puede apreciar en la Figura 2.2	 <p>Figura 2.2</p>
	<p>Avance: 20 mm/min</p>		
3/8 in de diámetro. Broca con punta recubierta de titanio.	<p>Velocidad de giro de broca: 630 RPM</p>	Se perforó a una profundidad de 70 mm. Operación que podemos apreciar en la Figura 2.3.	 <p>Figura 2.3</p>
	<p>Avance: 15 mm/min</p>		
Lima circular		Retiro de viruta en la superficie interior.	

Elaboración propia.

Al final del proceso de taladrado y un retoque de limado, se procedió a insertar las resistencias en los dos alojamientos, acoplando y asegurando un buen contacto con el molde como se muestra en la Figura 2.5.



**Figura 2.5. Alojamiento de la resistencia eléctrica en el molde hembra, posterior a la operación de taladrado.**

### **2.3.2 Fresado frontal del perfil de la probeta en el molde 'hembra'.**

Posterior al proceso de taladrado, se realizó el fresado frontal en el molde hembra; siguiendo el perfil de la probeta bajo la norma ASTM B 557 M, la cual es requerida para los procesos de ensayos de tracción de productos fabricados por pulvimetalurgia.

Dicho proceso, se llevó a cabo en el centro de mecanizado CNC marca Lunan modelo XH7132A, perteneciente al laboratorio de CAMPRO de la institución. Es importante destacar que antes del proceso de mecanizado, se realizó la programación del CNC en Código G, el mismo que se puede encontrar en el apéndice A, donde mediante un software de uso comercial, se simuló la trayectoria de la herramienta de corte sobre el material, siguiendo el perfil de la probeta, con los parámetros de mecanizado correspondientes.

En la Tabla 2.5, se describe con detalle el proceso con la herramienta de corte utilizada y los parámetros de mecanizado, y en la Figura 2.6, se puede apreciar el proceso de mecanizado del mismo. En la figura 2.7, se muestra el molde hembra, concluido el proceso de mecanizado.

**Tabla 2.5. Operación de ranurado, para el perfilado de la probeta según la norma ASTM B 557M.**

Herramienta de corte	Parámetros de mecanizado.	Detalle
Fresa frontal de cuatro filos. HSS 5% Co 4 mm de diámetro.	Velocidad de giro: 1500 RPM	Corte material realizado por la fresa, siendo refrigerado constantemente por aceite soluble; formando la trayectoria de la probeta, con una profundidad de 0,5 mm por cada trayectoria completa.
	Velocidad de avance: 50 mm/min	

Elaboración propia.



**Figura 2.6. Proceso de ranurado al molde hembra, realizado por el centro de mecanizado CNC, utilizando fresa frontal HSS, refrigerado con aceite soluble.**



**Figura 2.7. Molde hembra, finalizado el proceso de mecanizado.**

### **2.3.3 Fresado frontal del perfil de la probeta en el molde ‘macho’.**

Durante el proceso de fresado frontal, también realizado en el centro de mecanizado CNC, se programó y aplicó el código G del molde macho, el cual se encuentra en el apéndice B. Previamente en dicho proceso, se simuló la trayectoria de la fresa realizando desbaste de material y perfilado de la probeta con una diferencia de 0,5 mm en relación al perfil del molde hembra. En la tabla 2.6., se detalla el proceso de mecanizado del molde macho.

**Tabla 2.6. Operación de desbaste de material y perfilado de la probeta para el molde macho, según la norma ASTM B 557M.**

<b>Herramienta</b>	<b>Parámetros de mecanizado.</b>	<b>Detalle</b>
Fresa frontal de cuatro filos. HSS 5% Co 10 mm de diámetro.	Velocidad de giro: 720 RPM	Corte material realizado por la fresa, refrigerado constantemente por aceite soluble; realizando tres vueltas de desbaste de material, para luego de una cuarta vuelta formar el perfil de la probeta, con una profundidad de 0,5 mm por cada trayectoria completa.
	Velocidad de avance: 50 mm/min	

Elaboración propia.

En la figura 2.8, se muestra el proceso de mecanizado del molde macho, siendo refrigerado constantemente por aceite soluble. En la figura 2.9., se muestra la pieza una vez concluido el proceso de mecanizado.



**Figura 2.8 Mecanización del molde macho el centro de mecanizado CNC.**



**Figura 2.9. Molde macho, finalizado el proceso de mecanizado.**

## 2.4 Tratamiento térmico de las piezas del sistema.

Este proceso fue realizado en un horno para tratamientos térmicos, marca Lindberg, modelo 11-SC-25A. El proceso de tratamiento térmico, con las condiciones indicadas por el fabricante; se clasifico en dos etapas:

Temple: las piezas fueron templadas a una temperatura de 1050 °C, con un tiempo de permanencia de 30 min. En las figuras 2.10 y 2.11, se muestran las piezas macho y hembra respectivamente, en el interior del horno, durante el templeado al aire.



**Figura 2.10. Proceso de temple del molde macho en el horno.**



**Figura 2.11. Proceso de temple del molde hembra en el horno.**

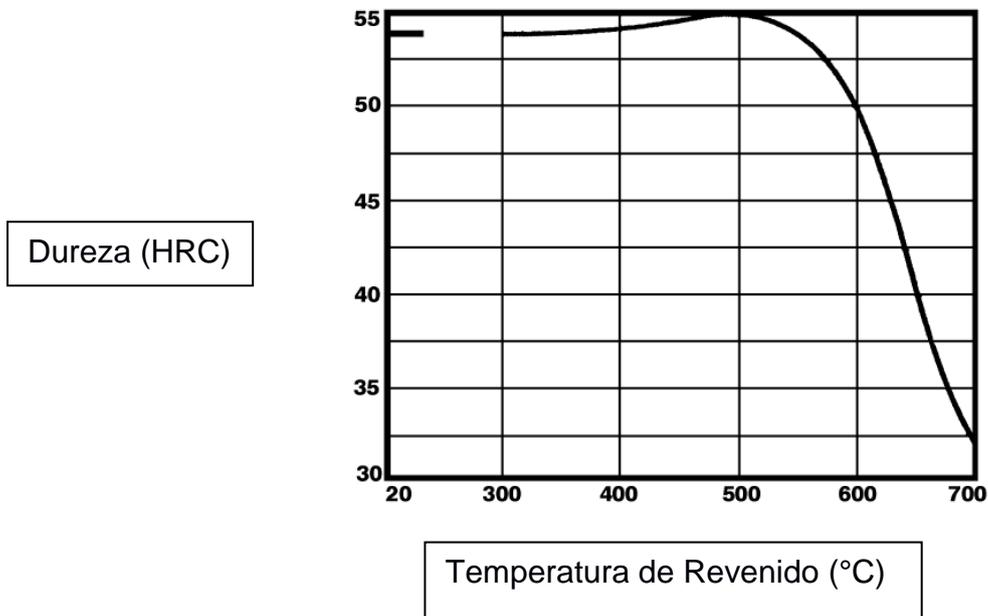
Revenido: Las piezas fueron sometidas a dos ciclos de calentamiento lento, inmediatamente después del templado, durante tres horas.

El primer revenido, se realizó a una temperatura de 530 °C.

El segundo revenido, se realizó a una temperatura de 630 °C.

Posteriormente, fueron enfriadas naturalmente al aire.

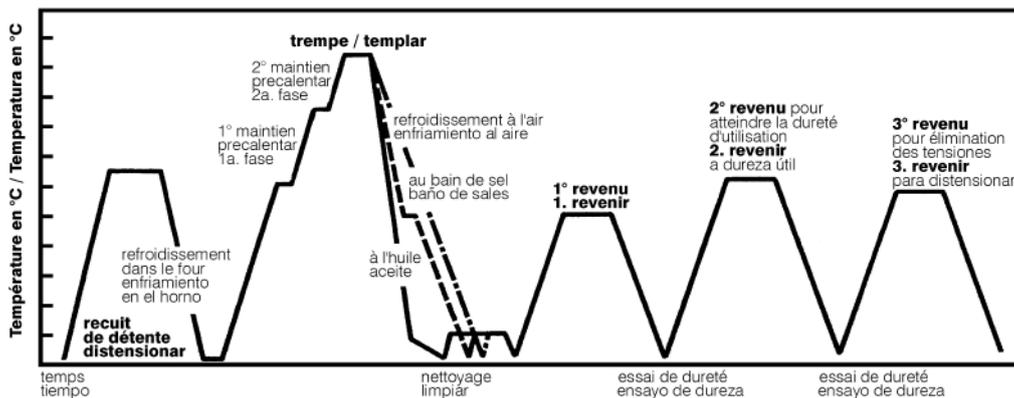
Concluido el proceso de revenido final, las piezas del sistema de moldeo obtienen la dureza de 45 HRC, como se puede apreciar en la Figura 2.12, donde se sometieron a una temperatura de 630 °C, para la obtención de la dureza mencionada. Para entender mejor el proceso, en la figura 2.13, se muestra un esquema del tratamiento térmico, donde se realizaron dos revenidos, el segundo hasta llegar a dureza útil.



**Figura 2.12. Diagrama de revenido para el acero AISI H13.**

Fuente: Especificaciones técnicas de acero W302, Böhler.

Es importante destacar que la dureza más alta que se pueden obtener por el revenido es de 52 HRC, según la Figura 2.12. Para la aplicación del sistema de moldeo, el fabricante del acero recomienda realizar un revenido del molde hembra para obtener una dureza entre 40 y 45 HRC; y para el molde macho recomienda una dureza de entre 45 y 48 HRC. Esto, para garantizar que la resistencia a la fluencia sea la mínima como lo indica la curva (2) segmentada en la Figura 3.2, determinado por el fabricante. Además, para la aplicación del proyecto, el fabricante recomienda durezas bajas, para que el acero tenga mayor resistencia a la compresión.



**Figura 2.13. Esquema de tratamiento térmico para el acero AISI H13.**

Fuente: Especificaciones técnicas de acero W302, Böhler.

## 2.5 Ensamble del sistema

En esta etapa, se reúnen todas las partes del sistema; realizando el montaje de las piezas del molde insertadas las resistencias eléctricas, integrado al sistema controlador de temperatura.

### **2.5.1 Ensamble de componentes del tablero controlador de temperatura.**

El tablero controlador de temperatura, se utiliza para regular la temperatura a la que estará sometido el molde mediante el uso de resistencias eléctricas. Se conforma de los siguientes componentes:

- Controlador de temperatura digital.
- Contactor de 15 Amp / 240 V
- Selector 220 V
- Luz piloto 220 V
- Breaker 10 Amp

### **2.6 Metodología para la elaboración de muestras.**

Concluido el ensamble del equipo, se realizaron pruebas en el taller de máquinas y herramientas de la institución, ya que posee los equipos necesarios para la compresión del sistema de moldeo.

La figura 2.14. muestra la prensa utilizada para el compactado, junto con el equipo instalado.



**Figura 2.14. Prensa utilizada para la compactación del molde.**

El polvo de aluminio utilizado para la elaboración de probetas es de marca Loba Chemie con 98 % de pureza y un tamaño de grano de  $5\mu\text{m}$ .

Se colocó el polvo en la ranura del molde hembra de manera uniforme lo cual se llena con una cantidad de 10 g de polvo, hasta llegar a la totalidad de su capacidad. Instalado el sistema de moldeo macho y hembra en la máquina se instaló el sistema de moldeo en la prensa hidráulica mostrado en la Figura 2.15, colocando fibra de cerámica sobre la superficie de contacto del molde macho y hembra con la prensa hidráulica como aislante térmico.



**Figura 2.15. Sistema montado en la prensa hidráulica.**



**Figura 2.16. Sistema montado en la prensa hidráulica, ejerciendo presión sobre el sistema de moldeo, alcanzando la temperatura de 320 °C.**

En la tabla 2.7, se detalla las condiciones para la elaboración de muestras. De las figuras 2.16 a 2.19, se muestran las muestras retiradas.

**Tabla 2.7. Parámetros y procedimiento de elaboración de muestras de aluminio puro.**

<b>Ensayo</b>	<b>Presión ejercida</b>	<b>Temperatura máxima.</b>	<b>Detalle</b>
1	1600 psi (681 kg) Durante 2 horas.	243 °C Durante 25 min.	Se lubricó la ranura del molde hembra con aceite SAE 10.
2	1600 psi (681 kg) Durante 2 horas.	243 °C Durante 25 min.	Se lubricó la ranura del molde hembra con grasa multipropósito para altas temperaturas.
3	1600 psi (681 kg) Durante 80 min.	435 °C Durante 20 min.	Se cubrió la ranura del molde hembra con papel aluminio.
4	1600 psi (681 kg) Durante 80 min	300 °C Durante 28 min.	En esta muestra se realizó con viruta de aluminio.
5	1600 psi (681 kg) Un solo pulso	300 °C Durante 5 min.	Se lubricó la ranura del molde hembra con grasa multipropósito para altas temperaturas.
6	1600 psi (681kg) Durante 75 min.	245 °C Durante 75 min.	Se lubricó la ranura del molde hembra con grasa multipropósito.
7	2200 psi (1000 kg) Durante 240 min	335 °C Durante 180 min	Se aplicó una cobertura de teflón en la superficie de la ranura del molde hembra.

Elaboración propia.



**Figura 2.17. Muestra 1 de aluminio, retirada del molde posterior al proceso de prensado y calentamiento.**



**Figura 2.18. Muestra 2 de aluminio, retirada del molde posterior al proceso de prensado y calentamiento.**



**Figura 2.19. Muestra 4 de aluminio en viruta, retirada del molde posterior al proceso de prensado y calentamiento.**



**Figura 2.20. Muestra 5 de aluminio en viruta, retirada del molde posterior al proceso de prensado y calentamiento.**

Los mejores resultados se obtuvieron en la muestra 6, con la cobertura de teflón en la ranura. En la Figura 2.21, se observó en la probeta de aluminio concluido el proceso de prensado y sinterizado, que en este caso no se compactó el polvo de aluminio en su totalidad, sin embargo, se obtuvo un espesor de 4,4 mm en la probeta obtenida. Se obtuvieron buenos acabados superficiales en todas las muestras.



**Figura 2.21. Muestra 6 de aluminio con cobertura de teflón, separando la superficie del aluminio y el molde hembra.**

Se realizó el retiro de la muestra del molde, golpeando en la superficie de unión entre el teflón y el molde utilizando un cincel fino, e impactando el mismo. En la Figura 2.22 se muestra la probeta retirada con la cobertura de teflón adherida a la probeta de aluminio.



**Figura 2.22. Muestra 6 de aluminio, retirada del molde posterior al proceso de prensado y calentamiento.**

En la prueba 8, se realizó una mezcla del aluminio puro, con oxido de cerio puro al 2 %. Se agregaron 0,2 gramos de óxido de cerio. En la tabla 2.8, se muestra las condiciones de operación para la elaboración de la muestra de aluminio con óxido de cerio. En la Figura 2.23, podemos apreciar las muestras retiradas.

**Tabla 2.8. Parámetros y procedimiento de elaboración de muestras de compuesto de aluminio con óxido de cerio**

Ensayo	Presión ejercida	Temperatura Máxima.	Detalle
8	2200 psi (1000 kg) Durante 285 min.	350 °C Durante 180 min.	Se colocó una cubierta de grasa multipropósito, seguido de la colocación de teflón.



**Figura 2.23. Muestra de compuesto de aluminio con oxido de cerio al 2%.**

Las condiciones más favorables, para el retiro de las muestras, fue en el ensayo 7, donde se colocó la cubierta del teflón sobre la superficie de la ranura del molde 'hembra'.

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Simulación del esquema de diseño

La simulación realizada mediante elementos finitos se hizo para tener una representación tridimensional del molde, considerando las medidas de la probeta de ensayo de tracción que se desea fabricar para el estudio del material, mediante pulvimetalurgia. La figura 3.1 muestra la parte inferior (hembra), Figura 3.1a, y la superior (macho), Figura 3.1b, del molde. Como se puede apreciar, la cavidad reproduce la forma de una probeta de tracción de sección plana, cuyas dimensiones cumplen con lo establecido en la norma ASTM B 557M.

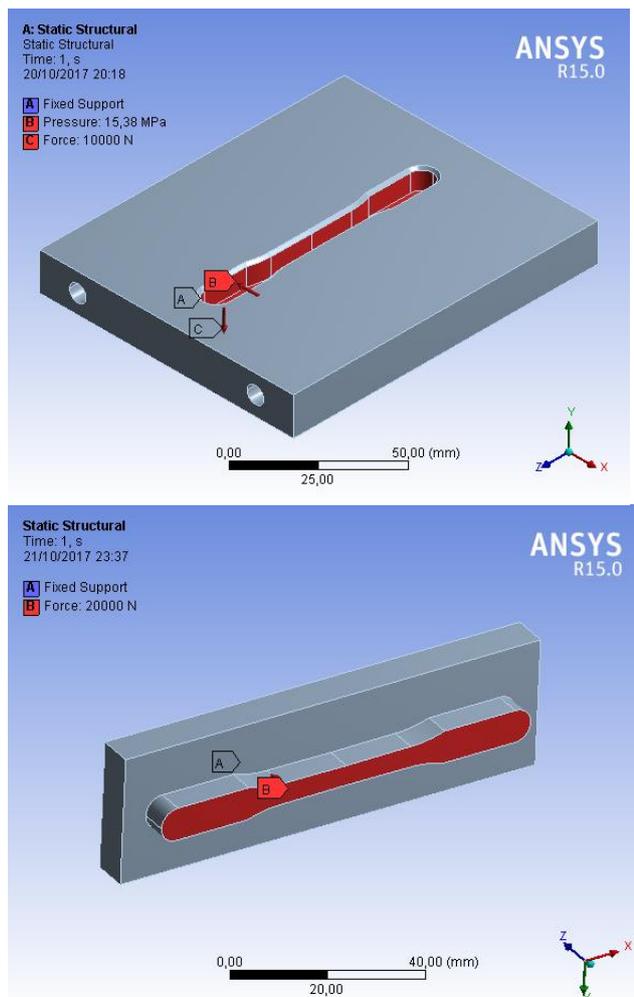


Figura 3.1a y 3.1b. Esquema del diseño del sistema de molde de probetas. a) hembra. b) Macho Software de elementos finitos.

### **3.2. Selección del material**

Para la selección del material del molde, además de las propiedades que deben ser consideradas para satisfacer las necesidades de servicio, se evaluó la disponibilidad y el costo. Analizando todas estas variables en conjunto se identificaron dos tipos de aceros: 1) Acero al cromo-molibdeno ASTM A-678 (AISI H13), que es resistente a la fatiga térmica, y 2) el acero inoxidable AISI 420, ambos son recomendados para aplicaciones de moldeo a las temperaturas de servicio.

Para seleccionar por uno de los aceros candidatos, se hicieron varias estimaciones, tomando como referencia datos reportados en la literatura y estimaciones a través de simulaciones mediante elementos finitos. En la sección de termofluencia se presentan los resultados obtenidos.

#### **3.2.1. Termo-fluencia**

La evaluación de la respuesta mecánica del material sometido a las temperaturas de trabajo, se hizo mediante una estimación de la deformación que sufriría el material a esas condiciones y a partir de allí se calculó el factor de seguridad.

##### ***3.2.1.1 Condiciones de termofluencia para el acero AISI 420***

En la tabla 2.1, se observan datos del cambio de esfuerzo de fluencia de distintos tipos de acero inoxidable en calentamiento durante un periodo de tiempo.

El molde será sometido a una temperatura promedio de 350 °C, por lo que según la tabla 2.1, el esfuerzo de fluencia es de 454 MPa y el esfuerzo ultimo de tensión será de 490 MPa, para dicha temperatura.

**Tabla 3.1. Valores de esfuerzo ultimo de tensión, esfuerzo de fluencia y módulo de Young para acero martensítico AISI 420 a diferentes temperaturas.**

Temperatura (°C)	$\sigma_m$ (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	E (GPa)
20	781,7	657,5	220
100	720,6	618,4	210
150	695,5	578,5	205
200	664,8	570,1	200
300	613	588,8	190
400	549	510	188
500	652,3	323,3	155
600	186,5	158	80
700	127,5	83	60

Fuente: Análisis del comportamiento mecánico, resistencia a la fluencia y resistencia uniaxial a la fatiga del acero martensítico AISI 420.

Realizando el análisis de elementos finitos para diferentes valores de carga aplicada, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2. Condiciones de simulación y resultados de Factor de seguridad para acero inoxidable martensítico AISI 420.**

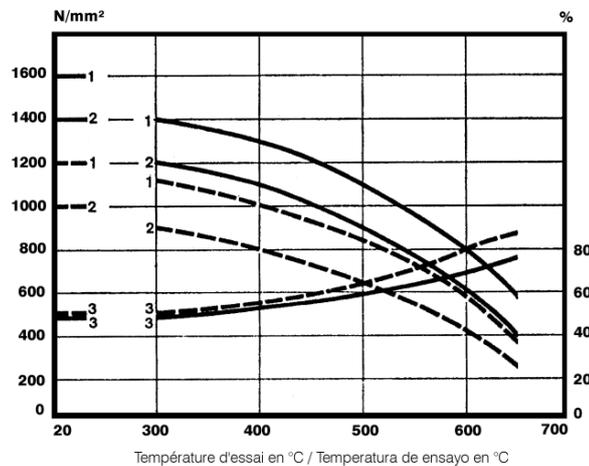
	Carga aplicada (kg)	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Esfuerzo por termofluencia a 350 °C (MPa)	Factor de seguridad mínimo (hembra)	Factor de seguridad mínimo (macho)
<b>AISI 420</b>	3000	690	594	3,7	6,3
<b>AISI 420</b>	7000	690	594	1,6	3,2
<b>AISI 420</b>	9000	690	594	1,3	2,7

Elaboración propia.

El factor de seguridad que se presenta en una carga de 9000 kg (9 ton), da un factor de seguridad bajo para el molde hembra ya que, sobre la superficie interior de la ranura, presenta bajos valores de F.S.

### 3.2.1.2 Condiciones de termofluencia para el acero AISI H13.

Las propiedades mecánicas del acero AISI H13 a distintas temperaturas, se presentan en la Figura 2.3, y su factor de seguridad en función de la temperatura se incluye en la tabla 2.3. Las líneas segmentadas y continuas en la gráfica varían, dependiendo del nivel de dureza útil que se tenga en el acero, según el tratamiento térmico.



**Figura 3.2. Grafica esfuerzo último de tensión (1), esfuerzo de fluencia (2), porcentaje de elongación (3), para el acero AISI H13, en función a la temperatura operativa.**

Fuente: Böhler W302, especificaciones técnicas.

**Tabla 3.3. Valores de esfuerzo último de tensión, esfuerzo de fluencia y módulo de Young para acero AISI H13 a diferentes temperaturas.**

Temperatura (°C)	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Esfuerzo ultimo de fluencia (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)
20	1000	1200	215
315	900	1100	---
500	---	---	176

Fuente: Material property data (2017). H13 hot work tool Steel.

Realizando la simulación, se obtuvieron los siguientes resultados en la tabla 3.4:

**Tabla 3.4. Condiciones de simulación y resultados de Factor de Seguridad.**

	Carga aplicada (kg)	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Esfuerzo por termofluencia a 350 °C (MPa)	Factor de seguridad mínimo (hembra)	Factor de seguridad mínimo (macho)
<b>AISI H13</b>	3000	1200	850	5,3	9
<b>AISI H13</b>	7000	1200	850	2,3	4,5
<b>AISI H13</b>	9000	1200	850	1,8	3,9

Elaboración propia.

Para una carga de 9000 kg, el factor de seguridad es mayor para el acero AISI H13 comparado con el acero martensítico que a esta condición de carga tiene un valor de 1,8 a una temperatura de 350°C. Por lo tanto, es más resistente a la compresión, bajo las condiciones de operación.

### 3.3 Durabilidad

Se aproximará el tiempo de vida de los moldes ‘macho’ y ‘hembra’ utilizando ecuaciones empíricas que permiten hacer estimaciones del tiempo de ruptura del material, basados en el fenómeno de creep. Para aceros inoxidables martensíticos, se utiliza la ecuación de Baley-Norton representada por la ecuación 3.1:

$$\varepsilon(t) = D^{-T} \sigma^p t^r \quad \text{Ecuación 3.1}$$

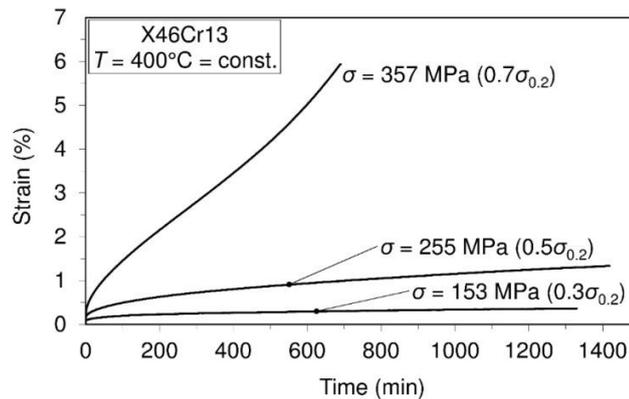
Siendo T (temperatura),  $\sigma$  (esfuerzo), t (tiempo). Y D, p y r que son valores dependientes de la temperatura, y se obtienen mediante las ecuaciones empíricas:

$$D(T) = 1.4300566 \cdot 10^{-5}T^2 - 1.3106973 \cdot 10^{-2}T + 4.0672118 \quad \text{Ecuación 3.2}$$

$$p(T) = 4.0013503 \cdot 10^{-4}T^2 - 3.5889003 \cdot 10^{-1}T + 81.625941 \quad \text{Ecuación 3.3}$$

$$r(T) = 1.5594627 \cdot 10^{-6}T^2 - 1.0455052 \cdot 10^{-3}T + 4.9960179 \cdot 10^{-1} \quad \text{Ecuación 3.4}$$

La Figura 3.3 muestra la deformación en función del tiempo para el acero inoxidable martensítico para una temperatura de 400°C.



**Figura 3.3. Gráfico deformación (%) vs tiempo (min), de velocidad de deformación de acero AISI 420 a 350 °C**

Fuente: Análisis del comportamiento mecánico, resistencia a la fluencia y resistencia uniaxial a la fatiga del acero martensítico AISI 420.

Haciendo uso de modelos matemáticos y empíricos, se estimaron los parámetros D, p y r; para una temperatura de 350 °C, obteniendo como resultado lo siguiente:

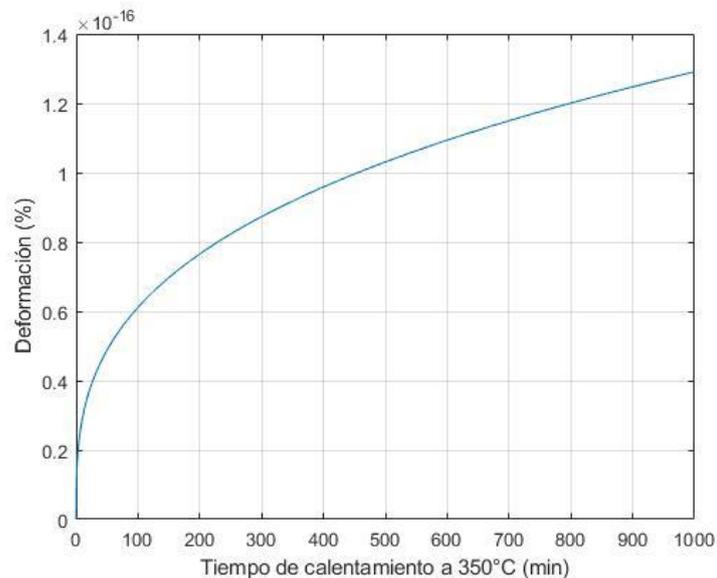
$$D(T) = 1,231589535$$

$$p(T) = 5,030971675$$

$$r(T) = 0,3247091508$$

De esta manera, se obtuvo la ecuación de deformación 3.5 para el acero martensítico, representada en forma gráfica en la Figura 3.4, con un esfuerzo equivalente máximo de 0,6 σ<sub>0,2</sub>

$$\varepsilon(t) = 1,37E - 19 * t^{0,3247091508} \quad \text{Ecuación 3.5}$$



**Figura 3.4. Gráfico de deformación (%) vs. Tiempo (min) de velocidad de deformación de deformación de acero AISI 420 a 350 °C**

En la figura 3.4. representa la deformación transiente, para el esfuerzo máximo de  $0,6 \sigma_{0,2}$  del sistema molde 'macho y 'hembra' para un rango de 0 a 1000 minutos. De esta información, se deduce que el molde no sufrirá deformaciones considerables, ya que la deformación está en rango de  $10^{-16}$ , considerando que es insignificante, por lo que el acero no sufrirá deformaciones en la ranura de la probeta.

El fenómeno de creep para temperaturas de 400 °C y para estas ecuaciones empíricas, son válidas para fuerzas aplicadas de 1,1 ton a 7 ton, considerando que en los alrededores del molde hembra y la probeta estarán a las mismas temperaturas. Los valores de deformación del material del molde por efectos de termofluencia para tiempos aproximados de horas (tiempo estimado de aplicación de la carga) es muy bajo para que el molde sufra daños por creep.

Para el acero AISI H13, su esfuerzo de fluencia a 500 °C, es de 850 MPa, por lo que se considera un acero muy resistente a la fatiga térmica y mecánica; por lo

tanto, se espera una mayor durabilidad en comparación con el acero inoxidable martensítico AISI 420.

### 3.4 Resistencia a la corrosión

Las propiedades del acero inoxidable siempre brindan una resistencia efectiva a la corrosión, ya que esta resistencia es debido a la formación de una capa de óxido de cromo en la superficie del acero; adicionalmente, la poca presencia de carbono sobre el material, también contribuirá a la disminución de óxido. En la tabla 3.5., se presenta el contenido de cromo y carbono para estos aceros.

**Tabla 3.5. Contenido de cromo y carbono para los aceros candidatos.**

	<b>Composición Cr %</b>	<b>Composición C %</b>
<b>AISI 420</b>	14,5	0,27
<b>AISI H13</b>	5,10	0,39

Fuente: Aceros Böhler, catálogos M 303 y W 302.

Las propiedades anti-corrosivas serán mejores en el acero inoxidable AISI 420, dadas las diferencias notables en el contenido de carbono.

El acero AISI H13, sin embargo, es recomendado para operaciones de trabajo en caliente; por lo tanto, esta variable no es tan relevante.

### 3.5 Matriz de selección

Se evaluarán todas las propiedades analizadas en la matriz de decisión, registrando en la tabla 3.7 los criterios de ponderación establecidos según las relevancias para cada una de por factores consideradas. Esta ponderación varía entre 1 y 5, en orden de importancia ascendente. En la tabla 3.6., se obtiene el puntaje por relevancia de cada una de los factores considerados, con su

respectiva ponderación y puntaje correlativo. Estos factores incluyen parámetros del proceso de manufactura, propiedades del material y costo.

**Tabla 3.6. Puntaje para la ponderación de los criterios, según su relevancia.**

RELEVANCIA	PUNTAJE
Muy importante	5
importante	4
Leve importancia	3
Poca importancia	2
Sin importancia	1

Elaboración propia.

**Tabla 3.7. Matriz de selección calificada para los aceros candidatos.**

CRITERIO	RELEVANCIA	PUNTUACIÓN ACERO INOX /10	PUNTUACION AISI H13 /10	PONDERACIÓN ACERO INOX /5	PONDERACIÓN AISI H13 /5
Termofluencia	5	6	9	3	4,5
Dureza	5	8	8	4	4
Durabilidad	3	6	8	1,8	2,4
Post TT	2	7	7	1,4	1,4
Propiedades térmicas	3	7	7	2,1	2,1
Resistencia a la corrosión	1	9	6	0,9	0,6
Maquinabilidad	4	4	6	1,6	2,4
Compatibilidad	3	7	7	2,1	2,1
Costo	3	7	7	2,1	2,1
Disponibilidad	4	8	8	3,2	3,2
<b>TOTAL</b>	<b>35</b>			<b>22,2/35</b>	<b>24,8/35</b>

Elaboración propia.

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

Se diseñó el sistema para el compactado y calentamiento de muestras en polvo metálico de aluminio, en base a una matriz de selección que tomó en cuenta factores como la termofluencia, maquinabilidad, dureza obtenida post-tratamiento térmico, termo conducción, entre otras.

El montaje se probó bajo las variables indicadas de presión y temperatura, el montaje no sufrió fracturas ni desperfectos por lo que el montaje fue exitoso en la realización de los experimentos. Sin embargo, las muestras resultaron adheridas al molde hembra debido al efecto de la presión y la temperatura que inducían un proceso de difusión entre las capas superficiales del acero y el aluminio, favoreciendo la adhesión.

Realizando un análisis cualitativo de las muestras resultantes, en el prensado a la temperatura de 335 °C, las muestras de aluminio obtenidas se mostraban totalmente homogéneas y rígidas, no se apreciaban partículas de polvo; caso contrario sucedió en el prensado a temperatura de 243 °C, donde resultaron muestras rígidas, pero se podían apreciar partículas de polvo. Esto debido a que, en la muestra a 335 °C, el aluminio se acercaba al punto de fusión y se inducía un proceso de difusión entre la superficie de las partículas de polvo que producía un mejor efecto de homogenización de la muestra.

Se ensayaron algunos métodos para evitar la adhesión de la probeta al molde, como la colocación de aceite y grasa sobre la superficie de la ranura del molde hembra, para crear una capa divisora, sin embargo, la muestra aún seguía adherida. Se insertó una cubierta de teflón, y resultó fue el mejor método resultante

para separar la interface entre el molde hembra y la muestra de aluminio en polvo, ya que se logró retirar la totalidad de la probeta, pero en partes fraccionadas. Esto debido a que, al realizar el esfuerzo sobre la tela de teflón, la probeta se fracturó por aun no estar totalmente homogenizada.

Dadas las limitaciones de tiempo no se pudo probar otras técnicas para evitar la adhesión. Quedó pendiente la utilización de una lámina removible de otro acero que actuara como separador de las fases.

## **4.2 Recomendaciones**

Para el sistema de moldeo, se recomienda seleccionar un acero, donde los defectos por termo-fluencia sean despreciables, se recomienda la selección del acero AISI M41 (acero de herramienta), de más bajo costo, \$3/kg; ya que es una alternativa más económica y de excelente maquinabilidad. Esto con el objetivo, de solo enfocarse únicamente en la compresión, para la elaboración de la probeta, más no las limitaciones por termofluencia.

Durante el proceso de prensado colocar una pequeña capa de fibra de cerámica refractaria o fibra de vidrio para aislar todas superficies de contacto con el sistema de molde y la prensa; si se requiere llegar hasta temperaturas superiores a los 400 °C, es necesario colocar un mayor grosor de fibra de cerámica.

# BIBLIOGRAFÍA

- Villalonga M. (2013). **Estructura y propiedades mecánicas de compuestos desarrollados a partir de la mezcla de aluminio y nanotubos de carbono**. Maracaibo, Venezuela.
- The library of manufacturing. **Powder processes**. [Artículo en línea]. [http://thelibraryofmanufacturing.com/powder\\_processes.html](http://thelibraryofmanufacturing.com/powder_processes.html)
- Estudiantes de metalografía (julio, 2012). **Capítulo 7: aceros inoxidables**. Pereira, Colombia. Universidad tecnológica de Pereira. [Artículo en línea]. <http://blog.utp.edu.co/metalografia/7-aceros-inoxidables/>
- A designer's handbook series (AISI). **High temperature characteristics Stainless Steel**. Short time tensile properties. Pp. 5-7.
- J. Brnic; \* S. Krscanski; D. Lanc; M. Brcic; G. Turkalj; M. Canadija; J. Niu. (2017) **Analysis of the Mechanical Behavior, Creep Resistance and Uniaxial Fatigue Strength of Martensitic Steel X46Cr13**. Uniaxial Short-Time Creep Tests and Creep Modeling. [Artículo en línea]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5506967/>
- Diaz del Castillo (Agosto del 2008). **Capítulo 2: programación CNC y programación automática**. Cuautitlán, México. Facultad de estudios superiores de Cuautitlán. [Artículo en línea]. [http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina\\_ingenieria/mecanica/mat/mat\\_mec/m4/master\\_cam.pdf](http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m4/master_cam.pdf)
- Universidad centroamericana José Simeón Cañas. **Propiedades mecánicas: fatiga y termofluencia**. Clases para ingeniería. La libertad, El Salvador. [Artículo en línea]. <http://www.uca.edu.sv/facultad/clases/ing/m210031/Tema%2010.pdf>
- Universidad de las Palmas de Gran Canaria. **Capítulo 3: conducción en régimen transitorio**. Gran canaria, España. Ecuación general de régimen transitorio pp. 36-37. [Artículo en línea].

<http://editorial.dca.ulpgc.es/ftp/ambiente/antesol/TESIS/cap3.pdf>

- Arian S. A. **Funcionamiento de termocuplas**. Santiago, Chile. [Artículo en línea]. <http://www.arian.cl/downloads/nt-002.pdf>
- Groover P. Mikell (1997). **Fundamentos de manufactura moderna**. Pearson, Prentice hall. Fresado frontal pp. 613
- Vílchez R. (2010). **Esfuerzos combinados**. Universidad Francisco de Miranda. Falcón, Venezuela. [Artículo en línea].  
<https://es.slideshare.net/vilchez/esfuerzos-combinados>
- Norton L. Robert (2004). **Diseño de máquinas**. (Cuarta edición). Pearson, Prentice Hall
- Universidad de Oviedo. **Propiedades mecánicas. Rotura**. Oviedo, España. Laboratorio de cementos. [Artículo en línea].

<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/TEMAII.2.7.PROPIEDADESMECANICAS.pdf>

- Material property data (2017). **H13 hot work tool Steel**. Mechanical and termical properties. [Artículo en línea].  
<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=97524110b425424d992f4bded0a20b2d&ckck=1>
- Bohler. **Catálogo de acero W302, acero para trabajo en caliente**.
- Bohler. **Catálogo de acero M333, acero inoxidable martensítico**. [Artículo en línea].  
<https://www.bohler-edelstahl.com/media/productdb/downloads/M333DE.pdf>
- Facultad de ingeniería industrial (2008). **Tratamientos térmicos**. Escuela colombiana de ingeniería Julio Garavito, Colombia. [Artículo en línea].  
[http://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/1537\\_tratamientostermicosr2.pdf](http://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/1537_tratamientostermicosr2.pdf)
- ASTM international (2004). **Standard Test Methods of Tension Testing Wrought and Cast Aluminum- and Magnesium-Alloy Products [Metric]**. Designation B 557M-02a.

# **APÉNDICES**

**APÉNDICE A**  
**Código G de molde hembra**

%O00001  
G90  
G21  
G92 Z50  
G00 X0 Y0  
M03 S1000  
M08  
G01 Z-0.5 F30  
G01 Y0.86 X0 F50  
G01 Y0.985 X16  
G03 Y2.36 X24.18 R27  
G01 Y2.36 X40.68  
G02 Y-2.36 X40.68 R2.36  
G01 Y-2.36 X24.18  
G03 Y-0.985 X16 R27  
G01 Y-0.86 X0  
G01 Y-0.985 X-16  
G03 Y-2.36 X-24.18 R27  
G01 Y-2.36 X-40.68  
G02 Y2.36 X-40.68 R2.36  
G01 Y2.36 X-24.18  
G03 Y0.985 X-16 R27  
G01 Y0.86 X0  
G01 Y0 X0  
G01 Y0 X38.68  
G01 Y0 X-38.68  
G01 Y0 X0  
G01 Z-1 F30  
G01 Y0.86 X0 F50  
G01 Y0.985 X16  
G03 Y2.36 X24.18 R27  
G01 Y2.36 X40.68  
G02 Y-2.36 X40.68 R2.36  
G01 Y-2.36 X24.18  
G03 Y-0.985 X16 R27  
G01 Y-0.86 X0  
G01 Y-0.985 X-16  
G03 Y-2.36 X-24.18 R27  
G01 Y-2.36 X-40.68  
G02 Y2.36 X-40.68 R2.36  
G01 Y2.36 X-24.18  
G03 Y0.985 X-16 R27  
G01 Y0.86 X0  
G01 Y0 X0  
G01 Y0 X38.68  
G01 Y0 X-38.68  
G01 Y0 X0  
G01 Z-1.5 F30  
G01 Y0.86 X0 F50  
G01 Y0.985 X16  
G03 Y2.36 X24.18 R27  
G01 Y2.36 X40.68

G02 Y-2.36 X40.68 R2.36  
G01 Y-2.36 X24.18  
G03 Y-0.985 X16 R27  
G01 Y-0.86 X0  
G01 Y-0.985 X-16  
G03 Y-2.36 X-24.18 R27  
G01 Y-2.36 X-40.68  
G02 Y2.36 X-40.68 R2.36  
G01 Y2.36 X-24.18  
G03 Y0.985 X-16 R27  
G01 Y0.86 X0  
G01 Y0 X0  
G01 Y0 X38.68  
G01 Y0 X-38.68  
G01 Y0 X0  
G01 Z-2 F30  
G01 Y0.86 X0 F50  
G01 Y0.985 X16  
G03 Y2.36 X24.18 R27  
G01 Y2.36 X40.68  
G02 Y-2.36 X40.68 R2.36  
G01 Y-2.36 X24.18  
G03 Y-0.985 X16 R27  
G01 Y-0.86 X0  
G01 Y-0.985 X-16  
G03 Y-2.36 X-24.18 R27  
G01 Y-2.36 X-40.68  
G02 Y2.36 X-40.68 R2.36  
G01 Y2.36 X-24.18  
G03 Y0.985 X-16 R27  
G01 Y0.86 X0  
G01 Y0 X0  
G01 Y0 X38.68  
G01 Y0 X-38.68  
G01 Y0 X0  
G01 Z-2.5 F30  
G01 Y0.86 X0 F50  
G01 Y0.985 X16  
G03 Y2.36 X24.18 R27  
G01 Y2.36 X40.68  
G02 Y-2.36 X40.68 R2.36  
G01 Y-2.36 X24.18  
G03 Y-0.985 X16 R27  
G01 Y-0.86 X0  
G01 Y-0.985 X-16  
G03 Y-2.36 X-24.18 R27  
G01 Y-2.36 X-40.68  
G02 Y2.36 X-40.68 R2.36  
G01 Y2.36 X-24.18  
G03 Y0.985 X-16 R27  
G01 Y0.86 X0  
G01 Y0 X0

G01 Y0 X38.68  
G01 Y0 X-38.68  
G01 Y0 X0  
G01 Z-3 F30  
G01 Y0.86 X0 F50  
G01 Y0.985 X16  
G03 Y2.36 X24.18 R27  
G01 Y2.36 X40.68  
G02 Y-2.36 X40.68 R2.36  
G01 Y-2.36 X24.18  
G03 Y-0.985 X16 R27  
G01 Y-0.86 X0  
G01 Y-0.985 X-16  
G03 Y-2.36 X-24.18 R27  
G01 Y-2.36 X-40.68  
G02 Y2.36 X-40.68 R2.36  
G01 Y2.36 X-24.18  
G03 Y0.985 X-16 R27  
G01 Y0.86 X0  
G01 Y0 X0  
G01 Y0 X38.68  
G01 Y0 X-38.68  
G01 Y0 X0  
G01 Z-3.5 F30  
G01 Y0.86 X0 F50  
G01 Y0.985 X16  
G03 Y2.36 X24.18 R27  
G01 Y2.36 X40.68  
G02 Y-2.36 X40.68 R2.36  
G01 Y-2.36 X24.18  
G03 Y-0.985 X16 R27  
G01 Y-0.86 X0  
G01 Y-0.985 X-16  
G03 Y-2.36 X-24.18 R27  
G01 Y-2.36 X-40.68  
G02 Y2.36 X-40.68 R2.36  
G01 Y2.36 X-24.18  
G03 Y0.985 X-16 R27  
G01 Y0.86 X0  
G01 Y0 X0  
G01 Y0 X38.68  
G01 Y0 X-38.68  
G01 Y0 X0  
G01 Z-4 F30  
G01 Y0.86 X0 F50  
G01 Y0.985 X16  
G03 Y2.36 X24.18 R27  
G01 Y2.36 X40.68  
G02 Y-2.36 X40.68 R2.36  
G01 Y-2.36 X24.18

G03 Y-0.985 X16 R27  
G01 Y-0.86 X0  
G01 Y-0.985 X-16  
G03 Y-2.36 X-24.18 R27  
G01 Y-2.36 X-40.68  
G02 Y2.36 X-40.68 R2.36  
G01 Y2.36 X-24.18  
G03 Y0.985 X-16 R27  
G01 Y0.86 X0  
G01 Y0 X0  
G01 Y0 X38.68  
G01 Y0 X-38.68  
G01 Y0 X0  
G01 Z-4.5 F30  
G01 Y0.86 X0 F50  
G01 Y0.985 X16  
G03 Y2.36 X24.18 R27  
G01 Y2.36 X40.68  
G02 Y-2.36 X40.68 R2.36  
G01 Y-2.36 X24.18  
G03 Y-0.985 X16 R27  
G01 Y-0.86 X0  
G01 Y-0.985 X-16  
G03 Y-2.36 X-24.18 R27  
G01 Y-2.36 X-40.68  
G02 Y2.36 X-40.68 R2.36  
G01 Y2.36 X-24.18  
G03 Y0.985 X-16 R27  
G01 Y0.86 X0  
G01 Y0 X0  
G01 Y0 X38.68  
G01 Y0 X-38.68  
G01 Y0 X0  
G01 Z-5 F30  
G01 Y0.86 X0 F50  
G01 Y0.985 X16  
G03 Y2.36 X24.18 R27  
G01 Y2.36 X40.68  
G02 Y-2.36 X40.68 R2.36  
G01 Y-2.36 X24.18  
G03 Y-0.985 X16 R27  
G01 Y-0.86 X0  
G01 Y-0.985 X-16  
G03 Y-2.36 X-24.18 R27  
G01 Y-2.36 X-40.68  
G02 Y2.36 X-40.68 R2.36  
G01 Y2.36 X-24.18  
G03 Y0.985 X-16 R27  
G01 Y0.86 X0  
G01 Y0 X0

G01 Y0 X38.68  
G01 Y0 X-38.68  
G01 Y0 X0  
G01 Z-5.5 F30  
G01 Y0.86 X0 F50  
G01 Y0.985 X16  
G03 Y2.36 X24.18 R27  
G01 Y2.36 X40.68  
G02 Y-2.36 X40.68 R2.36  
G01 Y-2.36 X24.18  
G03 Y-0.985 X16 R27  
G01 Y-0.86 X0  
G01 Y-0.985 X-16  
G03 Y-2.36 X-24.18 R27  
G01 Y-2.36 X-40.68  
G02 Y2.36 X-40.68 R2.36  
G01 Y2.36 X-24.18  
G03 Y0.985 X-16 R27  
G01 Y0.86 X0  
G01 Y0 X0  
G01 Y0 X38.68  
G01 Y0 X-38.68  
G01 Y0 X0  
G01 Z-6 F30  
G01 Y0.86 X0 F50  
G01 Y0.985 X16  
G03 Y2.36 X24.18 R27  
G01 Y2.36 X40.68  
G02 Y-2.36 X40.68 R2.36  
G01 Y-2.36 X24.18  
G03 Y-0.985 X16 R27  
G01 Y-0.86 X0  
G01 Y-0.985 X-16  
G03 Y-2.36 X-24.18 R27  
G01 Y-2.36 X-40.68  
G02 Y2.36 X-40.68 R2.36  
G01 Y2.36 X-24.18  
G03 Y0.985 X-16 R27  
G01 Y0.86 X0  
G01 Y0 X0  
G01 Y0 X38.68  
G01 Y0 X-38.68  
G01 Y0 X0  
G01 Z-6.5 F30  
G01 Y0.86 X0 F50  
G01 Y0.985 X16  
G03 Y2.36 X24.18 R27  
G01 Y2.36 X40.68  
G02 Y-2.36 X40.68 R2.36  
G01 Y-2.36 X24.18

G03 Y-0.985 X16 R27  
G01 Y-0.86 X0  
G01 Y-0.985 X-16  
G03 Y-2.36 X-24.18 R27  
G01 Y-2.36 X-40.68  
G02 Y2.36 X-40.68 R2.36  
G01 Y2.36 X-24.18  
G03 Y0.985 X-16 R27  
G01 Y0.86 X0  
G01 Y0 X0  
G01 Y0 X38.68  
G01 Y0 X-38.68  
G01 Y0 X0  
G01 Z-7 F30  
G01 Y0.86 X0 F50  
G01 Y0.985 X16  
G03 Y2.36 X24.18 R27  
G01 Y2.36 X40.68  
G02 Y-2.36 X40.68 R2.36  
G01 Y-2.36 X24.18  
G03 Y-0.985 X16 R27  
G01 Y-0.86 X0  
G01 Y-0.985 X-16  
G03 Y-2.36 X-24.18 R27  
G01 Y-2.36 X-40.68  
G02 Y2.36 X-40.68 R2.36  
G01 Y2.36 X-24.18  
G03 Y0.985 X-16 R27  
G01 Y0.86 X0  
G01 Y0 X0  
G01 Y0 X38.68  
G01 Y0 X-38.68  
G01 Y0 X0  
G01 Z-7.5 F30  
G01 Y0.86 X0 F50  
G01 Y0.985 X16  
G03 Y2.36 X24.18 R27  
G01 Y2.36 X40.68  
G02 Y-2.36 X40.68 R2.36  
G01 Y-2.36 X24.18  
G03 Y-0.985 X16 R27  
G01 Y-0.86 X0  
G01 Y-0.985 X-16  
G03 Y-2.36 X-24.18 R27  
G01 Y-2.36 X-40.68  
G02 Y2.36 X-40.68 R2.36  
G01 Y2.36 X-24.18  
G03 Y0.985 X-16 R27  
G01 Y0.86 X0  
G01 Y0 X0

G01 Y0 X38.68  
G01 Y0 X-38.68  
G01 Y0 X0  
G01 Z-8 F30  
G01 Y0.86 X0 F50  
G01 Y0.985 X16  
G03 Y2.36 X24.18 R27  
G01 Y2.36 X40.68  
G02 Y-2.36 X40.68 R2.36  
G01 Y-2.36 X24.18  
G03 Y-0.985 X16 R27  
G01 Y-0.86 X0  
G01 Y-0.985 X-16  
G03 Y-2.36 X-24.18 R27  
G01 Y-2.36 X-40.68  
G02 Y2.36 X-40.68 R2.36  
G01 Y2.36 X-24.18  
G03 Y0.985 X-16 R27  
G01 Y0.86 X0  
G01 Y0 X0  
G01 Y0 X38.68  
G01 Y0 X-38.68  
G01 Y0 X0  
G01 Z-8.5 F30  
G01 Y0.86 X0 F50  
G01 Y0.985 X16  
G03 Y2.36 X24.18 R27  
G01 Y2.36 X40.68  
G02 Y-2.36 X40.68 R2.36  
G01 Y-2.36 X24.18  
G03 Y-0.985 X16 R27  
G01 Y-0.86 X0  
G01 Y-0.985 X-16  
G03 Y-2.36 X-24.18 R27  
G01 Y-2.36 X-40.68  
G02 Y2.36 X-40.68 R2.36  
G01 Y2.36 X-24.18  
G03 Y0.985 X-16 R27  
G01 Y0.86 X0  
G01 Y0 X0  
G01 Y0 X38.68  
G01 Y0 X-38.68  
G01 Y0 X0  
G01 Z-9 F30  
G01 Y0.86 X0 F50  
G01 Y0.985 X16  
G03 Y2.36 X24.18 R27  
G01 Y2.36 X40.68  
G02 Y-2.36 X40.68 R2.36  
G01 Y-2.36 X24.18

G03 Y-0.985 X16 R27  
G01 Y-0.86 X0  
G01 Y-0.985 X-16  
G03 Y-2.36 X-24.18 R27  
G01 Y-2.36 X-40.68  
G02 Y2.36 X-40.68 R2.36  
G01 Y2.36 X-24.18  
G03 Y0.985 X-16 R27  
G01 Y0.86 X0  
G01 Y0 X0  
G01 Y0 X38.68  
G01 Y0 X-38.68  
G01 Y0 X0  
G01 Z-9.5 F30  
G01 Y0.86 X0 F50  
G01 Y0.985 X16  
G03 Y2.36 X24.18 R27  
G01 Y2.36 X40.68  
G02 Y-2.36 X40.68 R2.36  
G01 Y-2.36 X24.18  
G03 Y-0.985 X16 R27  
G01 Y-0.86 X0  
G01 Y-0.985 X-16  
G03 Y-2.36 X-24.18 R27  
G01 Y-2.36 X-40.68  
G02 Y2.36 X-40.68 R2.36  
G01 Y2.36 X-24.18  
G03 Y0.985 X-16 R27  
G01 Y0.86 X0  
G01 Y0 X0  
G01 Y0 X38.68  
G01 Y0 X-38.68  
G01 Y0 X0  
G01 Z-10 F30  
G01 Y0.86 X0 F50  
G01 Y0.985 X16  
G03 Y2.36 X24.18 R27  
G01 Y2.36 X40.68  
G02 Y-2.36 X40.68 R2.36  
G01 Y-2.36 X24.18  
G03 Y-0.985 X16 R27  
G01 Y-0.86 X0  
G01 Y-0.985 X-16  
G03 Y-2.36 X-24.18 R27  
G01 Y-2.36 X-40.68  
G02 Y2.36 X-40.68 R2.36  
G01 Y2.36 X-24.18  
G03 Y0.985 X-16 R27  
G01 Y0.86 X0  
G01 Y0 X0

G01 Y0 X38.68  
G01 Y0 X-38.68  
G01 Y0 X0  
G01 Z-10.5 F30  
G01 Y0.86 X0 F50  
G01 Y0.985 X16  
G03 Y2.36 X24.18 R27  
G01 Y2.36 X40.68  
G02 Y-2.36 X40.68 R2.36  
G01 Y-2.36 X24.18  
G03 Y-0.985 X16 R27  
G01 Y-0.86 X0  
G01 Y-0.985 X-16  
G03 Y-2.36 X-24.18 R27  
G01 Y-2.36 X-40.68  
G02 Y2.36 X-40.68 R2.36  
G01 Y2.36 X-24.18  
G03 Y0.985 X-16 R27  
G01 Y0.86 X0  
G01 Y0 X0  
G01 Y0 X38.68  
G01 Y0 X-38.68  
G01 Y0 X0  
G01 Z-11 F30  
G01 Y0.86 X0 F50  
G01 Y0.985 X16  
G03 Y2.36 X24.18 R27  
G01 Y2.36 X40.68  
G02 Y-2.36 X40.68 R2.36  
G01 Y-2.36 X24.18  
G03 Y-0.985 X16 R27  
G01 Y-0.86 X0  
G01 Y-0.985 X-16  
G03 Y-2.36 X-24.18 R27  
G01 Y-2.36 X-40.68  
G02 Y2.36 X-40.68 R2.36  
G01 Y2.36 X-24.18  
G03 Y0.985 X-16 R27  
G01 Y0.86 X0  
G01 Y0 X0  
G01 Y0 X38.68  
G01 Y0 X-38.68  
G01 Y0 X0  
G00 Z50  
M05  
M09  
M30

## **APÉNDICE B**

### **Código G de molde macho**



%O0001  
G90  
G21  
M03 S1000  
G00 Z50  
G00 X-50 Y-16  
G01 Z-0.5 F30  
G01 X54 Y-16 F100  
G01 X54 Y16  
G01 X-54 Y16  
G01 X-54 Y -12  
G01 X53 Y-12  
G01 X53 Y12  
G01 X-53 Y12  
G01 X-53 Y-8.855  
G01 X50 Y-8.855  
G01 X50 Y8.855  
G01 X-50 Y8.855  
G01 X-50 Y-8.855  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G02 X-16 Y-7.48 R29.5  
G01 X0 Y-7.36  
G01 X16 Y-7.48  
G02 X24.13 Y-8.855 R29.5  
G01 X40.63 Y-8.855  
G03 X40.63 Y8.855 R8.86  
G01 X24.13 Y8.855  
G02 X16 Y7.48 R29.5  
G01 X0 Y7.36  
G01 X-16 Y7.48  
G02 X-24.13 Y8.855 R29.5  
G01 X-40.63 Y8.855  
G03 X-40.63 Y-8.855 R8.86  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G01 X-50 Y-16  
G01 Z-1 F30  
G01 X54 Y-16 F100  
G01 X54 Y16  
G01 X-54 Y16  
G01 X-54 Y -12  
G01 X53 Y-12  
G01 X53 Y12  
G01 X-53 Y12  
G01 X-53 Y-8.855  
G01 X50 Y-8.855  
G01 X50 Y8.855  
G01 X-50 Y8.855  
G01 X-50 Y-8.855  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G02 X-16 Y-7.48 R29.5  
G01 X0 Y-7.36  
G01 X16 Y-7.48

G02 X24.13 Y-8.855 R29.5  
G01 X40.63 Y-8.855  
G03 X40.63 Y8.855 R8.86  
G01 X24.13 Y8.855  
G02 X16 Y7.48 R29.5  
G01 X0 Y7.36  
G01 X-16 Y7.48  
G02 X-24.13 Y8.855 R29.5  
G01 X-40.63 Y8.855  
G03 X-40.63 Y-8.855 R8.86  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G01 X-50 Y-16  
G01 Z-1.5 F30  
G01 X54 Y-16 F100  
G01 X54 Y16  
G01 X-54 Y16  
G01 X-54 Y -12  
G01 X53 Y-12  
G01 X53 Y12  
G01 X-53 Y12  
G01 X-53 Y-8.855  
G01 X50 Y-8.855  
G01 X50 Y8.855  
G01 X-50 Y-8.855  
G01 X-50 Y8.855  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G02 X-16 Y-7.48 R29.5  
G01 X0 Y-7.36  
G01 X16 Y-7.48  
G02 X24.13 Y-8.855 R29.5  
G01 X40.63 Y-8.855  
G03 X40.63 Y8.855 R8.86  
G01 X24.13 Y8.855  
G02 X16 Y7.48 R29.5  
G01 X0 Y7.36  
G01 X-16 Y7.48  
G02 X-24.13 Y8.855 R29.5  
G01 X-40.63 Y8.855  
G03 X-40.63 Y-8.855 R8.86  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G01 X-50 Y-16  
G01 Z-2 F30  
G01 X54 Y-16 F100  
G01 X54 Y16  
G01 X-54 Y16  
G01 X-54 Y -12  
G01 X53 Y-12  
G01 X53 Y12  
G01 X-53 Y12  
G01 X-53 Y-8.855  
G01 X50 Y-8.855  
G01 X50 Y8.855

G01 X-50 Y8.855  
G01 X-50 Y-8.855  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G02 X-16 Y-7.48 R29.5  
G01 X0 Y-7.36  
G01 X16 Y-7.48  
G02 X24.13 Y-8.855 R29.5  
G01 X40.63 Y-8.855  
G03 X40.63 Y8.855 R8.86  
G01 X24.13 Y8.855  
G02 X16 Y7.48 R29.5  
G01 X0 Y7.36  
G01 X-16 Y7.48  
G02 X-24.13 Y8.855 R29.5  
G01 X-40.63 Y8.855  
G03 X-40.63 Y-8.855 R8.86  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G01 X-50 Y-16  
G01 Z-2.5 F30  
G01 X54 Y-16 F100  
G01 X54 Y16  
G01 X-54 Y16  
G01 X-54 Y -12  
G01 X53 Y-12  
G01 X53 Y12  
G01 X-53 Y12  
G01 X-53 Y-8.855  
G01 X50 Y-8.855  
G01 X50 Y8.855  
G01 X-50 Y8.855  
G01 X-50 Y-8.855  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G02 X-16 Y-7.48 R29.5  
G01 X0 Y-7.36  
G01 X16 Y-7.48  
G02 X24.13 Y-8.855 R29.5  
G01 X40.63 Y-8.855  
G03 X40.63 Y8.855 R8.86  
G01 X24.13 Y8.855  
G02 X16 Y7.48 R29.5  
G01 X0 Y7.36  
G01 X-16 Y7.48  
G02 X-24.13 Y8.855 R29.5  
G01 X-40.63 Y8.855  
G03 X-40.63 Y-8.855 R8.86  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G01 X-50 Y-16  
G01 Z-3 F30  
G01 X54 Y-16 F100  
G01 X54 Y16

G01 X-54 Y16  
G01 X-54 Y -12  
G01 X53 Y-12  
G01 X53 Y12  
G01 X-53 Y12  
G01 X-53 Y-8.855  
G01 X50 Y-8.855  
G01 X50 Y8.855  
G01 X-50 Y8.855  
G01 X-50 Y-8.855  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G02 X-16 Y-7.48 R29.5  
G01 X0 Y-7.36  
G01 X16 Y-7.48  
G02 X24.13 Y-8.855 R29.5  
G01 X40.63 Y-8.855  
G03 X40.63 Y8.855 R8.86  
G01 X24.13 Y8.855  
G02 X16 Y7.48 R29.5  
G01 X0 Y7.36  
G01 X-16 Y7.48  
G02 X-24.13 Y8.855 R29.5  
G01 X-40.63 Y8.855  
G03 X-40.63 Y-8.855 R8.86  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G01 X-50 Y-16  
G01 Z-3.5 F30  
G01 X54 Y-16 F100  
G01 X54 Y16  
G01 X-54 Y16  
G01 X-54 Y -12  
G01 X53 Y-12  
G01 X53 Y12  
G01 X-53 Y12  
G01 X-53 Y-8.855  
G01 X50 Y-8.855  
G01 X50 Y8.855  
G01 X-50 Y8.855  
G01 X-50 Y-8.855  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G02 X-16 Y-7.48 R29.5  
G01 X0 Y-7.36  
G01 X16 Y-7.48  
G02 X24.13 Y-8.855 R29.5  
G01 X40.63 Y-8.855  
G03 X40.63 Y8.855 R8.86  
G01 X24.13 Y8.855  
G02 X16 Y7.48 R29.5  
G01 X0 Y7.36  
G01 X-16 Y7.48

G02 X-24.13 Y8.855 R29.5  
G01 X-40.63 Y8.855  
G03 X-40.63 Y-8.855 R8.86  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G01 X-50 Y-16  
G01 Z-4 F30  
G01 X54 Y-16 F100  
G01 X54 Y16  
G01 X-54 Y16  
G01 X-54 Y -12  
G01 X53 Y-12  
G01 X53 Y12  
G01 X-53 Y12  
G01 X-53 Y-8.855  
G01 X50 Y-8.855  
G01 X50 Y8.855  
G01 X-50 Y8.855  
G01 X-50 Y-8.855  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G02 X-16 Y-7.48 R29.5  
G01 X0 Y-7.36  
G01 X16 Y-7.48  
G02 X24.13 Y-8.855 R29.5  
G01 X40.63 Y-8.855  
G03 X40.63 Y8.855 R8.86  
G01 X24.13 Y8.855  
G02 X16 Y7.48 R29.5  
G01 X0 Y7.36  
G01 X-16 Y7.48  
G02 X-24.13 Y8.855 R29.5  
G01 X-40.63 Y8.855  
G03 X-40.63 Y-8.855 R8.86  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G01 X-50 Y-16  
G01 Z-4.5 F30  
G01 X54 Y-16 F100  
G01 X54 Y16  
G01 X-54 Y16  
G01 X-54 Y -12  
G01 X53 Y-12  
G01 X53 Y12  
G01 X-53 Y12  
G01 X-53 Y-8.855  
G01 X50 Y-8.855  
G01 X50 Y8.855  
G01 X-50 Y8.855  
G01 X-50 Y-8.855  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G02 X-16 Y-7.48 R29.5  
G01 X0 Y-7.36

G01 X16 Y-7.48  
G02 X24.13 Y-8.855 R29.5  
G01 X40.63 Y-8.855  
G03 X40.63 Y8.855 R8.86  
G01 X24.13 Y8.855  
G02 X16 Y7.48 R29.5  
G01 X0 Y7.36  
G01 X-16 Y7.48  
G02 X-24.13 Y8.855 R29.5  
G01 X-40.63 Y8.855  
G03 X-40.63 Y-8.855 R8.86  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G01 X-50 Y-16  
G01 Z-5 F30  
G01 X54 Y-16 F100  
G01 X54 Y16  
G01 X-54 Y16  
G01 X-54 Y -12  
G01 X53 Y-12  
G01 X53 Y12  
G01 X-53 Y12  
G01 X-53 Y-8.855  
G01 X50 Y-8.855  
G01 X50 Y8.855  
G01 X-50 Y8.855  
G01 X-50 Y-8.855  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G02 X-16 Y-7.48 R29.5  
G01 X0 Y-7.36  
G01 X16 Y-7.48  
G02 X24.13 Y-8.855 R29.5  
G01 X40.63 Y-8.855  
G03 X40.63 Y8.855 R8.86  
G01 X24.13 Y8.855  
G02 X16 Y7.48 R29.5  
G01 X0 Y7.36  
G01 X-16 Y7.48  
G02 X-24.13 Y8.855 R29.5  
G01 X-40.63 Y8.855  
G03 X-40.63 Y-8.855 R8.86  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G01 X-50 Y-16  
G01 Z-5.5 F30  
G01 X54 Y-16 F100  
G01 X54 Y16  
G01 X-54 Y16  
G01 X-54 Y -12  
G01 X53 Y-12  
G01 X53 Y12  
G01 X-53 Y12

G01 X-53 Y-8.855  
G01 X50 Y-8.855  
G01 X50 Y8.855  
G01 X-50 Y8.855  
G01 X-50 Y-8.855  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G02 X-16 Y-7.48 R29.5  
G01 X0 Y-7.36  
G01 X16 Y-7.48  
G02 X24.13 Y-8.855 R29.5  
G01 X40.63 Y-8.855  
G03 X40.63 Y8.855 R8.86  
G01 X24.13 Y8.855  
G02 X16 Y7.48 R29.5  
G01 X0 Y7.36  
G01 X-16 Y7.48  
G02 X-24.13 Y8.855 R29.5  
G01 X-40.63 Y8.855  
G03 X-40.63 Y-8.855 R8.86  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G01 X-50 Y-16  
G01 Z-6 F30  
G01 X54 Y-16 F100  
G01 X54 Y16  
G01 X-54 Y16  
G01 X-54 Y -12  
G01 X53 Y-12  
G01 X53 Y12  
G01 X-53 Y12  
G01 X-53 Y-8.855  
G01 X50 Y-8.855  
G01 X50 Y8.855  
G01 X-50 Y8.855  
G01 X-50 Y-8.855  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G02 X-16 Y-7.48 R29.5  
G01 X0 Y-7.36  
G01 X16 Y-7.48  
G02 X24.13 Y-8.855 R29.5  
G01 X40.63 Y-8.855  
G03 X40.63 Y8.855 R8.86  
G01 X24.13 Y8.855  
G02 X16 Y7.48 R29.5  
G01 X0 Y7.36  
G01 X-16 Y7.48  
G02 X-24.13 Y8.855 R29.5  
G01 X-40.63 Y8.855  
G03 X-40.63 Y-8.855 R8.86  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G01 X-50 Y-16

G01 Z-6.5 F30  
G01 X54 Y-16 F100  
G01 X54 Y16  
G01 X-54 Y16  
G01 X-54 Y -12  
G01 X53 Y-12  
G01 X53 Y12  
G01 X-53 Y12  
G01 X-53 Y-8.855  
G01 X50 Y-8.855  
G01 X50 Y8.855  
G01 X-50 Y8.855  
G01 X-50 Y-8.855  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G02 X-16 Y-7.48 R29.5  
G01 X0 Y-7.36  
G01 X16 Y-7.48  
G02 X24.13 Y-8.855 R29.5  
G01 X40.63 Y-8.855  
G03 X40.63 Y8.855 R8.86  
G01 X24.13 Y8.855  
G02 X16 Y7.48 R29.5  
G01 X0 Y7.36  
G01 X-16 Y7.48  
G02 X-24.13 Y8.855 R29.5  
G01 X-40.63 Y8.855  
G03 X-40.63 Y-8.855 R8.86  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G01 X-50 Y-16  
G01 Z-7 F30  
G01 X54 Y-16 F100  
G01 X54 Y16  
G01 X-54 Y16  
G01 X-54 Y -12  
G01 X53 Y-12  
G01 X53 Y12  
G01 X-53 Y12  
G01 X-53 Y-8.855  
G01 X50 Y-8.855  
G01 X50 Y8.855  
G01 X-50 Y8.855  
G01 X-50 Y-8.855  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G02 X-16 Y-7.48 R29.5  
G01 X0 Y-7.36  
G01 X16 Y-7.48  
G02 X24.13 Y-8.855 R29.5  
G01 X40.63 Y-8.855  
G03 X40.63 Y8.855 R8.86  
G01 X24.13 Y8.855

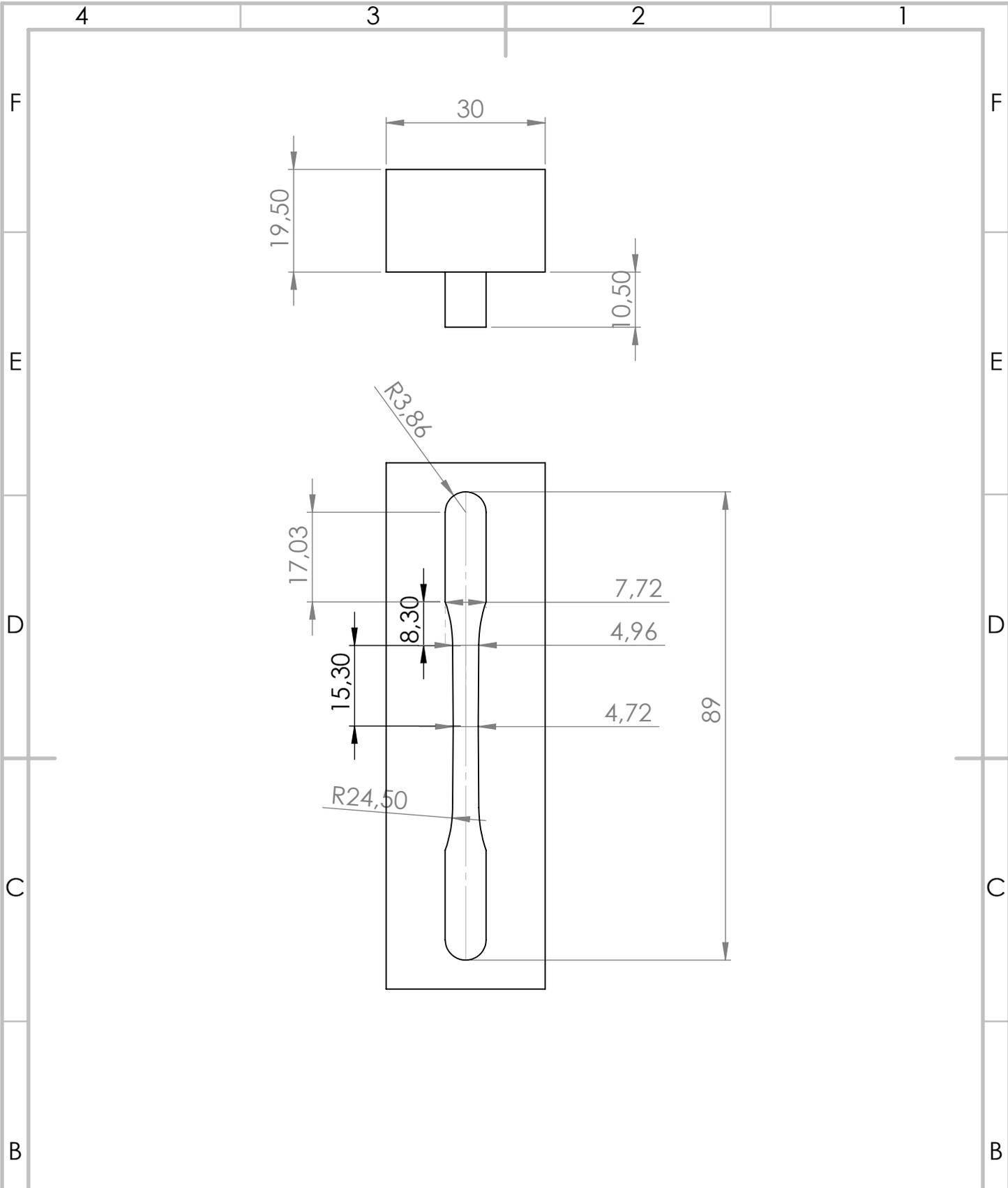
G02 X16 Y7.48 R29.5  
G01 X0 Y7.36  
G01 X-16 Y7.48  
G02 X-24.13 Y8.855 R29.5  
G01 X-40.63 Y8.855  
G03 X-40.63 Y-8.855 R8.86  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G01 X-50 Y-16  
G01 Z-7.5 F30  
G01 X54 Y-16 F100  
G01 X54 Y16  
G01 X-54 Y16  
G01 X-54 Y -12  
G01 X53 Y-12  
G01 X53 Y12  
G01 X-53 Y12  
G01 X-53 Y-8.855  
G01 X50 Y-8.855  
G01 X50 Y8.855  
G01 X-50 Y8.855  
G01 X-50 Y-8.855  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G02 X-16 Y-7.48 R29.5  
G01 X0 Y-7.36  
G01 X16 Y-7.48  
G02 X24.13 Y-8.855 R29.5  
G01 X40.63 Y-8.855  
G03 X40.63 Y8.855 R8.86  
G01 X24.13 Y8.855  
G02 X16 Y7.48 R29.5  
G01 X0 Y7.36  
G01 X-16 Y7.48  
G02 X-24.13 Y8.855 R29.5  
G01 X-40.63 Y8.855  
G03 X-40.63 Y-8.855 R8.86  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G01 X-50 Y-16  
G01 Z-8 F30  
G01 X54 Y-16 F100  
G01 X54 Y16  
G01 X-54 Y16  
G01 X-54 Y -12  
G01 X53 Y-12  
G01 X53 Y12  
G01 X-53 Y12  
G01 X-53 Y-8.855  
G01 X50 Y-8.855  
G01 X50 Y8.855  
G01 X-50 Y8.855  
G01 X-50 Y-8.855

G01 X-24.13 Y-8.855  
G02 X-16 Y-7.48 R29.5  
G01 X0 Y-7.36  
G01 X16 Y-7.48  
G02 X24.13 Y-8.855 R29.5  
G01 X40.63 Y-8.855  
G03 X40.63 Y8.855 R8.86  
G01 X24.13 Y8.855  
G02 X16 Y7.48 R29.5  
G01 X0 Y7.36  
G01 X-16 Y7.48  
G02 X-24.13 Y8.855 R29.5  
G01 X-40.63 Y8.855  
G03 X-40.63 Y-8.855 R8.86  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G01 X-50 Y-16  
G01 Z-8.5 F30  
G01 X54 Y-16 F100  
G01 X54 Y16  
G01 X-54 Y16  
G01 X-54 Y -12  
G01 X53 Y-12  
G01 X53 Y12  
G01 X-53 Y12  
G01 X-53 Y-8.855  
G01 X50 Y-8.855  
G01 X50 Y8.855  
G01 X-50 Y8.855  
G01 X-50 Y-8.855  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G02 X-16 Y-7.48 R29.5  
G01 X0 Y-7.36  
G01 X16 Y-7.48  
G02 X24.13 Y-8.855 R29.5  
G01 X40.63 Y-8.855  
G03 X40.63 Y8.855 R8.86  
G01 X24.13 Y8.855  
G02 X16 Y7.48 R29.5  
G01 X0 Y7.36  
G01 X-16 Y7.48  
G02 X-24.13 Y8.855 R29.5  
G01 X-40.63 Y8.855  
G03 X-40.63 Y-8.855 R8.86  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G01 X-50 Y-16  
G01 Z-9 F30  
G01 X54 Y-16 F100  
G01 X54 Y16  
G01 X-54 Y16  
G01 X-54 Y -12

G01 X53 Y-12  
G01 X53 Y12  
G01 X-53 Y12  
G01 X-53 Y-8.855  
G01 X50 Y-8.855  
G01 X50 Y8.855  
G01 X-50 Y8.855  
G01 X-50 Y-8.855  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G02 X-16 Y-7.48 R29.5  
G01 X0 Y-7.36  
G01 X16 Y-7.48  
G02 X24.13 Y-8.855 R29.5  
G01 X40.63 Y-8.855  
G03 X40.63 Y8.855 R8.86  
G01 X24.13 Y8.855  
G02 X16 Y7.48 R29.5  
G01 X0 Y7.36  
G01 X-16 Y7.48  
G02 X-24.13 Y8.855 R29.5  
G01 X-40.63 Y8.855  
G03 X-40.63 Y-8.855 R8.86  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G01 X-50 Y-16  
G01 Z-9.5 F30  
G01 X54 Y-16 F100  
G01 X54 Y16  
G01 X-54 Y16  
G01 X-54 Y -12  
G01 X53 Y-12  
G01 X53 Y12  
G01 X-53 Y12  
G01 X-53 Y-8.855  
G01 X50 Y-8.855  
G01 X50 Y8.855  
G01 X-50 Y8.855  
G01 X-50 Y-8.855  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G02 X-16 Y-7.48 R29.5  
G01 X0 Y-7.36  
G01 X16 Y-7.48  
G02 X24.13 Y-8.855 R29.5  
G01 X40.63 Y-8.855  
G03 X40.63 Y8.855 R8.86  
G01 X24.13 Y8.855  
G02 X16 Y7.48 R29.5  
G01 X0 Y7.36  
G01 X-16 Y7.48  
G02 X-24.13 Y8.855 R29.5  
G01 X-40.63 Y8.855

G03 X-40.63 Y-8.855 R8.86  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G01 X-50 Y-16  
G01 Z-10 F30  
G01 X54 Y-16 F100  
G01 X54 Y16  
G01 X-54 Y16  
G01 X-54 Y -12  
G01 X53 Y-12  
G01 X53 Y12  
G01 X-53 Y12  
G01 X-53 Y-8.855  
G01 X50 Y-8.855  
G01 X50 Y8.855  
G01 X-50 Y8.855  
G01 X-50 Y-8.855  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G02 X-16 Y-7.48 R29.5  
G01 X0 Y-7.36  
G01 X16 Y-7.48  
G02 X24.13 Y-8.855 R29.5  
G01 X40.63 Y-8.855  
G03 X40.63 Y8.855 R8.86  
G01 X24.13 Y8.855  
G02 X16 Y7.48 R29.5  
G01 X0 Y7.36  
G01 X-16 Y7.48  
G02 X-24.13 Y8.855 R29.5  
G01 X-40.63 Y8.855  
G03 X-40.63 Y-8.855 R8.86  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G01 X-50 Y-16  
G01 Z-10.5 F30  
G01 X54 Y-16 F100  
G01 X54 Y16  
G01 X-54 Y16  
G01 X-54 Y -12  
G01 X53 Y-12  
G01 X53 Y12  
G01 X-53 Y12  
G01 X-53 Y-8.855  
G01 X50 Y-8.855  
G01 X50 Y8.855  
G01 X-50 Y8.855  
G01 X-50 Y-8.855  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G02 X-16 Y-7.48 R29.5  
G01 X0 Y-7.36  
G01 X16 Y-7.48  
G02 X24.13 Y-8.855 R29.5

G01 X40.63 Y-8.855  
G03 X40.63 Y8.855 R8.86  
G01 X24.13 Y8.855  
G02 X16 Y7.48 R29.5  
G01 X0 Y7.36  
G01 X-16 Y7.48  
G02 X-24.13 Y8.855 R29.5  
G01 X-40.63 Y8.855  
G03 X-40.63 Y-8.855 R8.86  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G01 X-50 Y-16  
G01 Z-11 F30  
G01 X54 Y-16 F100  
G01 X54 Y16  
G01 X-54 Y16  
G01 X-54 Y -12  
G01 X53 Y-12  
G01 X53 Y12  
G01 X-53 Y12  
G01 X-53 Y-8.855  
G01 X50 Y-8.855  
G01 X50 Y8.855  
G01 X-50 Y8.855  
G01 X-50 Y-8.855  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G02 X-16 Y-7.48 R29.5  
G01 X0 Y-7.36  
G01 X16 Y-7.48  
G02 X24.13 Y-8.855 R29.5  
G01 X40.63 Y-8.855  
G03 X40.63 Y8.855 R8.86  
G01 X24.13 Y8.855  
G02 X16 Y7.48 R29.5  
G01 X0 Y7.36  
G01 X-16 Y7.48  
G02 X-24.13 Y8.855 R29.5  
G01 X-40.63 Y8.855  
G03 X-40.63 Y-8.855 R8.86  
G01 X-24.13 Y-8.855  
G01 X-50 Y-16  
M05  
M30



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:  
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM  
 ACABADO SUPERFICIAL:  
 TOLERANCIAS:  
 LINEAL:  
 ANGULAR:

ACABADO:  
  
 REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA  
 REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	Ramón Unamuno		16 - Nov - 2017
VERIF.	Ana Rivas PhD. / Eric Plaza PhD.		16 - Nov - 2017
APROB.	Rodrigo Perugachi MsC.		16 - Nov - 2017
FABR.	Ramón Unamuno		21 - Dic - 2017

TÍTULO:  
**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA PARA LA ELABORACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS DE ALEACIONES ALUMINIO REFORZADAS VIA PULVIMETALURGIA**

CALID.	MATERIAL:	N.º DE DIBUJO
	ALSI H13	Molde macho
	PESO:	ESCALA:1:2
		HOJA 1 DE 1

4 3 2 1

F

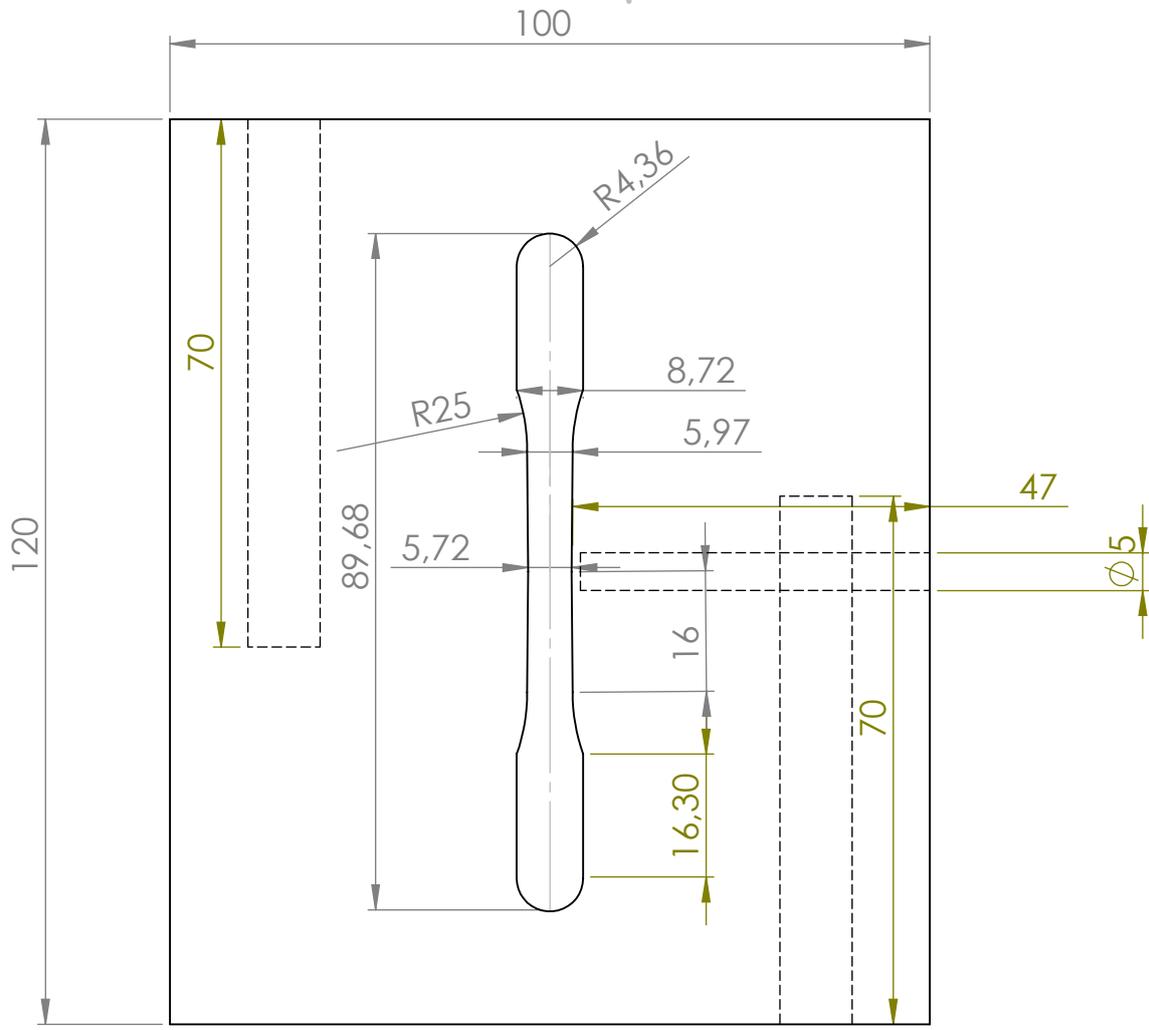
F

E

E

D

D

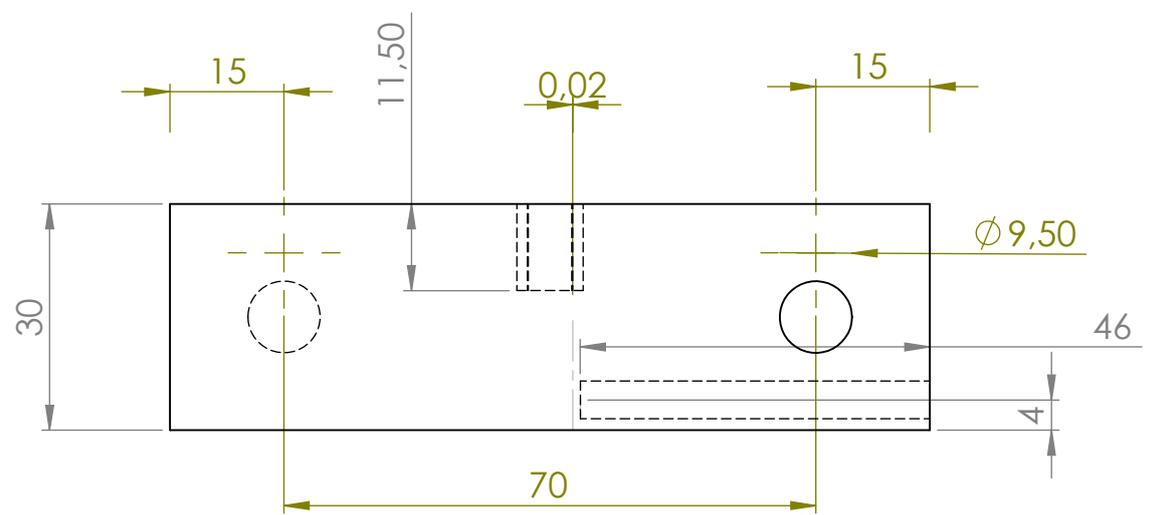


C

C

B

B



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:	ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	Ramon Unamuno		16 - Nov - 2017
VERIF.	Ana Rivas PhD. / Eric Plaza PhD.		16 - Nov - 2017
APROB.	Rodrigo Perugachi MsC.		16 - Nov - 2017
FABR.	Ramon Unamuno		20 - Dic - 2017

TÍTULO:  
**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA PARA LA  
 ELABORACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS DE  
 ALEACIONES ALUMINIO REFORZADAS VIA  
 PULVIMETALURGIA**

CALID.	MATERIAL:	N.º DE DIBUJO
	<p style="text-align: center;">AIS1 H13</p>	<p style="font-size: 2em;"><b>Molde Hembra</b></p>
	PESO:	ESCALA:1:5
	XXXXXXX	HOJA 1 DE 1

A

A

4 2 1