



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



Facultad de Ingeniería

División de Ingeniería Mecánica e Industrial

Diseño y fabricación de un equipo didáctico de fundición centrífuga

TESIS

Para obtener el título de:

Ingeniero Mecánico

Presenta:

Juan Eric Durán Piña

Director de Tesis:

Ing. Raúl Gilberto Valdez Navarro

Ciudad Universitaria, México, D. F. 2012



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

A lo largo de mi vida, pero sobre todo en estos años de estudio en la universidad y durante el desarrollo de esta tesis han estado presentes personas y amigos que de no haber sido por ellos no sería la persona en la que hoy en día me he convertido.

Agradezco primeramente a mis padres, por todo el apoyo tan incondicional como el amor que desde siempre me han brindado. Gracias a ustedes he alcanzado mis sueños, pues han sido mi guía a lo largo de todo este camino ya recorrido.

A mi hermana, por escucharme y por entenderme. Sabes que para mi eres y serás el mejor ejemplo a seguir en esta vida, gracias por estar siempre a mi lado, por toda tu comprensión y el cariño que en ti he encontrado, llenas mi vida de felicidad.

A mi madrina Eugenia, por todo el apoyo, el cariño y la comprensión que he encontrado en ella. Siempre haz estado conmigo, sobre todo durante estos años en la universidad, sin tu presencia no tendría la fortaleza que hoy tengo, gracias de todo corazón.

A mis tíos Lulú, Mary y Ubaldo, que me han apoyado a lo largo de toda mi preparación y han estado al pendiente durante todo este tiempo en el que desarrollé este trabajo.

Al Ingeniero Raúl Valdez, por todos los conocimientos que compartió conmigo, por el apoyo y por las valiosísimas horas que dedico durante la dirección de esta tesis. Gracias por todo profe, en usted encontré un ejemplo a seguir pero sobre todo a un gran amigo para toda la vida.

A mis amigos Ángel, Jorge y Cuitláhuac, quienes han dejado una huella imborrable durante estos años de carrera, gracias por todo este apoyo y por todo lo que hemos compartido en la universidad. Sin ustedes no habría alcanzado los objetivos de este trabajo en el tiempo en que lo logre. De corazón gracias por todo.

A mis asesores por la atenta lectura de este trabajo, por sus comentarios y atinadas correcciones. Gracias a ustedes por el tiempo dedicado y por brindarme sus conocimientos.

Y finalmente a la Universidad Nacional Autónoma de México, donde aprendí a formarme como profesionista y como ser humano, pues en ella encontré excelentes personas que han marcado mi vida.

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN EQUIPO DIDÁCTICO DE FUNDICIÓN CENTRÍFUGA

INDICE

OBJETIVO.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1 GENERALIDADES SOBRE LOS PROCESOS DE FUNDICIÓN.....	3
1.1 Clasificación de los procesos.....	4
1.1.1 Tipos de molde.....	6
1.1.2 Tipos de modelo.....	7
1.1.3 Fuerzas de llenado.....	8
1.2 Descripción general de los procesos de fundición.....	9
1.2.1 Fundición en arena.....	9
1.2.2 Moldeo en cascara.....	11
1.2.3 Fundición en molde consumible.....	12
1.2.4 Fundición en molde de yeso.....	13
1.2.5 Fundición en molde cerámico.....	13
1.2.6 Fundición por revestimiento.....	14
1.2.7 Fundición al vacío.....	15
1.2.8 Fundición en molde permanente.....	15
1.2.9 Fundición a presión.....	16
1.2.10 Fundición por inyección en matriz o dados.....	17
1.2.11 Fundición centrífuga.....	18
1.3 Fundición del metal y etapas de solidificación y contracción.....	19
1.3.1 Calentamiento del metal.....	19
1.3.2 Temperatura de vaciado.....	19
1.3.3 Fluidez.....	19
1.3.4 Etapa de solidificación.....	20
1.3.5 Tiempo de solidificación.....	21
1.3.6 Etapa de contracción.....	22
1.4 Defectos comunes en la fundición.....	24

CAPÍTULO 2 FUNDICIÓN CENTRÍFUGA	29
2.1 Breve historia de la fundición cetrífuga.....	30
2.2 Fundamentos teóricos del proceso de fundición centrífuga.....	31
2.2.1 Rotación de la masa alrededor de un eje vertical.....	31
2.2.2 Distribución de las presiones para el proceso con eje vertical.....	35
2.2.3 Velocidad de rotación para el proceso con eje vertical.....	36
2.2.4 Rotación de la masa alrededor de un eje horizontal.....	41
2.2.5 Distribución de las presiones para el proceso con eje horizontal	44
2.2.6 Velocidad de rotación para el proceso con eje horizontal.....	45
2.2.7 Determinación del número de revoluciones del molde.....	46
2.3 Clasificación del proceso.....	47
2.3.1 Fundición centrífuga real.....	47
2.3.2 Fundición semicentrífuga.....	49
2.3.3 Fundición centrifugada.....	50
CAPÍTULO 3 DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL EQUIPO (Método Gui Bonsiepe).....	51
3.1 Estructuración del problema.....	52
3.1.1 Localización de una necesidad.....	52
3.1.2. Valoración de la necesidad.	52
3.1.3. Análisis del problema respecto a su justificación.....	52
3.1.4. Definición del problema en términos generales.....	52
3.1.5. Precisión del problema.....	53
3.1.6. División de problemas en subproblemas.....	53
3.1.7. Jerarquización de los problemas.....	55
3.1.8. Análisis de soluciones existentes.....	55
3.2. Diseño.....	56
3.2.1 Desarrollo de alternativas o ideas básicas.....	56
3.2.2. Examen de alternativas.....	59
3.2.3. Selección de mejores alternativas.....	61
3.2.4. Desarrollar alternativa seleccionada.....	66
3.2.5. Construcción del prototipo.....	97

3.2.6	Evaluación del prototipo.....	105
3.2.7.	Introducir modificaciones eventuales.....	106
3.2.8.	Preparación de planos técnicos definitivos para la fabricación.....	110
3.2.9.	Elaboración de estudios de costos.	126
 CAPÍTULO 4 ANALISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES		127
4.1	Resultados.....	128
4.2	Conclusiones.....	130
 BIBLIOGRAFÍA		132

INDICE DE TABLAS Y FIGURAS.

- Tabla 1 . Contracción volumétrica para diferentes metales de fundición debida a la contracción por solidificación y contracción del sólido. Pág. 23.*
- Tabla 2 . Datos para la solución de la velocidad angular del molde. Pág. 83.*
- Tabla 3 . Control de datos de tiempo y temperatura durante la operación del equipo. . Pág.109.*
- Tabla 4 . Estudio de costos del equipo. Pág.126.*
-
- Figura 1 . Corazón para fundición en molde de arena. Pág.4.*
- Figura 2 . Clasificación para los procesos de fundición. Pág. 5.*
- Figura 3 . Molde de fundición en arena y posible diseño de sujetador. Pág.6.*
- Figura 4 . Tipos de modelo. Pág.7.*
- Figura 5 . Esquema de los pasos de producción en una operación típica de fundición en arena. Pág.10.*
- Figura 6 . Corazón empleado en el proceso de fundición de bloques de motor de BMW. Pág.10.*
- Figura 7 . Un método común para fabricar moldes de cascarón, llamado técnica de volteo. Pág.11.*
- Figura 8 . Fundición en molde consumible. Pág.12.*
- Figura 9 . Molde de yeso para fundición. Pág.13.*
- Figura 10 . Esquema explicativo de la fundición por revestimiento. Pág.14.*
- Figura 11 . Fundición de aluminio en moldes permanentes. Pág.16.*
- Figura 12 . Esquema de la fundición a presión en moldes permanentes. Pág.16.*
- Figura 13 . Fundición en cámara caliente. Pág.17.*
- Figura 14 . Ciclo de la fundición en cámara fría. Pág.18.*
- Figura 15 . Curva de enfriamiento para un metal puro durante la solidificación. Pág.20.*
- Figura 16 . Diagrama de fase y curva de enfriamiento. Pág.21.*
- Figura 17 . Etapas de contracción en el proceso de fundición. Pág.22.*
- Figura 18 . Llenado incompleto. Pág.24.*
- Figura 19 . Junta fría. Pág.24.*
- Figura 20 . Gránulos fríos. Pág.25.*
- Figura 21 . Cavidad por contracción. Pág.25.*

- Figura 22 . *Microporosidad. Pág.26.*
- Figura 23 . *Desgarramiento caliente. Pág.26.*
- Figura 24 . *Poros al interior de la fundición. Pág.27.*
- Figura 25 . *Burbujas en la fundición. Pág.27.*
- Figura 26 . *Desigualdades de espesor de las paredes. Pág.28.*
- Figura 27 . *Desmoronamiento en zona marginal y abombamientos redondeados. Pág.28.*
- Figura 28 . *Rotación de la masa alrededor de un eje vertical. Pág.31.*
- Figura 29 . *Rotación de la masa alrededor de un eje vertical, al aumentar la velocidad angular. Pág.37.*
- Figura 30 . *Rotación de la masa alrededor de un eje horizontal. Pág.41.*
- Figura 31 . *Disposición de la fundición centrífuga real. Pág.49.*
- Figura 32 . *Fundición semicentrífuga. Pág.49.*
- Figura 33 . *Fundición centrifugada. Pág.50.*
- Figura 34 . *Propuesta inicial básica del diseño del molde. Pág.61.*
- Figura 35 . *Propuesta inicial básica del diseño de la transmisión. Pág.62.*
- Figura 36 . *Propuesta inicial básica del diseño de soporte y estabilidad. Pág.63.*
- Figura 37 . *Ejemplificación del funcionamiento del sistema de soporte y estabilidad. Pág.63.*
- Figura 38 . *Propuesta inicial básica del sistema de precalentamiento del molde. Pág.64.*
- Figura 39 . *Ejemplificación del proceso de calentamiento del molde. Pág.64.*
- Figura 40 . *Propuesta inicial básica del sistema de vaciado. Pág.65.*
- Figura 41 . *Propuesta inicial básica de la carcasa de seguridad. Pág.65.*
- Figura 42 . *Medidas teóricas del molde y sus tapas en [mm]. Pág.67.*
- Figura 43 . *Dimensiones del costado del molde ensamblado en [mm]. Pág.68.*
- Figura 44 . *Dimensiones del centro del molde ensamblado en [mm]. Pág.69.*
- Figura 45 . *Dimensiones para las guías del molde en [mm]. Pág.70.*
- Figura 46 . *Dimensiones teóricas de la fundición de aluminio en [mm] a 726 [°C]. Pág.73.*
- Figura 47 . *Gráfica de la densidad del aluminio en función de la temperatura Pág.74.*
- Figura 48 . *Aceleración para un movimiento circular. Pág.75.*
- Figura 49 . *Chumacera del mandril en Solid Edge. Pág.82.*

- Figura 50 . *Propuesta del diámetro mínimo de las poleas de transmisión. Pág.82.*
- Figura 51 . *Esquema de la transmisión para el cálculo de la polea del motor en [mm]. Pág.83.*
- Figura 52 . *Propuesta de la altura para la calza de las chumaceras en [mm]. Pág.85.*
- Figura 53 . *Dimensiones para la base de las chumaceras en [mm]. Pág.85.*
- Figura 54 . *Dimensiones para las poleas del sistema de soporte y estabilidad en [mm]. Pág.86.*
- Figura 55 . *Dimensiones para las partes del eje de los rodamientos del sistema de soporte y estabilidad en [mm]. Pág.86.*
- Figura 56 . *Ensamble en Solid Edge del rodamiento y las partes de su eje. Pág.87.*
- Figura 57 . *Dimensiones para las poleas de transmisión en [mm]. Pág.87.*
- Figura 58 . *Posición del molde sobre las poleas de la transmisión y el sistema de soporte y estabilidad. Dimensiones en [mm]. Pág.88.*
- Figura 59 . *Dimensiones de las placas y los ángulos de las bases del sistema de soporte y estabilidad. Pág.89.*
- Figura 60 . *Ensamble de las poleas del sistema de soporte y estabilidad con sus bases. Pág.89.*
- Figura 61 . *Dimensiones de interés para el diseño de la base de la polea superior del sistema de soporte y estabilidad en [mm]. Pág.90.*
- Figura 62 . *Dimensiones de interés de la sección A de la base de la polea superior en [mm]. Pág.90.*
- Figura 63 . *Dimensiones de las soleras para la sección B de la base de la polea superior en [mm] Pág.91.*
- Figura 64 . *Ejemplificación del ensamble de la polea superior con su base y el resorte tensor. Pág.91.*
- Figura 65 . *Ensamble de las poleas de soporte y estabilidad, el mandril y el molde. Pág.92.*
- Figura 66 . *Vista superior del ensamble de las poleas de soporte y estabilidad, el mandril y el Molde. Pág. 92.*
- Figura 67 . *Ensamble del equipo con la base principal. Pág.93.*
- Figura 68 . *Dimensiones de la base principal en [mm]. Pág.93.*
- Figura 69 . *Dimensiones del sistema de vaciado en [mm]. Pág.94*
- Figura 70 . *Dimensiones de la base para el sistema de vaciado en [mm]. Pág.95.*
- Figura 71 . *Pistola de aire caliente que se empleará para la etapa de precalentamiento. Pág.95.*

- Figura 72 . Ejemplificación de la carcasa colocada en el dispositivo. Pág.96.
- Figura 73 . Medidas de interés para la fabricación de la carcasa en [mm]. Pág.97.
- Figura 74 . Molde terminado Pág.98.
- Figura 75 . Tapas del molde. Pág.98.
- Figura 76 . Poleas del sistema de soporte y estabilidad. Pág.99.
- Figura 77 . Ejes de las poleas del sistema de soporte y estabilidad. Pág.99.
- Figura 78 . Poleas de transmisión. Pág.100.
- Figura 79 . Polea inferior ensamblada a su base. Pág.100.
- Figura 80 . Polea superior ensamblada a su base. Pág.101.
- Figura 81 . Eje de transmisión con sus componentes y las poleas de transmisión. Pág.102.
- Figura 82 . Sistema de vaciado. Pág.102.
- Figura 83 . Base del sistema de vaciado. Pág.103.
- Figura 84 . Base principal del equipo. Pág.103.
- Figura 85 . Carcasa de seguridad. Pág.104.
- Figura 86 . Ensamble de los componentes del equipo. Pág.104.
- Figura 87 . Pieza seccionada obtenida en una de las primeras pruebas. Pág.105.
- Figura 88 . Rediseño del sistema de vaciado. Pág.106.
- Figura 89 . Defectos de porosidades durante el proceso usando pintura de grafito. Pág.107.
- Figura 90 . Porosidades causadas por presencia de metanol de la pintura de circonio. Pág.107.
- Figura 91 . Escurrimiento en la superficie interior del molde. Pág.108.
- Figura 92 . Pieza terminada de un proceso en el cual no se protegió el molde contra el desgaste por efecto de la difusión. Pág.128.
- Figura 93 . Metalografía de una sección del tubo obtenido por medio de fundición centrífuga (Microscopio Nikon Epiphot 200, 100 aumentos). Pág.129.
- Figura 94 . Metalografía de una sección del lingote del cual se obtuvo el material para las pruebas de validación del prototipo (Microscopio Nikon Epiphot 200, 100 aumentos) Pág.129.

TABLA DE SIMBOLOS.

Símbolo	Representación
H	Calor total requerido para llevar el metal a la temperatura de fusión en [J].
ρ	Densidad en [kg/m ³]
V	Volumen en [m ³]
C _s	Calor específico del material sólido en [J/kgK]
T _m	Temperatura de fusión del metal en [°C]
T ₀	Temperatura inicial del sistema en [°C]
H _f	Calor de fusión en [J/kg]
C _L	Calor específico del material líquido en [J/g°C]
T _v	Temperatura de vaciado en [°C]
TST	Tiempo de solidificación total en [min]
A	Área superficial en [cm ²]
V _p	Volumen de material fundido en [cm ³]
n	Exponente que toma un valor de 2
C _m	Constante del molde en [min/cm ²]
F	Fuerza en [N]
m	Masa en [kg]
v	Velocidad en [m/s]
R	Radio interior del molde en [m]
W	Peso en [N]
g	Gravedad en [m/s ²]
GF	Factor de gravedad
N	Velocidad angular en [rev/min]
D	Diámetro en [m]
V _{costado}	Volumen del costado del molde en [mm ³]
r _{ext}	Radio exterior en [mm]
r _{int}	Radio interior en [mm]
h	Espesor de las tapas en [mm]
V _{costados}	Volumen de los costados del molde en [mm ³]
r _{Text}	Radio exterior del tubo en [mm]
R _{Tint}	Radio interior del tubo en [mm]
h _T	Longitud del tubo sin contar la sección que ocupan las tapas en [mm]
V _{centro}	Volumen del centro del molde en [mm ³]
V _{guía}	Volumen retirado de las guías del molde en [mm ³]
r _{guía}	Radio del tubo en la sección de las guías en [mm]
h _g	Longitud de las guías en [mm]
V _{total}	Volumen total del molde en [mm ³]
V _{1[m]}	Volumen en un metro de tubo de 102[mm] cedula 40 en [m ³]

m_{molde}	Masa del molde en [kg]
α_{acero}	Coefficiente de dilatación lineal del acero en [1/°C]
β	Coefficiente de dilatación volumétrica
β_{acero}	Coefficiente de dilatación volumétrica del acero en [1/°C]
V_f	Volumen final en [m^3]
V_0	Volumen inicial en [m^3]
ΔT	Diferencia de temperatura en [°C]
$V_{150 [°C]}$	Volumen del molde a 150[°C] en [m^3]
V_{Tamb}	Volumen del molde a temperatura ambiente en [m^3]
Esp_{Al}	Espesor de pared teórico de la pieza terminada en [mm]
$r_{intmolde}$	Radio interior del molde en [mm]
$r_{inttapa}$	Radio interior de la tapa del molde en [mm]
$V_{Al726 [°C]}$	Volumen del aluminio a 726 [°C] en [m^3]
$r_{Al ext}$	Radio exterior del tubo de aluminio a 726[°C] en [mm]
$r_{Al int}$	Radio interior del tubo de aluminio a 726[°C] en [mm]
m_{Al}	Masa del aluminio máxima que se debe fundir
A_{int}	Área de la superficie interior del molde en [m^2]
a	Aceleración
a_{tan}	Aceleración tangencial
\vec{u}_{tan}	Vector unitario tangencial
a_n	Aceleración normal
\vec{u}_n	Vector unitario normal
v_T	Velocidad tangencial en [m/s^2]
r_{ext}	Radio exterior del molde en [m]
ω	Velocidad angular
P	Presión en [Pa]
S	Esfuerzo en la dirección tangencial en [MPa]
E	Espesor de pared en [m]
D	Diámetro del molde en [m]
m_{aire}	Masa del aire en [kg]
m_{acero}	Masa del acero en [kg]
T_{fusAl}	Temperatura de fusión del aluminio en [°C]
T_{molde}	Temperatura de precalentamiento del molde en [°C]
T_{amb}	Temperatura ambiente en [°C]
T_{eq}	Temperatura de equilibrio en [°C]
Cp	Capacidad térmica específica a presión constante en [$\frac{J}{kg \cdot C}$]
λ_{fusAl}	Entalpia de fusión del aluminio en [J/Kg]
Q_{sens}	Calor sensible en [J]
Q_{lat}	Calor latente en [J]
$V_{721 [°C]}$	Volumen del molde a 721[°C] en [m^3]
$r_{ext(721[°C])}$	Radio exterior del molde a 721[°C] en [m]

$r_{int(721[^\circ C])}$	Radio interior del molde a 721[°C] en [m]
$L(721[^\circ C])$	Longitud del molde a 721[°C] en [m]
$\rho_{Al(721[^\circ C])}$	Densidad del aluminio a 721[°C] en [kg/m ³]
$V_{Al(650[^\circ C])}$	Volumen del aluminio a 650 [°C] en [m ³]
$V_{Al(Tamb)}$	Volumen del aluminio a temperatura ambiente en [°C]

Objetivo.

Diseñar y fabricar un dispositivo didáctico de fundición centrífuga horizontal que pueda ser empleado en las prácticas del laboratorio de fundición del Departamento de Materiales y Manufactura de la Facultad de Ingeniería, con la intención de ejemplificar el proceso realizado en la industria.

Introducción. [1][2]

La fundición de los metales se remonta a cerca de 4000 a. C. El oro fue el primer metal que descubrieron y utilizaron las civilizaciones antiguas, era maleable y podía martillarse para darle forma fácilmente a temperatura ambiente. Al parecer no fue necesario emplear otros métodos para su formado.

Posteriormente, el descubrimiento del cobre dio pie a la necesidad de la fundición. Aunque el cobre podía forjarse para darle forma, el proceso era más difícil (debido al endurecimiento por deformación) y se limitaba a formas relativamente simples. Los historiadores creen que pasaron cientos de años antes de que el proceso de fundición de cobre se realizara por primera vez, probablemente sucedió por accidente durante la reducción del mineral de cobre antes de prepararlo para fabricar utensilios de martilleo. Entonces nació el arte de la fundición gracias a la inventiva del hombre. Es probable que el descubrimiento ocurriera en Mesopotamia y la tecnología se haya extendido rápidamente por todo el mundo antiguo.

Con la fundición se pudieron hacer formas mucho más complejas que por simple martilleo. Se fabricaron armas y herramientas más sofisticadas, se moldearon implementos y ornamentos más detallados y la joyería de oro se hizo más refinada y valiosa que con los metales previos. Al descubrir que la mezcla de cobre y estaño (bronce) producía fundiciones mejores fue cuando se empezaron a utilizar las aleaciones por primera vez.

La religión proporcionó una importante influencia durante la Edad Media, perpetuando las habilidades de los fundidores, pues la construcción de catedrales e iglesias requería la fundición de campanas, hecho que contribuyó a que el proceso se trasladara de los terrenos del arte hacia el campo de la tecnología, llegando a mejoras importantes en la fundición y en las técnicas de fabricación de moldes.

Otro producto importante plenamente relacionado con el desarrollo de la fundición fue el cañón. El primer cañón fundido fue hecho en Gante Bélgica, en el año de 1313. Fue hecho de bronce y el alma del cañón se formó utilizando un corazón durante la fundición. Debido a lo rugoso de la superficie del alma así fabricada, este antiguo cañón no era muy preciso, y tenía que dispararse a una distancia relativamente corta para ser efectivo. Pronto se comprendió que la precisión y el alcance podrían

mejorarse alisando el alma con procedimientos de maquinado de la superficie, este primer proceso fue llamado perforado.

Cuando los españoles llegaron a América, ésta se hallaba, en términos generales, en la Edad de Bronce. Mucho ha intrigado a los historiadores que no se hubiera pasado a la Edad del Hierro, ya que por sus avances en otras ramas se podría prever que disponían de conocimientos para haberlo hecho. Si comparamos el desarrollo de la metalurgia americana con la europea o la asiática, es evidente que la primera debió estar atrasada, desde el punto de vista temporal, respecto a las dos últimas entre 2,000 y 3,000 años.

Algunas culturas mesoamericanas, tales como la purépecha, prefirieron fabricar los objetos utilitarios tales como hachas, escoplos, cinceles, buriles, coas, agujas, alfileres, anzuelos, etc, en metal, mientras que otras culturas siguieron utilizando herramientas de piedra. Los metales, en Mesoamérica, especialmente las aleaciones de cobre, fueron muy utilizados en la elaboración de herramientas.

La industria de la fundición en México genera el 78 % de su producción total para la industria automotriz, un 8.3 % en maquinaria agrícola, un 3.8 % en industria en general y el resto en otros rubros productivos. De esta producción más del 70% se desarrolla en el norte del país.

La producción a nivel estatal se desarrolla de la siguiente manera:

1. Nuevo León, 144 procesos, con más de 222 mil toneladas anuales de piezas fundidas.
2. Coahuila, 64 procesos y más 198 mil toneladas.
3. Edo. Mex., 278, pero todos ellos en talleres pequeños que no figuran en tonelaje.
4. Puebla, 50 procesos de fundición.
5. Querétaro, 32 procesos.

En México, esta industria está conformada por unas mil fundidoras, de las cuales el 95% son pequeñas y medianas, y el resto son grandes corporaciones. Todas estas realizan al año entre mil 100 y mil 500 fundiciones, esto sin tomar en cuenta los procesos que se realizan en pequeños talleres que operan de manera informal o improvisada.

Pese a que este ramo de la industria ha sorteado diversas crisis, la que más le ha afectado es la caída en el mercado automotriz, dado a que el alto porcentaje de piezas que se funden van dirigidas a este rubro, llegando a producir a solo el 30 % de su capacidad a causa del fuerte desplome de la demanda estadounidense durante los primeros meses del 2009, lográndose recuperar para finales de ese mismo año con una producción de más del 75 % en relación a su capacidad instalada.

CAPITULO 1.

GENERALIDADES SOBRE LOS PROCESOS DE FUNDICIÓN.



CAPÍTULO 1 GENERALIDADES SOBRE LOS PROCESOS DE FUNDICIÓN

1.1 Clasificación de los procesos. [3][4]

Mediante el colado se manufacturan muchas piezas y componentes, incluyendo cámaras, carburadores, motores, cigüeñales, equipo agrícola y para ferrocarriles, herramientas eléctricas, cañones de rifle, sartenes, etc...

Hoy en día dos tendencias están teniendo un impacto de importancia en la industria, la primera es la constante mecanización y automatización del proceso de fundición y la segunda es la creciente demanda de piezas fundidas de alta calidad, con tolerancias dimensionales cerradas y sin defectos.

La fabricación de piezas por fundición es un proceso que consiste en vaciar un metal fundido al interior de un molde (figura 1), con el propósito de llenar sus cavidades para que una vez solidificado el meta pueda extraerse la pieza terminada. Este proceso de fabricación es posible porque los metales en estado líquido tienen una buena fluidez, elevada densidad y son buenos conductores del calor.



Figura 1. Corazón para fundición en molde de arena.

La siguiente figura muestra la clasificación de los procesos de fundición dependiendo el tipo de molde y modelo según sea el caso.

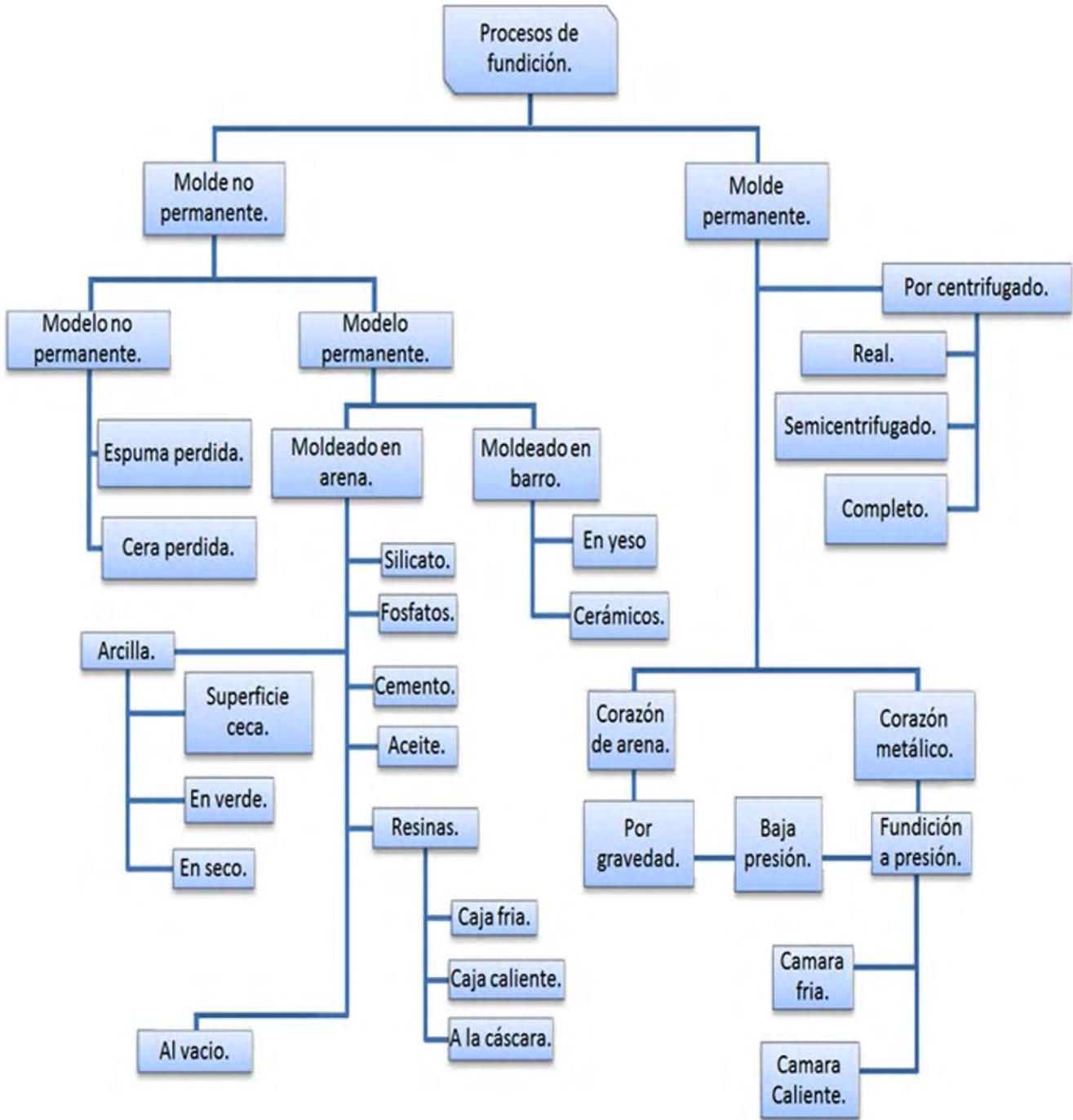


Figura 2. Clasificación para los procesos de fundición.

1.1.1 Tipos de molde

Moldes desechables. Fabricados de arena, yeso, cerámica y materiales similares. Estos materiales son por lo general mezclados con varios aglutinantes o agentes de unión. Al ser materiales refractarios son capaces de resistir las altas temperaturas de los metales fundidos. Una vez solidificada la pieza colada el molde es roto para retirar la pieza.

Moldes permanentes. Hechos de metales que conservan su resistencia a altas temperaturas, se utilizan de manera repetida y están diseñados de forma que la pieza pueda ser retirada con facilidad y reutilizar el molde. Dado que los moldes de metal son mejores conductores del calor que los moldes no metálicos, la solidificación queda sometida a una velocidad de enfriamiento más elevada, lo que a su vez afecta la microestructura y el tamaño de grano en la fundición.

Moldes compuestos. Fabricados de dos o más materiales compuestos como arena, grafito y metal, combinando las ventajas de cada material. Se utilizan en varios procesos de fundición para mejorar la resistencia del molde, controlar la velocidad de enfriamiento y optimizar la economía general del proceso.

Una parte importante de los moldes de fundición en arena es la mazarota. Esta alimenta de metal líquido al proceso durante el enfriamiento y compensar así la contracción por solidificación. La mazarota debe permanecer fundida hasta después de que la fundición solidifique (figura 3).

Los modelos definen la forma externa de la fundición. Si posee superficies internas, se necesita un corazón para definir las. Un corazón es un modelo de tamaño natural de las superficies interiores de la parte. El tamaño real del corazón debe incluir las tolerancias para contracción y maquinado. El corazón se inserta en la cavidad del molde antes del vaciado. El corazón puede o no requerir soportes que lo sostengan en su posición, estos soportes llamados sujetadores se hacen de un metal que posea una temperatura de fusión mayor a la del metal a fundir. La porción de los sujetadores que sobresalen de al fundición se recortan después (figura 3).

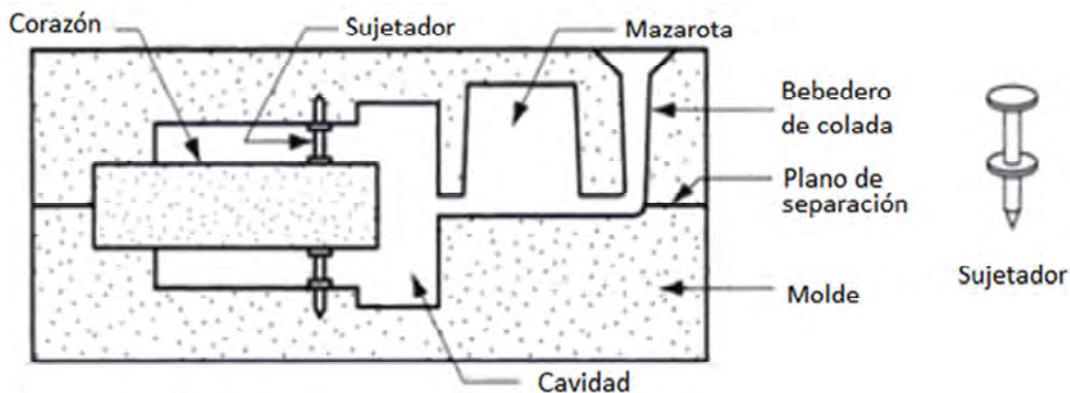


Figura 3. Molde de fundición en arena y posible diseño de sujetador.

1.1.2 Tipos de modelo.

Modelo permanente. Empleados para fundición en arena y cáscara.

Los materiales que se emplean para los modelos incluyen la madera, los plásticos y los metales. La madera es un material común para modelos permanentes, por la facilidad de trabajarla y darle forma. Sus desventajas son la tendencia a la torsión y al desgaste por la abrasión de la arena que se compacta a su alrededor, lo cual limita el número de veces que puede usarse. Los modelos de metal son más costosos pero duran más, mientras que los plásticos representan un término medio entre la madera y los metales. La selección del material apropiado depende en gran medida de la cantidad total de fundiciones a producir.

Existen varios tipos de modelos permanentes. El más simple está hecho de una pieza, llamado modelo sólido, que tiene la misma forma de la fundición y los ajustes en tamaño por contracción y maquinado. Su manufactura es fácil pero la complicación surge cuando se utiliza para hacer el molde por lo que los modelos sólidos se usan solo para producciones de muy baja cantidad (Figura 4.a).

Los modelos divididos constan de dos piezas que se separan a lo largo de un plano, el cual coincide con la separación del molde. Estos modelos son apropiados para partes de forma compleja y cantidades moderadas de producción (Figura 4.b).

Para altos volúmenes de producción, se emplean los modelos con placa de acoplamiento o los modelos de doble placa (superior e inferior). En un modelo con placa de acoplamiento las dos piezas del modelo se adhieren a los lados opuestos de una placa de madera o metal. Los agujeros de la placa permiten una alineación precisa entre la parte superior y el fondo del molde. Los modelos de doble placa de acoplamiento son similares, excepto que las mitades del patrón dividido se pegan a placas separadas, de manera que las secciones de la parte superior e inferior del molde se puedan fabricar independientemente, en lugar de usar la misma herramienta para ambas. Los modelos con una o doble placa se muestran en la siguiente figura.

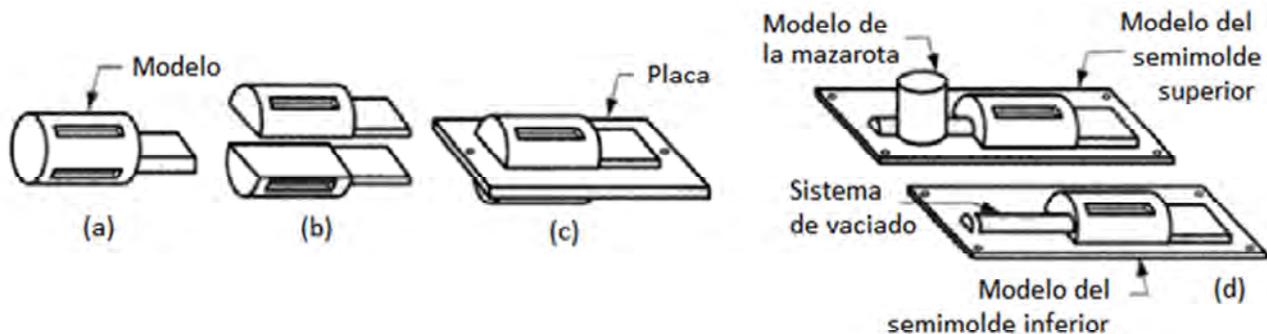


Figura 4. Tipos de modelo: a) modelo sólido, b) modelo dividido, c) modelo con placa de acoplamiento y d) modelo de doble placa.

Modelo desechable. Empleados en fundición en cera perdida y en el proceso de fundición en moldeo con poliestireno. Estos modelos se hacen inyectando cera o plástico en un dado de metal con la forma del modelo.

Modelo de cera. Cuando se emplea cera, se inyecta en un dado de metal con la forma del modelo. Una vez que se tienen los modelos éstos son recubiertos de un material refractario. Los modelos de cera se eliminan en una etapa previa a la de vaciado, mientras que los modelos de poliestireno eliminan este material durante la etapa de vaciado.

Modelo de poliestireno. Estos se elaboran colocando perlas de poliestireno crudo desechable conteniendo una baja cantidad de pentano (un hidrocarburo volátil), en un dado precalentado que por lo general está hecho de aluminio. El poliestireno se expande y toma la forma de la cavidad del dado. El dado se deja enfriar y posteriormente se retira la pieza de poliestireno.

1.1.3 Fuerzas de llenado.

Esta clasificación divide el proceso en:

a) Fuerzas naturales. (por gravedad)

En estos procesos el metal fundido fluye a causa de los efectos de la fuerza de gravedad

b) Fuerzas adicionales. (presión, centrifugado)

Presión. Su aplicación es para metales no féreos. El metal en estado pastoso se introduce a presión en moldes permanentes de varias piezas. Durante la solidificación se mantiene la presión. Este método ofrece piezas terminadas con una precisión de dimensiones que llega a 0.1 mm para un número de piezas de 400 y más por hora.

Centrifugado. Como su nombre implica, utiliza la fuerza de inercia causada por la rotación para distribuir el metal fundido en las cavidades del molde. Con este proceso se consigue una baja porosidad y grano fino.

1.2 Descripción general de los procesos de fundición. [3][4]

1.2.1 Fundición en arena.

El método tradicional de vaciado de metales es en moldes de arena y ha sido usado durante milenios. Explicado brevemente, la fundición en arena consiste en colocar un modelo con la forma de la pieza deseada en arena para crear una impresión.

El molde contiene el sistema de vaciado y de mazarota, pero si la fundición tiene superficies internas, como partes huecas o agujeros debe incluirse también un corazón, posteriormente se llena la cavidad resultante de metal fundido, se deja el metal enfriar hasta que solidifique. Como el molde se sacrifica para remover la fundición se tiene que hacer un nuevo molde de arena por cada parte a producir

Posteriormente la fundición pasa por un proceso de limpieza e inspección, pero en ocasiones requiere un tratamiento térmico para mejorar sus propiedades metalúrgicas.

Aunque el origen de la fundición en arena se remonta a tiempos lejanos, sigue siendo la forma más prevaleciente de fundición. La producción por medio de este método representa la mayor parte del tonelaje de la fundición.

Casi todas las aleaciones pueden fundirse en arena; de hecho, es uno de los pocos procesos que pueden usarse para metales con altas temperaturas de fusión, como son el acero, el níquel y el titanio. Su versatilidad permite fundir partes muy pequeñas o de grandes dimensiones y en cantidades de producción que van de una pieza a millones de éstas.

La mayor parte de operaciones de fundición en arena usan arena de sílice (SiO_2), que es el producto de la desintegración de las rocas a lo largo de periodos de tiempo extremadamente largos. La arena es económica y adecuada como material de molde debido a su resistencia a altas temperaturas.

Por medio de este proceso se puede colar prácticamente cualquier metal, no hay límite de tamaño, forma o peso y el costo de herramental es bajo, un ejemplo se muestra en la figura 6. Presenta problemas al requerir un buen acabado, pues este es áspero y requiere de amplias tolerancias.

La siguiente figura indica uno a uno los pasos de producción en una operación típica de fundición en arena.

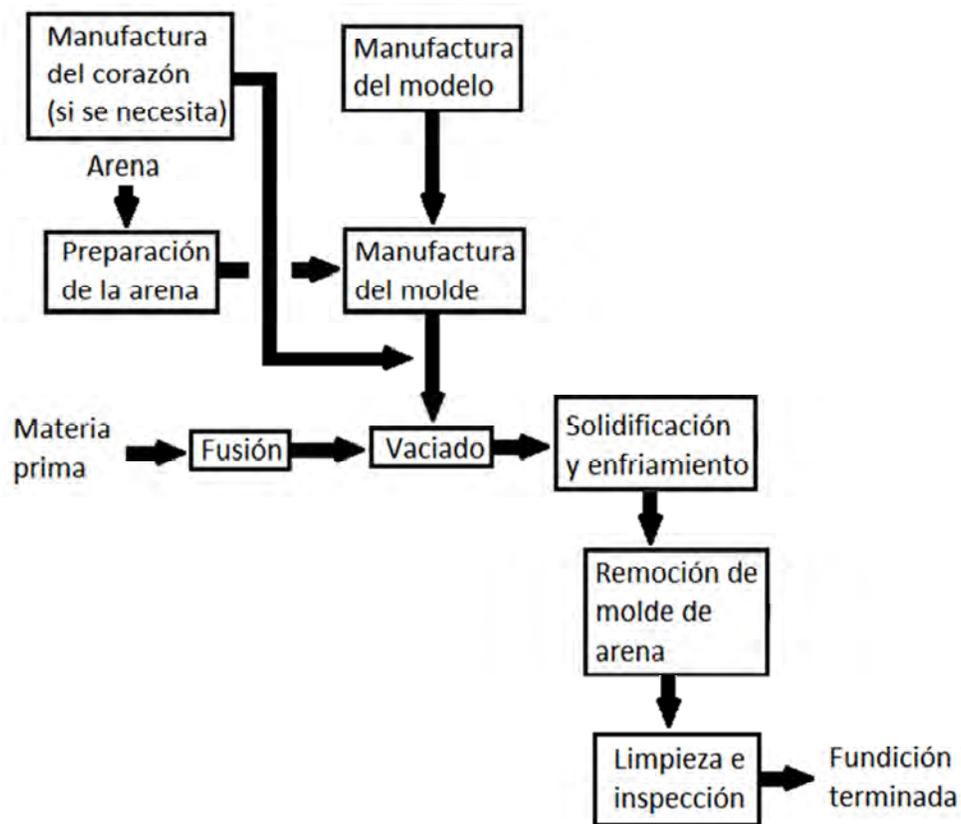


Figura 5. Esquema de los pasos de producción en una operación típica de fundición en arena.



Figura 6. Corazón empleado en el proceso de fundición de bloques de motor de BMW.

1.2.2 Moldeo en cáscara.

Se desarrolló por primera vez en los años cuarenta y ha crecido de manera significativa ya que su costo es reducido y se obtienen buenos resultados. En este proceso, un modelo hecho de un material ferroso o aluminio es calentado entre 175 y 370 [°C] y posteriormente es recubierto con un agente separador como el silicón y se sujeta a una caja o cámara. La caja contiene arena fina mezclada con aglutinante de resina termoestable que recubre las partículas de arena. La caja se voltea o la mezcla de arena se sopla sobre el modelo, permitiendo que el arena recubra dicho modelo. Todo el conjunto se coloca en un horno durante un periodo de tiempo para completar el curado de la resina, el cascarón se endurece alrededor del molde y es retirado mediante bujes de eyección, obteniendo dos medios cascarones, mismos que se pegan o se juntan en preparación para el vaciado (Figura 7).

Éste método permite piezas con buena precisión dimensional y acabado superficial, además de una alta velocidad de producción. Sus limitaciones son la restricción en el tamaño de la pieza y requiere de moldes y equipos costosos.

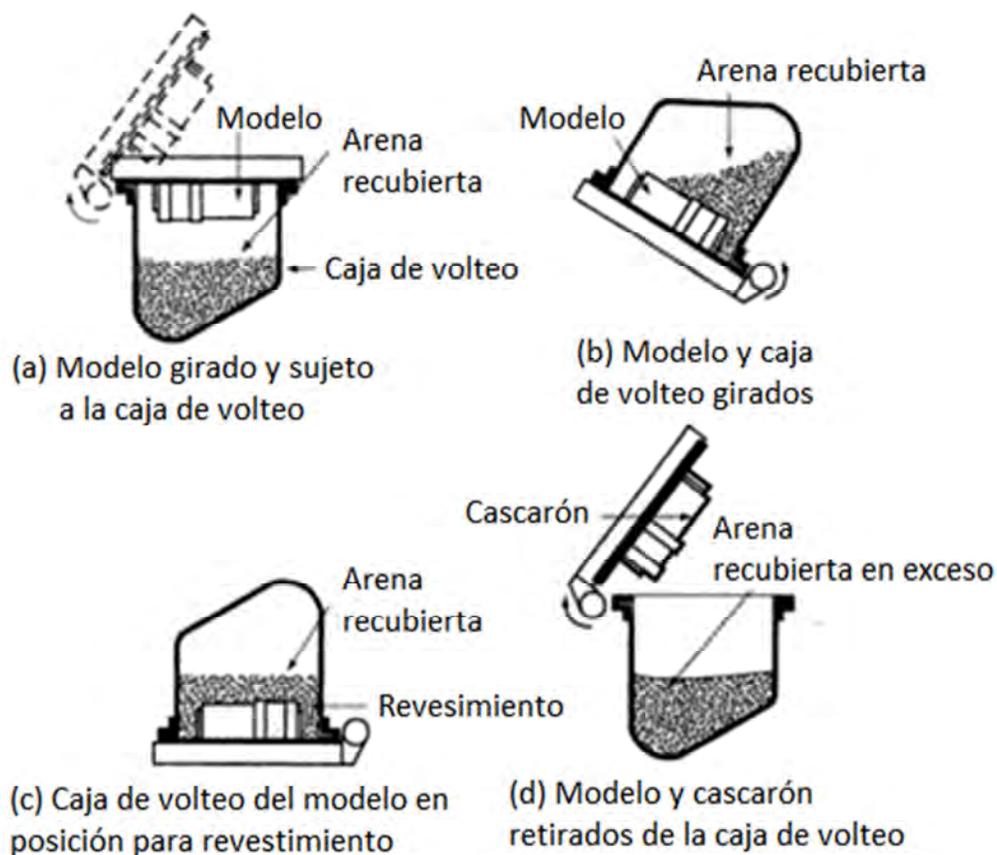


Figura 7. Un método común para fabricar moldes de cascarón, llamado técnica de volteo.

1.2.3 Fundición en molde consumible (perdido).

Ampliamente utilizado en la industria automotriz. Utiliza un modelo de poliestireno que se recubre con un barro refractario base agua colocándose en una caja de moldeo. La caja se llena de arena. Sin retirar el poliestireno se vacía el metal fundido en el molde. Esta acción de inmediato vaporiza el modelo y llena la cavidad del molde, reemplazando completamente el espacio antes ocupado por el poliestireno (Figura 8).

Por este método se pueden hacer fundiciones sin límites dimensionales y se pueden obtener formas complejas, sin embargo los moldes poseen una baja resistencia y pueden resultar costosos para pequeñas cantidades de producción.

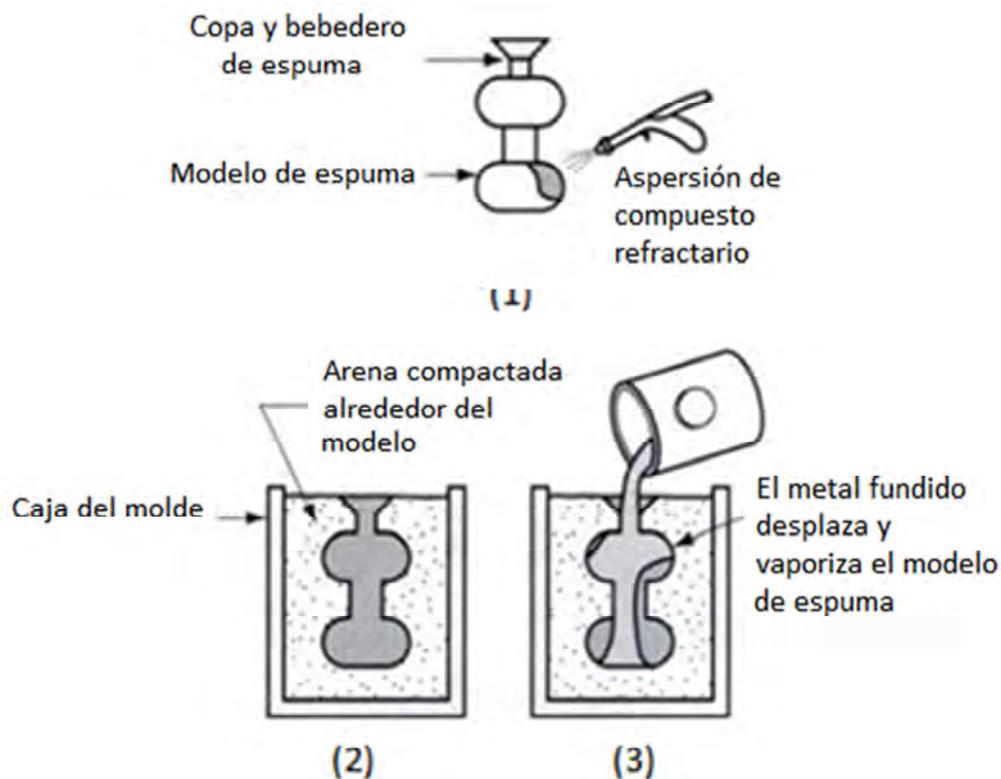


Figura 8. Fundición en molde consumible: (1) el modelo se recubre con un compuesto refractario; (2) posteriormente se coloca en la caja del molde y se llena de arena; (3) se vacía el metal fundido, el cual vaporiza la espuma de poliestireno ocupando el espacio de esta.

1.2.4 Fundición en molde de yeso (Figura 9).

El molde es a base de yeso con la adición de talco y harina de sílice para mejorar la resistencia y controlar el tiempo requerido para el curado del yeso. Estos componentes se mezclan con agua y el barro resultante se vacía sobre el modelo. Una vez curado el yeso, se retira el patrón y se deja secar el molde entre 120 y 260 [°C] para eliminar por completo la humedad. Las mitades del molde se ensamblan para formar la cavidad del mismo y se precalientan hasta aproximadamente 120 °C. El metal fundido es vaciado entonces en el molde. Dado que los moldes de yeso tienen una muy baja permeabilidad, los gases que se forman durante la solidificación del metal no pueden escaparse, motivo por el cual el metal fundido es vaciado a presión o en un vacío.

Este método permite formas complicadas con una precisión dimensional y acabados buenos, además de una baja porosidad, pero está limitado a metales no ferrosos, con un bajo tamaño y volumen de producción, con un tiempo de fabricación del molde relativamente largo.



Figura 9. Molde de yeso para fundición.

1.2.5 Fundición en molde cerámico.

Este proceso es similar al de molde de yeso, con la excepción de que utiliza materiales refractarios para el molde adecuados para aplicaciones de altas temperaturas. El barro es una mezcla de zirconio de grano fino ($ZrSiO_4$), óxido de aluminio y sílice fundido, que se mezclan con agentes aglutinantes y se vacían en el modelo previamente colocado en una caja de moldeo. El modelo puede estar hecho de madera o metal. Después del endurecimiento, los moldes se retiran, se queman para eliminar toda materia volátil y se hornean. La resistencia a altas temperaturas de los materiales refractarios permite que estos moldes se utilicen en el colado de aleaciones ferrosas y otras de altas temperaturas de fusión, de aceros inoxidables y de aceros para herramienta.

Este método permite formas complejas, tolerancias estrechas y un buen acabado superficial, sin embargo, el tamaño de la pieza es limitado.

1.2.6 Fundición por revestimiento.

También llamado a la cera perdida, fue utilizado por primera vez durante el periodo entre el 4000 y el 3000 a.C. Como se muestra en la siguiente figura, el modelo se hace inyectando cera o plástico en un dado de metal con la forma del modelo. Este después se sumerge en un barro de material refractario. Una vez seco este recubrimiento inicial, el patrón se recubre varias veces a fin de aumentar su espesor. El molde de una pieza se seca al aire y se calienta a una temperatura entre 90 y 175 °C. Se deja en una posición invertida durante aproximadamente 12 horas para fundir la cera. El molde se quema entonces a una temperatura entre 650 y 1050°C por aproximadamente 4 horas, dependiendo el metal que se va a fundir, a fin de eliminar el agua de cristalización (agua químicamente combinada) y quemar cualquier cera residual. Una vez vaciado y solidificado el metal se rompe el molde y se retira la fundición.

Este método es útil para piezas complejas, con acabado superficial y precisión excelentes, prácticamente se puede fundir cualquier metal, sin embargo el tamaño de la pieza está limitado además, los moldes, los modelos y la mano de obra resultan costosos.

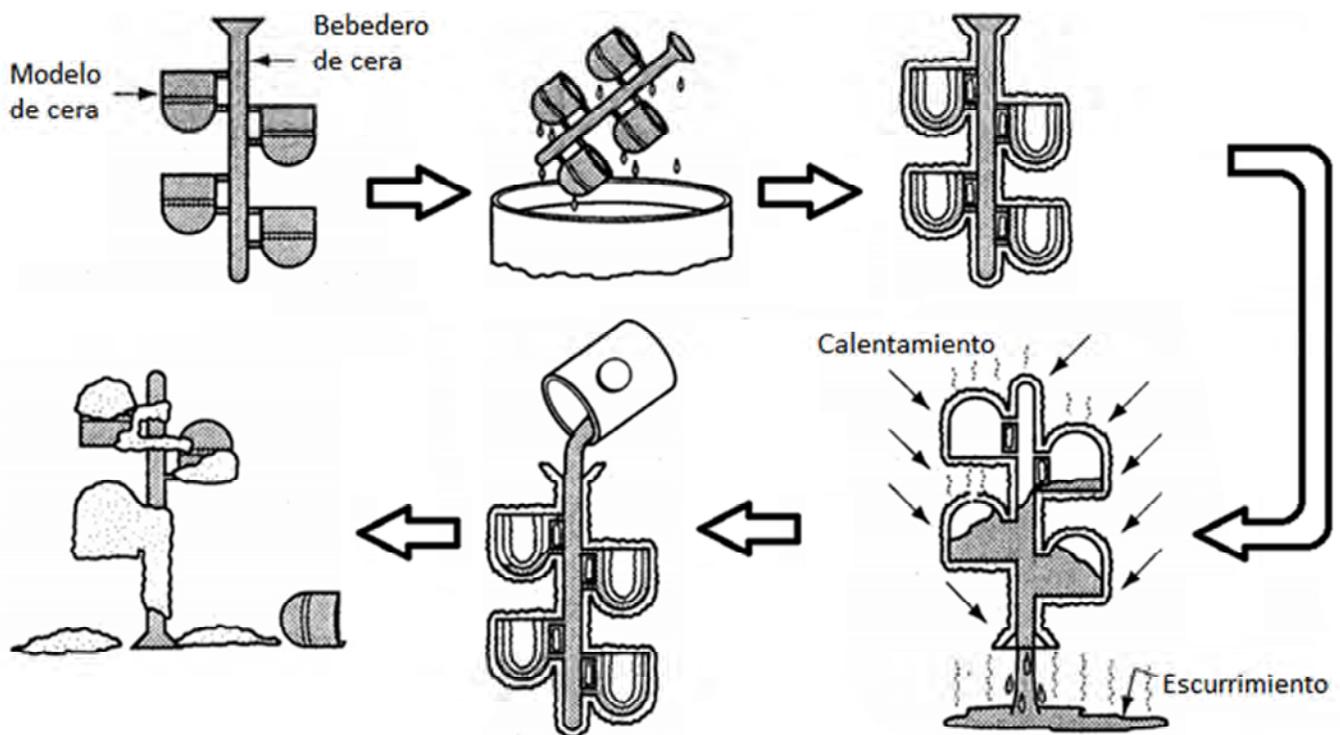


Figura 10. Esquema explicativo de la fundición por revestimiento.

1.2.7 Fundición al vacío.

Se moldea una mezcla de arena fina y de uretano sobre dados de metal que se cura con vapor de amina. El molde es sujeto después con un brazo robótico y se sumerge parcialmente en metal fundido que se encuentra en un horno de inducción. El metal se puede fundir al aire o en vacío.

El vacío reduce la presión del aire en el interior del molde a aproximadamente dos terceras partes de la presión atmosférica, succionando por tanto el metal fundido en las cavidades del molde a través de un canal de alimentación en la parte inferior del molde. El metal fundido se encuentra a una temperatura de 55[°C] superior a la temperatura líquidus; en consecuencia empieza a solidificarse dentro de una fracción de segundo. Una vez lleno el molde se retira del metal fundido.

1.2.8 Fundición en molde permanente.

Para este proceso se fabrican dos mitades de un molde de materiales como hierro colado, acero, bronce, grafito o aleaciones de metal refractario (Figura 11). La cavidad del molde y el sistema de canales de alimentación se maquinan en el molde y por tanto forman parte integral del mismo. Para producir piezas con cavidades internas, se colocan corazones hechos de metal o de agregados de arena en el molde antes de la fundición.

A fin de incrementar la vida de los moldes permanentes, las superficies de la cavidad del molde por lo general están recubiertas de un barro refractario o se rocían con grafito cada cierto número de coladas. Pueden ser necesarios eyectores mecánicos para la extracción de las piezas fundidas complejas.

Los moldes se sujetan juntos por medios mecánicos y se calientan a temperaturas entre los 150 y 200 [°C] para facilitar el flujo del metal y reducir el daño térmico a los dados. El metal fundido se vacía entonces por medio de canales de alimentación. Después de la solidificación se abren los moldes y se extrae la pieza colada. Para enfriar el molde se emplean medios especiales incluyendo el agua o el uso de aletas similares a las que se encuentran en los motores de motocicleta para enfriar el motor.

Por este método se obtiene precisión dimensional y un acabado superficial bueno, una porosidad baja y una alta velocidad de producción. El costo de los moldes resulta costoso, la forma y complejidad están limitadas y no es adecuado para metales con un alto punto de fusión.



Figura 11. Fundición de aluminio en moldes permanentes.

1.2.9 Fundición a presión.

En los procesos de molde permanente el metal fundido fluye hacia el interior de la cavidad del molde por gravedad. En el proceso de fundición a presión el metal fundido es obligado a fluir hacia arriba por presión de gas en un molde de grafito o metal. La presión se mantiene hasta que el metal se haya solidificado totalmente dentro del molde. El metal fundido también puede ser obligado a fluir hacia arriba mediante un vacío (Figura 12).

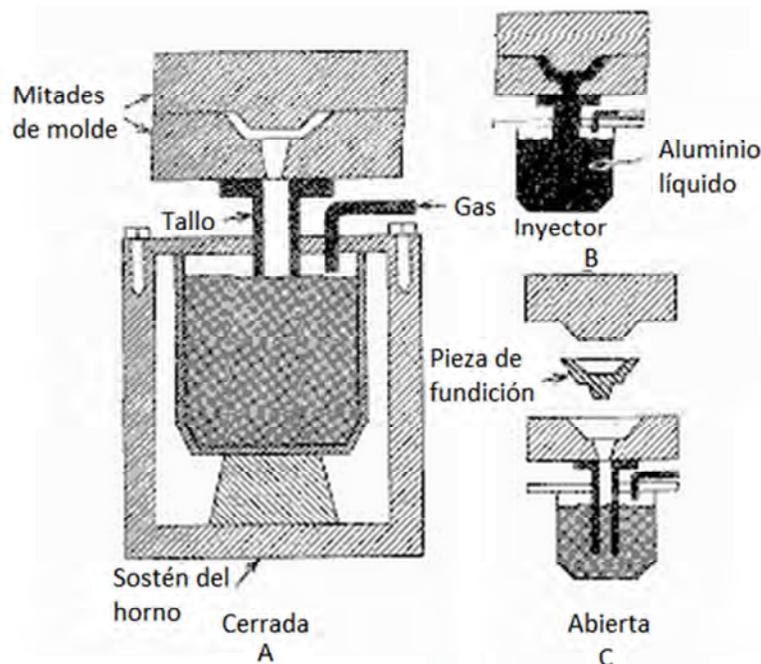


Figura 12. Esquema de la fundición a presión en moldes permanentes.

1.2.10 Fundición por inyección en matriz o dados.

Este es un ejemplo de la fundición en molde permanente. El metal fundido es forzado dentro de la cavidad de la matriz o dado a presiones que van de 0.7 a 700 MPa. Este método se divide en dos procesos: cámara caliente y cámara fría.

El proceso de cámara caliente involucra el uso de un pistón, que atrapa un cierto volumen de metal fundido y obliga a pasar a la cavidad de la matriz de vaciado a través de un cuello de cisne y una tobera. Las presiones de inyección son de hasta 35 MPa (Figura 13). El metal se mantiene a presión hasta que solidifica en la matriz de vaciado, la cual es enfriada con agua o aceite que fluye a través de canales en el interior de la matriz colada. La fundición en dados con cámara caliente impone una dificultad especial en el sistema de inyección, porque gran parte de dicho sistema queda sumergido en el metal fundido. Por esta causa, las aplicaciones del proceso quedan limitadas a metales de bajo punto de fusión, que no atacan químicamente al pistón y a otros componentes mecánicos. Estos metales incluyen al zinc, al estaño, al plomo y algunas veces al magnesio.

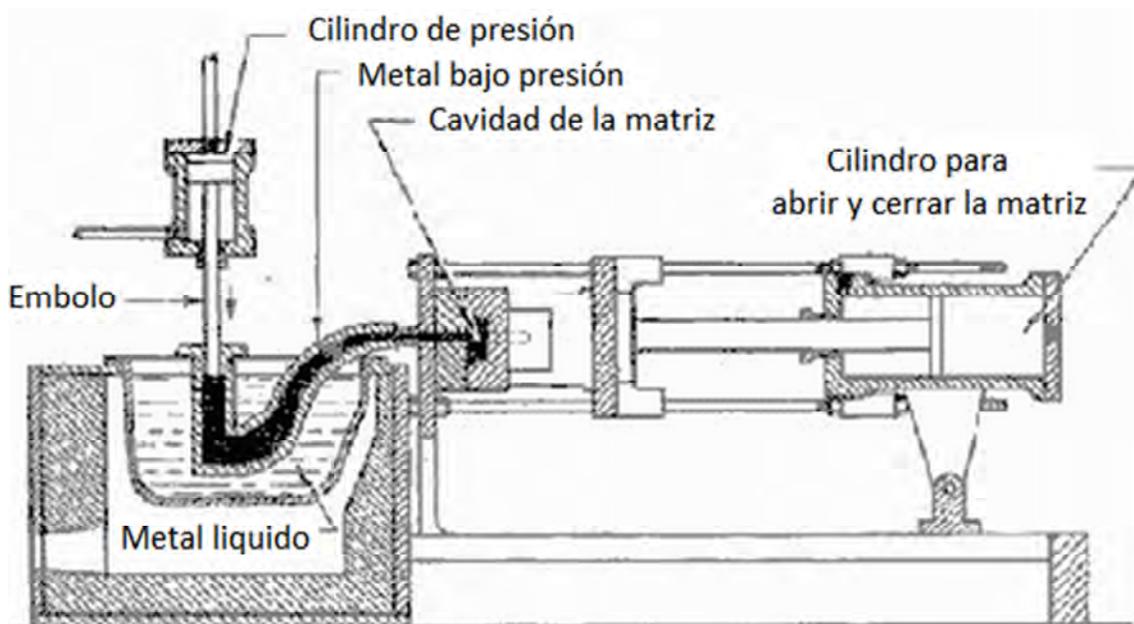


Figura 13. Fundición en cámara caliente.

En el proceso de cámara fría el metal fundido se vacía en el cilindro de inyección. La cámara de inyección no es calentada. El metal fundido es forzado en la cavidad de la matriz de vaciado a presiones en un rango usualmente de 20 a 70 MPa (Figura 14). La velocidad de producción no es tan

rápida con respecto a las máquinas de cámara caliente, debido a que es necesario una cuchara de colada para vaciar el metal líquido desde una fuente externa en la cámara. Las máquinas de cámara fría se usan típicamente para fundiciones de aluminio, latón y aleaciones de magnesio.

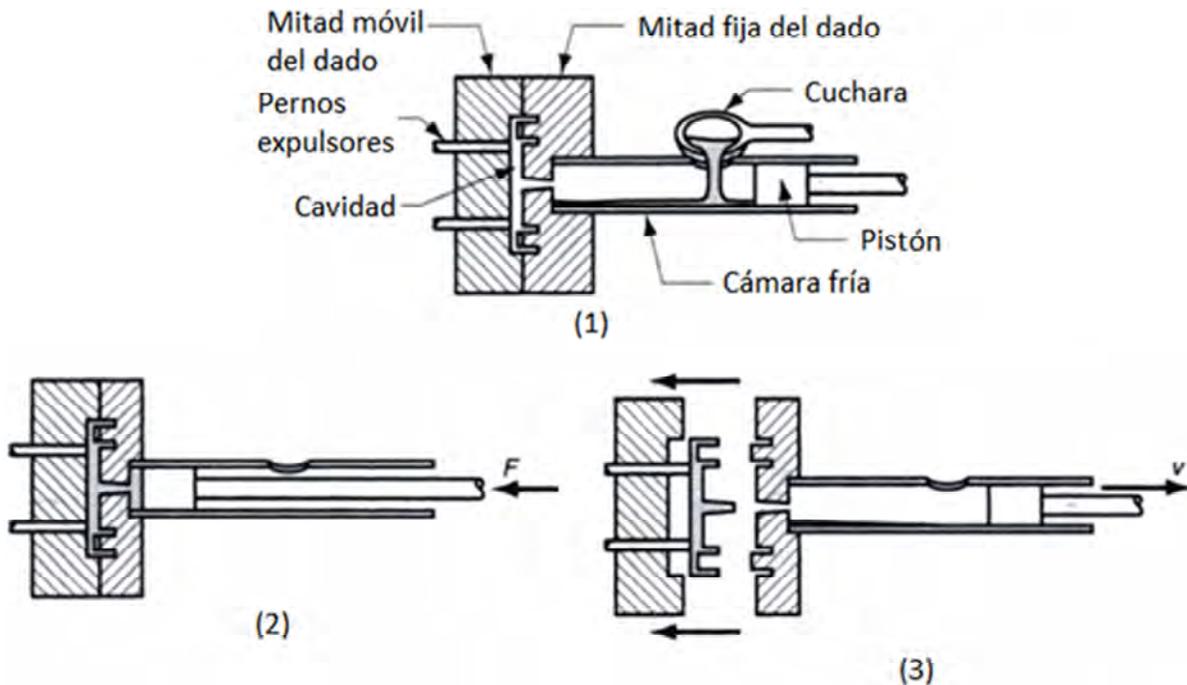


Figura 14. Ciclo de la fundición en cámara fría. (1) Se vacía el metal en la cámara con el dado cerrado y el pistón retraído; (2) el pistón fuerza al metal a fluir en el dado, manteniendo la presión durante el enfriamiento y la solidificación; y (3) se retrae el pistón, se abre el dado y se expulsa la fundición.

1.2.11 Fundición centrífuga.

La fundición centrífuga se refiere a varios métodos de fundición caracterizados por utilizar un molde que gira a alta velocidad para que la fuerza centrífuga distribuya el metal fundido en las regiones exteriores de la cavidad del dado. El grupo incluye: 1) fundición centrífuga real, 2) fundición semicentrífuga y 3) fundición centrifugada. Este método es económicamente apropiado para la fabricación de tubos, cuerpos cilíndricos y para fundir casquillos de cojinete. Por este proceso se obtienen grandes piezas cilíndricas, de buena calidad y alta velocidad de producción pero el equipo puede resultar costoso y la forma de la pieza es limitada. Se profundizará más sobre este método en el capítulo 2.

1.3 Fundición del metal y etapas de solidificación y contracción. [3][4][5][7]

1.3.1 Calentamiento del metal.

Se usan varias clases de hornos para calentar el metal a la temperatura de fusión. La energía calorífica requerida es la suma de 1) calor para elevar la temperatura hasta el punto de fusión, 2) calor de fusión para convertir el metal de sólido a líquido y 3) calor para elevar al metal fundido a la temperatura de vaciado. Esto se expresa como:

$$H = \rho V [C_s (T_m - T_0) + H_f + C_L (T_v - T_m)] \quad (\text{Ec. 1.1})$$

Donde:

H	Calor total requerido para llevar el metal a la temperatura de fusión en [J].
ρ	Densidad en [kg/m ³]
V	Volumen en [m ³]
C_s	Calor específico del material sólido en [J/kgK]
T_m	Temperatura de fusión del metal en [°C]
T_0	Temperatura inicial del sistema en [°C]
H_f	Calor de fusión en [J/kg]
C_L	Calor específico del material líquido en [J/g°C]
T_v	Temperatura de vaciado en [°C]

1.3.2 Temperatura de vaciado.

La máxima temperatura de fusión de aleaciones de aluminio se halla por debajo de los 800 [°C], generalmente entre 700 y 750 [°C]. La temperatura ideal de vaciado para aleaciones de aluminio es de un 10% mayor a la temperatura de fusión. Dentro de este rango de temperaturas el líquido fundido emite una radiación que no facilita determinar la temperatura por colorimetría.

1.3.3 Fluidez.

Las características de un metal fundido se describen frecuentemente con el término fluidez, una medida de la capacidad del metal para llenar el molde antes de enfriarse. La fluidez es inversa a la viscosidad, al incrementarse la viscosidad, la fluidez decrece. Los factores que afectan la fluidez son la temperatura de vaciado, la composición del metal, la viscosidad del metal líquido y el calor transferido

a sus alrededores. Una temperatura mayor con respecto al punto de solidificación del metal, incrementa el tiempo que el metal permanece en estado líquido. La composición también afecta a la fluidez, particularmente en lo que respecta a los mecanismos de la solidificación del metal. Los metales que se solidifican a temperatura constante tienen mejor fluidez (por ejemplo, metales puros y aleaciones eutécticas).

1.3.4 Etapa de solidificación.

Después de vaciar el metal fundido en el molde, éste se enfría y solidifica. Los aspectos asociados con la solidificación incluyen el tiempo de enfriamiento del metal, la contracción, la solidificación direccional y el diseño de las mazarotas.

Solidificación en los metales. La solidificación involucra el regreso del metal fundido al estado sólido. El proceso de solidificación difiere dependiendo de si el metal es un elemento puro o una aleación

Un metal puro solidifica a una temperatura constante que constituye su punto de fusión. El proceso ocurre en un tiempo determinado como se observa en la curva de enfriamiento inferior. La solidificación real toma un tiempo llamado, tiempo local de solidificación, durante el cual el calor latente de fusión del metal escapa fuera del molde. El tiempo total de solidificación va desde el momento de vaciar el metal hasta su completa solidificación. Después que la fundición se ha solidificado completamente, el enfriamiento continúa a una velocidad indicada por la pendiente debajo de la curva de enfriamiento. La velocidad de enfriamiento depende del calor que se transfiere en el molde y de las propiedades térmicas del metal.

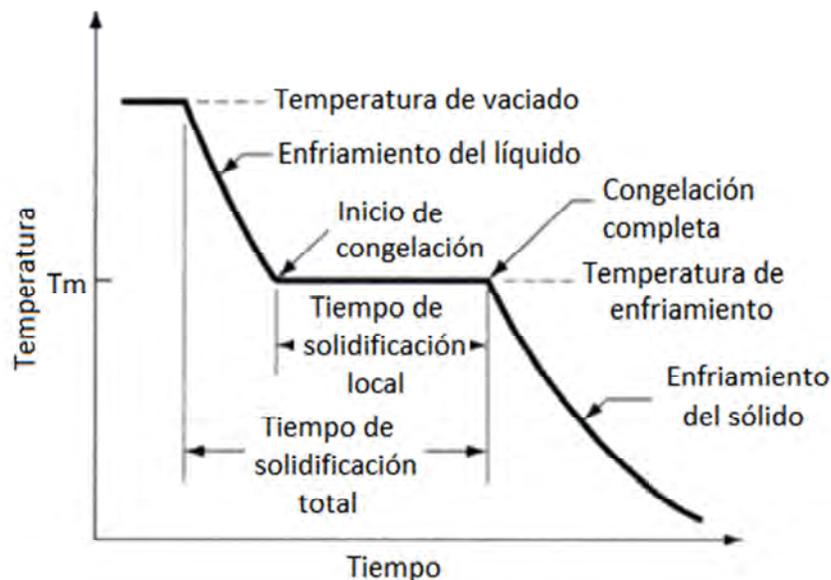


Figura 15. Curva de enfriamiento para un metal puro durante la solidificación.

Las aleaciones solidifican generalmente en un intervalo de temperaturas en lugar de una temperatura constante. El rango exacto depende del sistema de aleación y de su composición particular. Se puede explicar la solidificación de una aleación con referencia a la siguiente figura, que presenta el diagrama de fase de un sistema particular de aleación y a la curva de enfriamiento para una composición dada. Conforme desciende la temperatura, empieza la solidificación en la temperatura que indica la línea líquidus y se completa cuando se alcanza la línea sólidus.

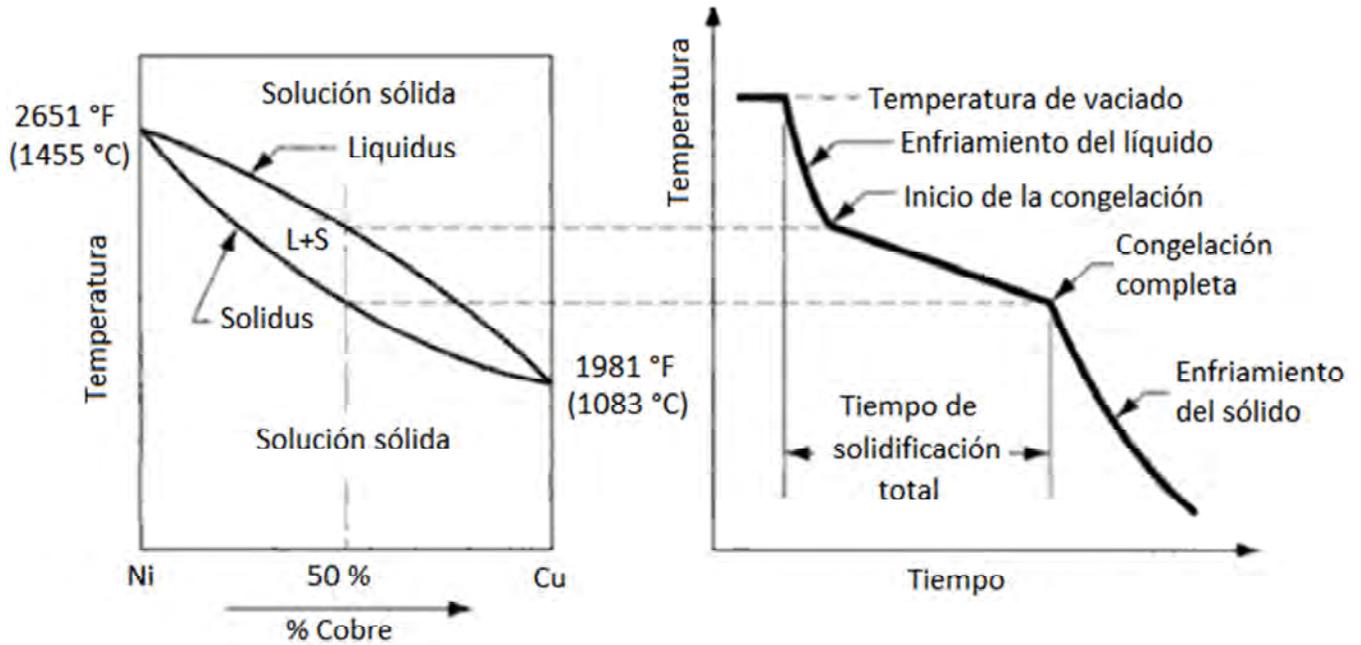


Figura 16. Diagrama de fase y curva de enfriamiento asociados a una composición Ni-Cu 50-50% durante la fundición.

1.3.5 Tiempo de solidificación.

Si la fundición es metal puro o aleación, de todos modos, su solidificación toma tiempo. El tiempo total de solidificación (TST) es el tiempo necesario para que la fundición solidifique después del vaciado. Este tiempo depende del tamaño y de la forma de la fundición expresada por una relación empírica conocida como regla de Chvorinov, que establece

$$TST = C_m \left(\frac{V_p}{A} \right)^n \quad (\text{Ec. 1.2})$$

Donde:

TST	Tiempo de solidificación total en [min]
A	Área superficial en [cm ²]
V _p	Volumen de material fundido en [cm ³]
n	Exponente que toma un valor de 2
C _m	Constante del molde en [min/cm ²]

El valor de C_m depende de las condiciones particulares de la operación de fundición, entre las cuales se incluyen el material del molde (calor específico y conductividad térmica), propiedades térmicas del metal de fundición (calor de fusión, calor específico y conductividad térmica), y la temperatura relativa de vaciado con respecto al punto de fusión del metal por lo que se determinará en base a datos experimentales de la operación.

La regla de Chvorinov indica que una fundición con una relación de volumen entre área superficial se enfriará y solidificará más lentamente que otra con una relación más baja. Este principio ayuda en el diseño de la mazarota del molde.

Para cumplir su función de alimentar metal fundido a la cavidad principal, el metal en la mazarota debe permanecer en fase líquida más tiempo que el de la fundición. En otras palabras, el TST para la mazarota debe exceder el TST de la fundición principal. Como la condición del molde para la mazarota y la fundición es la misma, las constantes del molde serán iguales

1.3.6 Etapa de contracción.

La contracción ocurre en tres pasos como se ilustra en la siguiente figura:

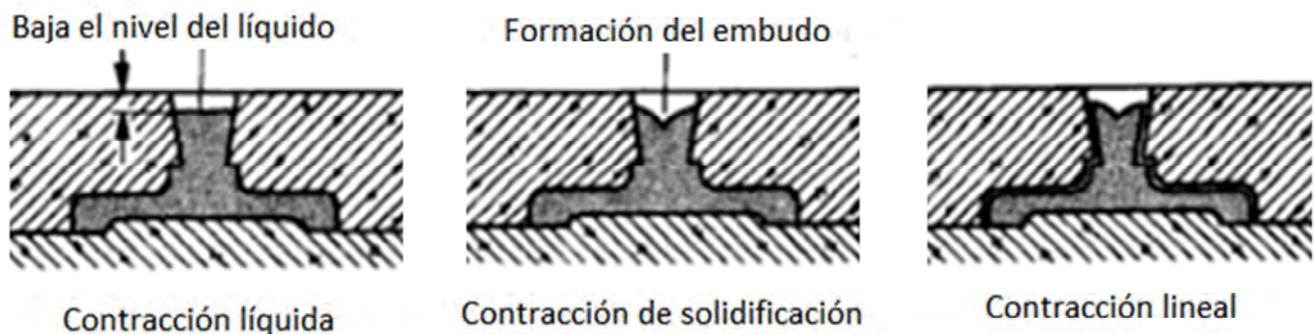


Figura 17. Etapas de contracción en el proceso de fundición.

1. Fase de contracción fluida. Se aprecia por el descenso del nivel de líquido en el alimentador.
2. Contracción de solidificación. Se produce durante la solidificación y llega a formar un embudo. Este embudo no debe quedar en la pieza, sino en el alimentador para impedir que se produzcan cavidades de contracción.
3. Contracción lineal. Es la última fase de la solidificación hasta alcanzar la temperatura ambiente. Esta contracción se tiene en cuenta en el molde utilizando la escala de contracción. Las cuantías de contracción longitudinal son del 2% para el acero colado, del 1% para la fundición gris, del 1.25% para el aluminio y del 1.5 para la fundición de aleaciones que usan CuZnSn, aproximadamente.

La siguiente tabla muestra el nivel de contracción de cada material en función de su temperatura.

Tabla 1. Contracción volumétrica para diferentes metales de fundición debida a la contracción por solidificación y contracción del sólido.

Metal	Contracción volumétrica debido a:	
	Contracción por solidificación%	Contracción térmica del sólido%
Aluminio	7.0	5.6
Aleación de aluminio(típica)	7.0	5.0
Fundición de hierro gris	1.8	3.0
Fundición de hierro gris al alto carbono	0.0	3.0
Fundición de hierro gris al bajo carbono	3.0	7.2
Fundición de acero al bajo carbono	3.0	7.2
Cobre	4.5	7.5

1.4 Defectos comunes en la fundición. [3]

Llenado incompleto.

Aparece en una fundición que solidificó antes de completar el llenado de la cavidad del molde. Las causas típicas incluyen fluidez insuficiente del material fundido, baja temperatura de vaciado, vaciado lento, o sección transversal de la cavidad del molde muy delgada (Figura 18).

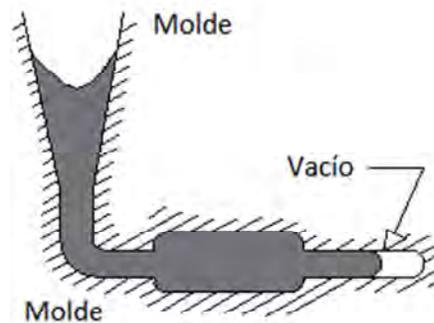


Figura 18. Llenado incompleto.

Junta fría.

Una junta fría aparece cuando dos porciones del metal fluyen al mismo tiempo, pero hay una falta de fusión entre ellas debido a solidificación o enfriamiento prematuro, sus causas son similares a las de llenado incompleto (Figura 19).

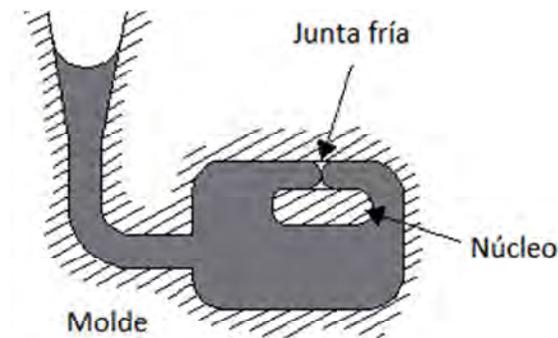


Figura 19. Junta fría.

Gránulos fríos.

Las salpicaduras durante el vaciado hacen que se formen glóbulos de metal que quedan atrapados en la fundición. Es necesario un buen diseño del sistema y de los procedimientos de vaciado que eviten las salpicaduras para prevenir el defecto (Figura 20).

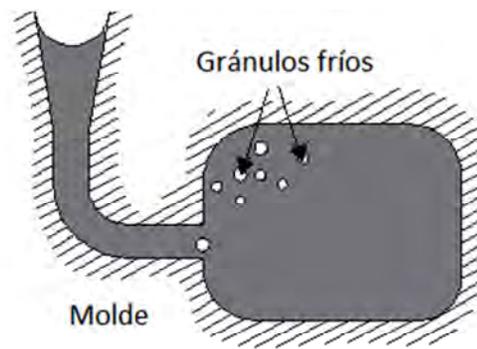


Figura 20. Gránulos fríos.

Cavidad por contracción.

Este defecto es una depresión de la superficie o un hueco interno en la fundición debido a la contracción por solidificación que restringe la cantidad de metal fundido disponible en la última región que solidificará. Ocurre frecuentemente cerca de la parte superior de la fundición, en cuyo caso se llama rechupe. El problema se puede resolver frecuentemente con un apropiado diseño de la mazarota (Figura 21).

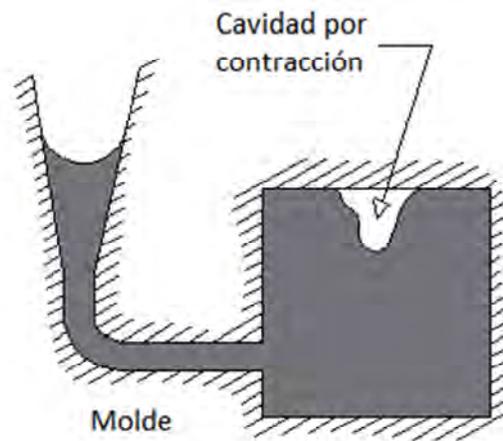


Figura 21. Cavidad por contracción.

Microporosidad.

Se refiere a una red de pequeños huecos distribuida a través de la fundición debida a la contracción por solidificación del último metal fundido en la estructura dendrítica. El defecto se asocia generalmente con las aleaciones, debido a la forma prolongada en que ocurre la solidificación de estos metales (Figura 22).

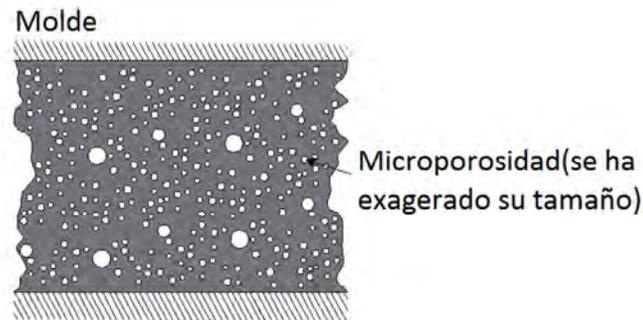


Figura 22. Microporosidad.

Desgarramiento caliente.

Este defecto ocurre cuando un molde, que no cede durante las etapas finales de la solidificación o en etapas primarias de enfriamiento restringe la contracción de la fundición después de la solidificación. Este defecto se manifiesta como una separación del metal en un punto donde existe una alta concentración de esfuerzos, causada por la indisponibilidad del metal para contraerse naturalmente (Figura 23). En la fundición de arena y otros procesos de molde desechable esto se previene arreglando el molde para hacerlo retráctil. En los procesos de molde permanente se reduce el desgarramiento en caliente, al separar la fundición del molde inmediatamente después de la solidificación.

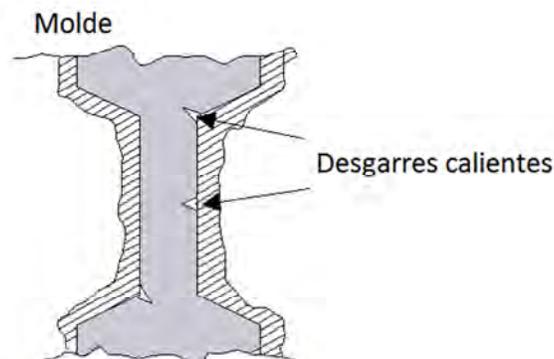


Figura 23. Desgarramiento caliente.

Poros al interior de la fundición.

El material fundido no se ha solidificado uniformemente. La solidificación se produce de afuera hacia adentro. En los lugares más gruesos de la pieza se forma así un hueco al que se le denomina poro o cavidad (Figura 24). Para evitarlo conviene que las piezas fundidas tengan un espesor uniforme de pared.

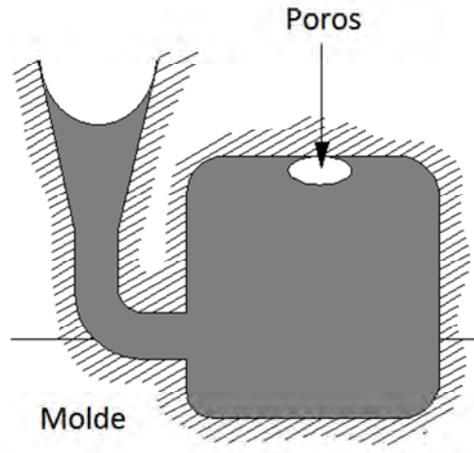


Figura 24. Poros al interior de la fundición.

Burbujas en la fundición.

La arena de moldear húmeda desprende hidrógeno y oxígeno a la temperatura de colada y estos gases penetran en la estructura del material (Figura 25).

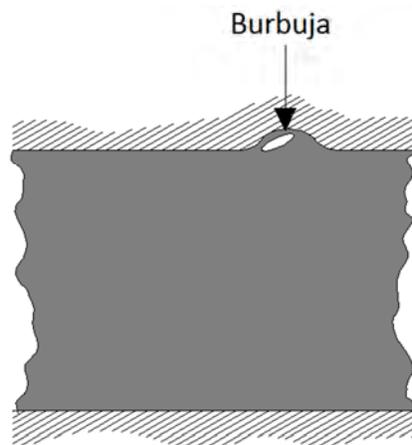


Figura 25. Burbujas en la fundición.

Desigualdad de espesor de las paredes.

La pieza tiene espesores desiguales en dos zonas enfrentadas. El macho se ha desplazado durante la colada (Figura 26).

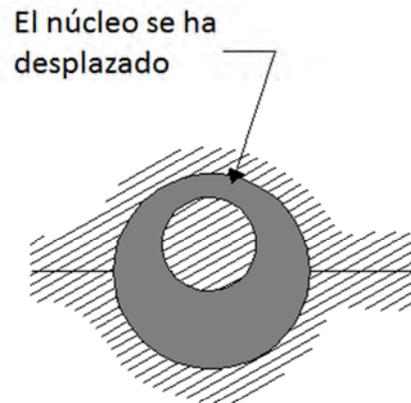


Figura 26. Desigualdad de espesor de las paredes.

Desmoronamiento en zonas marginales del molde y abombamientos redondeados.

Si el molde no se ha compactado suficientemente, cede bajo la presión del material de fundición (Figura 27).

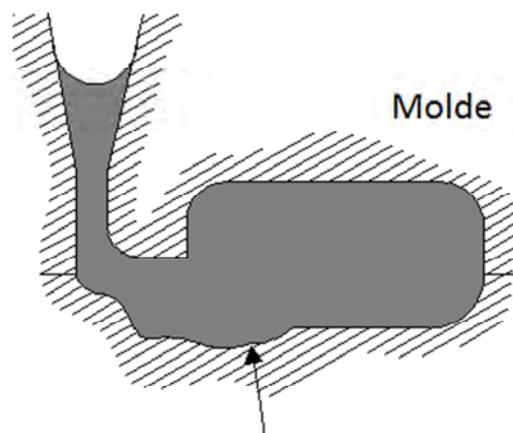


Figura 27. Desmoronamiento en zona marginal y abombamientos redondeados.

CAPITULO 2.

Fundición centrífuga.



CAPITULO 2 FUNDICIÓN CENTRÍFUGA. [3][4][6]

2.1 Breve historia de la fundición centrífuga.

El método de centrifugación empleado en la fabricación de diversos artículos tuvo su primera aplicación en la fabricación de tuberías, cuyo consumo siempre creciente obligó a buscar máquinas de mayor rendimiento, sin restarle importancia a la calidad de lo elaborado.

Se necesitaron siglos y hasta milenios para que la humanidad llegara a servirse del elemento más necesario de su existencia, el agua, y evacuar luego los líquidos servidos por medio de los sistemas más o menos perfectos de las canalizaciones modernas en los grandes centros urbanos. El material más antiguo que se utilizó para fabricar tuberías fue la arcilla.

Cuando más tarde se trató de abastecer los pueblos que se formaban a cierta altura en los países montañosos, se presentó el problema del transporte del agua por medio de tuberías que soportaran fuertes presiones. Entonces se procedió a elaborar las tuberías con piedras.

A los antiguos constructores les interesó especialmente la construcción de tuberías de desvío, que se fijaban a los conductos abiertos a alto nivel. Allí, por primera vez se emplearon tuberías de plomo, que se hacían de láminas que se arrollaban a un cilindro de diámetro determinado y luego se soldaban en la costura, pudiendo soportar presiones de hasta 12 [Kg/cm²].

A finales de la época medieval las personas pudientes de las ciudades o los príncipes ordenaron el mejoramiento de la sanidad en sus posesiones y se preocuparon por tener redes canalizadas de agua. Es en esta época donde aparecen por primera vez las tuberías de hierro fundido.

En el siglo XVIII la aplicación de las tuberías de hierro se generalizó en toda Europa. En el siglo XIX, aparecieron las tuberías de alta presión (43 Kg/cm²).

Ya a principios del siglo XIX nació la idea de emplear la fuerza centrífuga para fundir los objetos de metal; perteneció a Antonio Eckhardt (patente año 1809), pero la insuficiencia de las máquinas frenaba su aplicación práctica por la imposibilidad de conseguir el número necesario de revoluciones que dieran la fuerza centrífuga requerida.

Recién después de progresar la técnica, el ingeniero Fernando Arens, en colaboración con Sensaud de De Lavaud, en Brasil, lograron por fin en 1914, después de 100 años de vanos esfuerzos aplicar la fuerza centrífuga en la fundición de metales a escala industrial.

2.2 Fundamentos teóricos del proceso de fundición centrífuga.

Como su nombre lo implica, utiliza la fuerza de inercia causada por la rotación para distribuir el metal fundido en las cavidades del molde, de esta manera la fundición es compacta y de grano fino. Éste método es económicamente apropiado para la fabricación de tubos, cuerpos cilíndricos y para fundir casquillos de cojinete.

2.2.1 Rotación de la masa alrededor de un eje vertical.

La siguiente figura representa la sección longitudinal de un molde cilíndrico abierto, de radio interior igual a R . Si llenamos este molde con una masa líquida hasta la altura h y posteriormente se hace girar el molde alrededor del eje Z , coincidente con el eje del cilindro, a una velocidad angular constante ω , pasado cierto tiempo, también la masa empezará a girar con la misma velocidad.

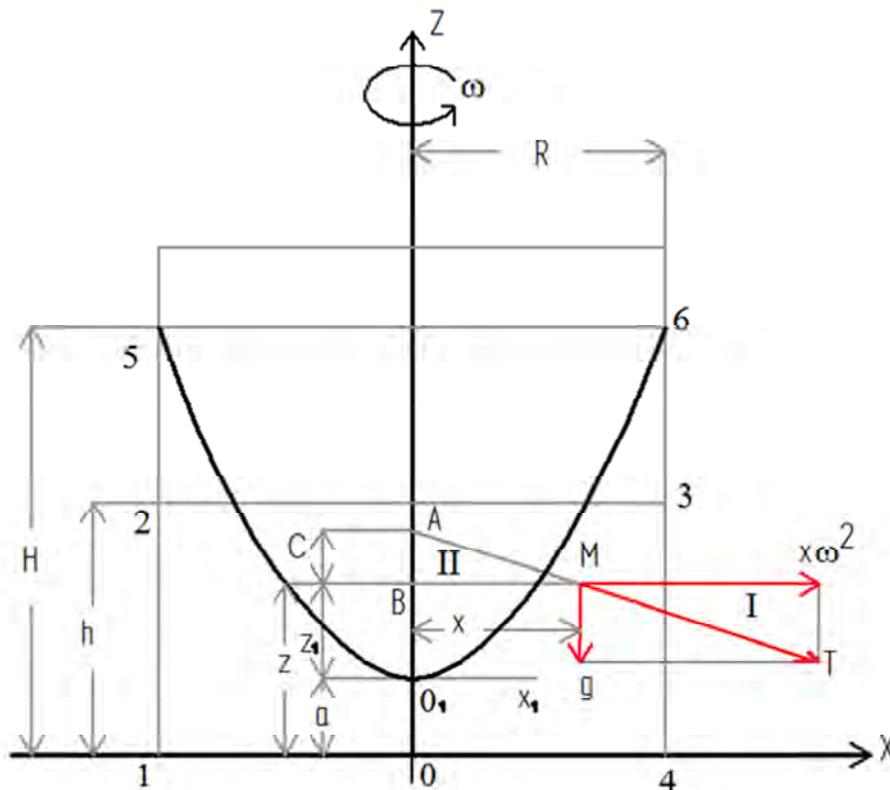


Figura 28. Rotación de la masa alrededor de un eje vertical.

Sean x y z coordenadas de un punto M cualquiera. Sobre la unidad de masa del material líquido actúan las fuerzas siguientes: la centrífuga $x\omega^2$, perpendicular al eje Z y la gravedad g , dirigida verticalmente hacia abajo.

Sea ρ la densidad del material y p la presión hidrostática en el punto M . Considerando que el material líquido está relativamente quieto respecto al molde, se aprovechará para determinar el aspecto de la superficie libre (que no tiene contacto con la interior del molde), la ecuación fundamental de equilibrio de la hidrostática (Euler):

$$dp = \rho(Xdx + Ydy + Zdz)$$

Donde x , y y z son proyecciones de fuerzas actuantes en M . En el caso dado tenemos:

$$x = x\omega^2; y = 0; z = -g;$$

Por lo que la ecuación de equilibrio tendrá el siguiente aspecto:

$$dp = \rho(x\omega^2 dx - g dz)$$

y finalmente, integrando se llega a:

$$p = \rho \left(\frac{\omega^2 x^2}{2} - gz \right) + c \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Suponiendo que p es una constante la ecuación de las curvas de presiones serán iguales a:

$$\frac{\omega^2 x^2}{2} - gz = D \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Ésta ecuación es la de una parábola con eje vertical, cuyo parámetro es g/ω^2 . Luego las superficies de presión iguales son superficies de los paraboloides de revolución.

A la misma conclusión se puede llegar de otra manera. Si se prolonga la resultante de $x\omega^2$ y g (señalada en la imagen anterior con T) hasta cortar el eje Z en el punto A y la fuerza centrífuga hasta su intersección en el punto B . Asignando al segmento AB la letra C se tendrá de los triángulos semejantes I y II ,

$$\frac{C}{x} = \frac{g}{x\omega^2}$$

De donde

$$C = \frac{g}{\omega^2} = \text{cte.}$$

Como el material se encuentra en estado relativamente quieto la resultante T normal a la superficie de nivel y, por consiguiente C no es otra cosa que la subnormal a la curva formada por la intersección de la superficie de nivel con el plano que pasa por el eje Z . Luego ésta curva es una parábola y la superficie formada por ella un paraboloide de revolución.

Para recibir la ecuación de la curva de la superficie libre es necesario conocer la constante D (ver la ecuación 2.2). Para ello se aprovecha la circunstancia de que el volumen del material $1, 2, 3, 4$ es igual al volumen del cilindro $1, 5, 6, 4$ menos el volumen del paraboloide $5, 0_1, 6$.

El volumen del cilindro $1, 2, 3, 4$ es igual a $\pi R^2 h$, mientras que el volumen del cilindro $1, 5, 6, 4$ es igual a $\pi R^2 H$. Por otro lado, el volumen del paraboloide $5, 0_1, 6$ es igual a $\frac{1}{2} (\pi R^2 (H-a))$. Luego se llega a:

$$\pi R^2 h = \pi R^2 H - \frac{1}{2} (\pi R^2 (H-a))$$

de donde:

$$2h = H - a$$

Suponiendo en la ecuación 2.2 Que $x = 0$ y $z = 0$ se tiene:

$$-ga = D$$

Hechas las correspondientes sustituciones, se obtienen las tres siguientes expresiones para las fórmulas:

$$a = h - \frac{R^2\omega^2}{4g}, \quad H = h + \frac{R^2\omega^2}{4g}, \quad D = \frac{R^2\omega^2}{4} - gh.$$

Ubicando en la ecuación 2.2 el valor encontrado para D , se obtiene la ecuación para la curva de superficie libre a saber:

$$\frac{x^2\omega^2}{2} - gz = \frac{R^2\omega^2}{4} - gh \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Traspasando el origen de las coordenadas desde el punto 0 al punto 0_1 la ecuación 2.2 adquirirá el aspecto $z_1 = z - a$

$$\frac{x^2\omega^2}{2} - gz_1 = 0 \quad \text{o} \quad z_1 = \frac{x^2\omega^2}{2g} \quad (\text{Ec. 2.2'})$$

De donde:

$$z_1 = \frac{x^2}{2C}$$

2.2.2 Distribución de las presiones para el proceso con eje vertical.

Para determinar la ley de la distribución de las presiones en el material líquido se determinará la constante C en la ecuación 2.1. Con $X = 0, Z = a, \dots, p = p_0$ (presión atmosférica). Sustituyendo se llega a:

$$p_0 = -\rho g a + C$$

De aquí, como $\rho g = \gamma$ (peso específico),

$$C = p_0 + \gamma a = p_0 + \gamma \left(h - \frac{R^2 \omega^2}{4g} \right)$$

Y llevando este valor de C a la ecuación 2.1 se tiene:

$$p = p_0 + \gamma (h - z) + \frac{R^2 \omega^2}{4g} (2x^2 - R^2) \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Claro está que con $z = \text{constante}$, o sea para los puntos que se encuentran en un mismo plano horizontal, las presiones crecen proporcionalmente al cuadrado de sus distancias del eje. Con $x = \text{constante}$, o sea para los puntos situados en una misma superficie cilíndrica, las presiones varían proporcionalmente a la distancia tomada sobre la normal a la superficie libre.

Una velocidad angular suficiente crea presiones correspondientes al espesamiento del material. Todas las partículas más livianas son expulsadas hacia la superficie libre. La zona de las presiones más grandes se encuentra en las cercanías de la circunferencia del fondo del molde. Aquí el material será más denso. La presión mayor ($x=R, z=0$) es igual a

$$p_{max} = p_0 + \gamma h + \gamma \frac{R^2 \omega^2}{4g}$$

La presión menor actúa en todos los puntos de la superficie libre ($p_0 = \text{kg/cm}^2$). Esto quiere decir que las capas del material adyacentes a esta superficie deben ser menos densas.

La ecuación 2.1 puede ser representada bajo un aspecto más sencillo. Si como origen de coordenadas tomamos el punto O_1 ,

$$z_1 = z - a$$

entonces:

$$p = \rho \left(\frac{\omega^2 x^2}{2} - g(z_1 + a) \right) + c$$

O sea,

$$p = \gamma \left(\frac{\omega^2 x^2}{2g} - z_1 \right) + F$$

Con $x = 0, z_1 = 0, \dots, p = F$. Por eso se puede escribir

$$p = p_0 + \gamma \left(\frac{\omega^2 x^2}{2g} - z_1 \right) \quad (\text{Ec. 2.1})$$

2.2.3 Velocidad de rotación para el proceso con eje vertical.

Al aumentar la velocidad angular se podrá conseguir que el paraboloide obtenga el aspecto alargado y su vértice O_1 descienda más abajo del punto O , o sea que el material dejará en descubierto el fondo del molde después de haberse trasladado íntegramente hacia la periferia del mismo. El material que gira tomará la forma indicada en la siguiente figura.

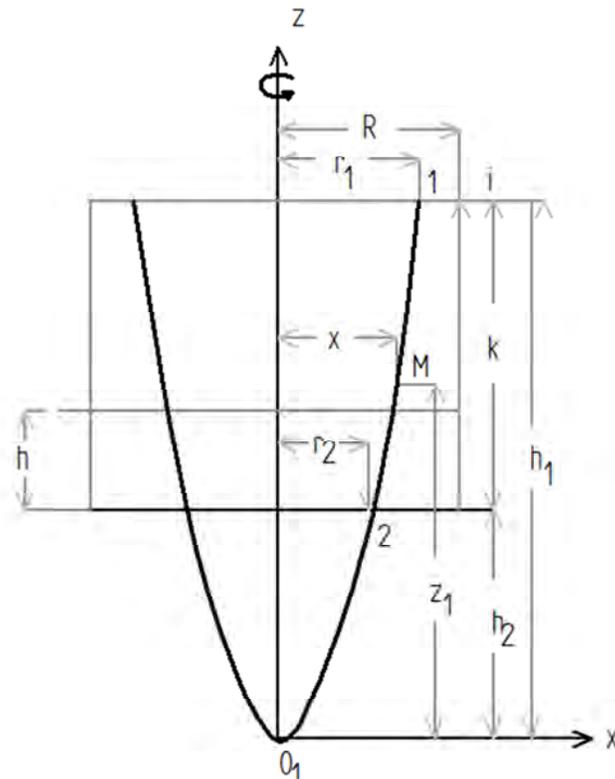


Figura 29. Rotación de la masa alrededor de un eje vertical, al aumentar la velocidad angular.

Tomando por radios máximo y mínimo, respectivamente, r_1 y r_2 , y suponiendo la altura igual a k , es fácil encontrar la fórmula que permite determinar la velocidad de rotación, Los puntos 1 y 2 pertenecen a la parábola. Por eso, marcando sus ordenadas, respectivamente, h_1 y h_2 , se puede escribir

$$h_1 = \frac{r_1^2 x^2}{2g}$$

$$h_2 = \frac{r_2^2 x^2}{2g}$$

Y como $k = h_1 - h_2$, sustituyendo estas últimas con sus valores respectivos se tiene

$$k = \frac{\omega^2}{2g} (r_1^2 - r_2^2)$$

De donde

$$\omega = \sqrt{\frac{2gk}{r_1^2 - r_2^2}}$$

La cual, puede ser expresada por el número de revoluciones por minuto:

$$\omega = \frac{\pi n}{30}$$

Y finalmente, considerando $g = 981 \text{ cm/s}^2$ y r_1 , r_2 y k expresadas en centímetros se obtiene, previas sustituciones y modificaciones indispensables:

$$n = 423 \sqrt{\frac{k}{r_1^2 - r_2^2}} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Dicha fórmula permite demostrar que los moldes verticales, en general, no sirven para la fabricación de modelos cilíndricos largos, ya que para ello se requerirán altas velocidades angulares, las cuales serán difíciles de alcanzar considerando el peso del molde y el material a vaciar.

Para determinar la relación entre la presión y el número de revoluciones, tomando las ecuaciones 2.1 y 2.2 y sustituyendo como se muestra a continuación.

Para la ecuación 2.1 $x = R$ y $z = h_1$. Se tiene:

$$p_1 - p_0 = \gamma \frac{\omega^2 R^2}{2g} - \gamma h_1$$

Para la ecuación 2.2' $x = r_1$ y $z = h_1$. Se tiene:

$$h_1 = \frac{\omega^2 r_1^2}{2g}$$

Introduciendo los valores de h_1 en la fórmula precedente tenemos:

$$p_1 - p_0 = \gamma \frac{\omega^2}{2g} (R^2 - r_1^2) = \gamma \frac{\pi^2 n^2}{2 * 30^2 g} (R^2 - r_1^2)$$

Y despejando la incógnita n de la ecuación anterior:

$$n = 423 \sqrt{\frac{p_1 - p_0}{\gamma(R^2 - r_1^2)}}$$

Y para una presión en exceso ubicada en el punto i se tiene:

$$n = 423 \sqrt{\frac{p_i}{\gamma(R^2 - r_1^2)}} \quad (\text{Ec 2.6})$$

Tomando en cuenta que $\pi(R^2 - r_1^2)$ es el área de la sección transversal del material sometido al moldeo y asignándole sometido al moldeo y asignándole la letra f , se tiene

$$n = 750 \sqrt{\frac{p_i}{f}}$$

La presión en exceso p_i en el punto i diferirá prácticamente poco de la presión existente en cualquier otro punto elegido en la superficie exterior de la pieza. Por eso, bajo la presión p_i corresponde entender la presión máxima en exceso en el material dado.

Por consiguiente, el número de revoluciones es directamente proporcional a la raíz cuadrada de la presión en exceso p_i e inversamente proporcional a la raíz cuadrada del peso específico y de la superficie de la sección transversal.

La aplicación de la ecuación 2.6 es cómoda cuando se usa en conjunto con la ecuación 2.5.

Suponiendo fijados p_i , R y r_1 , despejamos n de la ecuación 2.6. Eligiendo un valor para k para la altura, se determina con ayuda de la ecuación 2.5,

$$r_2 = \sqrt{r_1 - \frac{423^2 k}{n^2}} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

De aquí resulta claro que no es difícil determinar la cantidad de material necesario para el moldeo de un anillo de dimensiones preestablecidas. El volumen de un cilindro compacto de radio R es $\pi R^2 k$, mientras que el de un paraboloides truncado es

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}\pi r_1^2 h_1 - \frac{1}{2}\pi r_2^2 h_2 &= \frac{1}{2}\pi(r_1^2 h_1 - r_2^2 h_2) = \\ \frac{1}{2}\pi(r_1^2 h_1 - r_2^2 h_2 - r_1^2 h_2 + r_2^2 h_1) &= \frac{1}{2}\pi(r_1^2 + r_2^2)(h_1 - h_2) = \\ &= \frac{1}{2}\pi(r_1^2 + r_2^2)k \end{aligned}$$

$$h_1 = \frac{\omega^2 r_1^2}{2g}, \quad h_2 = \frac{\omega^2 r_2^2}{2g},$$

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2}$$

$$h_1 r_2^2 = h_2 r_1^2$$

El volumen y el peso de la pieza elaborada son respectivamente

$$V = \pi R^2 k - \frac{1}{2} \pi (r_1^2 + r_2^2) k \quad ; \quad W = \pi \gamma \left(R^2 - \frac{r_1^2 + r_2^2}{2} \right) k$$

Y suponiendo h la altura del material fabricado, entonces

$$V = \pi R^2 h - \frac{1}{2} \pi (r_1^2 + r_2^2) h \quad ; \quad W = \pi \gamma \left(R^2 - \frac{r_1^2 + r_2^2}{2} \right) h$$

2.2.4 Rotación de la masa alrededor de un eje horizontal.

Que la superficie libre de un material líquido que gira alrededor de un eje horizontal adquiere el aspecto cilíndrico se puede demostrar estudiando la sección transversal de un molde de radio R como se muestra en la siguiente figura.

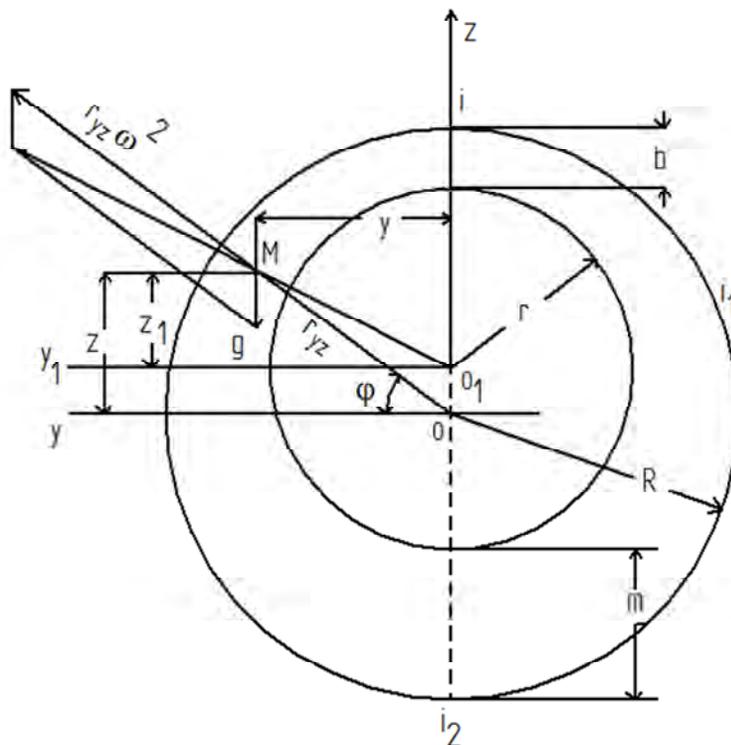


Figura 30. Rotación de la masa alrededor de un eje horizontal.

El molde gira a una velocidad angular ω constante alrededor de su eje 0, perpendicular al plano del dibujo. Junto con el molde gira también el material que lo llena parcialmente.

Considerando que el material se encuentra en el estado de quietud relativa, se puede, como en el caso de la rotación alrededor de un eje vertical, hacer uso de la ecuación fundamental de equilibrio de la hidrostática. Cualquier partícula del material M , está sometido a la acción de la fuerza de gravedad g , y de la fuerza centrífuga $r_{yz}\omega^2$. Las proyecciones de estas fuerzas sobre las coordenadas son, respectivamente:

$$Y = r_{yz}\omega^2 \cos\varphi = r_{yz}\omega^2 \frac{y}{r_{yz}} = \omega^2 y$$

$$Z = \omega^2 z - g$$

Por eso

$$dp = \rho(\omega^2 y dy + (\omega^2 z + g) dz)$$

Integrando se tiene

$$p = \rho \left(\frac{\omega^2 y^2}{2} + \frac{\omega^2 z^2}{2} - gz \right) + c \quad (\text{Ec. 2.7})$$

Con $p = \text{constante}$ se obtiene la ecuación de las curvas de igual presión

$$\frac{\omega^2 y^2}{2} + \frac{\omega^2 z^2}{2} - gz = D \quad (\text{Ec 2.8})$$

La ecuación anterior describe la circunferencia con centro en O_1 sobre el eje Z , que dista del origen de las coordenadas $c_1 = g/\omega^2$. Si se toma por origen de estas el punto O_1 , entonces la relación entre las coordenadas primitiva y nueva del punto M se expresa por la fórmula

$$z = z_1 + c = z_1 + \frac{g}{\omega^2}$$

Sustituyendo z con $z_1 + g/\omega^2$ en la ecuación 2.8, se obtiene, luego de necesarias simplificaciones y transformaciones, el siguiente aspecto:

$$\frac{\omega^2 y^2}{2} + \frac{\omega^2 z_1^2}{2} - \frac{g^2}{\omega^2} = D$$

o sea,

$$y^2 + z^2 = E \quad (\text{Ec 2.8'})$$

Si en la ecuación 2,8' $y = D$ y $z_1 = r$ el valor de la constante resulta

$$D = \frac{\omega^2 r^2}{2} - \frac{g^2}{2\omega^2}$$

Por eso la ecuación de la curva de superficie libre se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{\omega^2 y^2}{2} + \frac{\omega^2 z_1^2}{2} - \frac{g^2}{\omega^2} = \frac{\omega^2 r^2}{2} - \frac{g^2}{2\omega^2}$$

o bien

$$y^2 + z_1^2 = r^2$$

Como las curvas de las presiones iguales resultan ser circunferencias, estas son superficies de presiones iguales (incluso la superficie libre), en particular las cilíndricas concéntricas con el eje O_1 y excéntricas con el eje de rotación O del molde (excentricidad $c_1 = g/\omega^2$)

2.2.5 Distribución de las presiones para el proceso con eje horizontal.

La constante c en la ecuación 2.7 se determina porque cuando $y = 0$

$$z = r + \frac{g}{\omega^2} p = p_0$$

Estos valores de las coordenadas del punto M dan

$$c = p_0 - \gamma \left(\frac{\omega^2 r^2}{2g} - \frac{g}{\omega^2} \right)$$

Luego

$$p = p_0 + \gamma \left(\frac{\omega^2 r^2}{2g} + \frac{\omega^2 z^2}{2g} - z \right) - \gamma \left(\frac{\omega^2 r^2}{2g} - \frac{g}{2\omega^2} \right) \quad (\text{Ec. 2.7})$$

O si se toma por el origen de coordenadas el punto O_1 ,

$$p = p_0 + \gamma \left(\frac{\omega^2 (z_1 + \frac{g}{\omega^2})^2}{2g} - (z_1 + \frac{g}{\omega^2}) \right) - \gamma \left(\frac{\omega^2 r^2}{2g} - \frac{g}{2\omega^2} \right) \quad (\text{Ec. 2.7'})$$

Las dos ecuaciones anteriores permiten encontrar la presión en cualquier punto.

2.2.6 Velocidad de rotación para el proceso con eje horizontal.

Para determinar la velocidad de rotación, partiendo de la fórmula de la excentricidad

$$c_1 = \frac{g}{\omega^2}$$

Al tomar en ella $\pi n/30$ en lugar de ω y $g=981 \text{ cm/s}^2$ se tiene

$$n = \frac{300}{\sqrt{c_1}}$$

Atribuyendo a c_1 valores según se requieran se obtendrán los correspondientes valores para n . se puede también establecer la fórmula de la relación entre el número de revoluciones por la presión dada.

Partiendo de la ecuación 2.7', con $y = 0$ y $z = R$

$$p = p_i = p_0 + \gamma \left(\frac{\omega^2 r^2}{2g} + \frac{\omega^2 R^2}{2g} - R \right) - \gamma \left(\frac{\omega^2 r^2}{2g} - \frac{g}{2\omega^2} \right)$$

o sea,

$$p_i = p_0 + \gamma \left(\frac{R^2 - r^2}{2c_1} - \left(R - \frac{c_1}{2} \right) \right)$$

Siendo el término $R - \frac{c_1}{2}$ de esta ecuación relativamente insignificante, introduciendo en la ecuación $\frac{300^2}{n^2}$ en lugar de c_1 y despejando n se llega a lo siguiente:

$$n = 423 \sqrt{\frac{p_i - p_0}{\gamma(R^2 - r^2)}}$$

o sea,

$$n = 423 \sqrt{\frac{p_i'}{\gamma(R^2 - r^2)}} \quad (\text{Ec. 2.9})$$

La fórmula 2.10 es análoga a la 2.6, y como el área de la sección transversal del cilindro que se moldea es $f = \pi (R^2 - r^2)$, entonces

$$n = 750 \sqrt{\frac{p_i'}{\gamma f}}$$

O sea, igual como en el caso de la rotación del cuerpo alrededor de un eje vertical, el número de revoluciones es directamente proporcional a la raíz cuadrada de la presión excedente p_i' , e inversamente proporcional a la raíz cuadrada de un peso específico y al área de la sección transversal.

2.2.7 Determinación del número de revoluciones del molde.

Para obtener un artículo de buena calidad en el colado por centrifugación es necesario en cada caso establecer un mínimo óptimo de revoluciones del molde. Cabe decir que la determinación teórica de ese número es muy complicada debido a la gran cantidad de factores tecnológicos y mecánicos. Entre otros, son factores: el diámetro y el espesor de las paredes de la pieza, el peso específico de la

aleación, el estado de la superficie interna del molde (si tiene o no revestimiento), el régimen térmico del molde (si está frío, tibio o caliente).

Por ello, en la práctica se presentan diversas aleaciones, con frecuencia usando las fórmulas de Cammen, Konstantinow y Moldenke respectivamente.

$$n = \frac{970}{\sqrt{r}} \quad (\text{Ec. 2.10}); \quad n = \frac{1550}{\sqrt{r}} \quad (\text{Ec. 2.11}); \quad n = \frac{2470}{\sqrt{r}} \quad (\text{Ec. 2.12})$$

Cuando se usa el molde metálico es recomendable la fórmula de Konstantinow; para el molde metálico, pero revestido interiormente con arena, la fórmula de Moldenke ofrece valores más reales.

2.3 Clasificación del proceso.

Existen tres tipos de fundición centrífuga: verdadera, semicentrífuga y centrifugado. La fundición centrífuga verdadera se emplea para la fabricación de piezas cilíndricas, como tuberías, cañones de armas y postes telefónicos, la fundición semicentrífuga se utiliza para colar piezas con una simetría rotacional como una rueda con sus rayos mientras que el centrifugado sirve para fabricar piezas de cualquier forma, las cuales se colocan a una cierta distancia del eje de rotación.

2.3.1 Fundición centrífuga real.

En la fundición centrífuga real, el metal fundido se vacía en un molde que está girando para producir una parte tubular. El metal fundido se vacía en el extremo de un molde rotatorio horizontal. La rotación del molde empieza en algunos casos después del vaciado. La alta velocidad genera fuerzas centrífugas que impulsan al metal a tomar la forma de la cavidad del molde. Por tanto la forma exterior de la fundición puede ser redonda, octagonal, hexagonal o cualquier otra. Sin embargo, la forma interior de la fundición es perfectamente redonda(al menos teóricamente), debido a la simetría radial de las fuerzas en juego.

La orientación del eje de rotación del molde puede ser horizontal o vertical, siendo esta última la más común. Para que el proceso trabaje satisfactoriamente se calcula la velocidad de rotación del molde en la fundición centrífuga horizontal. La fuerza centrífuga está definida por la ecuación

$$F = \frac{m(v^2)}{R} \quad (\text{Ec. 2.13})$$

Donde:

- F Fuerza en [N]
- M Masa en [kg]
- v Velocidad en [m/s]
- R Radio interior del molde en [m]

Sabiendo que la fuerza F por efecto de la gravedad está dada por $W=mg$, el factor de gravedad GF es la relación de fuerza centrífuga dividida por el peso.

$$GF = \frac{F}{W} = \frac{m(v^2)}{Rmg} = \frac{v^2}{Rg} \quad (\text{Ec. 2.14})$$

La velocidad v puede expresarse como $2\pi RN/60 = \pi RN/30$ y al sustituir se obtiene:

$$GF = \frac{R(\frac{\pi N^2}{30})}{g} \quad (\text{Ec. 2.15})$$

Con un arreglo matemático para despejar la velocidad angular N y usando el diámetro D en lugar del radio, se tiene:

$$N = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{2gGF}{D}} \quad (\text{Ec. 2.16})$$

Si el GF es demasiado bajo en la fundición centrífuga, el metal líquido no quedará pegado a la pared del molde durante el proceso sino que "lloverá" dentro de la cavidad. Ocurren deslizamientos entre el

metal fundido y la pared del molde, lo cual significa que la velocidad rotacional del metal es menor que la del molde. Empíricamente, los valores de GF están en el orden de 60 a 80, pues son apropiados para la fundición centrífuga horizontal (Figura 31), aunque esto depende hasta cierto punto del metal que se funde.

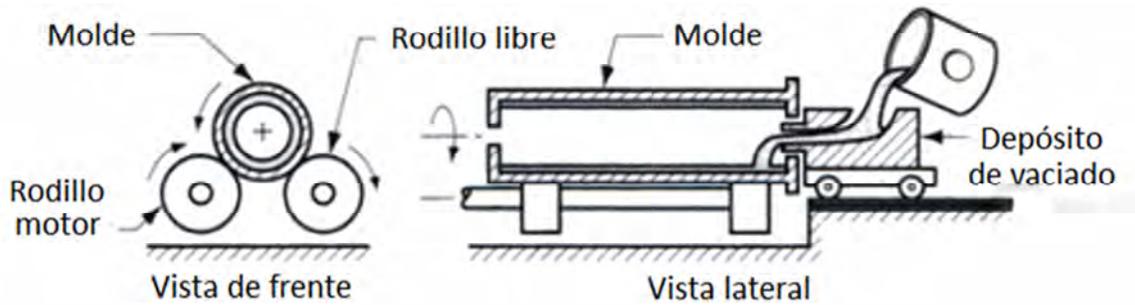


Figura 31. Disposición de la fundición centrífuga real.

2.3.2 Fundición semicentrífuga.

En este método se usa la fuerza centrífuga para producir fundiciones sólidas en lugar de partes tubulares. La velocidad de rotación se ajusta generalmente para un factor G alrededor de 15, y los moldes se diseñan con mazarotas que alimentan metal fundido desde el centro. La densidad del metal en la fundición final es más grande en sección externa que en el centro de rotación. El proceso se usa frecuentemente para producir fundiciones en las que se eliminan el centro mediante maquinado, excluyendo así la porción de más baja calidad. Los volantes y las poleas son ejemplos de fundiciones que pueden hacerse por este proceso (Figura 32).

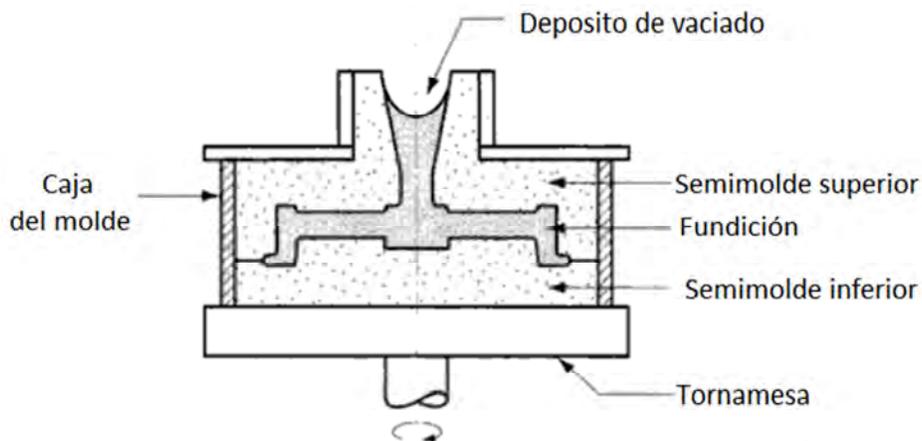


Figura 32. Fundición semicentrífuga.

2.3.3 Fundición centrífuga.

En la fundición centrífuga el molde se diseña con cavidades parciales localizadas lejos del eje de rotación, de manera que la fuerza centrífuga distribuya la colada del metal entre estas cavidades. El proceso se usa para partes pequeñas, la simetría radial de la parte no es un requerimiento como en los otros dos métodos (Figura 33).

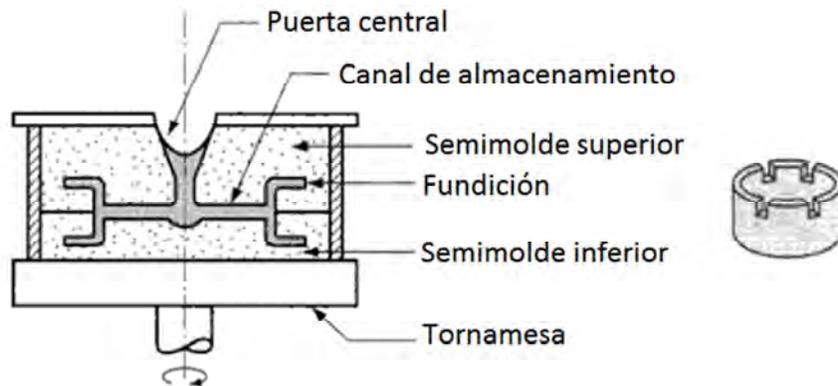
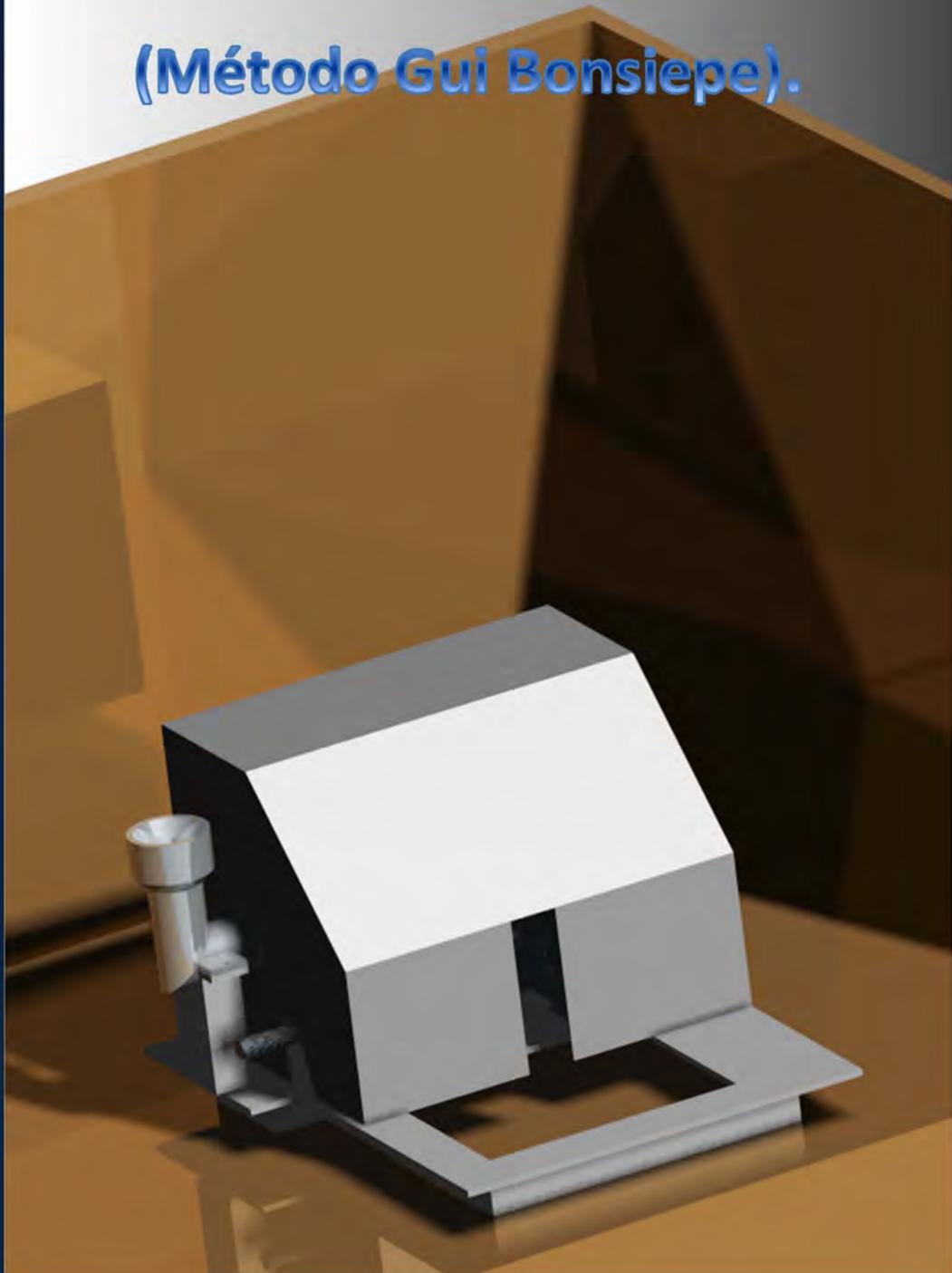


Figura 33. Fundición centrífuga.

CAPITULO 3.

DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL EQUIPO

(Método Gui Bonsiepe).



CAPITULO 3 DISEÑO DEL EQUIPO (Método Gui Bonsiepe). [12]

3.1 Estructuración del problema.

3.1.1 Localización de una necesidad.

La Facultad de Ingeniería requiere de un dispositivo de fundición centrífuga horizontal con la finalidad de que los alumnos sean capaces de realizar una práctica y conozcan este proceso de fundición.

3.1.2 Valoración de la necesidad.

Después de analizar los diferentes procesos de fundición se tomó la decisión de fabricar un equipo para fundición centrífuga horizontal de aluminio ya que en comparación con los demás procesos, la fabricación de dicho equipo es mucho más costeable que el dispositivo requerido para algunos de los demás procesos.

Existen algunos dispositivos utilizados en otros procesos de fundición cuya fabricación implica una inversión menor, sin embargo éste proceso, en comparación con los demás, no requiere más que el costo de la materia prima, lo que a la larga resulta más costeable que otros, en los que se tiene que hacer inversiones de materiales adicionales.

Por otro lado, éste proceso se puede llevar a cabo en un lapso de tiempo corto, el cual puede ajustarse a las necesidades requeridas para desarrollar una práctica de laboratorio.

3.1.3 Análisis del problema respecto a su justificación.

Al tener un proceso más de fundición en el Departamento de Materiales y Manufactura de la Facultad de Ingeniería, se contribuye a una formación más integral de los estudiantes para su incorporación al ámbito industrial, además de reforzar los conocimientos en las áreas de materiales y diseño de maquinaria implementando la práctica de fundición centrífuga horizontal.

3.1.4 Definición del problema en términos generales.

Se desarrollará un dispositivo de fundición centrífuga horizontal capaz de fabricar tubos de aluminio. Se planteará el principio de funcionamiento del dispositivo, analizando las variables involucradas, como son la elección del material a fundir, y el material del molde, así como dimensiones de la pieza a

fabricar, velocidad de rotación del molde y del eje de transmisión, temperaturas de vaciado y de precalentamiento del molde y tiempo de operación de la máquina. Es necesario considerar la inversión económica que se requiere para el desarrollo del equipo.

3.1.5 Precisión del problema.

Al plantearse la exigencia de poder crear un cilindro hueco de aluminio, tomando como guía el marco teórico revisado en los capítulos anteriores, es necesario generar un diseño de fundición basado en el fenómeno de centrifugación.

Tomando en cuenta la condición de que será aluminio el metal que se empleará para la fundición, se llevará a cabo la elección del material para la elaboración del molde.

Se calcularán las dimensiones del molde a fabricar, seguido de la velocidad de rotación de este, necesaria para un funcionamiento adecuado del dispositivo.

Se diseñarán los sistemas de transmisión y de soporte y estabilidad, los cuales dependerán de las condiciones que exija el proceso.

Se obtendrá de manera teórica las dimensiones de la pieza terminada, por lo que será necesario conocer:

1. La temperatura adecuada de vaciado del aluminio fundido.
2. La variación en las dimensiones del molde por efectos del cambio de temperatura.
3. La dilatación volumétrica del aluminio en función de su temperatura.

Una vez terminado el análisis será necesario desarrollar un presupuesto que sea factible cubrir en un 100%.

3.1.6 División de problemas en subproblemas.

- Selección del material del molde.
 1. Resistencia del material a altas temperaturas.
 2. Resistencia a las condiciones de presión a las que será sometido el molde durante el proceso.
 3. Se requiere además un maquinado para asegurar una superficie cilíndrica.

- Diseño del sistema de transmisión.
 1. Resistencia del material a altas temperaturas.
 2. Precisión en la fabricación del sistema para evitar problemas causados por vibraciones.
 3. Se requiere de un cálculo que proporcione al molde la velocidad angular adecuada.
- Base principal del sistema.
 1. Resistencia del material a altas temperaturas.
 2. El material debe tener la suficiente rigidez para soportar las condiciones a las que será sometido durante el proceso.
 3. Las dimensiones dependerán del diseño de los sistemas de transmisión, de soporte y estabilidad y de la base del sistema de vaciado.
- Control de la cantidad de material a fundir, de la temperatura de vaciado y del tiempo de operación de la máquina.
 1. Calcular la cantidad máxima del material a vaciar, dando un rango de seguridad para evitar un derrame de éste en la etapa de vaciado.
 2. Determinar un rango de temperaturas de vaciado que asegure un tiempo de operación adecuado así como una pieza final sin defectos.
 3. Realizar un control de temperatura del material durante la etapa de solidificación para evitar defectos en la pieza final y daños en el equipo por sobrecalentamiento.
- Sistema de precalentamiento.
 1. Se requiere que el molde se encuentre a una temperatura superior a la ambiente para evitar su deformación por efecto del choque térmico en la etapa de vaciado.
- Diseño del sistema de vaciado.
 1. El material debe soportar el choque térmico.
 2. Se requiere una velocidad de flujo que permita un llenado completo del molde.
 3. Requiere de una base que coloque con precisión el sistema de vaciado dentro del molde.
- Carcasa de seguridad.
 1. Resistencia al impacto del molde sobre éste a causa de una mala operación.
 2. Deberá ser capaz de contener cualquier cantidad de material derramado del molde por un exceso de material vaciado.
 3. Contribuir a elevar de manera más rápida la temperatura de precalentamiento.

- Método de extracción de la pieza terminada.

Determinar las medidas de seguridad pertinentes para retirar el molde del equipo y para la extracción de la pieza terminada del molde con el objeto de evitar un accidente por la alta temperatura a la que éste se encontrará.

3.1.7. Jerarquización de los problemas.

- Diseño del molde según los requerimientos.
- Cálculo de la cantidad de material a fundir, de la temperatura de vaciado y del tiempo de operación del dispositivo.
- Elección del método para hacer girar a una velocidad constante el molde.
- Diseñar un sistema de soporte y estabilidad así como de una base principal para el equipo.
- Diseño de una carcasa de seguridad.
- Diseñar un subsistema que eleve la temperatura del molde para evitar daños en este por choque térmico durante la etapa de vaciado.
- Diseñar el sistema de vaciado de manera que se tenga una velocidad de flujo para un llenado completo del molde.
- Diseñar un método seguro para la extracción de la pieza terminada.

3.1.8. Análisis de soluciones existentes.

Los dispositivos empleados para la fundición centrífuga horizontal se encuentran conformados por un molde cilíndrico, el cual resiste las condiciones a las que se somete durante el proceso, las características que definen el material que lo conforman dependen del material a vaciar.

El molde se hace girar por medio de un sistema de transmisión de poleas o rodillos dependiendo de la longitud de la pieza resultante. Ésta transmisión se encuentra conectada a un motor eléctrico.

Los equipos ya existentes cuentan con un subsistema que tiene como finalidad darle soporte de manera adecuada el molde, esta debe de brindar estabilidad para tener un proceso seguro para el o los operadores.

La etapa de vaciado se lleva a cabo con ayuda de un subsistema, el cual está diseñado para resistir la más alta temperatura que llega a tener el material fundido puesto que es aquí el primer lugar donde entre en contacto el metal líquido después de haberse fundido.

En algunas ocasiones los dispositivos cuentan con una carcasa que cubre el molde durante el proceso, esto para brindar una mayor seguridad para el o los operadores.

3.2. Diseño. [5][6][7][8][9][10]

3.2.1. Desarrollo de alternativas o ideas básicas.

El equipo de fundición será un sistema conformado por varios subsistemas:

- Se requiere de un horno para fundir el aluminio (El departamento ya cuenta con uno por lo que este punto está resuelto).
- El molde, que es el sistema donde se llevará a cabo el vaciado y la etapa de solidificación

Este deberá tomar en cuenta parámetros como son: las dimensiones de la pieza resultante, resistencia al choque térmico, conocer las características del aluminio para así poder hacer la elección del material del molde y verificar que dicho material tenga la resistencia necesaria al desgaste provocado por el sistema que lo haga rotar, así como la resistencia a la presión periférica a la que será sometido durante el proceso. El molde puede ser de tubo cedula 40 ya que se cuenta con este material, o bien se puede adquirir acero cold rolled en bloque, cuya composición es 0.15-0.20 % C, 0.60-0.90% Mn, 0.04% P como máximo y 0.05 S como máximo con la finalidad de ajustar las dimensiones del molde de la manera mas conveniente.

- El sistema de transmisión.

Es necesario diseñar un subsistema que genere la velocidad de rotación adecuada para el proceso. Esta velocidad dependerá del diámetro del molde. Hay que evitar o reducir lo más posible las vibraciones por efecto del funcionamiento del equipo, pues éstas pueden generar problemas en el resultado de la pieza y sobre el mismo equipo. Se propone desarrollar un sistema de transmisión por medio de poleas o rodillos, que entren en contacto directo con el molde. Estos a su vez deberán estar acopladas a un eje el cual se hará girar con ayuda de una banda conectada a un motor eléctrico.

- El sistema de soporte y estabilidad del molde.

Este estará conformado por poleas o rodillos dependiendo de la decisión que se tome de la fabricación del sistema de transmisión.

- La base del equipo.

Esta fijará los sistemas de transmisión, de soporte y estabilidad y la base del sistema de vaciado sobre un marco de placa o ángulo con ayuda ya sea de tornillería o soldadura. Las dimensiones de la base principal del sistema dependerán directamente de las dimensiones tanto del molde como de los sistemas que se fijarán en ella.

- El sistema de precalentamiento del molde.

Es necesario llevar la temperatura del molde a una temperatura de pre-operación con la finalidad de evitar un choque térmico que provoque daños en el molde y nos lleve a un proceso riesgoso. Para ello es necesario diseñar un dispositivo que eleve la temperatura del molde antes de poner en operación al dispositivo, este puede ser por flama directa o por medio de una resistencia eléctrica que caliente aire que posteriormente sea introducido en el molde, elevando su temperatura por convección.

- El sistema de vaciado del aluminio.

Se propone diseñar el sistema de vaciado con acero "cold rolled", ya que este posee un punto de fusión mucho más alto que el del aluminio, adicionalmente deberá ser lo suficientemente grueso como para no sufrir deformaciones por efectos del choque térmico al que será sometido. El sistema de vaciado deberá permitir un flujo que asegure un llenado completo, si este flujo es demasiado lento el material solidificará antes de lograr un llenado completo del molde por lo que se tendrá una pieza final defectuosa. Se propone la fabricación de este subsistema con ayuda de redondo de 50.8 [mm] de diámetro o bien con lámina cuyo calibre sea lo suficientemente grueso para soportar las altas temperaturas del proceso.

- Carcasa de seguridad.

La carcasa de seguridad se fijará a la base principal del sistema. Ésta será lo suficientemente gruesa para contener el impacto del molde en caso de que éste, durante el proceso de operación salga de su

eje de giro y pueda provocar un accidente, además contendrá cualquier cantidad de material fundido que salga del molde a causa de vaciar una cantidad excedente de material. Las dimensiones de ésta dependerán de los demás sistemas, adicionalmente deberá tener orificios en los costados a través de los cuales se llevarán a cabo las etapas de precalentamiento y de vaciado. Se propone fabricar este subsistema con lamina de acero cold rolled calibre 14.

- Cantidad de material a fundir.

Esta cantidad de aluminio se determinará en base al diseño del molde, las dimensiones de este son la base para calcular el volumen de material fundido que puede contener, para ello será necesario considerar las condiciones en las que se encontrarán tanto el molde como el aluminio durante el tiempo de operación, ya que pueden presentarse variaciones en su volumen a causa de la disminución de su densidad por el aumento de su temperatura.

- Temperatura de vaciado.

Se requiere llevar un control de la temperatura de vaciado respecto al tiempo en el que el crisol permanecerá en el horno. Este tiempo dependerá de la cantidad de material a fundir, si la temperatura del aluminio es demasiado baja no se presentará un adecuado llenado del molde, en cambio, si es demasiado alta esto llevará a la necesidad de tener un tiempo de operación mayor, con lo que el dispositivo puede estar expuesto a temperaturas que puedan provocar daños a sus componentes.

- Tiempo de operación del equipo.

El tiempo de operación del equipo dependerá directamente de la temperatura de vaciado del aluminio y el rango de temperaturas del material después de la etapa de vaciado. Si la temperatura de vaciado es muy elevada, provocará a un tiempo de operación más largo, lo que llevará a una transferencia de calor del molde a los demás sistemas del equipo durante más tiempo, pudiendo provocar daños en algunos de los componentes. Por otro lado, si el tiempo de operación es demasiado corto se pueden presentar defectos en la pieza terminada ya que el aluminio podrá encontrarse aun en la zona de mezcla.

- Método de extracción de la pieza terminada

Al haber transcurrido el tiempo de operación la temperatura del molde será superior a los 350[°C], por lo que será necesario retirar el molde de la máquina con ayuda de ganchos o pinzas para evitar daños sobre los demás componentes del dispositivo al exponerlos a una temperatura demasiado alta. La manera en que será retirado el molde del equipo dependerá del diseño del sistema de soporte y estabilidad. La extracción de la pieza terminada del molde deberá tomar las medidas de seguridad necesarias para prevenir algún posible accidente.

3.2.2. Examen de alternativas.

- Molde.

Se puede emplear tubo cedula 40 cuyo espesor es adecuado para resistir las presiones a las que será sometido durante el proceso, además se cuenta con este material; dicho tubo requiere de un maquinado tanto en su interior como en su exterior para darle un adecuado balanceo durante el proceso. Por otro lado se puede adquirir un bloque macizo de acero cold rolled el cual puede ser maquinado ajustándolo a las medidas que se deseen, con el inconveniente de que esto no resulta económico ya que requiere de demasiado maquinado, además es necesario adquirir cortadores largos para obtener un molde con dimensiones apropiadas con lo que se eleva de manera aun mas considerable el costo de fabricación.

- Sistema de transmisión de la velocidad angular al molde

Se debe diseñar un sistema que no genere vibraciones que lleguen a afectar el funcionamiento del equipo, de modo que éstas lleven a un proceso inestable y a una pieza final con defectos provocadas por un inadecuado diseño. Las poleas de acero "cold rolled" se pueden obtener a partir de redondo de 76.2 [mm] de diámetro, ya que se cuenta con este material. Éstas brindan un apoyo adecuado ya que la longitud de la pieza terminada no será superior a los 35 [cm], por lo que el empleo de rodillos resulta en un mayor costo por la cantidad de material que estos requieren, siendo mas que suficiente el uso de poleas. Se propone adquirir un mandril pulidor que servirá de eje para dichas poleas.

Se requiere de una fuente de energía que genere la velocidad angular del sistema; éste será un motor eléctrico que transmitirá la velocidad angular a las poleas del sistema con ayuda de una banda.

- Base principal del sistema

La base principal del sistema deberá ser fabricada con buena precisión para tener un proceso adecuado, en ella se fijaran el sistema de transmisión del molde, el sistema de soporte y estabilidad, la base del sistema de vaciado y la carcasa de seguridad. El material que se empleará será ángulo estructural de acero "cold rolled" de 50.8x50.8 [mm] con un espesor de 4.76 [mm] y solera de acero "cold rolled" de 4.76x50.8 [mm], ya que se cuenta con el, este es lo suficientemente resistente y garantiza un proceso seguro. Estas se pueden fijar con ayuda de tornillería, sin embargo las vibraciones que se presentan durante el proceso pueden llegar a provocar problemas en este subsistema, aflojando en algún momento alguno de sus componentes. El uso de soldadura resulta ser un proceso de fabricación mas laborioso y de mayor cuidado, sin embargo brinda una mayor seguridad para el o los operadores durante el proceso, ya que se elimina la posibilidad de falla de algún componente de este subsistema.

- Sistema de precalentamiento del molde.

Para este sistema se cuenta con una pistola de aire caliente, capaz de elevar la temperatura del aire a más de 250[°C]. Esta funciona por medio de un ventilador que jala aire del medio en el que se encuentra y lo calienta con ayuda de una resistencia eléctrica. El diámetro del tubo de salida de aire caliente es de 50.8 [mm] por lo que es posible ajustar el diseño del molde a estas dimensiones, asegurando con ello una buena temperatura de precalentamiento. Se puede también fabricar un sistema de precalentamiento por medio de flama directa empleando gas, este puede ser un tubo con varios orificios por los que pueda salir la flama. Dicho tubo deberá ser introducido en el molde mientras este se encuentra girando para asegurar un calentamiento uniforme sin embargo este subsistema requiere de mucho mas cuidado que la pistola de calor.

- Sistema de vaciado.

Se requiere de una adecuada elección del material con el que se fabricará este sistema, el cual debe resistir cambios importantes de temperatura, ya que es la primera parte del equipo que entrará en contacto con el aluminio durante la etapa de vaciado.

Este sistema debe asegurar un vaciado sencillo, que provea de material fundido al molde a una velocidad adecuada para que se lleve a cabo un llenado completo. Se cuenta con redondo de acero "cold rolled" de 50.8 [mm] de diámetro para fabricar una especie de caja o embudo. Éste se ajusta de manera adecuada al diseño del molde ya que tiene el mismo diámetro que el sistema de precalentamiento; si a éste se le lleva a cabo un adecuado maquinado se tendrá un sistema de vaciado

que cumpla con los requerimientos mencionados con anterioridad, la desventaja de este diseño es que requiere de bastante maquinado. Se puede por otro lado fabricar una caja en forma de embudo con ayuda de lámina lo suficientemente gruesa como para resistir las temperaturas de operación y no se deteriore en un lapso de tiempo corto, además su fabricación requiere de cuidado ya que no deben presentarse fugas que puedan provocar un accidente durante la etapa de vaciado.

3.2.3. Selección de mejores alternativas.

Molde (Figura 34).

El molde será fabricado de tubo cédula 40, con un diámetro nominal de 102[mm] ya que se cuenta con este material. Éste posee características suficientes para resistir las condiciones de choque térmico así como desgaste del material por efectos del proceso de rotación y excelente resistencia a la presión a la que se someterá durante el proceso. Las propiedades del material no se ven afectadas por la elevación de temperatura, además la dilatación de este material en comparación con el aluminio es ideal ya que es menor, lo que favorecerá a la extracción de la pieza terminada.

El diseño de las tapas del molde es de suma importancia, ya que están relacionadas en gran medida con un proceso de fundición seguro para el operador, se deberá involucrar un diseño que no provoque importantes vibraciones durante el proceso de rotación. Se deben maquinar rieles o guías sobre el molde. Éstas servirán como apoyo para la transmisión y serán parte del sistema que brindará estabilidad durante la rotación.

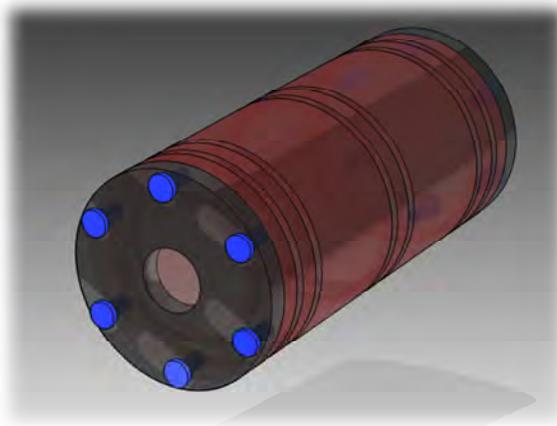


Figura 34. Propuesta inicial básica del diseño del molde.

Sistema de transmisión (Figura 35).

El sistema de transmisión constará de un motor eléctrico, el cual, por medio de una banda moverá un eje o flecha. Se realizarán los cálculos convenientes que ayuden a un correcto ajuste de las *rpm* a las que debe girar el molde. Se maquinarán un par de poleas que transmitan del mandril al molde las *rpm*. Éstas deberán ajustar de una manera adecuada en las guías sin que se presenten deslizamiento entre ambas superficies.

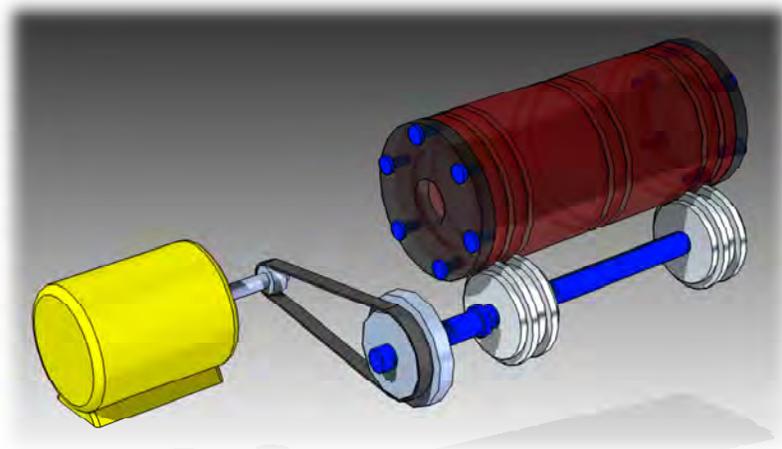


Figura 35. Propuesta inicial básica del diseño de la transmisión.

Sistema de soporte y estabilidad.

El sistema de soporte y estabilidad estará compuesto por tres poleas como muestra en las figuras 36 y 37. Las dos inferiores, junto con las poleas de transmisión brindarán el soporte al sistema durante el funcionamiento. La polea superior tiene como objetivo asegurar la correcta sujeción del molde, en conjunto todas garantizan un funcionamiento óptimo del sistema, con la finalidad de brindarle al operador un funcionamiento seguro. Todo este conjunto de poleas se encontrará fijo a una base que será el cuerpo principal del equipo.

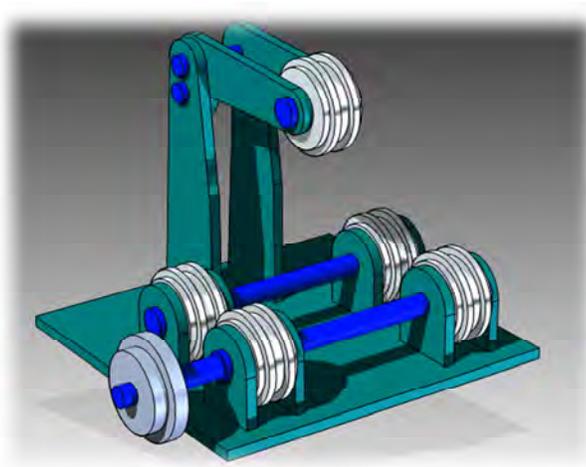


Figura 36. Propuesta inicial básica del diseño de soporte y estabilidad.

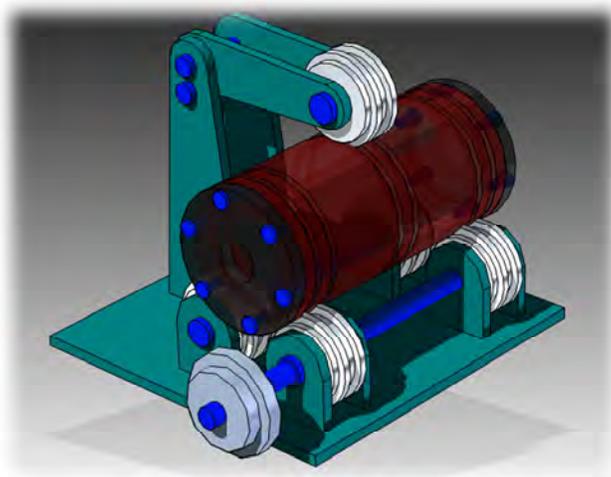


Figura 37. Ejemplificación del funcionamiento del sistema de soporte y estabilidad.

Sistema de precalentamiento del molde (Figura 38).

Debido al cambio de temperatura al que se encontrará expuesto el molde se requiere de un precalentamiento para evitar daños a este durante el proceso. Para ello se elevará la temperatura a un rango de entre 150 y 200 [°C]. Esto se llevará a cabo con ayuda de un sistema formado por una resistencia eléctrica y un ventilador, el cual introducirá aire a alta temperatura dentro del molde como se muestra en la figura 38. Se cuenta con un dispositivo que cumple con los requerimientos del problema.

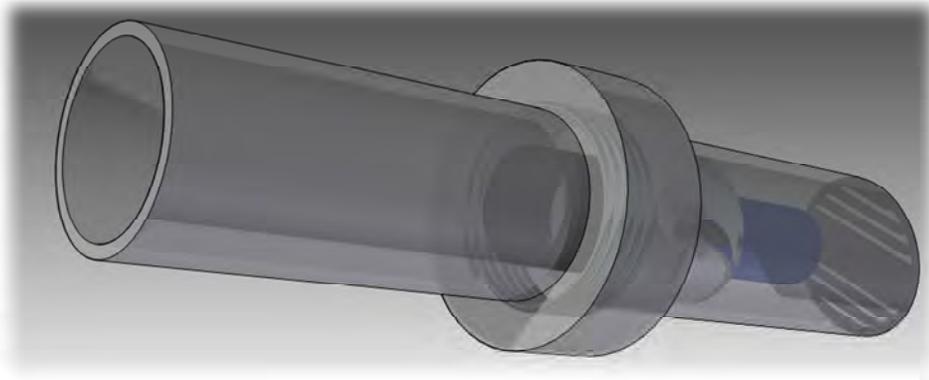


Figura 38. Propuesta inicial básica del sistema de precalentamiento del molde.

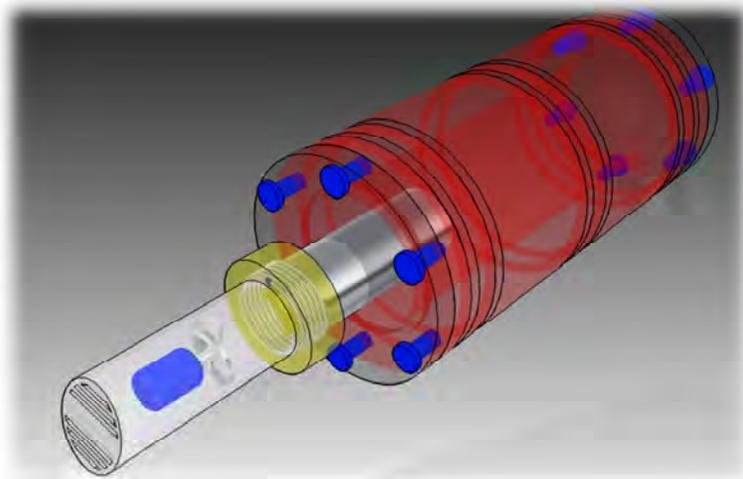


Figura 39. Ejemplificación del proceso de calentamiento del molde.

Sistema de vaciado (Figura 40).

Se requiere de un sistema que introduzca el material fundido durante el proceso, el cual debe ser capaz de soportar los cambios bruscos de temperatura. La propuesta inicial es un dispositivo similar a un embudo que se insertará dentro del molde, en el se llevará a cabo la etapa de colado.

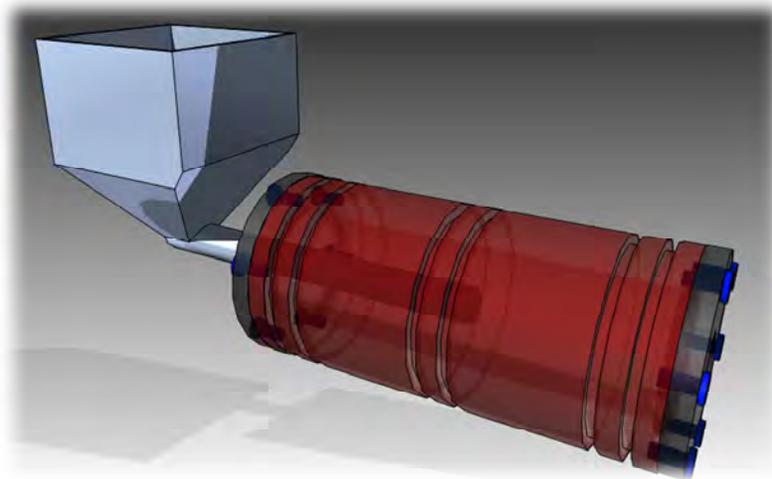


Figura 40. Propuesta inicial básica del sistema de vaciado.

Carcasa de seguridad (Figura 41).

Se debe fabricar una carcasa de protección para el usuario, además servirá para reducir la interacción con el ambiente, disminuyendo así las pérdidas de calor durante la etapa de precalentamiento. Ésta se elaborará con lámina calibre 18 ya que se cuenta con este material, las caras de esta carcasa serán unidas con ayuda de soldadura de arco eléctrico.

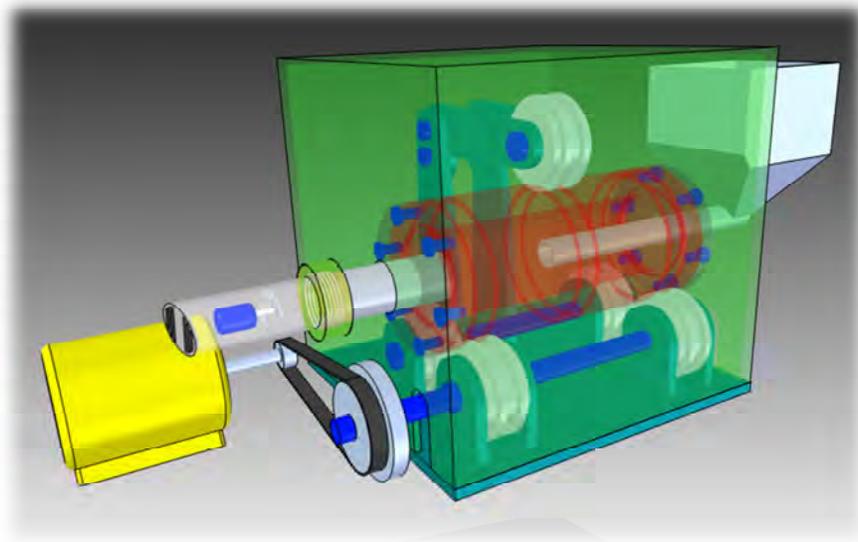


Figura 41. Propuesta inicial básica de la carcasa de seguridad.

Método de extracción.

El método de extracción requiere de ser un proceso seguro para el o los operadores. Para ello se propone que después del vaciado se espere un tiempo que asegure que el material fundido haya solidificado en su totalidad.

Una vez pasado este tiempo el molde podrá ser manipulado con mayor facilidad, se levantará la polea superior para permitir la salida de este, se dejará enfriar fuera del equipo el molde que se encuentra a una temperatura superior a los 300 [°C], se retirarán los tornillos que sujetan ambas tapas, y finalmente la contracción de la pieza fundida permitirá una sencilla extracción del molde.

3.2.4. Desarrollar alternativa seleccionada.

1. Diseño del molde y dimensiones teóricas de la pieza terminada.

El diseño del molde determinará las dimensiones finales de la pieza. Éstas se obtendrán después de realizar un balance de energía del sistema. Para ello es necesario conocer las masas del molde y de la cantidad de aluminio a fundir.

Se realizará una idealización a un sistema cerrado, tomando en cuenta que el dispositivo terminado se encontrará dentro de una carcasa de lámina durante el proceso. Ésta carcasa contendrá un volumen de aire de alrededor de 0.216 m³. El molde será construido con tubo negro cédula 40. Las características son las siguientes:

*Diámetro nominal = 102[mm]; Diámetro exterior = 114.3[mm]; Espesor de pared = 6.02[mm];
Peso = 16.21[kg/m]*

La longitud máxima del molde estará limitada por las dimensiones de la flecha que transmitirá las *rpm* dado que esta no se maquina sino que se empleará un mandril pulidor. Se modificarán algunos parámetros dimensionales de esta pieza. Una vez realizadas las correcciones del mandril, se determinarán las dimensiones del molde. Éstas dependerán del maquinado que requiera puesto que el tubo no es perfectamente cilíndrico, lo que hace necesario un maquinado tanto interior como exterior, con la finalidad de obtener una geometría cilíndrica y mejorar el acabado superficial. También se definirá la ubicación de las guías de rotación a lo largo de éste.

El diseño de las tapas debe considerar un espesor que permita su sujeción para brindar un proceso seguro, además de tomar en cuenta un barrenado central por donde pueda llevarse a cabo una adecuada etapa de vaciado del material fundido. El diseño de las guías dependerá de las dimensiones de las poleas que transmitirán las *rpm* al molde, así como de los rodamientos que den la estabilidad durante el proceso de rotación.

Las dimensiones en mm de las piezas que conforman al molde se muestran en la figura 42.

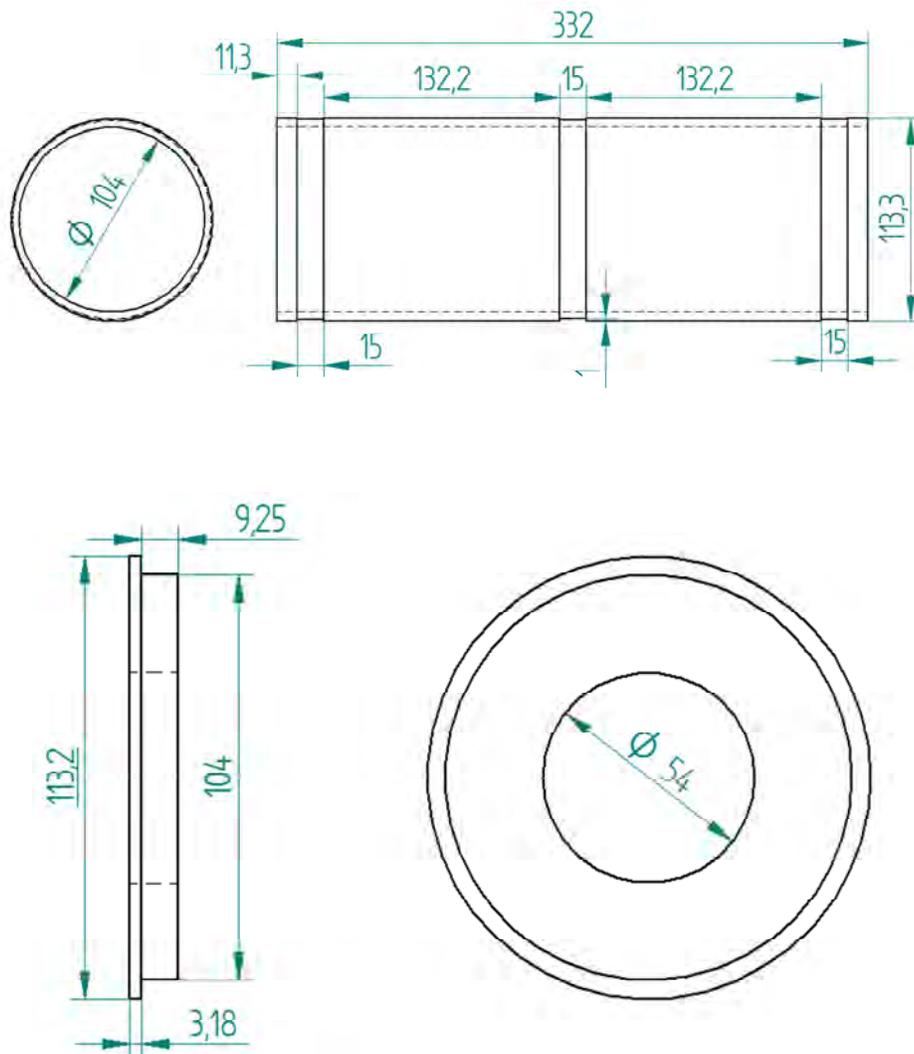


Figura 42. Medidas teóricas del molde y sus tapas en [mm].

Una vez armado el molde se puede determinar el volumen total, para así poder conocer la masa de acero involucrada en el proceso. Éste volumen se obtendrá calculando el volumen de los costados, el volumen del centro del cilindro y el volumen de la cantidad de material maquinada para fabricar las guías.

Las dimensiones para los costados se muestran en la figura 43:

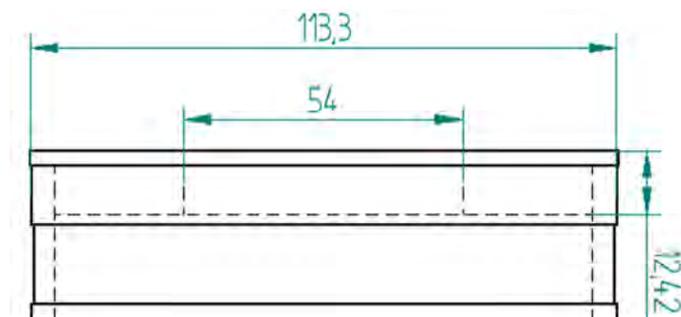


Figura 43. Dimensiones del costado del molde ensamblado en [mm].

$$V_{\text{costado}} = \pi(r_{\text{ext}}^2 - r_{\text{int}}^2)h \quad (\text{Ec. 3.1})$$

$$V_{\text{costado}} = \pi(56.65^2 - 27^2)12.42$$

$$V_{\text{costado}} = 96775 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Donde:

V_{costado}	Volumen del costado del molde en [mm ³]
r_{ext}	Radio exterior en [mm]
r_{int}	Radio interior en [mm]
h	Espesor de las tapas en [mm]

Y como son dos costados:

$$V_{\text{costados}} = 193550 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Para calcular el volumen del centro del molde se muestran las dimensiones en la siguiente figura 44.

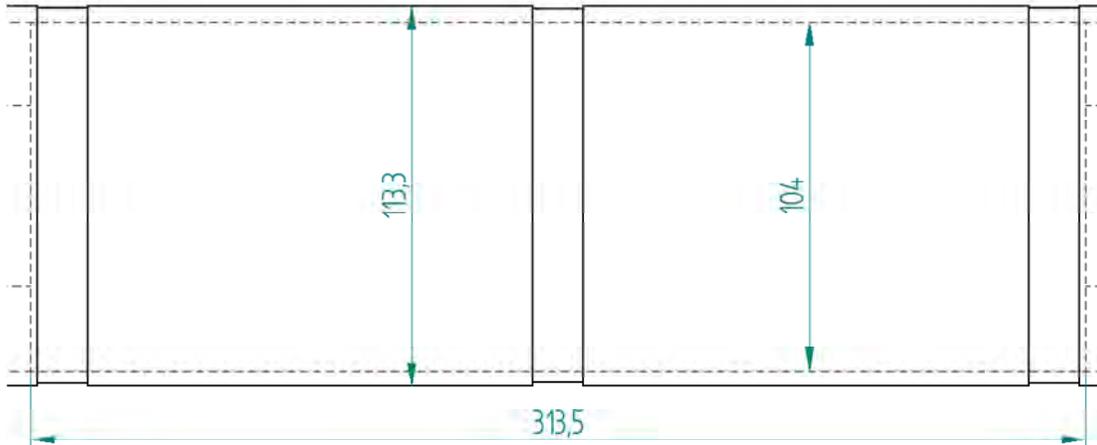


Figura 44. Dimensiones del centro del molde ensamblado en [mm].

$$V_{centro} = \pi(r_{Text}^2 - r_{Tint}^2)h_T \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Donde:

- r_{Text} Radio exterior del tubo en [mm]
- r_{Tint} Radio interior del tubo en [mm]
- h_T Longitud del tubo sin contar la sección que ocupan las tapas en [mm]
- V_{centro} Volumen del centro del molde en [mm^3]

$$V_{centro} = \pi(56.65^2 - 52^2)313.5$$

$$V_{centro} = 497588[mm^3]$$

Para determinar el volumen de material retirado por el maquinado de las guías las dimensiones se muestran en la figura 45.

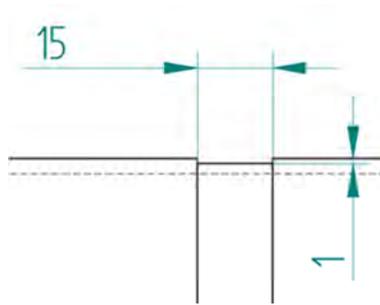


Figura 45. Dimensiones para las guías del molde en [mm].

$$V_{guía} = \pi(r_{Text}^2 - r_{guía}^2)h_g \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Donde:

- $V_{guía}$ Volumen retirado de las guías del molde en [mm^3]
- $r_{guía}$ Radio del tubo en la sección de las guías en [mm]
- h_g Longitud de las guías en [mm]

$$V_{guía} = \pi(56.65^2 - 55.65^2)15$$

$$V_{guía} = 5292[mm^3]$$

Y como son tres guías:

$$V_{guías} = 15876 [mm^3]$$

El volumen total V_{total} de la pieza será la suma de los costados más el centro y es necesario restar el material retirado por el proceso de maquinado de las guías, entonces:

$$V_{total} = V_{centro} + V_{costados} - V_{guías} = 16957.1[mm^3] \quad (\text{Ec. 3.4})$$

$$V_{total} = 497588 + 193550 - 15876$$

$$V_{total} = 675262[mm^3] = 0.000675262 [m^3]$$

Ahora que se conoce el volumen total del molde, y tomando el dato del proveedor de 16.21 [kg] por cada metro de tubo se obtendrá la densidad y con ello la masa.

El volumen en 1[m] de tubo de 102[mm] de cédula 40 es:

$$V_{1[m]} = \pi(r_{ext}^2 - r_{int}^2)h \quad (\text{Ec. 3.5})$$

$$V_{1[m]} = \pi(0.05715^2 - 0.05113^2)1$$

$$V_{1[m]} = 0.00205[m^3]$$

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{Ec. 12}) \quad ; \quad \rho = \frac{16.21}{0.00205} = 7907.3 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$m_{molde} = 7907.3(0.000675262) = 5.3 [kg]$$

Para determinar la cantidad de volumen de aluminio, es necesario considerar la dilatación térmica que éste sufrirá, ya que de no ser así el material puede llegar a derramarse por los orificios de las tapas del molde durante el proceso de vaciado y provocar un accidente. Este volumen estará en función de la medida del radio interno del molde a 150 [°C] ya que al entrar en contacto el aluminio líquido, el volumen que ocupará será el que tenga el molde a la temperatura de precalentamiento.

El volumen se obtiene calculando la dilatación volumétrica, así entonces:

$$\alpha_{acero} = 1.2 \times 10^{-5} [1/^\circ C] ;$$

$$\beta_{acero} = 3\alpha_{acero} \quad (\text{Ec. 3.6})$$

$$\beta_{acero} = 3.6 \times 10^{-5} [1/^\circ C]$$

Y recordando que:

$$V_f = V_0 + \beta V_0 (\Delta T)$$

Para el molde de acero se tiene que:

$$V_{150 [^\circ C]} = V_{T_{amb}} + \beta V_{T_{amb}} (150 [^\circ C] - 25 [^\circ C]) \quad (\text{Ec. 3.7})$$

$$V_{150 [^\circ C]} = 0.000675262 + 3.6 \times 10^{-5} (0.000675262) (150 - 25)$$

$$V_{150 [^\circ C]} = 0.0006783 [m^3]$$

Esto representa una dilatación volumétrica del 0.45%, que para fines prácticos podemos considerar despreciable. El volumen de aluminio que es posible colar, depende de la temperatura de vaciado, aproximadamente 10% superior a su temperatura de fusión, es decir 726 [°C]. Esta se determina basada en la experiencia, considerando que el aluminio debe tener suficiente fluidez para que el proceso se lleve a cabo de manera adecuada.

El orificio central de las tapas tiene un radio de 27 [mm] y el radio interior del molde, que determinará el diámetro exterior de nuestra fundición de aluminio es de 52 [mm]. Para un proceso seguro se establecerá como mínimo una distancia de 5 [mm] del orificio de las tapas a la pared interna del tubo de aluminio recién colado. Calculando según estos parámetros el espesor de la fundición a 726[°C] es:

$$Esp_{Al} = r_{int_{molde}} - (r_{int_{tapa}} + 5[mm]) \quad (\text{Ec. 3.8})$$

$$Esp_{Al} = 52 - (27 + 5)$$

$$Esp_{Al} = 20[mm]$$

Por lo que las dimensiones del tubo de aluminio a 726 [°C] serán las que se muestran en la figura 46.

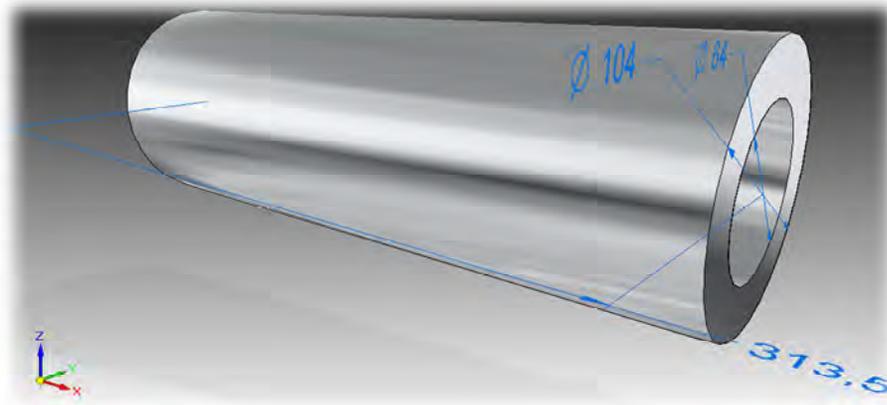


Figura 46. Dimensiones teóricas de la fundición de aluminio en [mm] a 726 [°C].

Es importante destacar que estas dimensiones son las que se tienen en el instante justo del vaciado del material, puesto que después de eso habrá un intercambio de calor donde se presentaran variaciones en las dimensiones tanto del molde como de la pieza de aluminio.

Así entonces el volumen de aluminio una vez terminado el proceso de vaciado resulta:

$$V_{Al_{726[^\circ C]}} = \pi(r_{Al\ ext}^2 - r_{Al\ int}^2)h \quad (\text{Ec. 3.9})$$

Donde:

$V_{Al_{726[^\circ C]}}$ Volumen del aluminio a 726 [°C] en [m^3]
 $r_{Al\ ext}$ Radio exterior del tubo de aluminio a 726[°C] en [mm]
 $r_{Al\ int}$ Radio interior del tubo de aluminio a 726[°C] en [mm]

$$V_{Al_{726[^\circ C]}} = \pi(52^2 - 32^2)313.5$$

$$V_{Al_{726[^\circ C]}} = 1654614[mm^3]$$

$$V_{Al_{726[^\circ C]}} = 0.001654614 [m^3]$$

Para determinar la cantidad de masa de aluminio involucrada en el proceso es necesario conocer su densidad a 726 [°C], esta se obtendrá haciendo una aproximación con la siguiente gráfica.

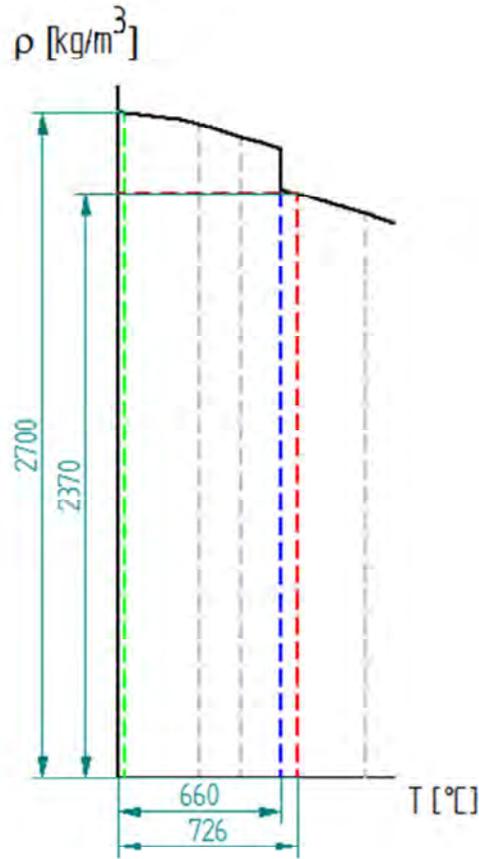


Figura 47. Gráfica de la densidad del aluminio en función de la temperatura

Sabiendo que $\rho_{\text{Al}(726^{\circ}\text{C})} \approx 2370$ $[\text{kg/m}^3]$

La masa será de:

$$m_{\text{Al}} = 2370(0.001654614) = 3.92$$
 $[\text{kg}]$

Esta cantidad de material es la máxima considerada para un proceso de vaciado seguro.

Ahora hay que considerar la presión provocada por esta masa de aluminio en las paredes del molde. Ésta debe ser menor que la presión máxima a la que puede ser sometido el tubo que se empleará para fabricar el molde. Recordando que:

$$P = F/A_{int} \quad (\text{Ec. 3.10})$$

Donde:

A_{int} Área de la superficie interior del molde en $[m^2]$

$$A_{int} = 2\pi rh = 2\pi(0.052)(0.3135)$$

$$A_{int} = 0.1024 [m^2]$$

Para determinar la fuerza, al ser un movimiento rotativo se presentará una aceleración conformada por dos vectores:

$$a = a_{tan} \vec{u}_{tan} + a_n \vec{u}_n \quad (\text{Ec. 3.11})$$

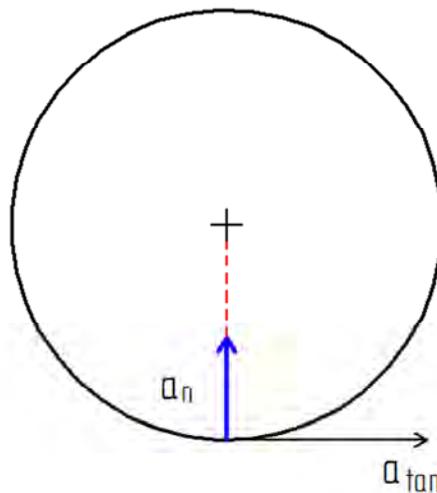


Figura 48. Aceleración para un movimiento circular.

Para el problema en cuestión, como se muestra en la figura 48, la aceleración de interés es la normal, que se calcula de la forma:

$$a_n = \frac{v_T^2}{r_{ext}} \quad (\text{Ec. 3.12})$$

$$v_T = \omega r_{ext} \quad (\text{Ec. 3.13})$$

Recordando que:

$$a_n = \frac{(\omega r_{ext})^2}{r_{ext}} = r_{ext}(\omega^2) \quad (\text{Ec. 3.14})$$

Para determinar la velocidad angular es necesario hacer el siguiente análisis:

$$a_n = r \left(\frac{2\pi N}{60} \right)^2 = r \left(\frac{4\pi^2 N^2}{3600} \right) = r \left(\frac{\pi^2 N^2}{900} \right) \quad (\text{Ec. 3.15})$$

Si GF es demasiado bajo, el aluminio líquido no quedará pegado a la pared del molde durante el proceso sino que "lloverá" dentro de la cavidad. Si se propone un factor GF=70 tendremos entonces:

$$N = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{2gGF}{D}} \quad (\text{Ec. 3.16})$$

$$N = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{2(9.78)(70)}{(0.104)}}$$

$$N = 1095.7[rpm]$$

Por lo que:

$$a_n = 0.052 \left(\frac{\pi^2 1095.7^2}{900} \right) = 684.6 \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

Y como la masa del aluminio es de 3.92 [kg]

$$F = m(a) = 3.92(684.6) = 2683.6[N]$$
$$P = \frac{2683.6}{0.1024} = 26207.3[Pa] = 267978 \left[\frac{kg}{m^2} \right] = 2.67 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

Se desprecia la fuerza provocada por la gravedad, ya que en comparación con la generada por la rotación del molde, tiene un valor muy pequeño. Para determinar la presión máxima que soporta el molde, según la fórmula de Barlow tenemos que:

$$P = \frac{2SE}{D} \left[\frac{kg}{m^2} \right] \quad (\text{Ec. 3.17})$$

Se tendrá un valor igual al 50% del límite elástico, que para el acero en cuestión es de 206.84 [MPa]. Las secciones que presentan el menor espesor son las guías, con 3.65 [mm] de espesor.

Así entonces:

$$P = \frac{(206.840 \times 10^6)(0.00365)}{0.1133} \left[\frac{kg}{m^2} \right]$$
$$P = 6663.5[kPa] = 66.635 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

Por lo que no se tendrá ningún problema en cuanto a la presión máxima que se ejercerá en el molde durante el proceso.

Conociendo las masas de ambos metales involucrados se hará un balance de energía idealizado a un sistema cerrado, considerando que el dispositivo estará dentro de una carcasa de 60x60x60 [cm³] aproximadamente. Si se determina la temperatura de equilibrio de este sistema idealizado, se

conocerá la máxima dilatación térmica del molde de acero. Sabiendo que la densidad del aire es de $1.293 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$, con un volumen de $0.216 \text{ [m}^3\text{]}$ se tendrá una masa de 0.279 [kg] de aire. Así entonces:

$$m_{aire} = 0.279 \text{ [kg]} \quad m_{Al} = 3.92 \text{ kg} \quad m_{acero} = 5.3 \text{ [kg]}$$

$$T_v = 726 [^{\circ}C] \quad T_{fusAl} = 660 [^{\circ}C] \quad T_{molde} = 150 [^{\circ}C] \quad T_{amb} = 25 [^{\circ}C] \quad T_{eq} = ?$$

$$Cp_{Al} = 904 \left[\frac{J}{kg^{\circ}C} \right] \quad Cp_{acero} = 460 \left[\frac{J}{kg^{\circ}C} \right] \quad Cp_{aire} = 1000 \left[\frac{J}{kg^{\circ}C} \right] \quad \lambda_{fusAl} = 377 \times 10^3 \left[\frac{J}{kg} \right]$$

Desarrollando el balance térmico:

$$Q_{sensAl liq} + Q_{latAl} + Q_{sensAl sol} = Q_{sensacero} + Q_{sensaire} \quad (\text{Ec. 3.18})$$

Donde:

$$\begin{aligned} m_{Al} Cp_{Al} (T_v - T_{fusAl}) + m_{Al} \lambda_{fusAl} + m_{Al} Cp_{Al} (T_{fusAl} - T_{eq}) \\ = \\ m_{acero} Cp_{acero} (T_{eq} - T_{molde}) + m_{aire} Cp_{aire pcte} (T_{eq} - T_{amb}) \end{aligned}$$

Sustituyendo:

$$3.92(904)(726 - 660) + 3.92(377 \times 10^3) + 3.92(904)(660 - T_{eq})$$

=

$$5.3(460)(T_{eq} - 150) + 0.279(1000)(T_{eq} - 25)$$

$$233883 + 1477840 + 2338829 - 3544T_{eq} = 2254T_{eq} - 338100 + 297T_{eq} - 6975$$

$$-6095T_{eq} = -4395627$$

$$T_{eq} = 721[^\circ\text{C}]$$

Por lo que el cálculo de la dilatación volumétrica del molde resulta:

$$V_{721[^\circ\text{C}]} = V_{T_{amb}} + \beta V_{T_{amb}}(721[^\circ\text{C}] - 25[^\circ\text{C}])$$

$$V_{721[^\circ\text{C}]} = 0.0006157 + 3.6 \times 10^{-5}(0.0006157)(721 - 25)$$

$$V_{721[^\circ\text{C}]} = 0.000631[\text{m}^3]$$

Esto representa un aumento en su volumen de casi el 2.2%. Para determinar las dimensiones del molde a 721[°C]:

$$r_{ext(721[^\circ\text{C}])} = r_{ext} + \alpha_{acero} r_{ext}(721 - 25)$$

$$r_{ext(721[^\circ\text{C}])} = 0.05665 + 1.2 \times 10^{-5}(0.05665)(721 - 25)$$

$$r_{ext(721[^\circ\text{C}])} = 0.057[\text{m}]$$

$$r_{int(721[^\circ\text{C}])} = r_{int} + \alpha_{acero} r_{int}(721 - 25)$$

$$r_{int(721[^\circ\text{C}])} = 0.052 + 1.2 \times 10^{-5}(0.052)(721 - 25)$$

$$r_{int(721[^\circ\text{C}])} = 0.0524[\text{m}]$$

$$L_{(721[^\circ\text{C}])} = L + \alpha_{acero} L(721 - 25)$$

$$L_{(721[^\circ\text{C}])} = 0.3135 + 1.2 \times 10^{-5}(0.3135)(721 - 25)$$

$$L_{(721[^\circ\text{C}])} = 0.316[\text{m}]$$

En la realidad no habrá una temperatura de equilibrio pues no se tiene un sistema cerrado, sino una temperatura máxima en las paredes internas del molde que se encuentran en contacto con el material fundido. El aumento de temperatura llevará a una dilatación térmica del molde que ayudará a

determinar las dimensiones finales de la pieza terminada. Ésta temperatura máxima será menor a la temperatura de equilibrio encontrada en el sistema idealizado, dado que el proceso se llevará a cabo en un lapso de tiempo relativamente corto en comparación con el necesario para alcanzar dicha temperatura de equilibrio y que el proceso ocurre en un sistema abierto, donde habrá interacción con el aire del ambiente de maneta constante.

Las dimensiones del tubo de aluminio a 721[°C] estarán en función de su densidad, del radio interior del molde y de la longitud del mismo a dicha temperatura. La densidad resulta prácticamente la misma que la temperatura ideal de vaciado, de 726 [°C]. Se tiene entonces que:

$$\rho_{Al(721[^\circ C])} = 2370 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Y como la masa de aluminio es de 3.92 [kg] se tiene un volumen a 650[°C] de:

$$V_{Al(650[^\circ C])} = \frac{3.92}{2370} = 0.00165[m^3]$$

El radio exterior del tubo de aluminio a 721 [°C] es igual al radio interior del molde, y la longitud será igual a la longitud de la parte central del molde, así entonces se tiene que:

$$0.00165 = \pi(0.0524^2 - r_{int}^2) 0.3158$$

$$r_{int} = \sqrt{0.0524^2 - \frac{0.00163}{\pi(0.3158)}}$$

$$r_{int} = 0.0347[m]$$

Hallando una relación entre radios y longitud se tiene que:

$$r_{int} = 0.0347[m]$$

$$r_{ext} = 0.0524[m] = 1.51r_{int}$$

$$L = 0.3158[m] = 9.1r_{int}$$

Sabiendo que la densidad del aluminio a temperatura ambiente es de $2700[\text{kg}/\text{m}^3]$ y que la masa es de $3.92 [\text{kg}]$ al final del proceso se obtendrá un tubo de aluminio cuyo volumen será de $0.00145 [\text{m}^3]$. Y con la relación de radios obtenida se tiene que:

$$V_{Al(Tamb)} = \pi[(1.51r_{int})^2 - r_{int}^2](9.1r_{int}) \quad (\text{Ec. 3.19})$$

$$0.00145 = \pi[(1.51r_{int})^2 - r_{int}^2](9.1r_{int})$$

$$0.00145 = \pi[2.28(r_{int}^2) - r_{int}^2](9.1r_{int})$$

$$0.00145 = \pi[1.28r_{int}^2](9.1r_{int})$$

$$0.00145 = 36.6r_{int}^3$$

$$r_{int} = \sqrt[3]{\frac{0.00114}{25.4}} = 0.034[m]$$

$$r_{ext} = 1.51r_{int} = 0.05134[m]$$

$$L = 9.1r_{int} = 0.3094[m]$$

Estas son las medidas finales teóricas de la fundición de aluminio, las cuales aseguran una extracción sencilla de la pieza.

2. Sistema de transmisión

Se utilizará un mandril pulidor modelo C-354 marca Torillo Hijos el cual, será sometido a un maquinado para que se ajuste a las medidas requeridas por el molde.

El motor eléctrico que generará el movimiento rotacional del molde será un motor Siemens trifásico de $0.5 [\text{HP}]$, con una velocidad de rotación de $1730 [\text{rpm}]$. El mandril pulidor cuenta con una polea con un diámetro de $46 [\text{mm}]$. La transmisión entre esta polea y el motor será por medio de una banda, por lo que se acoplará una polea al eje del motor, ésta tiene un diámetro de $51.4 [\text{mm}]$. Se maquinarán un

par de poleas más que se fijarán al mandril, éstas transmitirán la velocidad de giro al ponerse en contacto con las guías del molde, y su diámetro deberá ser lo suficientemente grande como para que el molde no entre en contacto con las chumaceras del mandril.

Para determinar el radio mínimo que deben tener las poleas que estarán en contacto con las guías del molde se realizará un diseño asistido por computadora. El resultado se muestra en la figura 49.



Figura 49. Chumacera del mandril en Solid Edge.

Y basándose en la vista frontal de la chumacera el resultado se muestra en la figura 50.

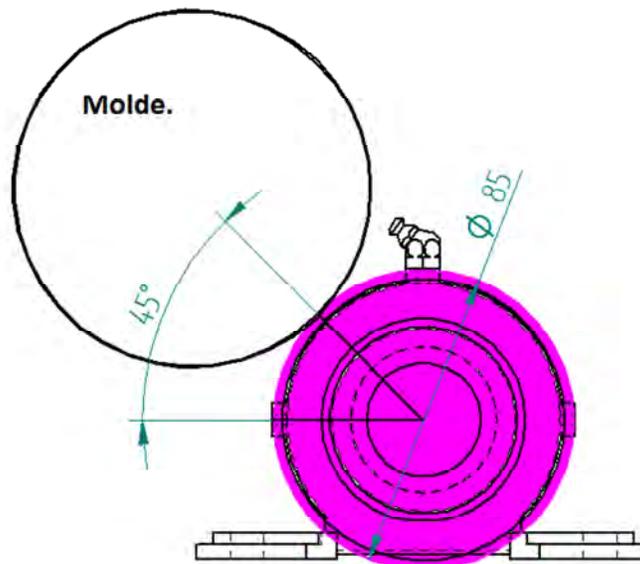


Figura 50. Propuesta del diámetro mínimo de las poleas de transmisión.

Con esto se observa que las poleas deben tener un diámetro mínimo de 85[mm].

En base a los datos anteriores es posible determinar la velocidad angular a la que girará el molde como se muestra en la siguiente figura. Los datos necesarios se muestran en la tabla 2.

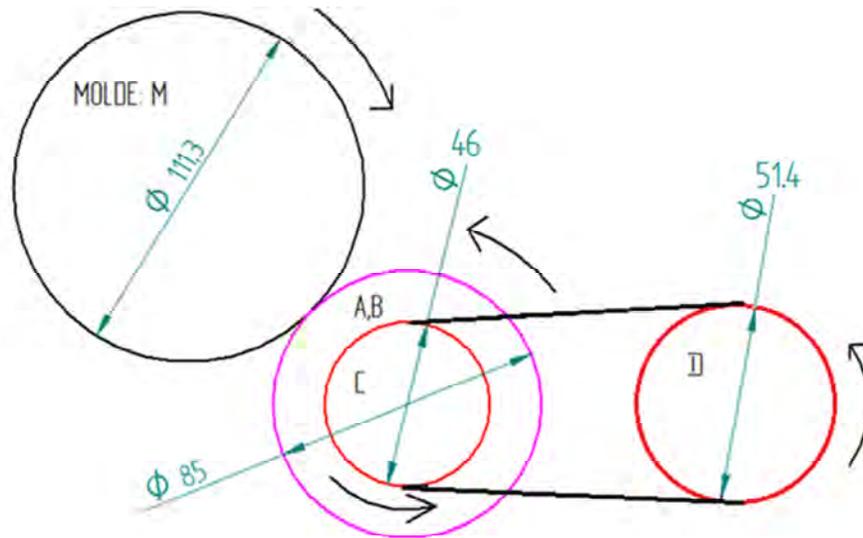


Figura 51. Esquema de la transmisión para el cálculo de la polea del motor en [mm].

Tabla 2. Datos para la solución de la velocidad angular del molde.

MOLDE	Poleas A y B	Polea C	Polea D
$r \approx 56.15 [mm]$	$r = 42.5 [mm]$	$r = 23$	$r = 25.7$
$\omega = ? [rpm]$	$\omega = ?$	$\omega = ?$	$\omega = 1730 [rpm]$
$v = ?$	$v = ?$	$v = ?$	$v = ?$

Para la polea D se tiene que:

$$\omega = 1730 [rpm] = 181.165 \left[\frac{rad}{s} \right]$$

$$v = \omega r \quad (\text{Ec. 3.20})$$

$$v = 181.165(0.0257) = 4.656 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Al estar en contacto con la banda la polea D, cualquier punto alrededor de la banda y por consiguiente, cualquiera de la polea C, llevarán esta velocidad; así entonces se llega a:

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (\text{Ec. 3.21})$$
$$\omega = \frac{4.656}{0.023} = 202.43 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$$

Al encontrarse acopladas en el mismo eje, las poleas A, B y C, la velocidad angular será la misma para las tres. Con base en esto se determinarán los diámetros de las dos poleas restantes según convenga para el diseño del equipo. Así entonces la velocidad tangencial en las poleas A y B, resultan:

$$v_{A,B} = 202.43(0,0425) = 8.6 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Finalmente, al estar en contacto ambas poleas con el molde se obtendrá la velocidad angular de este:

$$\omega = \frac{8.6}{r} = \frac{8.6}{0.05615} = 153.16 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] = 1462.6 \text{ [rpm]}$$

Esta velocidad es mayor a la teórica requerida.

3. Sistema de soporte y estabilidad

Las chumaceras y los rodamientos del mandril pulidor formarán parte del sistema de estabilidad, como se mencionó con anterioridad esta herramienta requiere de un maquinado, puesto que sus dimensiones resultan un tanto excesivas para el proceso. Además necesario considerar la fabricación de unas calzas para las chumaceras ya que, como se muestra en la siguiente figura, el radio de las poleas es mayor que la distancia que hay del centro de la chumacera hasta su parte más baja, así entonces se proponen calzas con un espesor de 12.7[mm].

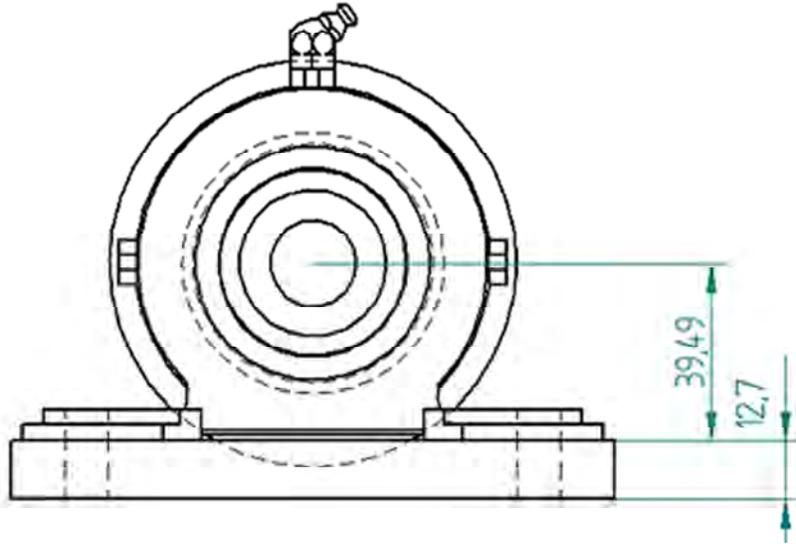


Figura 52. Propuesta de la altura para la calza de las chumaceras en [mm].

Las medidas de las bases para las chumaceras se muestran en la figura 53.

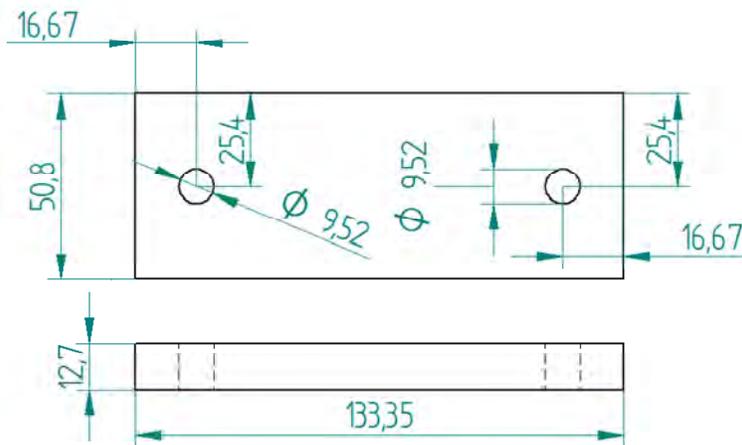


Figura 53. Dimensiones para la base de las chumaceras en [mm].

Los rodamientos que se acoplarán a las poleas serán iguales a los del mandril. Las dimensiones de las poleas a manufacturar del sistema de soporte y estabilidad se muestran en la siguiente figura.

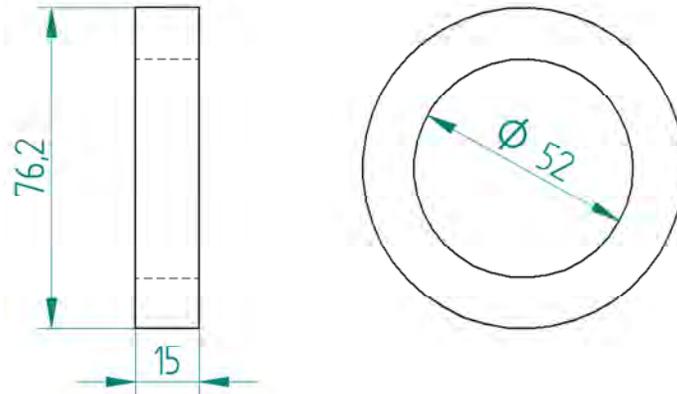


Figura 54. Dimensiones para las poleas del sistema de soporte y estabilidad en [mm].

Se tomó la decisión de fabricar estas poleas con un diámetro exterior de 76.2 [mm], puesto que se cuenta con el material para hacerlas de esta medida. Tomando esto en cuenta el eje donde se acoplará la parte interna de los rodamientos se diseñará en dos partes. Las medidas de esta pieza se muestran a continuación.

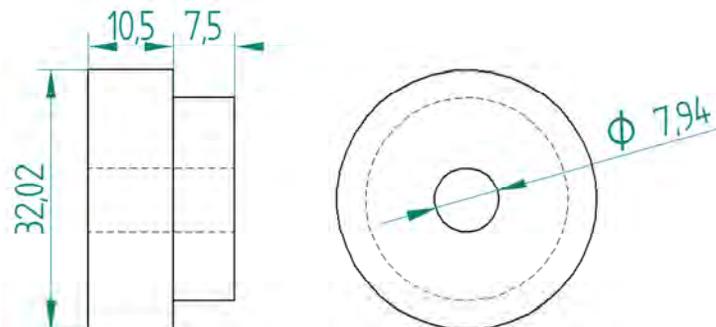


Figura 55. Dimensiones para las partes del eje de los rodamientos del sistema de soporte y estabilidad en [mm].

La finalidad del barrenado central del eje es para que con la ayuda de un perno o tornillo, el eje quede empotrado a las bases de la polea. El ensamble de las partes que conforman al eje con el rodamiento se muestra en la siguiente figura.

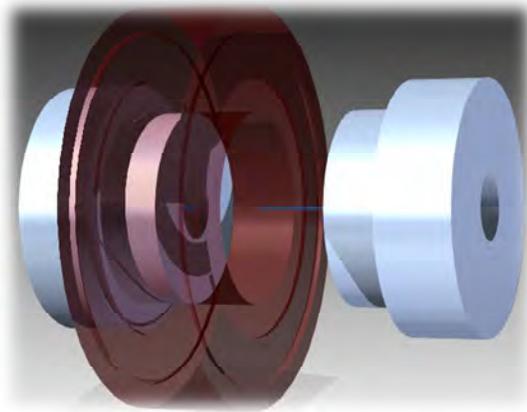


Figura 56. Ensamble en Solid Edge del rodamiento y las partes de su eje.

Recordando que la medida mínima del diámetro que deben tener las poleas a acoplar en el mandril pulidor es de 85 [mm] se obtienen las medidas para estas, las cuales se muestran en la figura 54.

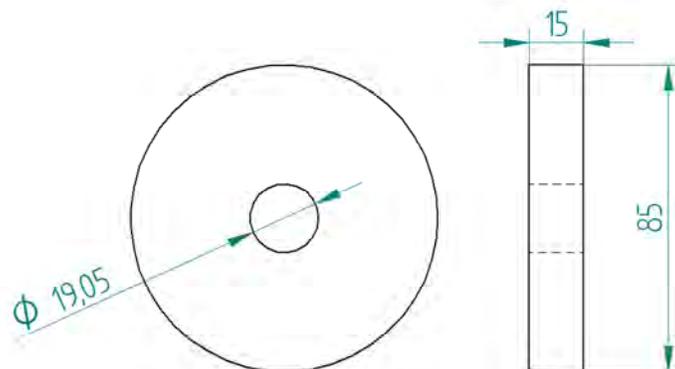


Figura 57. Dimensiones para las poleas de transmisión en [mm].

Estas poleas además de transmitir la velocidad de giro al molde forman parte del sistema de soporte y estabilidad.

Para determinar la altura de las bases es necesario definir la ubicación de las poleas de soporte y estabilidad. Al trazar una línea recta del centro del molde a los centros de cada una de las poleas debe formarse un ángulo de 90° entre ellas, de esta manera se obtienen las siguientes medidas de interés:

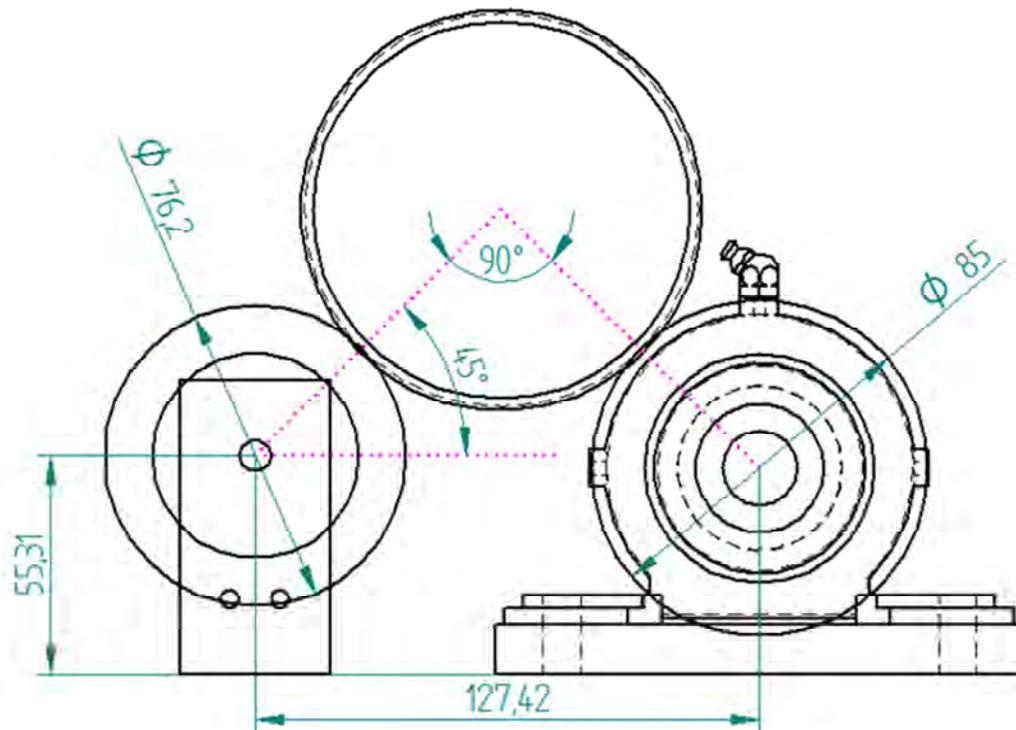


Figura 58. Posición del molde sobre las poleas de la transmisión y el sistema de soporte y estabilidad. Dimensiones en [mm].

Las rectas que parten de los centros de las poleas al centro del molde formarán ángulos de 45° respecto a la horizontal. Esto garantiza una buena estabilidad durante el proceso y adicionalmente asegurará que el molde no entre en contacto con la grasa de la chumacera.

Las bases de las poleas están compuestas de cuatro piezas: un par de placas con tres barrenos cada una, el barrenos superior sirve para empotrar el eje de los rodamientos y los barrenos inferiores ayudarán a fijar dichas placas en un par de ángulos, los cuales se fijarán a la base principal del sistema con ayuda de soldadura. Las medidas de las placas y los ángulos se muestran en la siguiente figura.

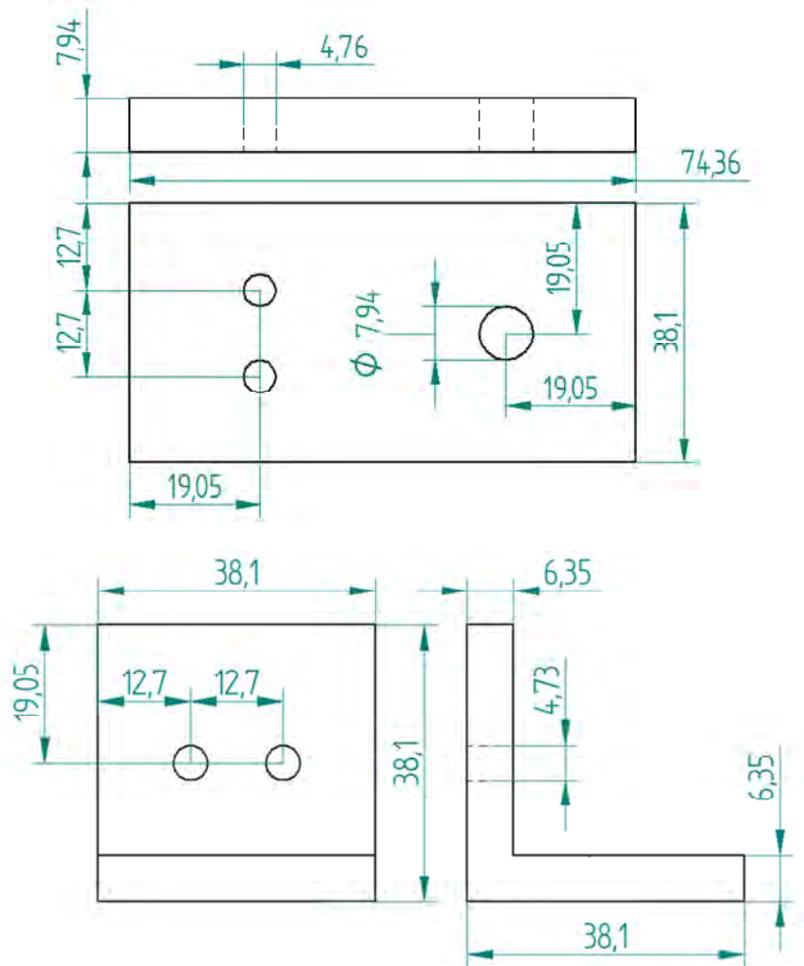


Figura 59. Dimensiones de las placas y los ángulos de las bases del sistema de soporte y estabilidad.

Finalmente el ensamble de las bases de soporte y estabilidad quedan como se muestra en la figura 60.

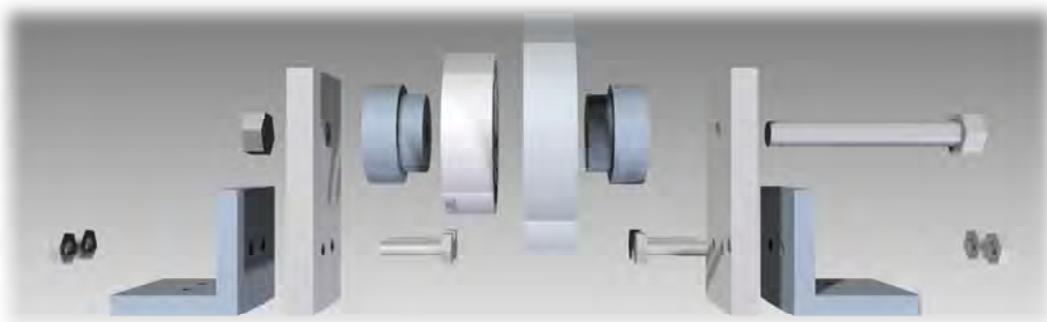


Figura 60. Ensamble de las poleas del sistema de soporte y estabilidad con sus bases.

Ahora es necesario diseñar la base para la polea superior, para ello se propone emplear solera de 7.94x38.1 [mm] puesto que se cuenta con el material y es funcional para la operación. Basándose en la consideración anterior y en la figura de abajo, se propone un brazo con un grado de libertad.

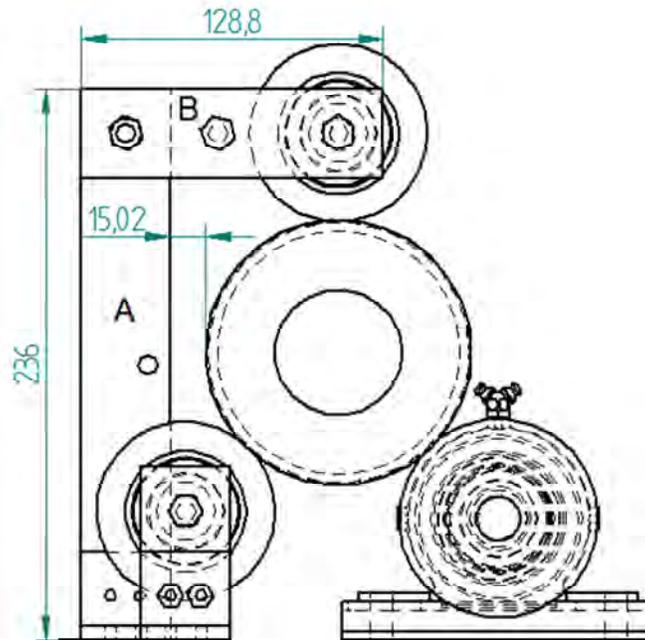


Figura 61. Dimensiones de interés para el diseño de la base de la polea superior del sistema de soporte y estabilidad en [mm].

Las características que debe tener la sección A se muestran en la siguiente figura:

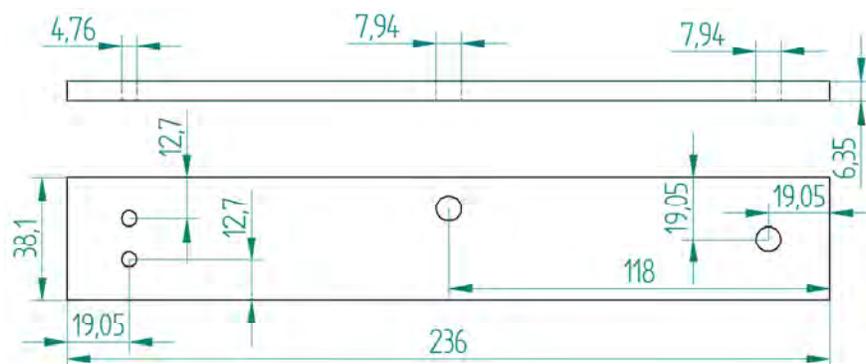


Figura 62. Dimensiones de interés de la sección A de la base de la polea superior en [mm].

Los barrenos de menor tamaño servirán para sujetar las soleras a un par de ángulos que las fijarán a la base principal del sistema. En el barreno de la parte central se colocará un perno en el cual se sujetará uno de los extremos de un resorte que tendrá la función de mantener la polea superior en contacto con el molde. El último barreno servirá para colocar un perno más que será el eje entre las secciones A y B. Las dimensiones de la sección B se muestran a continuación.

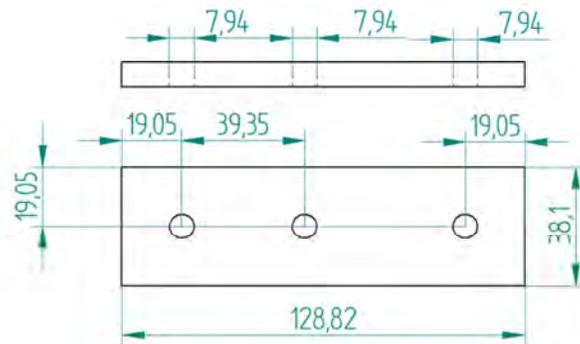


Figura 63. Dimensiones de las soleras para la sección B de la base de la polea superior en [mm].

Los pernos donde se soportará el resorte serán tornillos comunes. Éstos se fijarán a las soleras con ayuda de tuercas y rondanas de presión, tanto en la parte exterior como en la interior. El eje de rotación de la sección B será de igual manera un tornillo, con la diferencia de que éste se fijará con tuerca, rondana de presión y contratuerca, tanto en las zonas interiores como en las exteriores. Así entonces, la base con su polea se verá como se muestra en la figura 64.



Figura 64. Ejemplificación del ensamble de la polea superior con su base y el resorte tensor.

Para la fabricación de la base principal del sistema se requiere conocer la ubicación de los barrenos de las chumaceras del mandril y de las bases de las poleas de soporte y estabilidad, para lo cual se hará un ensamble en "Solid Edge" de las partes del sistema, obteniendo como resultado lo que se muestra en las figuras 65 y 66.



Figura 65. Ensamble de las poleas de soporte y estabilidad, el mandril y el molde.

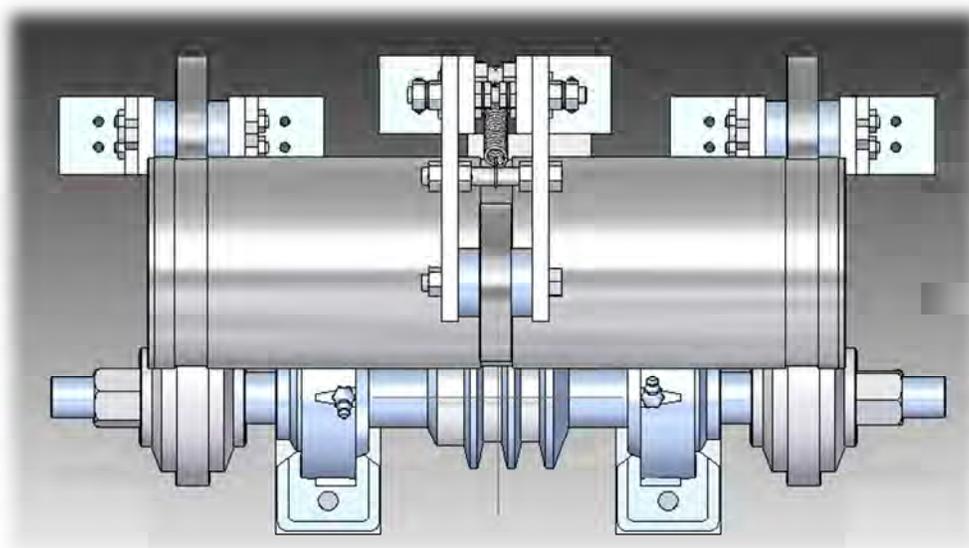


Figura 66. Vista superior del ensamble de las poleas de soporte y estabilidad, el mandril y el molde.

Se propone una base principal formada por un marco de ángulo de 2 [in] por ¼ [in]. La sección central será conformada por placa de ¼ de pulgada. En la parte que se muestra libre de la base se fijará el motor con una polea para transmitir el giro al mandril por medio de una banda. El resultado se muestra en la siguiente figura siguiente.

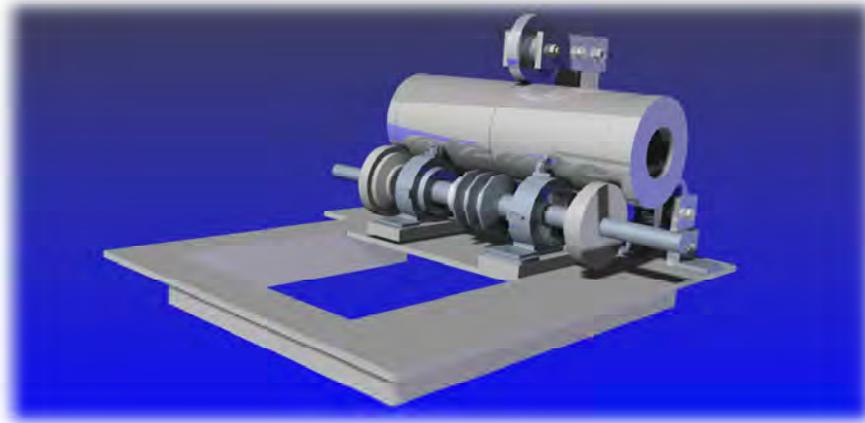


Figura 67. Ensamble del equipo con la base principal.

Y las dimensiones de la base principal del sistema se muestran en la figura 68.

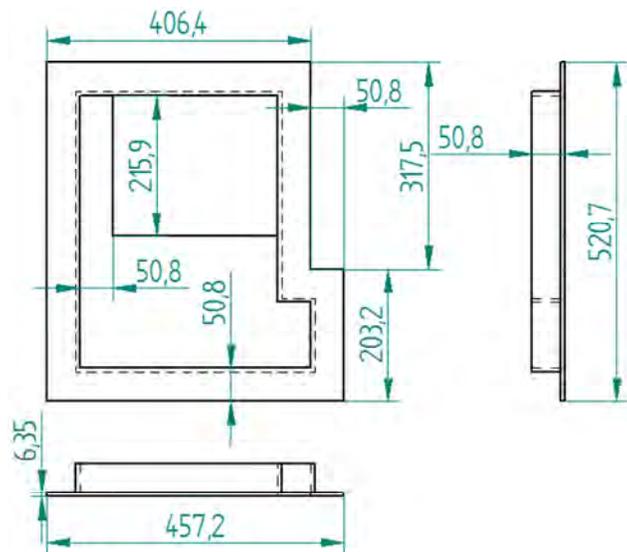


Figura 68. Dimensiones de la base principal en [mm].

4. Sistema de vaciado.

El sistema de vaciado estará formado por un tubo y su base. El tubo se elaborará con redondo de 50.8 [mm], a éste se le maquina un barreno de 25.4 [mm] por el que fluirá el metal fundido. El espesor del tubo elimina los efectos de deformación a causa del choque térmico puesto que este sistema no tendrá un precalentamiento. Se añadirán además un par de soleras de 6.35 [mm] para fijar el tubo en su base. Las dimensiones del sistema de vaciado se muestran en la siguiente figura.

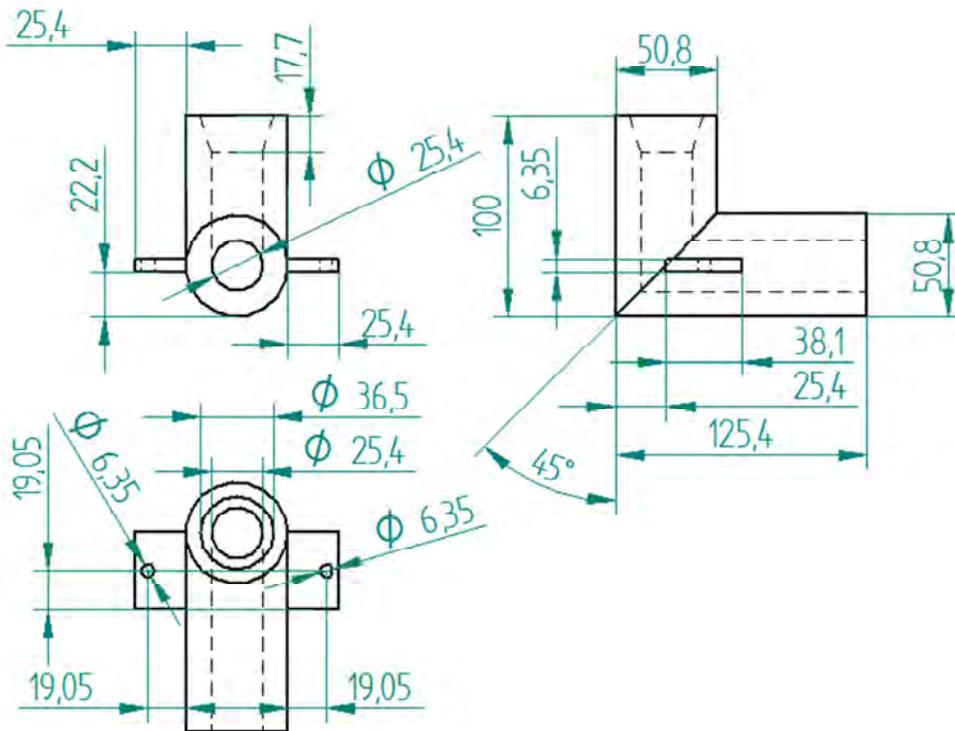


Figura 69. Dimensiones del sistema de vaciado en [mm].

Para sujetar el tubo de vaciado se requiere fabricar una base. Ésta se fijará con soldadura a la base principal del sistema, los barrenos que se muestran a los costados del tubo de vaciado servirán como guías, con ayuda de tornillos el tubo de vaciado se fijará a su base, con ello se asegura la alineación correcta de éste con la carcasa y el molde. Ésta base será fabricada con solera de 6.35x25.4 [mm] a continuación se muestran las medidas de interés para esta pieza:

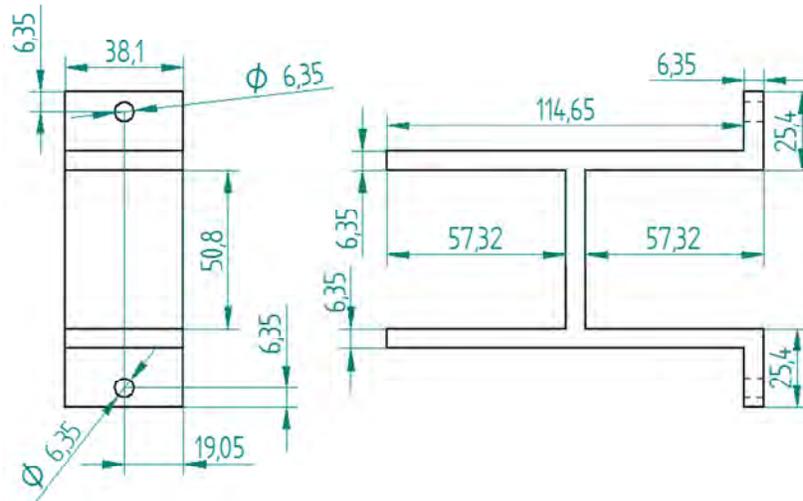


Figura 70. Dimensiones de la base para el sistema de vaciado en [mm].

5. Sistema de precalentamiento del molde.

El precalentamiento del molde se llevará a cabo con ayuda de una pistola de aire caliente la cual calienta el aire a una temperatura hasta de 250 [°C] (Figura 71). Ésta será introducida a través de la carcasa de seguridad y a través del molde, posteriormente se mantendrá en funcionamiento durante un tiempo que permita elevar la temperatura a la temperatura de precalentamiento para evitar los efectos de un choque térmico en el molde. Este dispositivo cuenta con un tubo por donde sale el aire caliente, el cual tiene un diámetro igual al del tubo de vaciado por lo que, el precalentamiento se llevará a cabo por la tapa opuesta a la que se realizará la etapa de vaciado.



Figura 71. Pistola de aire caliente que se empleará para la etapa de precalentamiento.

6. Carcasa de seguridad.

La carcasa servirá para garantizar un proceso seguro, ésta no permitirá la salida brusca e inesperada del molde durante la etapa de colado, además ayudará a disminuir la interacción de calor del sistema con el ambiente, con lo que se consigue una mayor temperatura de precalentamiento en un menor tiempo. El equipo lucirá de la siguiente manera:

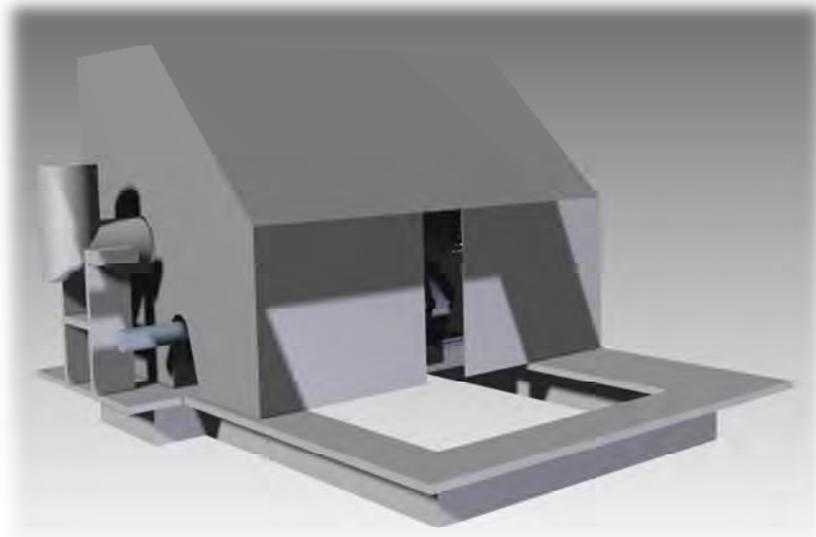


Figura 72. Ejemplificación de la carcasa colocada en el dispositivo.

Se harán los barrenos que se muestran en las tapas laterales para que a través de ellos se lleven a cabo las etapas de precalentamiento y vaciado. Además como la carcasa abrirá con un par de bisagras, se requiere orificios a la altura del mandril y de los ángulos de las bases de las chumaceras para que la carcasa pueda moverse libremente, mientras que el corte que se muestra en la tapa frontal es para que la banda pueda correr libremente del motor al mandril.

Las medidas de la carcasa se muestran en la figura 73.

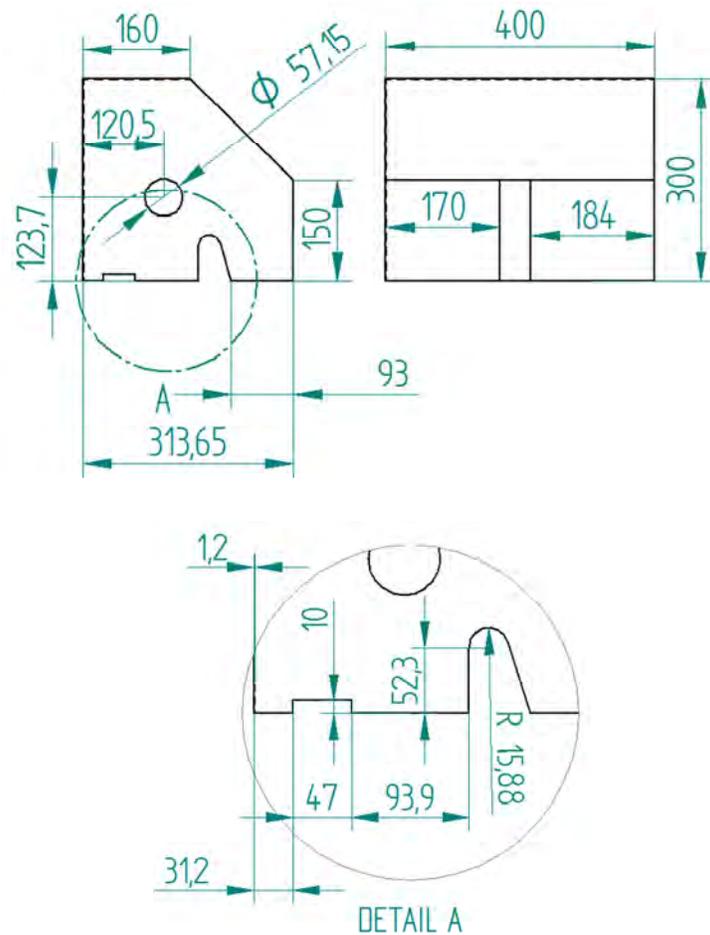


Figura 73. Medidas de interés para la fabricación de la carcasa en [mm].

3.2.5 Construcción del prototipo.

Molde (Figura 74).

El molde requiere de un maquinado tanto exterior como interior en todo su largo, ya que al no ser fabricado para esta aplicación no es del todo redondo. El maquinado exterior se realiza con el fin de tener una superficie lo más redonda posible para no generar vibraciones y excentricidades. El maquinado interior contribuye con el balanceo de la pieza y da un adecuado acabado superficial, que contribuye a la fácil extracción de la pieza terminada. Es necesario maquinar tres barrenos con cuerda en cada uno de los costados con el objetivo de mejorar la sujeción de las tapas durante el proceso introduciendo en cada uno de ellos un opresor que sirve para sujetar las tapas del molde. Las características del molde se encuentran en la sección 3.2.9 en el plano 1.



Figura 74. Molde terminado.

Tapas del molde (Figura 75).

Resulta de vital importancia la precisión en el maquinado de las tapas ya que estas deben estar muy bien sujetas durante el proceso por cuestiones de seguridad. Para su fabricación se cuenta con placa de 12,7[mm] de espesor, esta se corta inicialmente con ayuda de un compas y equipo de soldadura autógena, el maquinado requiere de una previa reducción del diámetro exterior con ayuda del esmeril puesto que el endurecimiento por el corte de soldadura provoca daños en el buril y dificulta su maquinado. Para llevar a cabo un proceso aun más seguro se deben maquinar tres barrenos en cada una de las tapas para que con ayuda de los opresores del molde se mejore la sujeción de las tapas. Las características de las tapas del molde se encuentran en la sección 3.2.9 en el plano 2.



Figura 75. Tapas del molde.

Poleas de soporte y estabilidad (Figura 76).

Para su fabricación se cuenta con redondo de 76.2 [mm] de diámetro, el cual es barrenado y maquinado con ayuda del torno. El maquinado de la parte exterior tiene como objeto una superficie lo más circular posible, con la finalidad de disminuir las vibraciones durante el proceso. Se debe tener una buena precisión en la superficie interna ya que estas funcionan como cajas de los rodamientos. Las características de las poleas de soporte y estabilidad se encuentran en la sección 3.2.9 en el plano 4.



Figura 76. Poleas del sistema de soporte y estabilidad.

Ejes de las poleas del sistema de soporte y estabilidad (Figura 77).

Estos se maquinan en el torno a partir de secciones de redondo de 31.75 [mm]. Cada eje está compuesto por dos partes iguales. La precisión es de importancia puesto que deben tener un adecuado ajuste con los rodamientos. Las características de las piezas que conforman los ejes de las poleas del sistema de soporte y estabilidad se encuentran en la sección 3.2.9 en el plano 5.



Figura 77. Ejes de las poleas del sistema de soporte y estabilidad.

Poleas de transmisión (Figura 78).

Estas se maquinan a partir de placa de 15.88 [mm] de espesor, dado que la medida comercial de redondo de mayor diámetro es de 76.2[mm] y el diámetro que requieren estas poleas es de 85[mm]. Al igual que las tapas del molde se lleva a cabo un corte con ayuda de compas y equipo de soldadura autógena, posteriormente se realiza un maquinado para ajustarlas a las medidas requeridas. Las características de las poleas de transmisión se encuentran en la sección 3.2.9 en el plano 6.



Figura 78. Poleas de transmisión.

Bases de las poleas inferiores del sistema de soporte y estabilidad (Figura 79).

Estas son conformadas por un par de soleras fijadas con ayuda de tornillos a ángulos, estas sujetan al eje donde se encuentra apoyada la polea, que gira con ayuda de rodamientos iguales a los empleados en el sistema de transmisión. Las bases de las poleas se fijan a la base principal con ayuda de soldadura eléctrica. Las características de las piezas que conforman las bases de las poleas se encuentran en la sección 3.2.9 en los planos 7 y 8.

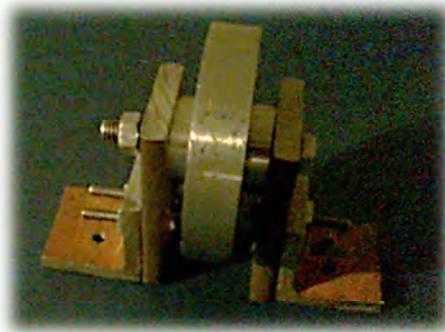


Figura 79. Polea inferior ensamblada a su base.

Base de la polea superior (Figura 80).

Ésta se fija a la base principal con ayuda de soldadura eléctrica. La base de la polea superior se conforma de un brazo articulado, el cual se tensiona con un resorte que se fija en los tornillos ubicados en las secciones medias de las soleras que componen la base. Las características de las piezas que conforman la base de la polea superior se encuentran en la sección 3.2.9 en los planos 8, 9 y 10.



Figura 80. Polea superior ensamblada a su base.

Eje del sistema de transmisión (Figura 81).

Se cuenta con un mandril pulidor que sirve como eje del sistema de transmisión, este requiere un maquinado para ajustar sus dimensiones a las de las guías por donde correrá el molde. Al ser estas dimensiones inferiores a las que el mandril trae de fábrica se debe maquinar unos bujes que permiten la sujeción de las poleas de transmisión en el mandril. Las características del eje del sistema de transmisión se encuentran en la sección 3.2.9 en el plano 15.



Figura 81. Eje de transmisión con sus componentes y las poleas de transmisión.

Sistema de vaciado (Figura 82).

El sistema de vaciado se obtuvo de un redondo de 50.2 [mm] de diámetro. A éste se le hizo un barrenado de un diámetro de 25.4 [mm]. Se maquinó una sección cónica en la parte superior del sistema con la finalidad de facilitar la etapa de vaciado. Una vez maquinado este tubo se hizo un corte a 45° con ayuda de cierra de disco. Ambas secciones del tubo se unieron con ayuda de soldadura de arco eléctrico. Para asegurar la penetración de la soldadura se hizo una sección cónica alrededor de las caras cortadas a 45° de la pieza.



Figura 82. Sistema de vaciado.

Base del sistema de vaciado (Figura 83).

Se fabricó además una base para el sistema de vaciado formada por solera de 6,35x38.1[mm] con la finalidad de proporcionar una adecuada sujeción durante el proceso. Ésta se fijó a la base principal del sistema con ayuda de soldadura de arco eléctrico. Las características de la base del sistema de vaciado se muestran en la sección 3.2.9 en el plano 12.



Figura 83. Base del sistema de vaciado.

Base principal del equipo (Figura 84).

La base principal del sistema se elaboró con ángulo estructural de 50.8x4.76 [mm] y solera de 50.8x5 [mm]. Sobre ella se fijarán las poleas de soporte y estabilidad con ayuda de soldadura eléctrica, de igual manera se fijará la base del sistema de vaciado. Las chumaceras del mandril pulidor se fijarán con ayuda de tornillos. Las características de la base principal del equipo se encuentran en la sección 3.2.9 en el plano 11.

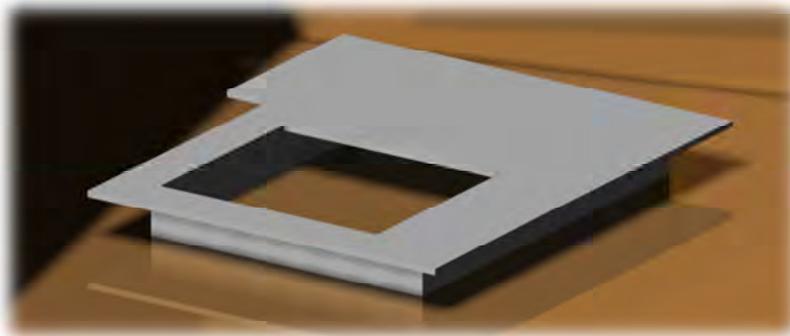


Figura 84. Base principal del equipo.

Carcasa de seguridad (figura 85).

La carcasa de seguridad se construyó con lámina negra de calibre 18 con ayuda de soldadura de arco eléctrico. Ésta se fijará a la base principal del sistema con ayuda de un par de bisagras. Las medidas obtenidas previamente aseguran que al abrir la carcasa, esta no entrará en contacto con la polea superior del sistema de soporte y estabilidad. Las características de la carcasa de seguridad se muestran en la sección 3.2.9 en el plano 14.

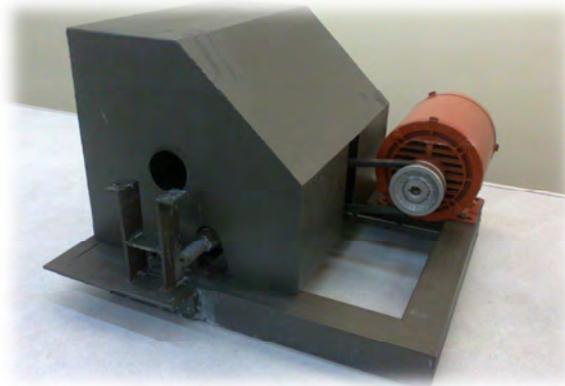


Figura 85. Carcasa de seguridad.

Ensamble final del equipo.

Una vez manufacturados todos los componentes del equipo, estos se ensamblaron a la base principal, el resultado se muestra en la siguiente figura. El equipo está listo para realizar las pruebas iniciales.

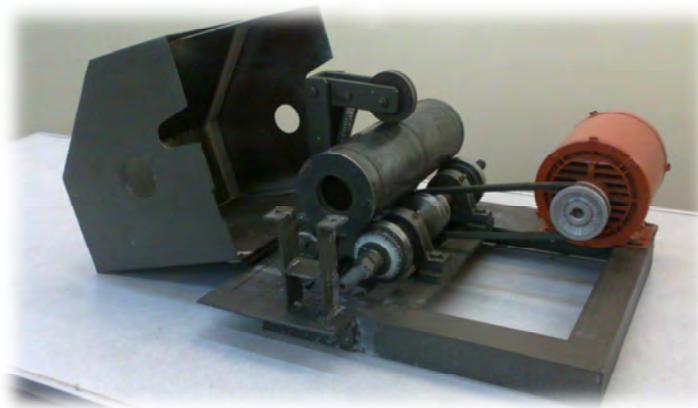


Figura 86. Ensamble de los componentes del equipo.

3.2.6 Evaluación del prototipo.

Una vez terminada la manufactura total del dispositivo, se llevaron a cabo pruebas de validación.

El calculo teórico de la velocidad angular del molde dio como resultado 1462.6 [rpm] mientras que la medición tomada con ayuda de un estroboscopio resultó de 1458 [rpm] después de la etapa de vaciado, por lo que no aparecieron problemas por efectos de deslizamientos entre el molde y las poleas.

Al ser esta velocidad angular, mayor que la mínima requerida se asegura un proceso adecuado en el que se descarta el efecto de lluvia.

La dilatación del molde por el aumento de su temperatura durante el proceso provoca que, al estar fijas las poleas de los costados el molde se salga de ellas y éstas se apoyen directamente en la pared exterior del molde, funcionando como guía únicamente la guía central, teniendo como resultado un proceso inestable.

En las primeras dos pruebas obtenidas se presentó un llenado incompleto del molde, este problema se muestra en la figura 87. En la sección por donde se llevó a cabo el vaciado se obtuvieron buenos resultados, un adecuado acabado superficial y no hubo presencia de poros a simple vista. En el otro costado del molde se presentó un llenado incompleto, el material solidificó antes de presentarse un llenado adecuado, observándose incluso defectos de poros y junta fría, además aparecieron problemas de desgaste en la superficie interior del molde por efecto de la difusión entre el aluminio y el acero.



Figura 87. Pieza seccionada obtenida en una de las primeras pruebas.

3.2.7. Introducción de modificaciones eventuales.

Se llevó a cabo un nuevo maquinado sobre las guías del molde con la finalidad de ampliarlas, con ello se consiguió un funcionamiento estable del dispositivo después de presentarse la dilatación del molde, evitando que las poleas de los costados salieran de sus guías. La cantidad a maquinar en cada guía se determinó por las marcas dejadas por las poleas sobre la superficie exterior del molde durante las primeras pruebas de funcionamiento del dispositivo.

Para asegurar un adecuado llenado del molde se modificó el sistema de vaciado (figura 88), agregando una conicidad que ayudó a aumentar la velocidad del flujo, además se consiguió eliminar los defectos de junta fría y porosidad debido a que se consiguió una etapa de vaciado más rápida.



Figura 88. Rediseño del sistema de vaciado.

Adicionalmente se determinaron las temperaturas de precalentamiento y vaciado con el fin de tener un proceso más controlado. Las características finales del sistema de vaciado se muestran en la sección 3.2.9 en el plano 12.

Para eliminar los problemas de desgaste en el molde se llevaron a cabo pruebas con recubrimientos. Se aplicaron pinturas de grafito y circonio; estas fueron vertidas en el molde como si se estuviera llevando a cabo la etapa de vaciado, con la finalidad de tener una capa de pintura uniforme a lo largo de toda la superficie interior.

Al aplicar la pintura de grafito (base agua) en el molde no se obtuvieron los resultados esperados. Aparecieron una gran cantidad de porosidades a lo largo de la superficie exterior de la pieza terminada, lo que llevó a un producto final inadecuado. Al hacer un corte transversal se observaron también porosidades provocadas por partículas de grafito que se quedaron incrustadas durante la etapa de solidificación. El resultado se muestra a continuación.



Figura 89. Defectos de porosidades durante el proceso usando pintura de grafito.

Al aplicar la pintura de circonio aparecieron problemas en el acabado superficial de la pieza. La presencia de metanol (base de la pintura de circonio) en el molde provocó grandes porosidades tanto en la superficie como en la parte interna de la pieza terminada. El resultado fue el siguiente.



Figura 90. Porosidades causadas por presencia de metanol de la pintura de circonio.

Para obtener mejores resultados empleando pintura de circonio, se debe colocar una capa de pintura delgada, que logre cubrir toda la superficie del molde, lográndose esto en una sola aplicación. Además se debe tener total certeza de que la pintura se encuentra completamente seca, de no ser así se obtienen resultados inadecuados pues aparece una gran cantidad de porosidades.

En ocasiones se presentaron escurrimientos de material en la superficie interna de la pieza terminada (figura 91) por lo que se efectuó un control de temperatura en función del tiempo de operación de la máquina, determinando un tiempo promedio en el cual el material haya alcanzado una temperatura lo suficientemente baja para evitar este defecto.



Figura 91. Ecurrimiento en la superficie interior del molde.

La siguiente tabla muestra el control de datos que se llevó a cabo con la finalidad de obtener una pieza final con el mínimo de defectos posibles.

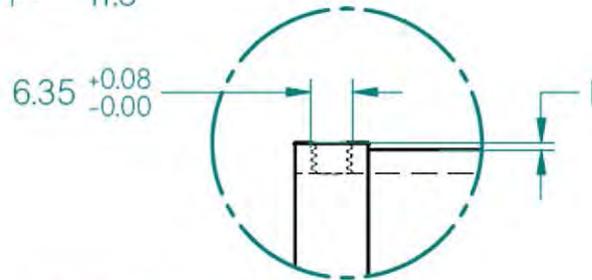
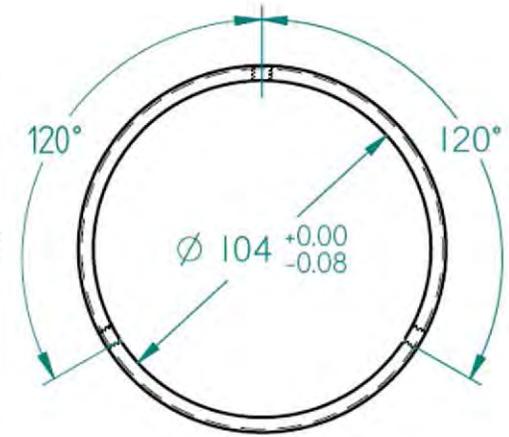
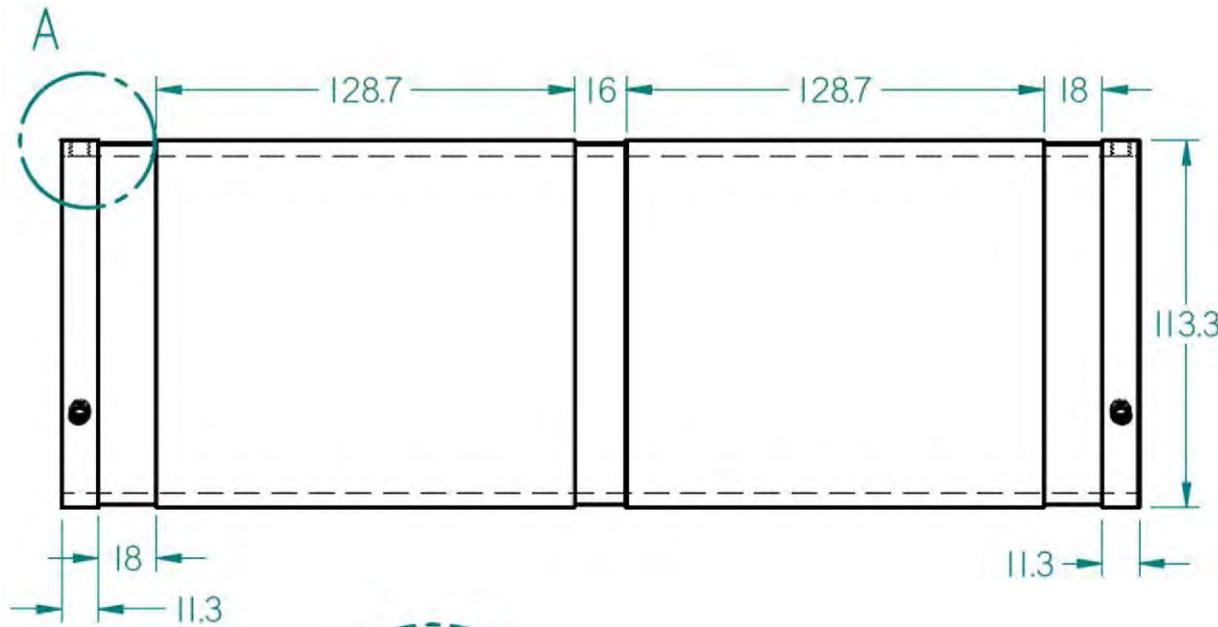
Tabla 3. Control de datos de tiempo y temperatura durante la operación del equipo.

PRUEBA	1	2	3	4	PROMEDIO
	T precal.[°C]				
	145,2	182,3	182	208	179,375
	T vaciado[°C]				
	730	740	740	760	742,5
	m[kg]	m[kg]	m[kg]	m[kg]	m[kg]
	3.154	2.997	2.949	3.048	3037
t[min]	T[°C]	T[°C]	T[°C]	T[°C]	T[°C]
1	560	581	578	580	574,75
2	555	565	552	550	555,5
3	532	550	535	541	539,5
4	513	524	508	521	516,5
5	494	501	483	502	495
6	472	484	460	483	474,75
7	448	461	447	467	455,75
8	430	444	427	449	437,5
9		426	411	432	423
10			395	418	406,5
11			385	403	394
12			370	395	382,5

3.2.8 Preparación de planos técnicos definitivos para la fabricación.

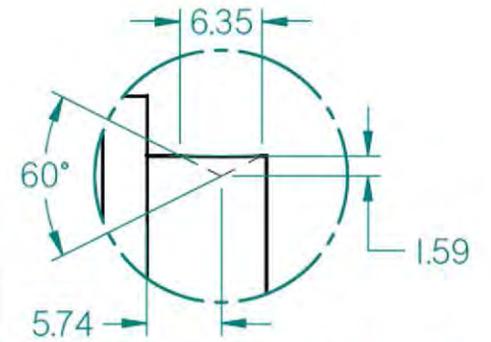
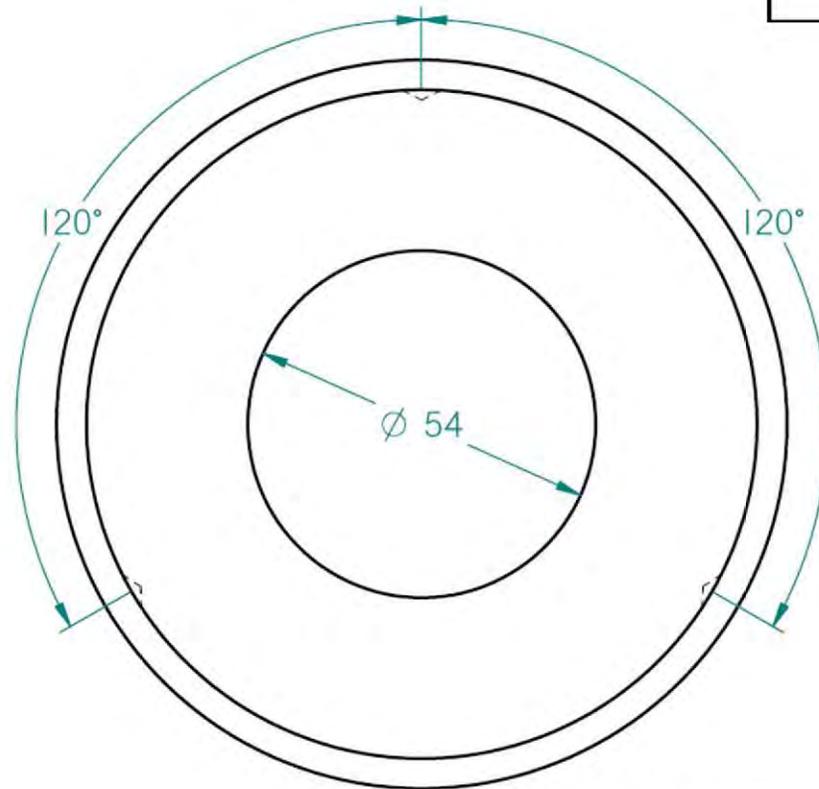
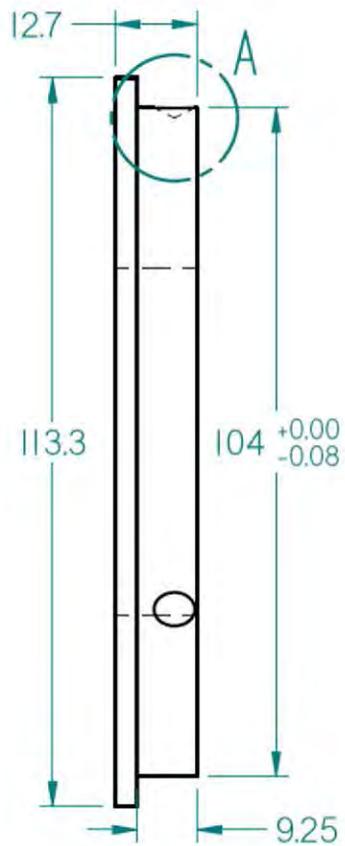
OBSERVACIONES

ROSCAS: UNC



DETALLE A

Solid Edge				
DIBUJÓ: JUAN ERIC DURÁN PIÑA	PIEZA:	MOLDE	UNIDADES:	mm
REVISÓ: R.G.V.N	MATERIAL:	COLD ROLLED	ESCALA:	
AUTORIZÓ: R.G.V.N	PLANO No. 1	TOLERANCIA ±0.08	TAMANO A4	



DETALLE A

OBSERVACIONES

SE REQUIEREN DOS PIEZAS COMO ESTA.

Solid Edge



DIBUJÓ: JUAN ERIC DURÁN PIÑA

PIEZA: TAPAS DEL MOLDE

UNIDADES:
mm

REVISÓ: R.G.V.N

MATERIAL: COLD ROLLED

ESCALA:
1:1

AUTORIZÓ: R.G.V.N

PLANO No. 2

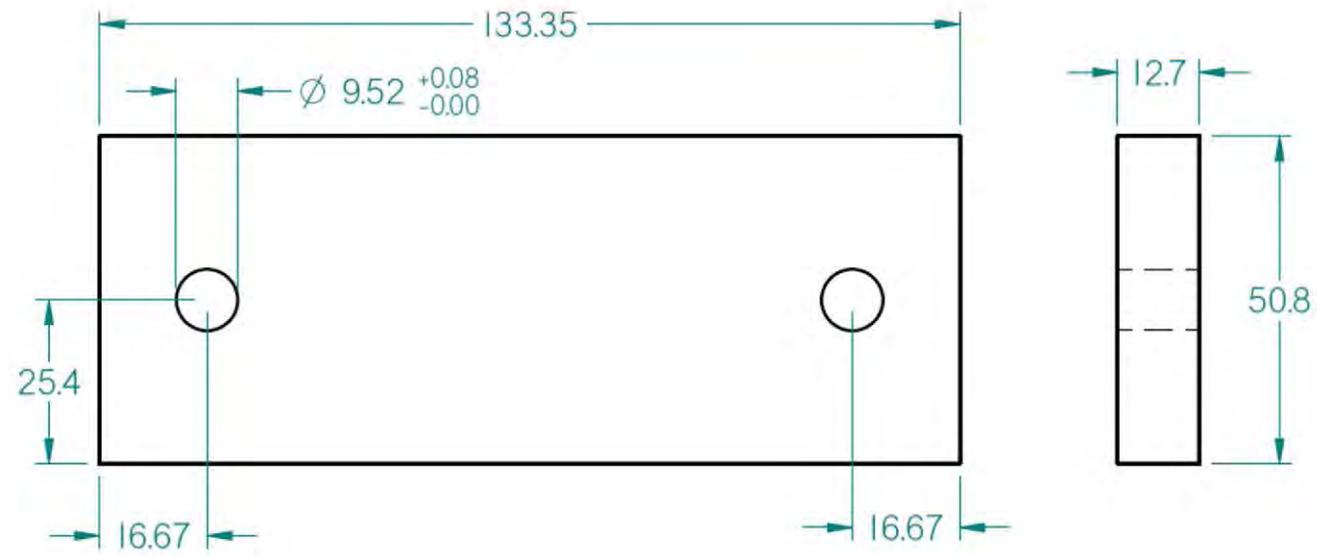
TOLERANCIA:
±0.08

TAMANO:
A4



OBSERVACIONES

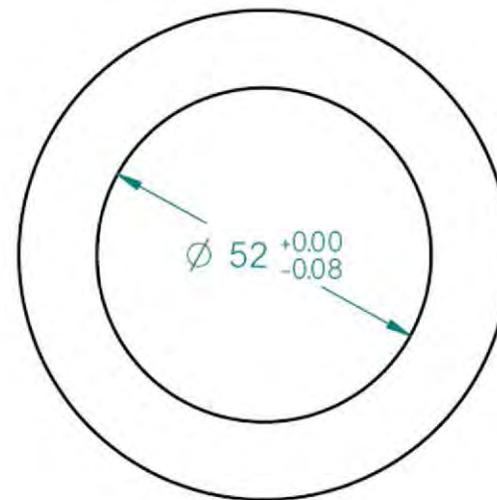
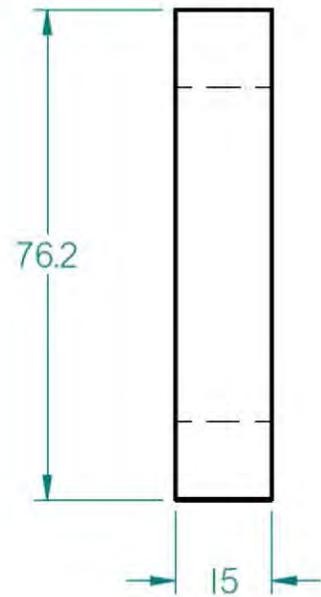
SE REQUIEREN DOS PIEZAS COMO ESTA.



Solid Edge				
DIBUJÓ: JUAN ERIC DURÁN PIÑA	PIEZA: CALSAS DE LAS CHUMACERAS	UNIDADES: mm		
REVISÓ: R.G.V.N	MATERIAL: COLD ROLLED	ESCALA: 1:1		
AUTORIZÓ: R.G.V.N	PLANO No. 3	TOLERANCIA: ±0.08		
		TAMAÑO A4		

OBSERVACIONES

SE REQUIEREN TRES PIEZAS COMO ESTA.



Solid Edge



DIBUJÓ: JUAN ERIC DURÁN PIÑA

PIEZA: POLEAS DE SOPORTE Y ESTABILIDAD

UNIDADES: mm

REVISÓ: R.G.V.N

MATERIAL: COLD ROLLED

ESCALA: 1:1

AUTORIZÓ: R.G.V.N

PLANO No. 4

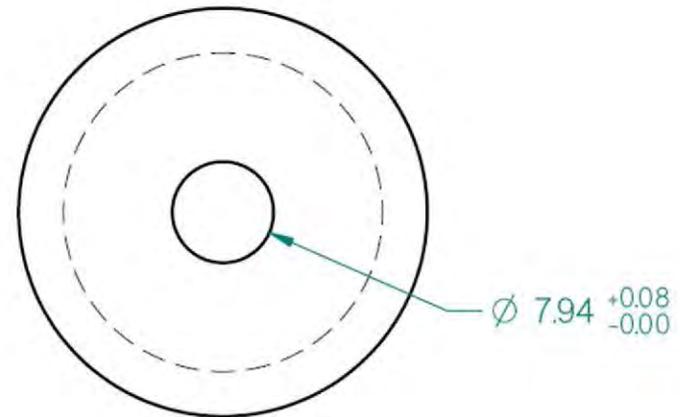
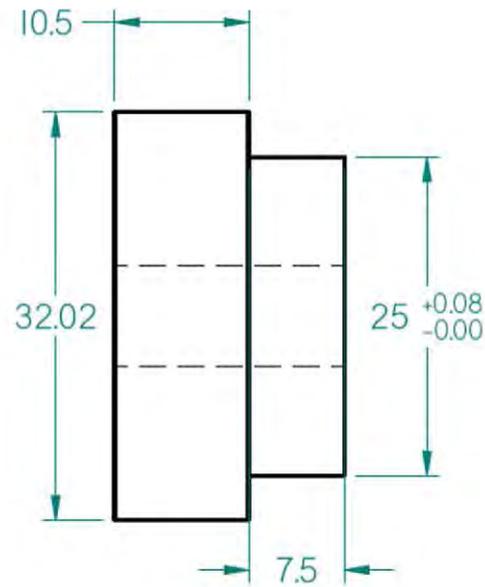
TOLERANCIA: ± 0.08

TAMAÑO: A4



OBSERVACIONES

SE REQUIEREN SEIS PIEZAS COMO ESTA



Solid Edge



DIBUJÓ: JUAN ERIC DURÁN PIÑA

PIEZA: EJES DE LAS POLEAS

UNIDADES:
mm

REVISÓ: R.G.V.N

MATERIAL: COLD ROLLED

ESCALA:
2:1

AUTORIZÓ: R.G.V.N

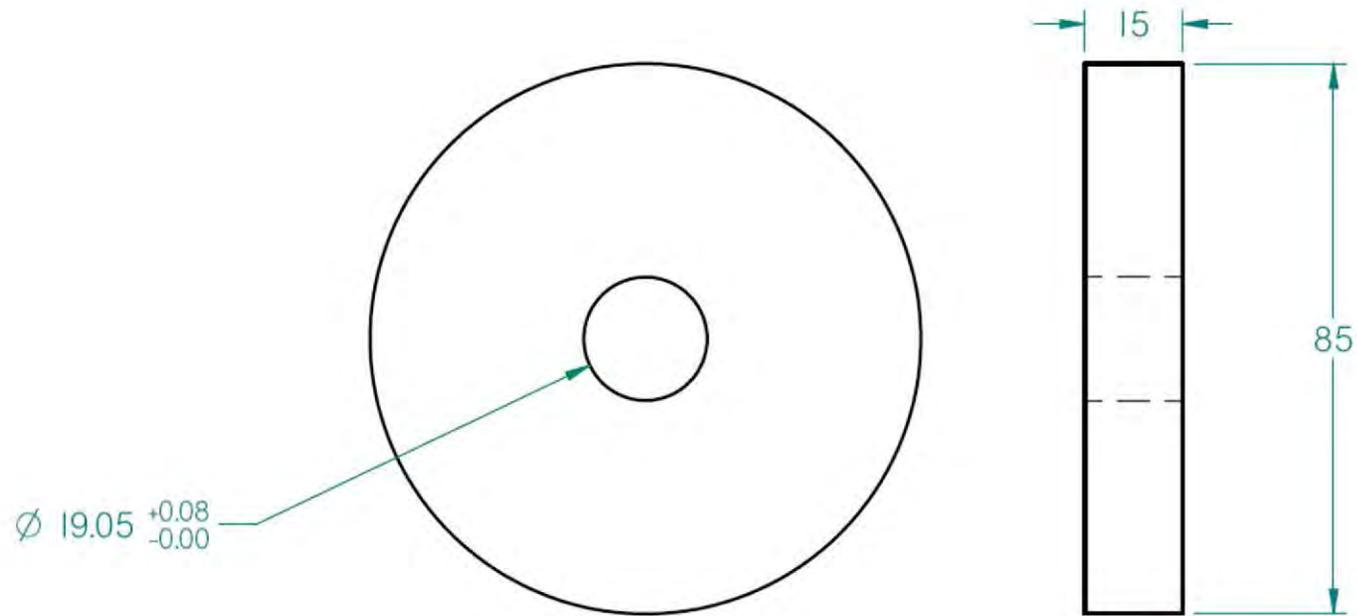
PLANO No. 5

TOLERANCIA:
 ± 0.08

TAMANO
A4

OBSERVACIONES

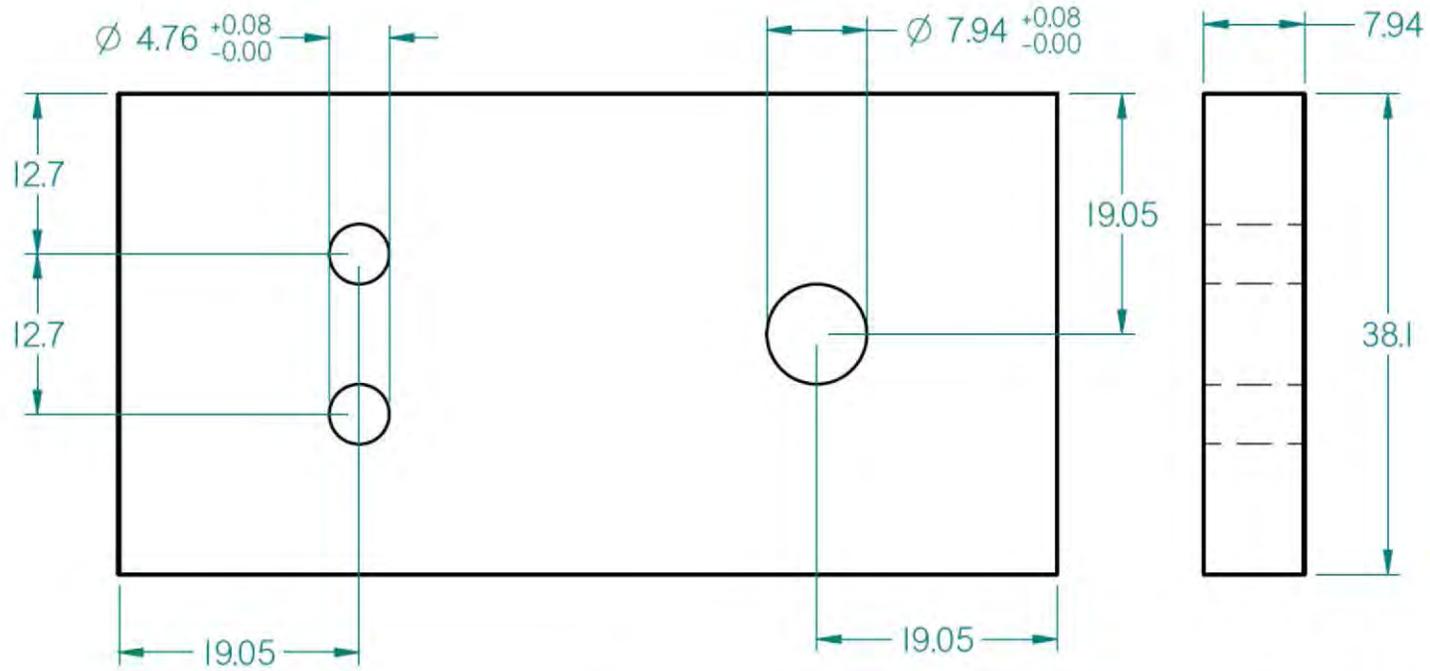
SE REQUIEREN DOS PIEZAS COMO ESTA.



Solid Edge				
DIBUJÓ: JUAN ERIC DURÁN PIÑA	PIEZA: POLEAS DE TRANSMISIÓN	UNIDADES: mm		
REVISÓ: R.G.V.N	MATERIAL: COLD ROLLED	ESCALA: 1:1		
AUTORIZÓ: R.G.V.N	PLANO No. 6	TOLERANCIA: ±0.8		

OBSERVACIONES

SE REQUIEREN CUATRO PIEZAS COMO ESTA.



Solid Edge



DIBUJÓ: JUAN ERIC DURÁN PIÑA

PIEZA: PLACA PARA LAS BASES DE LAS POLEAS INFERIORES

UNIDADES:
mm

REVISÓ: R.G.V.N

MATERIAL: COLD ROLLED

ESCALA:
2:1

AUTORIZÓ: R.G.V.N

PLANO No. 7

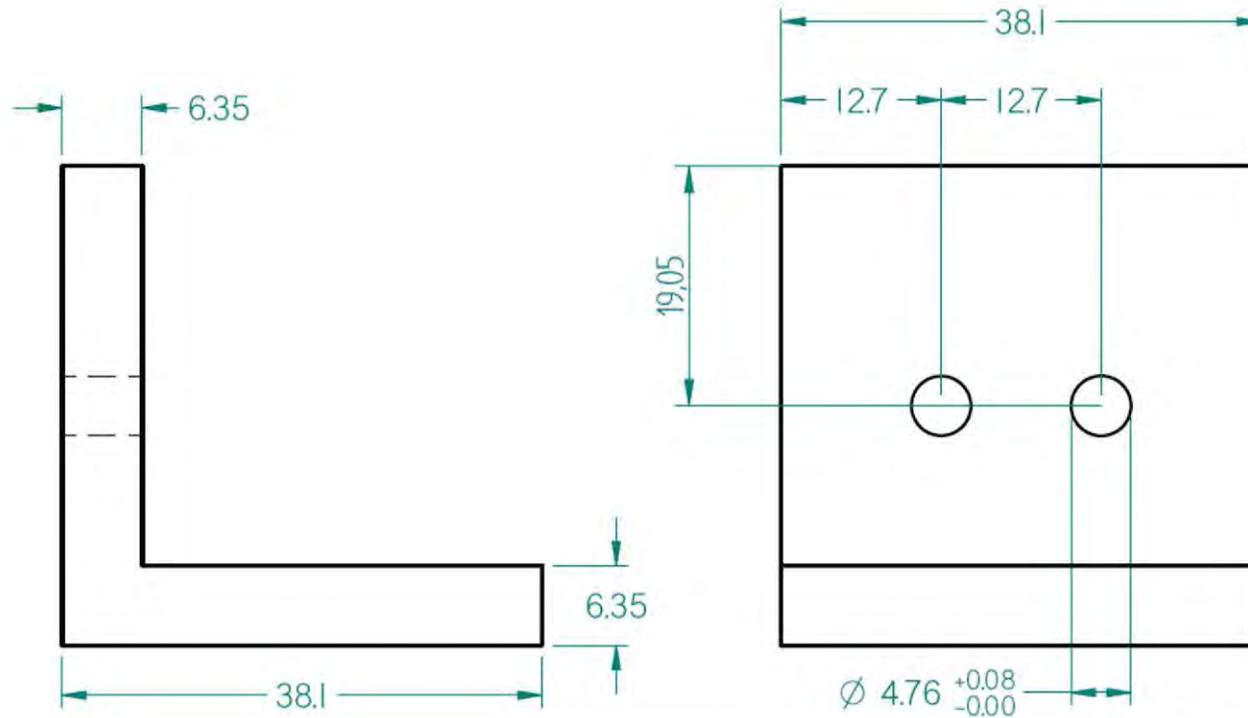
TOLERANCIA:
 ± 0.08

TAMAÑO
A4



OBSERVACIONES

SE REQUIEREN SEIS PIEZAS COMO ESTA.



Solid Edge



DIBUJÓ: JUAN ERIC DURÁN PIÑA

PIEZA: ÁNGULO DE LAS BASES DE LAS POLEAS

UNIDADES:
mm

REVISÓ: R.G.V.N

MATERIAL: COLD ROLLED

ESCALA:
2:1

AUTORIZÓ: R.G.V.N

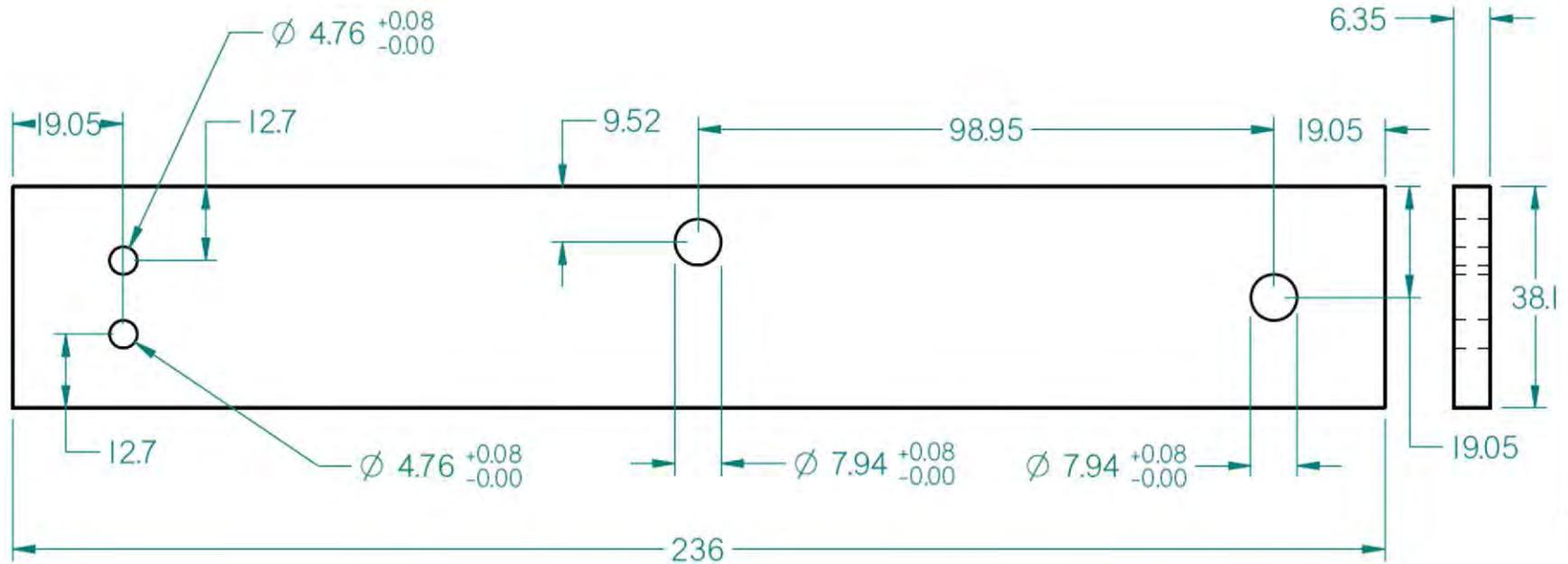
PLANO No. 8

TOLERANCIA:
 ± 0.08

TAMANO
A4

OBSERVACIONES

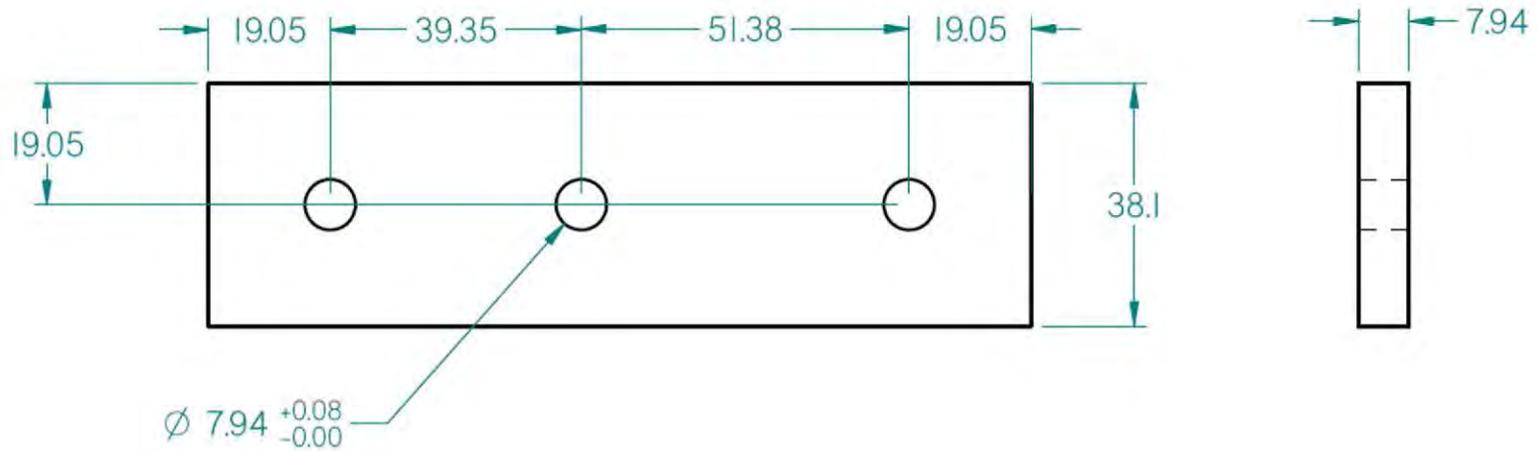
SE REQUIEREM DOS PIEZAS COMO ESTA



Solid Edge				
DIBUJÓ: JUAN ERIC DURÁN PIÑA	PIEZA:	SECCIÓN A	UNIDADES:	
REVISÓ: R.G.V.N	MATERIAL:	COLD ROLLED	mm	
AUTORIZÓ: R.G.V.N	PLANO No. 9	TOLERANCIA: ±0.08	ESCALA: 1:1	
			TAMANO: A4	

OBSERVACIONES

SE REQUIEREN DOS PIEZAS COMO ESTA.



Solid Edge



DIBUJÓ: JUAN ERIC DURÁN PIÑA

PIEZA: Sección B de la polea superior

UNIDADES: mm

REVISÓ: R.G.V.N

MATERIAL: COLD ROLLED

ESCALA: 1:1

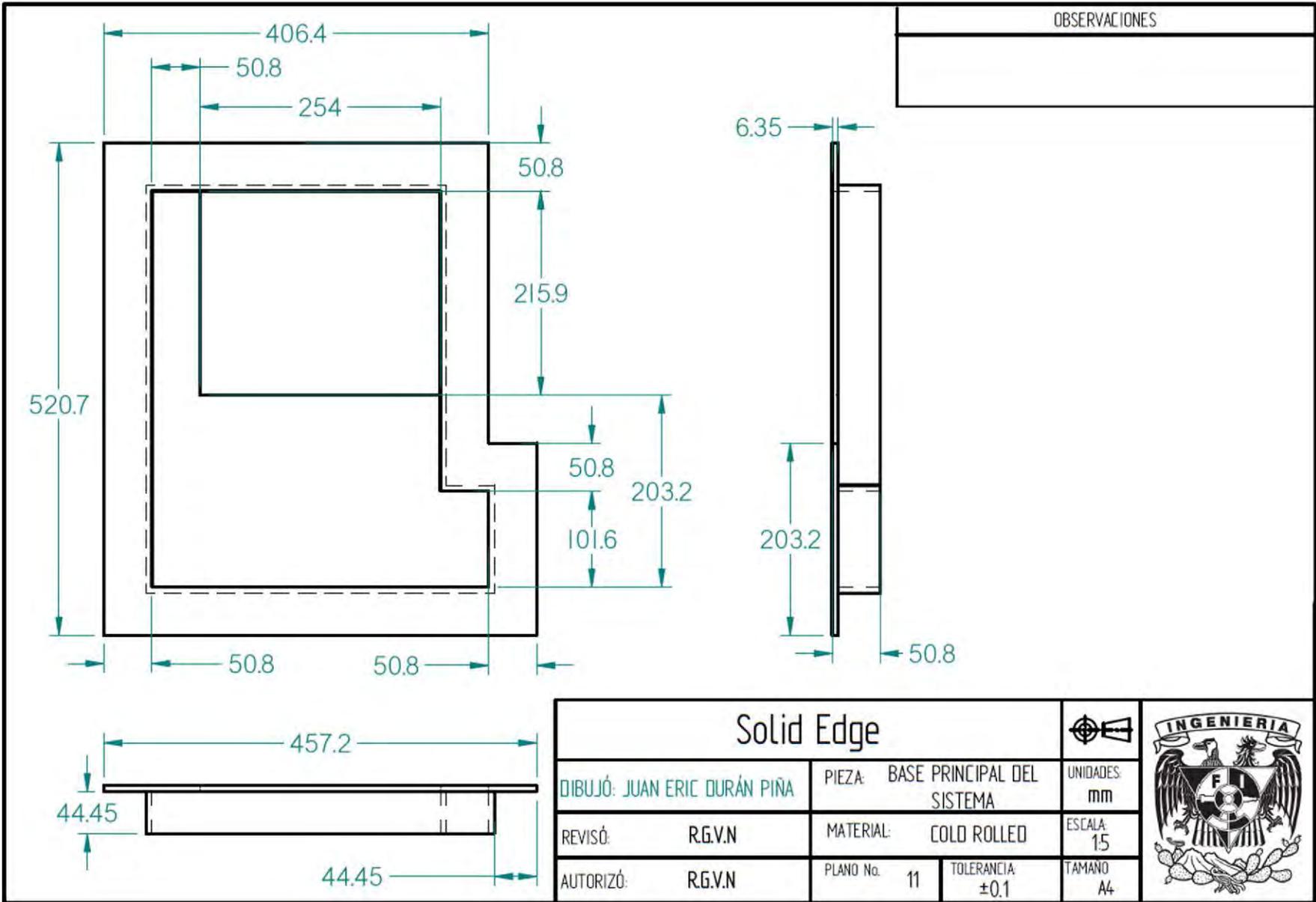
AUTORIZÓ: R.G.V.N

PLANO No. 10

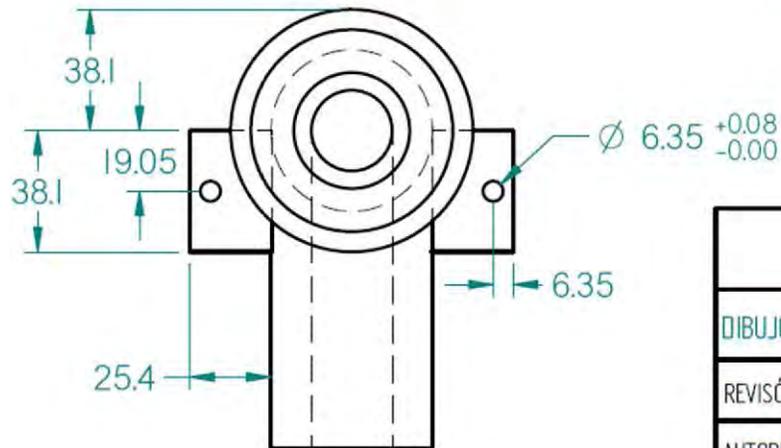
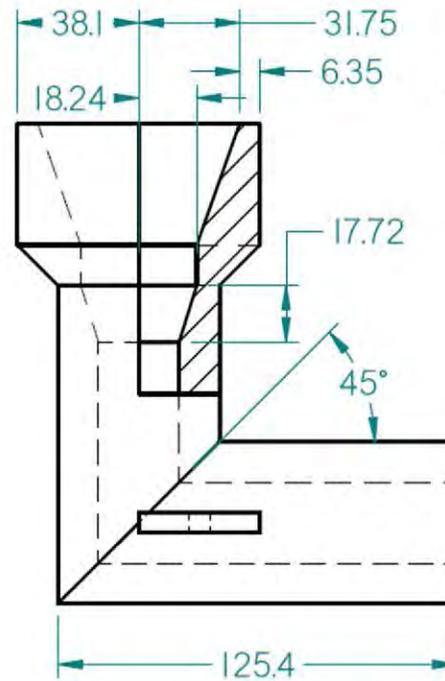
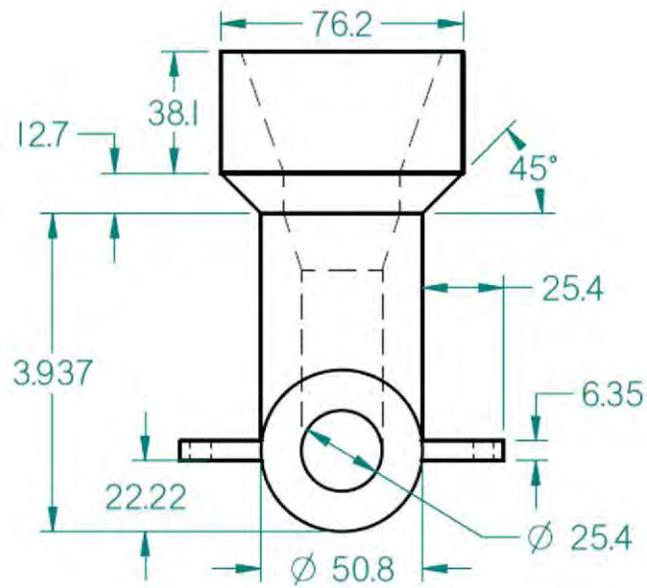
TOLERANCIA: ± 0.08

TAMAÑO: A4

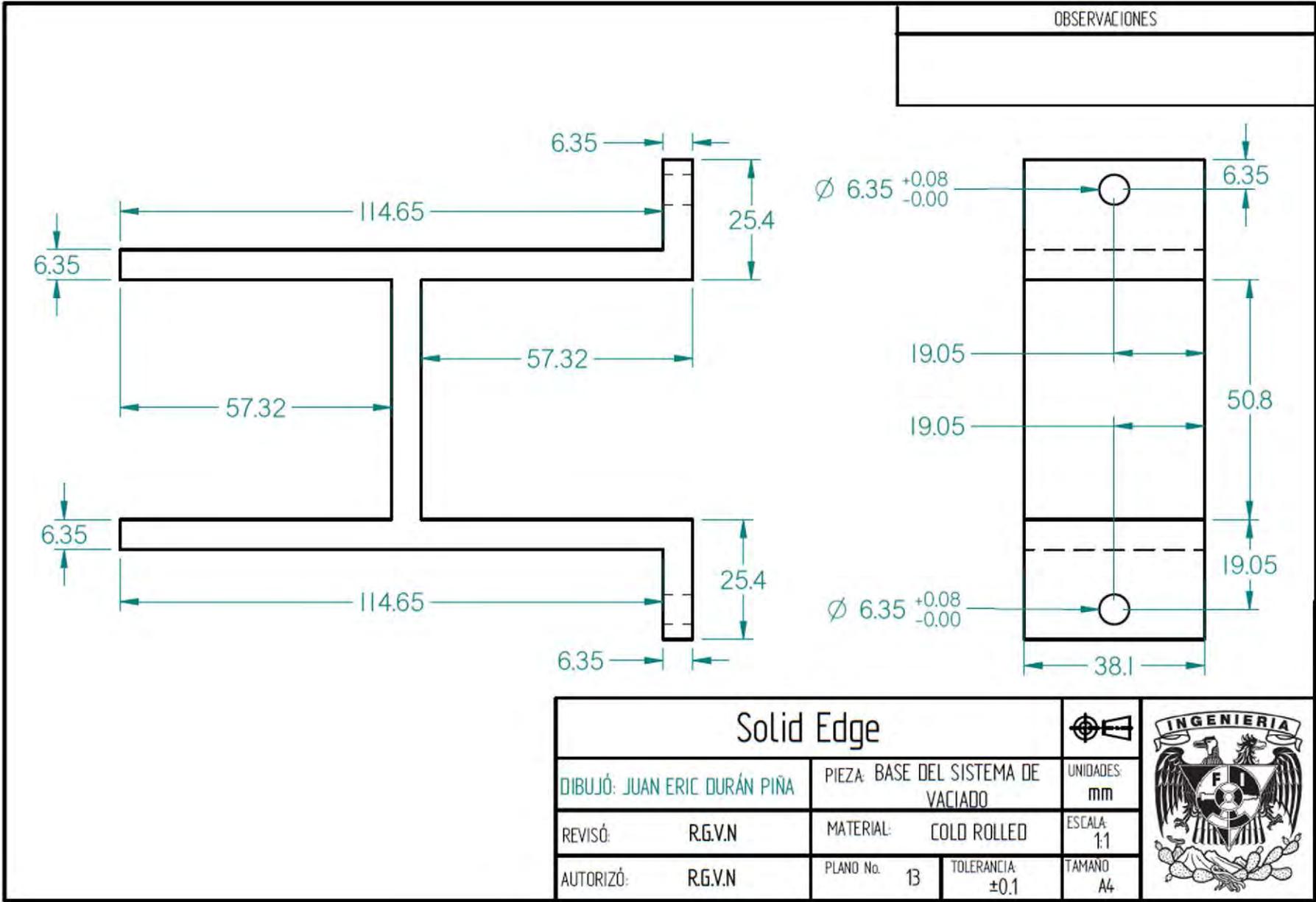




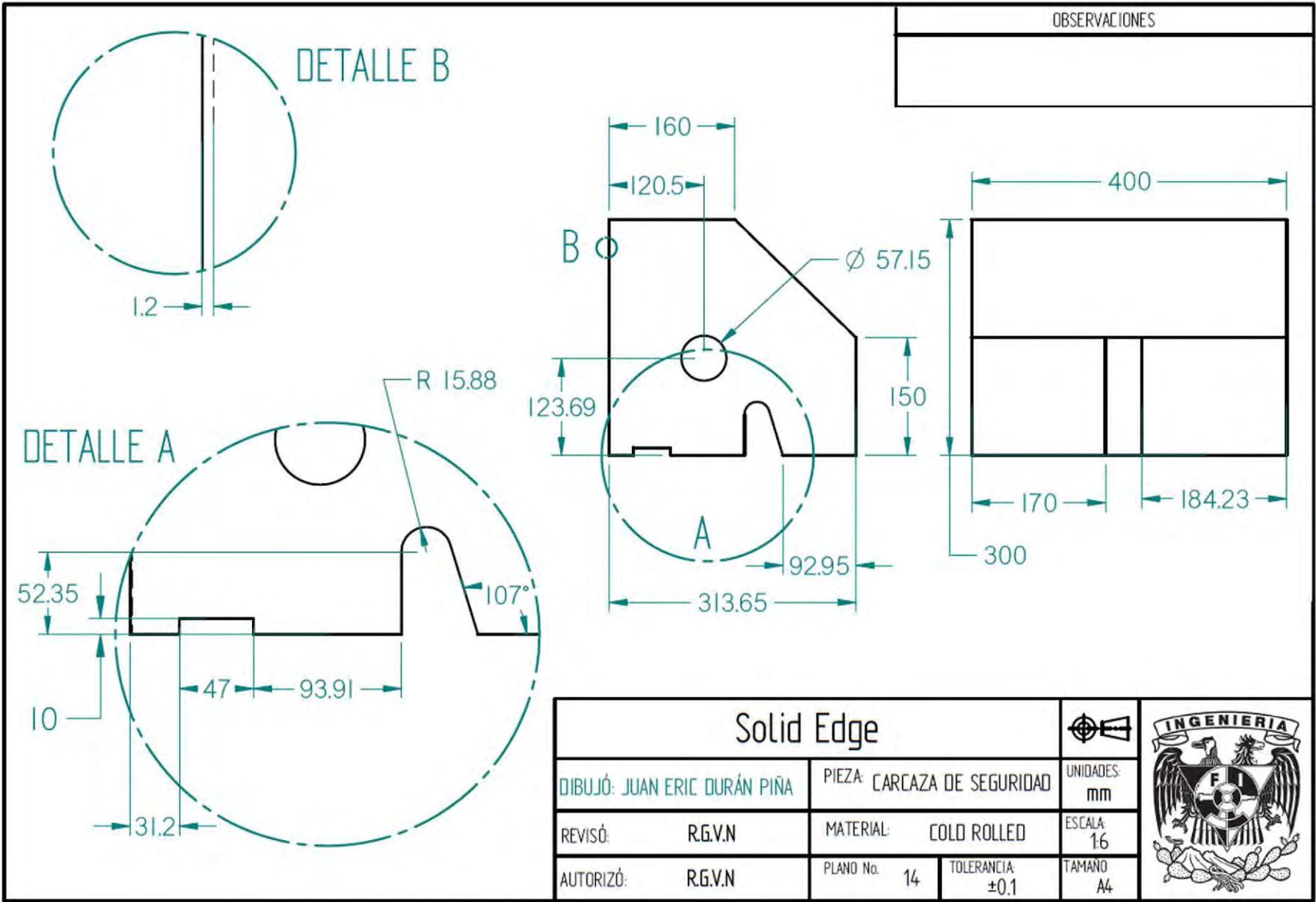
OBSERVACIONES



Solid Edge				
DIBUJÓ: JUAN ERIC DURÁN PIÑA	PIEZA: TUBO DE VACIADO	UNIDADES: mm		
REVISÓ: R.G.V.N	MATERIAL: COLD ROLLED	ESCALA: 1:2		
AUTORIZÓ: R.G.V.N	PLANO No. 12	TOLERANCIA: ±0.1		

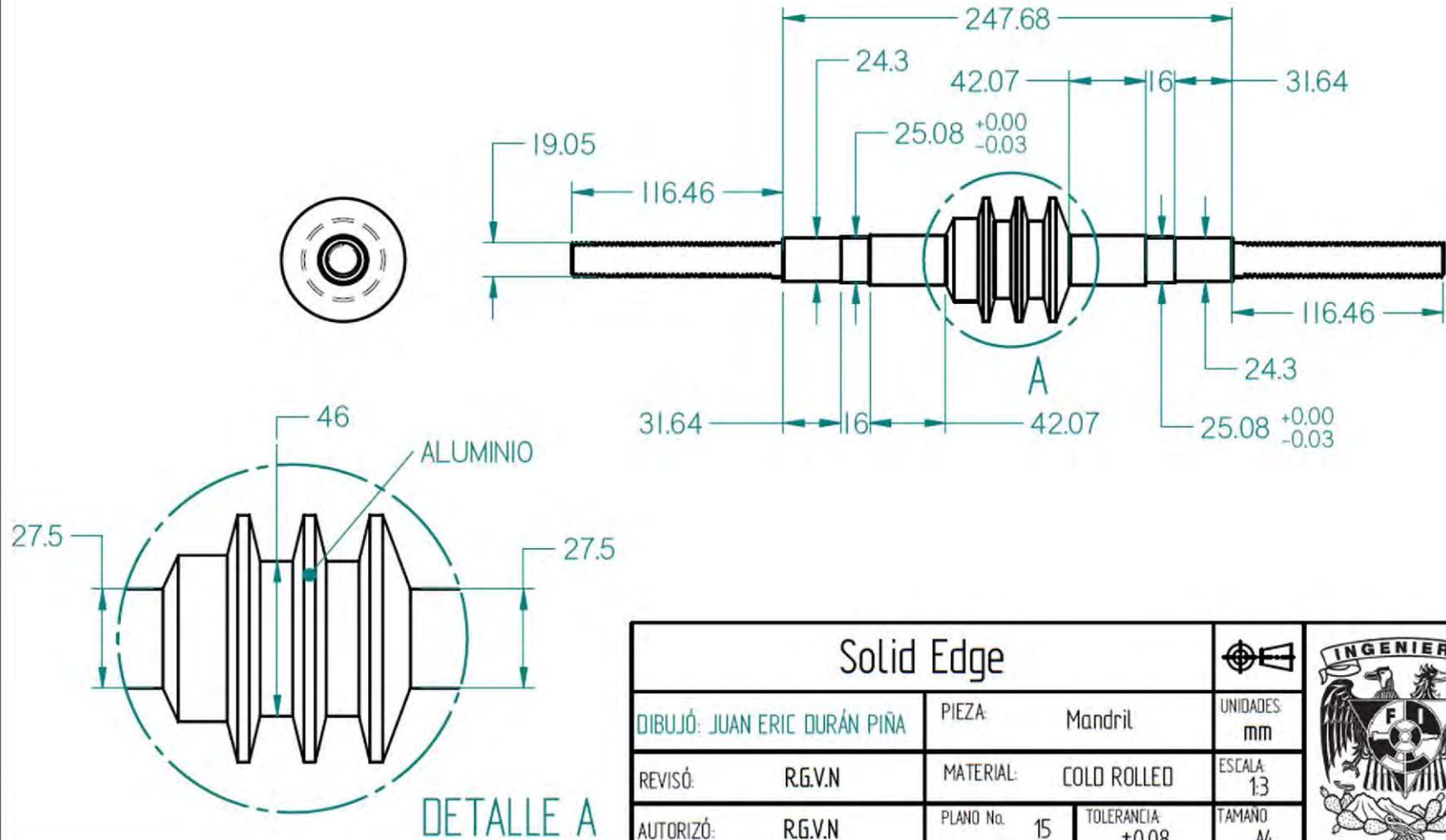


Solid Edge			
DIBUJÓ: JUAN ERIC DURÁN PIÑA	PIEZA: BASE DEL SISTEMA DE VACIADO	UNIDADES: mm	
REVISÓ: R.G.V.N	MATERIAL: COLD ROLLED	ESCALA: 1:1	
AUTORIZÓ: R.G.V.N	PLANO No. 13	TOLERANCIA: ±0.1	
		TAMAÑO: A4	



OBSERVACIONES

ROSCAS: UNC



Solid Edge			
DIBUJÓ: JUAN ERIC DURÁN PIÑA	PIEZA: Mandril	UNIDADES: mm	
REVISÓ: R.G.V.N	MATERIAL: COLD ROLLED	ESCALA: 1:3	
AUTORIZÓ: R.G.V.N	PLANO No. 15	TOLERANCIA: ±0.08	

3.2.9 Elaboración de estudios de costos.

Se llevó a cabo un análisis de costos del material y de los dispositivos que fue necesario adquirir para la fabricación del equipo, el resultado se muestra en la siguiente tabla

Tabla 4. Estudio de costos del equipo.

Equipo o material	Costo [\$]
Ángulo de 1 x ¼ [in]. 0.25 [m] en total.	30.00
Solera de 1.5 x ¼ [in]. 1[m] en total.	45.00
Solera de 2 x 3/16 [in]. 0.30 [m] en total.	18.00
Redondo de 3 [in]. 0.10 [m] en total.	60.00
Placa de acero de ½ [in]. 15 x 30 [cm ²] en total.	112.50
Placa de acero de 5/8[in]. 11 x 25 [cm ²] en total.	85.90
Redondo de 2 [in]. 25 [cm]	60.00
Tubo cédula 40 de 4 [in] de diámetro. 0.35 [m] en total	100.00
Rodamientos SKF modelo 6205-2Z. 5 en total.	399.50
Motor trifásico 0.5 [HP] Siemens modelo IRA30544Y31	1199.00
Mandril pulidor de ¾ [in] Torillo	790.00
Ángulo estructural de 2 x 3/16 [in]. 1.80[m] en total	90.00
Solera de 2 x 5/16 [in]. 1.50[m] en total.	85.00
Soldadura 6013, 1/8 [in]. 0.75 [kg]	30.00
Tornillería	50.00
Costo total	3167.90

CAPITULO 4.

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y
CONCLUSIONES.



CAPÍTULO 4. ANALISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

4.1 Resultados.

Se solucionó el problema de vibraciones causado por la dilatación volumétrica del molde al aumentar el ancho de las guías, con lo que se tuvo un proceso seguro.

El resultado de haber aumentado el diámetro del sistema de vaciado solucionó el problema del llenado incompleto, además se eliminaron los defectos de porosidad y junta fría.

Se observó que el mejor acabado superficial se obtuvo cuando no se aplica ningún elemento que proteja al molde (figura 92). La pintura de circonio ofreció buenos resultados, sin embargo presentó dos inconvenientes, un elevado costo y un riguroso control durante su aplicación y secado.



Figura 92. Pieza terminada de un proceso en el cual no se protegió el molde contra el desgaste por efecto de la difusión.

Se realizó un corte transversal a la pieza terminada, al cual se le hizo una observación en metalografía con la finalidad de determinar la presencia de poros y adicionalmente realizar una comparación con una metalografía hecha a una sección del lingote del cual se obtuvo el material con el que se llevaron a cabo las pruebas. Los resultados se muestran en las figuras 93 y 94.



Figura 93. Metalografía de una sección del tubo obtenido por medio de fundición centrífuga (Microscopio Nikon Epiphot 200, 100 aumentos).



Figura 94. Metalografía de una sección del lingote del cual se obtuvo el material para las pruebas de validación del prototipo (Microscopio Nikon Epiphot 200, 100 aumentos).

4.2 Conclusiones.

A pesar de no haberse logrado una pieza totalmente libre de porosidades se pudo observar una reducción considerable, en comparación a la cantidad de poros observada en la metalografía del lingote. La presencia de poros es debida a diferentes factores:

- se lleva a cabo una etapa de solidificación en un lapso de tiempo muy corto; mientras la temperatura de vaciado del aluminio es superior en aproximadamente un 10% a la temperatura de fusión.
- la temperatura de precalentamiento del molde es de alrededor de 180 [°C]. Si se aumenta la temperatura de precalentamiento del molde se evita un descenso de temperatura del aluminio tan rápido permitiendo la salida de las burbujas que puedan formarse durante la etapa de vaciado.
- Adicionalmente se puede hacer un cambio en la velocidad angular a la cual gira el molde, pues aunque el aluminio logra mantenerse adherido a las paredes del molde es importante recordar que el factor de gravedad GF se determina de manera empírica.

Se llevó a cabo un control de datos que permitió mejorar el proceso, evitando defectos de rechupe y escurrimiento por las paredes interiores, estos aparecen al no tener un control adecuado en el tiempo de funcionamiento de la máquina, se observó que estos dejan de aparecer a los 12 minutos, cuando la pieza se encuentra a una temperatura inferior a los 400 [°C]. Este tiempo se definió como el tiempo de operación de la máquina.

Después de haber realizado el proceso en repetidas ocasiones se presentó un deterioro en las roscas del molde, esto se debió a las altas temperaturas a las que se sometió el sistema durante las etapas de vaciado y solidificación, por lo cual dichas roscas debieron renovarse de manera constante, dejando inutilizable el molde, lo que convirtió la fabricación de un nuevo molde en un hecho más costoso que la aplicación de pintura de circonio.

Se puede realizar un rediseño de las tapas, dándoles un mayor espesor en la sección que entra al molde, aumentando así la distancia entre el material fundido y las roscas de los opresores, con lo que se consigue aumentar el tiempo de vida del molde, ya que se ve directamente afectado por el deterioro de dichas cuerdas más que por el desgaste por efecto de la difusión que muestra después de realizar el proceso en repetidas ocasiones.

El rodamiento de la polea superior del sistema de soporte y estabilidad debe cambiarse después de realizar varias veces el proceso, esto se debe a que dicho rodamiento es el que se encuentra expuesto

a una mayor temperatura en comparación a los otros dos, lo que ocasiona que se queme por completo la grasa del rodamiento, reduciendo de manera importante su tiempo de vida. Por ello se requiere un rediseño de la polea superior, que permita un mejor enfriamiento del rodamiento durante el proceso.

Se requiere un adecuado control durante las diferentes etapas que intervienen en el proceso de fundición centrífuga para obtener un buen resultado en la pieza terminada, disminuyendo de manera importante los defectos que pueden llegar a aparecer.

Es importante tomar en cuenta las debidas precauciones que se deben tomar durante la operación del dispositivo ya que el proceso maneja temperaturas considerablemente altas.

A pesar de que el proceso no está exento a que se presenten diversas eventualidades que causen variantes en los resultados, esto sigue siendo de gran utilidad, ya que dichas variaciones muestran diferencias en la pieza terminada, mismas que en su momento pueden ser motivo de estudio, puesto que el objetivo del dispositivo es ejemplificar el proceso industrial de la fundición centrífuga horizontal a nivel académico.

Bibliografía.

1. www.smfac.org.mx
2. Artículo. ¿Qué sabían de fundición los antiguos habitantes de Mesoamérica? Parte I. Dora M.K. de Grinberg. Sección de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, UNAM.
3. *Fundamentos de manufactura moderna. Materiales, procesos y sistemas.* Mikell P. Groover. Ed. Prentice Hall.
4. *Manufactura. Ingeniería y tecnología.* Kalpakjian, Schmid. Ed. Prentice Hall.
5. *Tecnología de los metales.* H. Appold, K Feiler, A. Reinhard, P. Schmidth. Ed. Reverte.
6. *Fundición centrifugada. Hierro. Vidrio. Hormigón.* Nicolas P. Waganoff. Ed. Alsina.
7. *Metals handbook.* Joseph R Davis, ASM International. Handbook Committee.
8. *Manual del aluminio. Vol 2.* Ed. Reverte.
9. *Manual de difussion.* Francisco J. Esclapés Jover, Mercedes Llorens Nicolau Ed. Club Universitario.
10. *Física. Conceptos y aplicaciones.* Tippens. Ed. McGraw Hill.
11. *Termodinamica.* Yunus A. Cengel, Michael A. Boles. Ed. McGraw Hill
12. *Pipping Handbook.* Mohinder L. Nayyar. Ed. McGraw Hill.
13. *Metodología de Diseño. Fundamentos teóricos.* Luz del Carmen Vilchis. Ed. Claves Latinoamericanas.