



Construcción de un molde permanente para probetas de aleaciones de aluminio aplicando la norma ASTM B-108

Construction of a permanent mold for specimens of aluminum alloys applying the ASTM B-108 standard

Byron Gómez Alencastro¹, Fernando Valencia Aguirre², Diego Ortiz Morales³, Cosme Mejía Echeverría⁴

¹Grupo de investigación en Diseño, Simulación y Manufactura, Universidad Técnica del Norte, Ibarra-Ecuador, Email: bsgomeza@utn.edu.ec

Resumen

El objetivo del presente proyecto es construir un molde permanente para probetas de aleaciones de aluminio aplicando la norma ASTM B-108 (*Standard Specification for Aluminum-Alloy Permanent Mold Castings*), determinando de manera heurística los parámetros de fundición adecuados como son temperatura del molde, temperatura del metal, tiempo de llenado y tiempo de solidificación mediante simulaciones, con el fin de mostrar posibles fallas internas de la probeta, además de poder analizar el comportamiento de solidificación del flujo y metalúrgico de la probeta. La técnica de fundición empleada para la obtención de la probeta de aluminio fundido es denominada colado por gravedad, que se realiza vertiendo el metal fundido sobre el molde permanente llenando así el mismo por el propio peso del material, teniendo como resultado la probeta que será analizada y validada con la simulación realizada previamente.

Palabras clave: probeta; fundición; aleaciones de aluminio; ASTM B-108

Abstract

The objective of the present project is to build a permanent mold for specimens of aluminum alloys applying the standard ASTM B-108 (*Standard Specification for Aluminum-Alloy Permanent Mold Castings*), determining in a heuristic way the parameters of casting suitable as mold temperature, metal temperature, filling time and solidification time by means of simulations, in order to show possible internal faults of the specimen, besides being able to analyze the flow solidification and metallurgical behavior of the specimen. The casting technique used to obtain the molten aluminum specimen is called gravity casting, which is carried out by pouring the molten metal onto the permanent mold, filling it by the weight of the material itself, resulting in the specimen that will be analyzed and validated with the previously performed simulation.

Keywords: test tube; foundry; aluminum alloys; ASTM B-108

1. Introducción

Los procesos de fundición de metales consisten básicamente en el vertido del metal líquido en un molde con la geometría de la pieza a fabricar en su superficie interior, y su posterior enfriamiento y solidificación en el interior de dicho molde. Dichos molde se clasifican en dos grandes grupos, desechables y permanentes. [1]

Los moldes desechables se caracterizan por el hecho de poder ser utilizados pocas veces, debido a que deben separarse de la pieza tras su enfriamiento y así permitir su correcta evacuación. Estos moldes suelen estar formados por arena, yeso, cerámicas u otros materiales similares [2]. Usualmente la duración de este tipo de moldes esta entre 1 a 100 operaciones de vaciado aproximadamente [3].

Los moldes permanentes se pueden utilizar repetidamente para obtener un gran número de piezas iguales debido a que están contruidos con materiales que mantienen sus propiedades a altas temperaturas, como pueden ser el acero o el grafito. Además, son mejores conductores térmicos y por ello las velocidades de enfriamiento son mayores que en los moldes desechables, afectando esto a la microestructura o al tamaño de grano y por tanto a las propiedades mecánicas de la pieza fabricada, por una parte, y al ritmo de producción y economía del proceso de fabricación, por otro [2]. Un molde es considerado permanente cuando supera las 1,000 operaciones de vaciado y generalmente su vida útil es de hasta 40,000 fundiciones [4].

2. Metodología

A continuación se detalla las fases para el desarrollo del presente proyecto como son diseño, simulaciones, selección de materiales y selección de herramental para la construcción del molde permanente, para que quede como referencia para investigaciones posteriores relacionadas con este tema. Es importante mencionar que esta investigación es basada en la norma ASTM B-108, artículos científicos y libros relacionados con el proceso de fundición para coquilla (molde permanente). En la *figura 2.1* se muestra un diagrama metodológico para tener claro las etapas que se van seguir para el desarrollo de esta investigación.

2.1. Fuentes Bibliograficas

Para el presente estudio se va a tomar en cuenta todos los requerimientos de la norma ASTM B-108, datos obtenidos en libros y artículos científicos, como son dimensiones, composición química, temperaturas del molde y colada, que son los parámetros más críticos al momento de realizar la fundición. Además en otras

investigaciones se obtiene datos de la influencia que tiene el coeficiente de transferencia de calor (HTC) al momento de la solidificación, así como también, la predicción de porosidades de una pieza fundida.

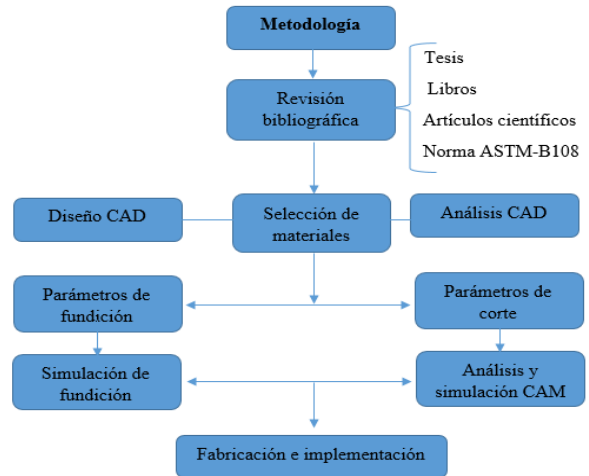


Figura 2.1. Diagrama metodológico

2.2. Diseño CAD

En esta etapa del proceso se inicia con el diseño usando las herramientas computacionales como es el paquete de SolidWorks, con el cual, se va a realizar las operaciones CAD para generar el modelo de fundición basándose en las medidas establecidas por la norma mencionada anteriormente y en la información ya recopilada, posteriormente se verifica las tolerancias dimensionales a la contracción para llevarlo a un análisis de ángulos de salida, que consiste en verificar las zonas rectangulares o cuadradas que necesitan ángulo de desmoldeo para que no existan retenciones y así evitar la erosión del molde. Una vez culminada esta etapa se selecciona el plano de partición para generar la matriz, que será usada para posteriores simulaciones, tanto de fundición como de mecanizado.

2.3. Selección de materiales

Para la selección del material con la que se va a fabricar el molde se considera materiales de comercialización nacional, costos, propiedades mecánicas y termodinámicas, siendo los más destacados el acero A36, W-300, W-400, entre otros, que son específicos para trabajos en caliente muy empleados en aplicaciones en las que la temperatura superficial se encuentra por encima de los 200°C.

2.4. Simulación de fundición

Previo a una simulación de fundición se debe realizar los cálculos necesarios, entre ellos, el tiempo de llenado y tiempo de solidificación, ya que el resultado de los mismos serán ingresados al software para determinar los posibles defectos que se puedan producir durante la etapa de colado, logrando así seleccionar los parámetros adecuados (temperatura del molde y colada), para evitar imperfecciones en el fundido y obtener una pieza de mejor calidad. El objetivo principal de realizar esta simulación es la de mejorar el proceso de fundición para así reducir costos y recursos, ya que si una fundición está mal realizada implica volver a fundir el metal y esto causa el aumento de tiempo y dinero.

2.5. Herramientas CAD-CAM

Una vez definidos los parámetros de fundición (temperatura del molde y colada), se procede hacer el uso de herramientas CAD- CAM, mismas que facilitan el análisis de la geometría de la pieza para la selección de las diferentes herramientas de corte, con las que se va a realizar los cálculos de mecanizado y construcción del molde. Además, este proceso permite seleccionar las estrategias de maquinado, logrando verificar mediante simulación las trayectorias programadas por código G. Otro propósito de realizar la simulación CAM es reducir tiempos de maquinado para poder optimizar el proceso de construcción del molde, respetando los parámetros de corte establecidos por el fabricante. Una gran ventaja de tener un sistema CAD-CAM es que ofrece una interfaz amigable con el usuario. Es importante mencionar que para conseguir mejores resultados, los usuarios deben tener conocimiento sobre máquinas herramientas y código G. Además para evitar errores en la fabricación se debe considerar realizar una hoja de procesos, misma que detalla todas las operaciones de maquinado y especificaciones de corte de la herramienta.

2.6. Fabricación e implementación

La Universidad Técnica del Norte dispone de un laboratorio de mecanizado CNC, el cual consta de una fresadora ROMI D800 de 3 ejes, esta dispone de varios accesorios entre ellos un sistema de sujeción por bridas (CK-12), un cono BT-40 que sirve para sujetar a la herramienta mediante una boquilla del mismo tipo y el herramental necesario para el maquinado del molde permanente. Durante el mecanizado del molde se utiliza las bridas de sujeción (CK-12), mismas que garantizan el apriete de la pieza a mecanizar evitando así que se mueva. Para la sujeción de la herramienta se hará el uso del cono BT-40 y una boquilla ER-32, que aseguran que la herramienta no presente vibraciones, evitando así dimensiones incorrectas al finalizar el mecanizado. En la figura 2.2 se muestra un diagrama en el que se detalla las

etapas de cómo se va a llevar a cabo la construcción del molde.

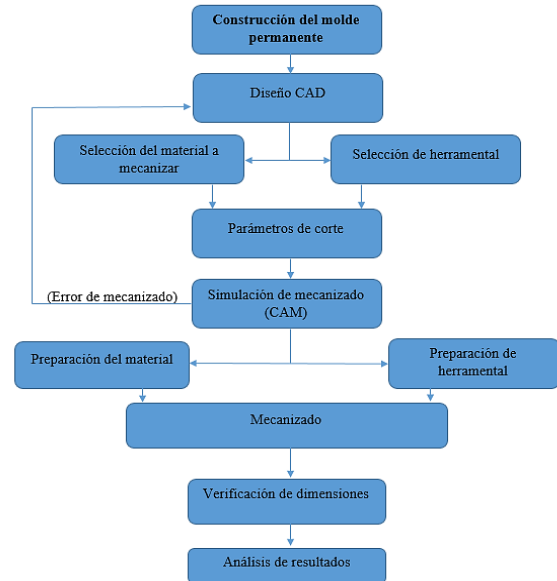


Figura 2.2. Etapas de construcción del molde permanente

Una vez culminado el proceso de fabricación se procede a realizar las pruebas de fundición en un 1 horno de crisol fijo de 100 kg, en la figura 2.3 se muestra un diagrama en el que se detalla las etapas de cómo se va a llevar a cabo el proceso de fundición y análisis de resultados.

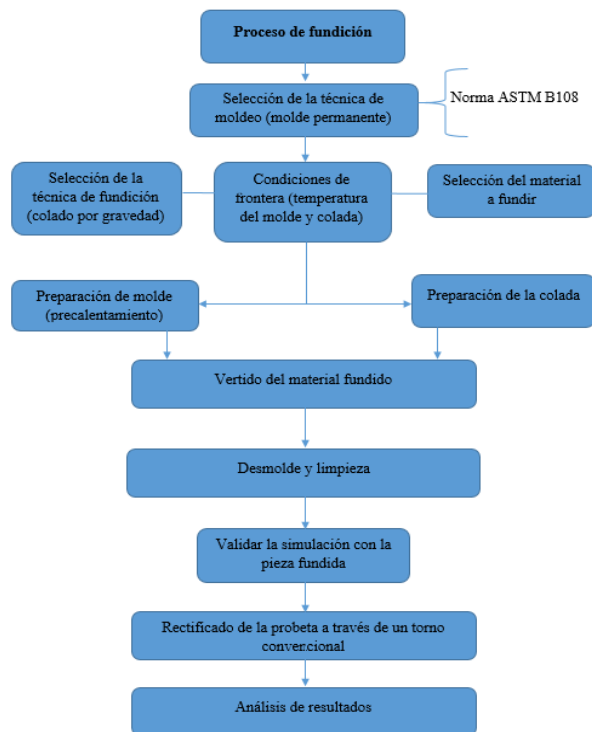


Figura 2.3. Etapas del proceso de fundición

3. Resultados

3.1. Parámetros de diseño

El diseño del molde permanente se realiza aplicando la norma ASTM B-108 cumpliendo con las dimensiones establecidas, mismas que corresponden al modelo de fundición.

3.2. Diseño CAD del molde permanente

3.2.1. Diseño del modelo de fundición

Para el dibujo del modelo de fundición se emplea el software SolidWorks que ofrece herramientas de fácil uso para el diseño mecánico 3D. Las dimensiones del sistema de alimentación, mazarotas, respiraderos y pocillo vienen ya definidas en la norma ASTM B-108. Ver *figura 3.1*.

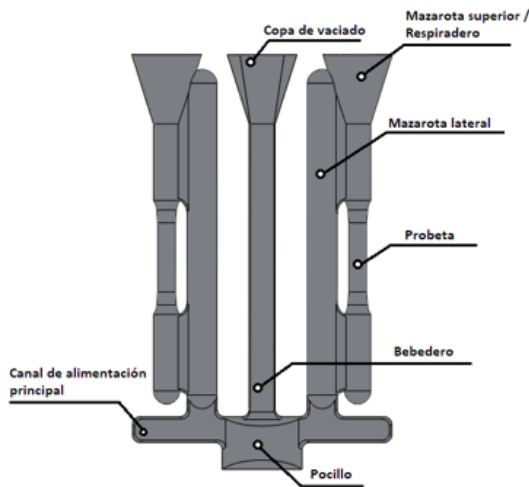


Figura 3.1. Modelo de fundición
Fuente: [5]

3.2.2. Analisis de angulos de desmoldeo

Los ángulos de desmoldeo o también conocidos como ángulos de salida son muy necesarios para facilitar la extracción de la pieza fundida. [6]. Para nuestro molde permanente se escogió un ángulo de desmoldeo de 20° debido a que es el valor establecido por la norma para secciones que sean cuadradas o rectangulares. Para el análisis de ángulos de salida se va a usar la herramienta de diseño de moldes, con la que cuenta el software antes mencionado, en el cual se va a realizar el siguiente procedimiento:

Se selecciona la dirección de desmoldeo de la pieza y se ingresa el valor del ángulo de salida, obteniendo una clasificación de colores en los que se puede observar las

zonas donde no poseen ángulos de desmoldeo. Ver *figura 3.2*.

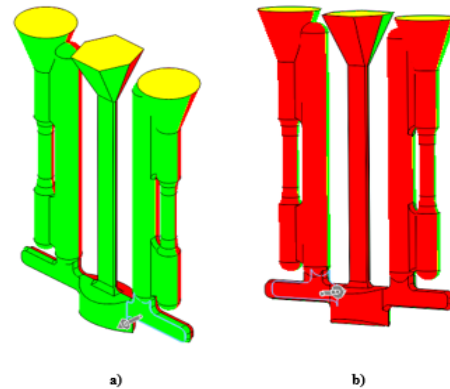


Figura 3.2. Analisis de angulos de salida a) dirección de desmoldeo positiva b) dirección de desmoldeo negativa.

Se puede visualizar 3 tipos de colores verde, rojo y amarillo, los colores verde y rojo significan que el ángulo de salida en todas las caras es igual o mayor al ángulo de referencia con respecto a la dirección de desmoldeo ya sea positiva o negativa, mientras que el color amarillo muestra las caras en las que es necesario aplicar un ángulo de desmoldeo para que no existan retenciones. Ver *figura 3.3*.

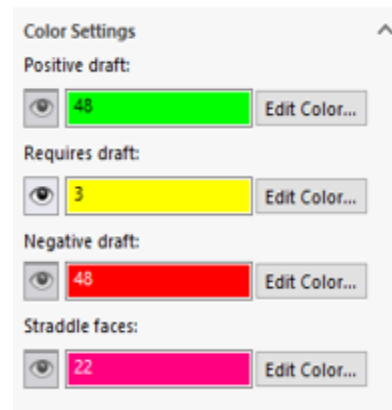


Figura 3.3. Caras sin Angulo de desmoldeo

3.2.3. Aplicación de ángulos de desmoldeo.

Como se observa en la *figura 3.3* las caras de color verde y rojo se encuentran con ángulos de desmoldeo, mientras que en las caras de color amarillo (copa de vaciado y mazarotas) no es necesario aplicar ángulos de salida, debido a que están en contacto con el ambiente, es por ello que no existe ningún tipo de retención al momento del desmoldeo de la pieza fundida.

3.2.4. Tolerancias a la contracción

Debido a sus características de dilatación térmica, los metales en general se contraen (comprimen) durante la solidificación y se enfrían a la temperatura ambiente. [6]. Para obtener una pieza con las medidas exactas se debe considerar la contracción que presenta el material durante la solidificación. Estas tolerancias dimensionales se encuentran detalladas en la *tabla 3.1*, que para una aleación de aluminio debe ser aproximadamente el 1.3%. Es importante mencionar que las dimensiones establecidas por la norma ya presentan un sobre espesor, es por ello que no es necesario aumentar el factor de escala ya que el modelo puede quedar sobredimensionado.

Tabla 3.1. Tolerancias a la contracción

Tolerancia normal a la contracción para algunos metales fundidos	
Metal	%
Hierro fundido gris	0.83-1.3
Hierro fundido blanco	2.1
Hierro fundido maleable	0.78-1.0
Aleaciones de aluminio	1.3
Aleaciones de magnesio	1.3
Latón amarillo	1.3-1.6
Bronce de fósforo	1.0-1.6
Bronce de aluminio	2.1
Acero de alto manganeso	2.6

Fuente: [6]

3.2.5. Plano de partición del molde permanente

Con la ayuda del análisis de ángulos de salida y la dirección del desmoldeo basada en la geometría de la pieza, se procede a escoger el plano de partición adecuado como se muestra en la *figura 3.4*, mismo que indica donde se separa el molde al momento de la obtención de la pieza fundida.

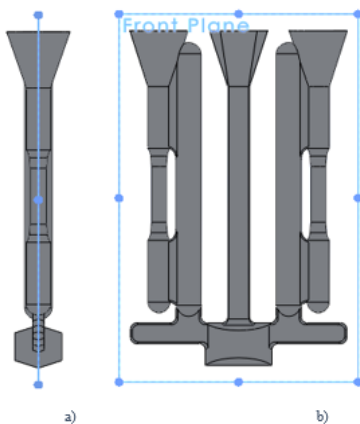


Figura 3.4. Plano de partición a) vista lateral b) vista frontal

3.2.6. Generación del molde 3D

Con la ayuda de la herramienta cavidad se genera el diseño del molde, mismo que consta de dos caras simétricas, como se muestra en la *figura 3.5*.

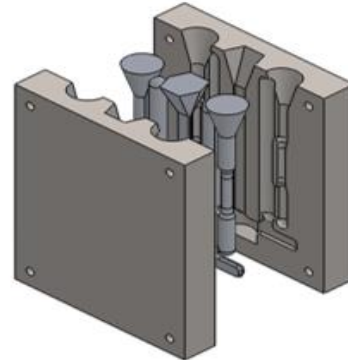


Figura 3.5. Molde para probetas

3.3. Selección del material a fundir

Para las pruebas de fundición se usa una aleación aluminio-silicio-magnesio (356.0 - F), obteniendo el elemento principal de perfiles de aluminio y realizando una compensación de los elementos químicos restantes, para llegar a los porcentajes establecidos por la norma. Las propiedades químicas, termodinámicas y físicas del material se ven detalladas en las *tablas 3.2* y *3.3* respectivamente.

Tabla 3.2. Composición química aleación 356.0

Composición %							
Al	Si	Fe	Mn	Cu	Mg	Zn	Ti
restante	6.5-7.5	0.2	0.1	0.2	0.25-0.45	0.1	0.2

Fuente: [5]

Tabla 3.3. Propiedades termodinámicas y mecánicas de la aleación 356.0

Punto de fusión	560-615°C	Conductividad térmica	150 W/m*°K
Solidus	560°C	Resistencia a la tracción	228 Mpa
Liquidus	615°C	Calor específico	963 J/Kg*°C
Densidad	2.68g/cm ³	Calor latente de fusión	389 KJ/Kg

Fuente: [7].

3.4. Selección del material a mecanizar

Para este proyecto se va a utilizar el acero A-36 que es un acero estructural de bajo contenido de carbono, muy

usado en maquinarias, herramientas y construcciones, mismo que presenta características similares a la del hierro gris. Debido a que los aceros para trabajos en caliente como el W-300 tienen un costo elevado se optó por este material, y además, por que la geometría del diseño no es compleja, por lo que el desgaste superficial del molde será mínimo.

Las propiedades del material químicas, termodinámicas y físicas se ven detalladas en las *tablas 3.4 y 3.5* respectivamente.

Tabla 3.4. Composición química acero A-36

Composición %						
Fe	Si	C	Mn	S	P	Cu
restante	0.4	0.26	0.05	0.04	0.2

Fuente: [8]

Tabla 3.5. Propiedades termodinámicas y mecánicas acero A-36.

Punto de fusión	1154°-1538°C
Solidus	1154°C
Liquidus	1538°C
Densidad	7850 kg/m ³
Conductividad térmica	51.9 W/m*°K
Resistencia a la tracción	400-550 Mpa
Calor específico	460 J/Kg°K

Fuente: [9]

3.5. Cálculos parámetros de fundición

3.5.1. Tiempo de solidificación

El tiempo de solidificación relaciona el volumen de una fundición con su área superficial, como se muestra en la *ecuación 3.1* (regla de Chvorinov), donde C_m es una constante que refleja (*a*) el material del molde, (*b*) las propiedades del metal (incluyendo el calor latente) y (*c*) la temperatura. El valor de dicha constante C_m se puede calcular con la *ecuación 3.2*.

$$T_{TS} = C_m \left(\frac{V}{A} \right)^2$$

Ecuación 3.1. Tiempo de solidificación

Fuente: [10]

$$C_m = \left[\frac{\rho_m * L}{(T_m - T_0)} \right]^2 \left[\frac{1}{(k\rho c)} \right] \left[\frac{\pi}{4} \right]$$

Ecuación 3.2. Constante del tiempo de solidificación

Fuente: [11]

Donde:

T_{TS} = tiempo de solidificación (min).

V = volumen del fundido (cm³).

A = área superficial (cm²).

C_m = constante del molde (min/cm²).

ρ : densidad del molde (kg/m³).

ρ_m : densidad del material (kg/m³).

L : calor latente del material (kJ/Kg).

T_m : Temperatura de fusión del material (°C).

T_0 : Temperatura inicial del molde (°C).

k : Conductividad térmica del molde (W/m*°K).

c : Calor específico del molde (J/Kg°K).

Se considera un volumen de 538591.4385 mm³ y una área superficial 102882.0677 mm². Reemplazando los valores y realizando los cálculos se obtiene:

$$T_{TS} = 2788 \text{ min/m}^2 \left(\frac{0.0005385914385}{0.1028820677} \text{ m} \right)^2$$

$$T_{TS} = 0.08 \text{ min} \approx 5 \text{ seg}$$

3.5.2. Tiempo y velocidad de llenado

Este cálculo se refiere al tiempo mínimo requerido que va a tardar el molde en llenarse, incluyendo, mazarotas, respiraderos y el sistema de alimentación. Para dicho cálculo se va a utilizar un método estándar que se describe en la *ecuación 3.3*, en la cual se debe calcular la velocidad de flujo en el bebedero, aplicando el teorema de Bernoulli entre el punto 1 y 2 de la *figura 3.6*, omitiendo las pérdidas por fricción y trabajando a presión atmosférica. [12].

$$MTF = \frac{V}{Q}$$

Ecuación 3.3. Tiempo de llenado.

Fuente: [12]

Donde:

MTF = tiempo de llenado (s)

V = Volumen de la pieza fundida (cm³)

Q = caudal (cm³/s).

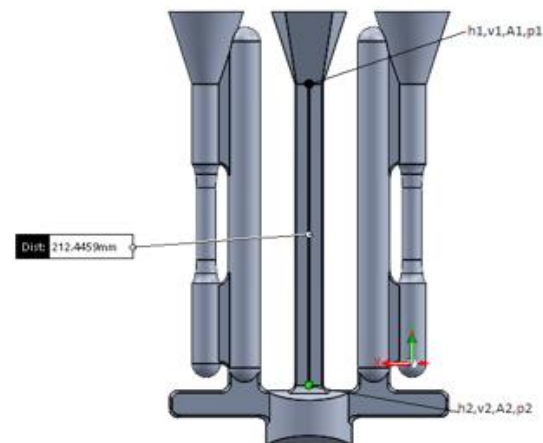


Figura 3.6. Extremo y base del bebedero

$$h_2 + \frac{v_2^2}{2g} = h_1 + \frac{v_1^2}{2g}$$

Ecuación 3.4. Ecuación de Bernoulli
Fuente: [12]

Siendo v_1 la velocidad en la parte superior del bebedero, v_2 la velocidad en la base del bebedero y $h_2=0$, donde:

$$v_2 = \sqrt{h_1 * 2g}$$

$$v_2 = \sqrt{2 * 981 * 21.24}$$

$$v_2 = 204.14 \text{ cm/s}$$

Aplicando la ley de continuidad, se va a calcular la velocidad de flujo volumétrico, donde A es el área de la base del bebedero, siendo igual a 0.684 cm^2 .

$$Q = A * v_2$$

$$Q = 0.684 * 204.13$$

$$Q = 139.6 \text{ cm}^3/\text{s}$$

Reemplazando los valores y realizando los cálculos se obtiene:

$$MTF = \frac{538.591 \text{ cm}^3}{139.6 \text{ cm}^3/\text{s}}$$

$$MTF = 3.86 \approx 4 \text{ s}$$

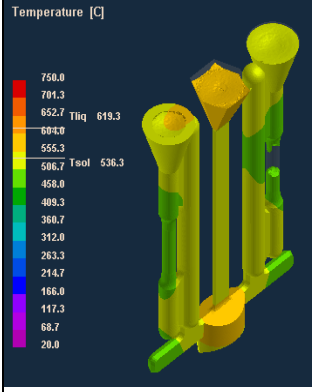
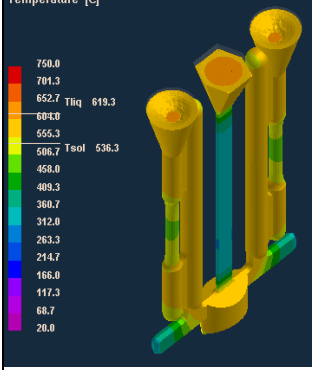
3.6. Simulación de llenado

Se va tomar una temperatura inicial del molde de 200°C , debido a que es un valor recomendado por [6, p. 304], y una temperatura inicial de la colada de 630°C , ya que para una aleación de aluminio-silicio-magnesio su punto de fusión es a partir de los 615°C , lo que quiere decir que es necesario aumentar su temperatura para estar en la zona de *Liquidus*. Se irá incrementando las temperaturas del molde y del material fundido cada 50°C para tener un mejor control de estas variables, evitando así temperaturas excesivas en dichos parámetros.

Se realizaron 18 simulaciones siendo las más representativas las que se encuentran detalladas en la *tabla 3.6*, ya que en las mismas se pueden apreciar el efecto que tienen los parámetros antes mencionados en el llenado del molde.

Tabla 3.6. Simulación de llenado

Simulación del proceso de fundición	
Imagen	Características
	<p>$T_{\text{molde}}=350^\circ\text{C}$ $T_{\text{colada}}=630^\circ\text{C}$ $\text{HTC}=2000 \text{ W/m}^2 * \text{K}$ Enfriamiento a temperatura ambiente Presión atmosférica Porcentaje de llenado: 61 % Conclusión: Solidificación prematura lo que ocasiona un llenado incompleto del molde</p>
	<p>$T_{\text{molde}}= 350^\circ\text{C}$ $T_{\text{colada}}= 700^\circ\text{C}$ $\text{HTC}=2000 \text{ W/m}^2 * \text{K}$ Enfriamiento a temperatura ambiente Presión atmosférica Porcentaje de llenado: 79 % Conclusión: Solidificación prematura lo que ocasiona un llenado incompleto del molde</p>
	<p>$T_{\text{molde}}= 400^\circ\text{C}$ $T_{\text{colada}}= 700^\circ\text{C}$ $\text{HTC}=2000 \text{ W/m}^2 * \text{K}$ Enfriamiento a temperatura ambiente Presión atmosférica Porcentaje de llenado: 82 % Conclusión: Solidificación prematura lo que ocasiona un llenado incompleto del molde</p>

	<p> $T_{\text{molde}} = 400^{\circ}\text{C}$ $T_{\text{colada}} = 750^{\circ}\text{C}$ $\text{HTC} = 2000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ Enfriamiento a temperatura ambiente Presión atmosférica Porcentaje de llenado: 90% Conclusión: Solidificación prematura lo que ocasiona un llenado incompleto del molde </p>
	<p> $T_{\text{molde}} = 450^{\circ}\text{C}$ $T_{\text{colada}} = 750^{\circ}\text{C}$ $\text{HTC} = 2000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ Enfriamiento a temperatura ambiente Presión atmosférica Porcentaje de llenado: 100% Conclusión: Llenado total del molde </p>

Se observa en las simulaciones realizadas que las temperaturas adecuadas de trabajo para el molde y la colada son de 450°C y 750°C respectivamente, ya que si se usan temperaturas menores se generan puntos fríos que obstruyen el flujo e impiden el correcto llenado del molde

3.7. Análisis CAM

Un análisis CAM tiene como objetivo buscar la forma de cómo llevar el diseño del molde a un proceso de mecanizado CNC, mejorando tiempos de maquinado, costo y recursos. Este análisis consiste en buscar el herramienta necesario para su construcción, observando la geometría de la pieza para elegir los puntos de sujeción y determinar el cero pieza para así lograr los resultados esperados.

3.8. Selección de herramienta

La selección de herramientas para el maquinado del molde, se obtiene del análisis CAM y de las propiedades mecánicas del material a mecanizar previamente analizadas, en este caso se va usar fresas frontales de vástago de metal duro HRC, debido a que este tipo de herramientas tienen una alta resistencia al desgaste y por

ende una larga vida útil a comparación de las herramientas de acero rápido HSS.

Las herramientas que se utilizan para el mecanizado CNC del molde se detallan en la *tabla 3.7*.

Tabla 3.7. Herramientas para el maquinado del molde

Tipo	Diámetro (mm)	Número de filos	Operaciones
Fresa frontal punta recta	20 mm	4	Desbaste
Fresa frontal punta recta	6 mm	4	Desbaste
Fresa frontal punta esférica	6 mm	2	Acabado
Broca	11.11 mm	2	Perforado

3.9. Cálculos parámetros de corte

3.9.1. Cálculo fresa de 20mm punta recta (D_{20})

Para determinar los parámetros de desbaste adecuados se va a usar la relación entre en avance y la profundidad de pasada, que para herramientas de metal duro es igual a $1/10$. [13].

$$\frac{a}{pp} = \frac{1}{10}$$

Ecuación 3.5. Relación entre el avance y la profundidad de pasada
Fuente: [13].

Donde:

a = avance (mm/rev)

pp = profundidad de pasada (mm)

La *figura 3.7* muestra la máxima profundidad de corte que puede desbastar la herramienta, misma que es igual a $0.2D$.

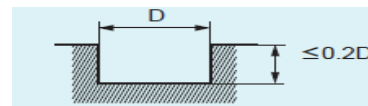


Figura 3.7. Máxima profundidad de corte

Donde:

D= ancho de corte (mm)

0.2D= profundidad de pasada (mm)

Reemplazando y realizando los cálculos respectivos se obtiene una profundidad de corte ≤ 4 mm, en este caso se va a seleccionar una profundidad de 1 mm, debido a que se va a realizar el careado del molde y no se necesitan grandes profundidades, ya que el objetivo de realizar esta operación es obtener una superficie plana que no presente discontinuidades del material a desbastar.

Con la profundidad de corte obtenida se procede a calcular el avance por diente para poder seleccionar la velocidad de corte adecuada.

$$a = \frac{1}{10} = 0.1 \frac{\text{mm}}{\text{rev}} = \mathbf{0.025 \frac{\text{mm}}{\text{diente}}}$$

El fabricante de la herramienta establece un rango de velocidades de corte de 120 a 200 metros por minuto con sus respectivos avances de 0.006 a 0.16 milímetros por diente.

Interpolando el avance por diente calculado con los parámetros de desbaste del fabricante se obtiene una velocidad de corte (V_c) de:

$$\frac{0.16 - 0.006}{0.16 - 0.025} = \frac{200 - 120}{200 - V_c}$$

$$V_c = \mathbf{130 \frac{m}{min}}$$

La *tabla 3.8* detalla los parámetros de corte óptimos obtenidos y propiedades del material a desbastar, que sirven para determinar el número de vueltas por minuto de la herramienta, la velocidad de avance, la potencia neta requerida, y el volumen de viruta, mismos que correctamente calculados garantizan un buen resultado de cualquier operación de fresado.

Tabla 3.8. Parámetros de corte para fresas punta recta de 20mm

Parámetros de herramientas de corte	
Avance por diente (f_z)	0.025 mm/diente
Profundidad de corte (ap)	1 mm
Numero de diente (z_c)	4
Ancho de corte axial (a_e)	20 mm
Velocidad de corte (V_c)	130 m/min

Reemplazando los valores se obtiene:

Velocidad del husillo

$$N = \frac{V_c * 1000}{\pi * D_{20}}$$

$$N = \mathbf{2069 \text{ Rpm}}$$

Velocidad de avance

$$V_f = N * z_c * f_z$$

$$V_f = \mathbf{207 \text{ mm/min}}$$

Arranque de viruta

$$Q = \frac{ap * a_e * v_f}{1000}$$

$$Q = \mathbf{4.14 \text{ cm}^3/\text{min}}$$

Potencia neta requerida

$$P_C = \frac{ap * a_e * v_f * K_C}{60 * 10^6}$$

$$P_C = \mathbf{0.1 \text{ KW}}$$

3.9.2. Cálculo fresa de 6mm recta (D_6)

Para los cálculos de la fresa de 6 mm se sigue el procedimiento anterior, obteniendo una profundidad de pasada ≤ 1.2 mm, en este caso se va a seleccionar una profundidad de pasada de 0.7 mm, para no correr el riesgo de una posible rotura de la herramienta.

Realizando los cálculos respectivos se obtiene:

$$a = \frac{0.7}{10} = 0.07 \frac{\text{mm}}{\text{rev}} = \mathbf{0.0175 \frac{\text{mm}}{\text{diente}}}$$

Interpolando para obtener la velocidad de corte:

$$\frac{0.16 - 0.006}{0.16 - 0.0175} = \frac{200 - 120}{200 - V_c}$$

$$V_c = \mathbf{126 \frac{m}{min}}$$

La *tabla 3.9* detalla los parámetros de corte óptimos obtenidos y propiedades del material a desbastar, que sirven para determinar el número de vueltas por minuto de la herramienta, la velocidad de avance, la potencia neta requerida, y el volumen de viruta, mismos que correctamente calculados garantizan un buen resultado de cualquier operación de fresado.

Tabla 3.9. Parámetros de corte para fresas punta recta de 6mm
Parámetros de herramientas de corte

Velocidad de corte (V_c)	126 m/min
Avance por diente (f_z)	0.0175 mm/diente
Profundidad de corte (a_p)	0.7 mm
Numero de diente (z_c)	4
Ancho de corte axial (a_e)	6 mm
Fuerza de corte (k_c)	1500 N/mm ²

Velocidad del husillo

$$N = \frac{V_c * 1000}{\pi * D_6}$$

$$N = \mathbf{6682 \text{ Rpm}}$$

Velocidad de avance

$$V_f = N * z_c * f_z$$

$$V_f = \mathbf{468 \text{ mm/min}}$$

Arranque de viruta

$$Q = \frac{a_p * a_e * v_f}{1000}$$

$$Q = \mathbf{1.96 \text{ cm}^3/\text{min}}$$

Potencia neta

$$P_C = \frac{a_p * a_e * v_f * K_C}{60 * 10^6}$$

$$P_C = \mathbf{0.05 \text{ KW}}$$

3.9.3. Calculo fresa de 6mm redonda (D_6).

En este caso la profundidad de corte es de 0.3 mm ya que es el sobre-espesor dejado en la etapa de desbaste para realizar el acabado final. [14].

Realizando los cálculos respectivos se obtiene:

$$a = \frac{0.3}{10} = 0.03 \frac{\text{mm}}{\text{rev}} = \mathbf{0.0075 \frac{\text{mm}}{\text{diente}}}$$

Interpolando para obtener la velocidad de corte:

$$\frac{0.16 - 0.006}{0.16 - 0.025} = \frac{200 - 120}{200 - V_c}$$

$$V_c = \mathbf{121 \frac{m}{min}}$$

Para el acabado los valores de la velocidad de corte aumentan un 25%, mientras que el avance disminuye un 25%. [15]. Ver *tabla 3.10*.

Tabla 3.10. Parámetros de corte para fresas punta esférica de 6mm
Parámetros de herramientas de corte

Velocidad de corte (V_c)	151 m/min
Avance por diente (f_z)	0.0056 mm/diente
Profundidad de corte (a_p)	0.3 mm
Numero de diente (z_c)	2
Ancho de corte axial (a_e)	0.3 mm
Fuerza de corte (k_c)	1500 N/mm ²

Velocidad del husillo

$$N = \frac{V_c * 1000}{\pi * D_6}$$

$$N = \mathbf{8000 \text{ Rpm}}$$

Velocidad de avance

$$V_f = N * z_c * f_z$$

$$V_f = \mathbf{90 \text{ mm/min}}$$

Arranque de viruta

$$Q = \frac{a_p * a_e * v_f}{1000}$$

$$Q = \mathbf{0.01 \text{ cm}^3/\text{min}}$$

Potencia neta

$$P_C = \frac{a_p * a_e * v_f * K_C}{60 * 10^3}$$

$$P_C = \mathbf{0.0002 \text{ KW}}$$

3.9.4. Cálculo para broca 7/16 (D_{7/16})

Tabla 3.11. Parámetros de corte para brocas de 7/16 in

Parámetros de herramientas de corte	
Velocidad de corte (V _c)	16 m/min
Avance por diente (f _z)	0.018 mm/diente
Profundidad de corte (a _p)	0.5 mm
Numero de diente (z _c)	2
Ancho de corte axial (a _e)	11.11 mm
Fuerza de corte (k _c)	1500 N/mm ²

Fuente: [15].

Reemplazando y realizando los cálculos se obtiene:

Velocidad del husillo

$$N = \frac{V_c * 1000}{\pi * D_{7/16}}$$

N=458 Rpm

Velocidad de avance

$$V_f = N * z_c * f_z$$

V_f = 82.44 mm/min

Arranque de viruta

$$Q = \frac{a_p * a_e * v_f}{1000}$$

Q= 8 cm³/min

Potencia neta

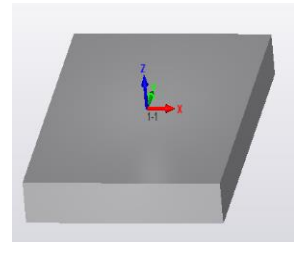
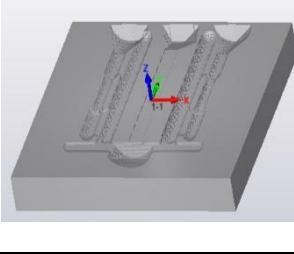
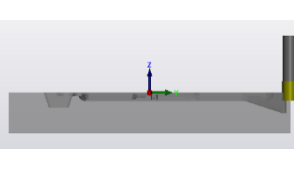
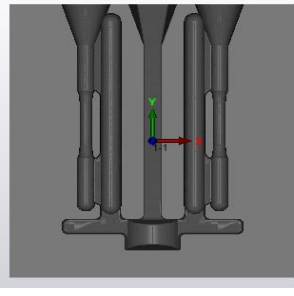
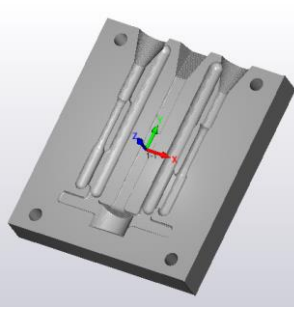
$$P_C = \frac{f_n * D_C * v_C * K_C}{240 * 10^3}$$

P_C = 0.2 KW

3.10. Simulación del proceso de mecanizado

A continuación, se describe el proceso de mecanizado de una cara del molde, mismo que se divide en 5 etapas de trabajo. Véase *tabla 3.12*.

Tabla 3.12. Simulación de mecanizado

Imagen	Etapas
	1.- Planeado Se realiza un planeado de la cara superior e inferior del material con una fresa de 20 mm, para eliminar cualquier discontinuidad presente en la superficie del material.
	2.- Desbaste forma del molde Con una fresa de 6mm y con la operación de 3Dmilling se procede a desbastar, de tal manera que solo exista un excedente de 0.3 mm mismo que se lo mecaniza en la etapa de acabado.
	3.- Desbaste caras laterales Para rectificar las 4 caras laterales del molde se utiliza la operación de contorneado y una fresa de 20 mm, desbastando una profundidad de 48 mm.
	4.- Acabado Con una fresa punta redonda de 6mm se procede a realizar el afinado del molde eliminando el material excedente dejado en la etapa 2.
	5.- Taladrado Con una broca 7/16 se procede a realizar las perforaciones, mismas que solamente sirven como guías al momento de la fundición para cuadrar el molde.

Una vez realizada la simulación CAM del molde, se genera el código G para posteriormente realizar una revisión y corregir errores si existieren.

3.11. Colado y fundición

3.11.1. Preparación el material para la fundición

Una vez que los moldes se encuentran listos se procede a preparar el material para realizar la colada usando aluminio chatarra, compensando los componentes químicos restantes para llegar a una aleación 356.0 (aleación establecida por la norma)

3.11.2. Fundición del metal

Ya preparado el material se procede a realizar la fundición del mismo colocando el metal dentro del horno de crisol fijo de 100 kg y elevando a una temperatura de 750°C como se muestra en la *figura 3.8*, este dato fue obtenido previamente mediante simulación, lo que asegura la fluidez del material en el momento del colado dentro de la cavidad del molde.



Figura 3.8. Fundición del metal

3.11.3. Preparación y precalentamiento de la matriz

Culminada la etapa de fundición del metal, se realiza el precalentamiento del molde como se muestran en las *figuras 3.9* y *3.10* respectivamente, llegando a una temperatura de 450°C, dato obtenido mediante simulación, dicho precalentamiento ayuda a mejorar la fluidez del material, logrando así el llenado de todas las cavidades de la matriz. Es importante mencionar que para la medición de temperaturas se hizo uso de un termómetro pirómetro infrarrojo.



Figura 3.9. Preparación de la matriz



Figura 3.10. Precalentamiento de la matriz a 450°C

3.11.4. Vertido del metal fundido

Una vez que el material y el molde se encuentran en las temperaturas óptimas que son de 750°C y 450°C respectivamente, se procede a realizar el vertido del metal fundido en el molde como se muestra en la *figura 3.11*.



Figura 3.11. Vertido del metal fundido a 750°C

3.11.5. Extracción de la pieza

Teniendo en cuenta el tiempo de solidificación previamente calculado, se debe esperar para realizar la extracción de la pieza. Al momento de la extracción se debe tener cuidado ya que el canal de alimentación es delgado y se corre el riesgo de que se rompa, además,

aunque la pieza ya se encuentre solidificada se encuentra a altas temperaturas (alrededor de 300°C) y puede ocasionar quemaduras si no se tiene las debidas precauciones. Ver figura 3.12.



Figura 3.12. Extracción de la pieza

3.11.6. Rectificado de la probeta

Para el rectificado de la probeta se va a usar un torno convencional aplicando la técnica de pulido, que es un proceso donde se produce un acabado de la superficie liso y sin rayas, ya que la probeta no debe presentar discontinuidades en la sección de prueba, debido a que se generan concentradores de esfuerzo y los datos obtenidos en el ensayo de tracción serian erróneos. Las dimensiones que debe presentar la probeta se encuentran detalladas en la tabla 2.1. Ver figura 3.13.



Figura 3.13. Probeta maquinada

4. Conclusiones

Al realizar el diseño del molde en software CAD se pudo analizar la geometría de la pieza a fabricar, además de cumplir los requisitos dimensionales establecidos por la norma y consideraciones de diseño para fundición, como son ángulos de desmoldeo (20°), tolerancias a la contracción que para aleaciones de aluminio es el 1.3% y

selección del plano de partición que depende de la forma de la pieza a fundir.

Se realizaron varias simulaciones variando los parámetros de fundición (temperatura del molde y colada), logrando así encontrar las temperaturas adecuadas siendo estas de 450°C y 750°C respectivamente, con las cuales existe un llenado total del 100% de todas las cavidades de la matriz. De igual forma se pudo identificar mediante simulación los defectos generados durante el proceso de fundición como son porosidades, faltas de llenado y vacíos.

Al determinar los parámetros de corte (velocidad de corte y avance por diente) usando la relación de esbeltez, se pudo obtener un correcto mecanizado tanto en desbaste como en acabado, además de utilizar dichos parámetros, es fundamental emplear refrigerante sintético y herramientas de metal duro HRC, para evitar así el desgaste excesivo del filo de la herramienta o adhesiones de material en la misma debido a las altas temperaturas generadas durante el mecanizado.

Mediante una simulación CAM usando el respectivo post procesador SINUMERIK 828D utilizado en la fresadora ROMI D800, se realizó con éxito la construcción del molde permanente a través de un proceso de mecanizado CNC, garantizando que las trayectorias de la herramienta y tiempos de maquinado obtenidos en la simulación son bastante confiables, ya que por medio de un análisis dimensional se obtuvo un promedio de error entre medidas reales y nominales menor al 1%, mismo que no afecta al diseño del molde ya que se encuentra dentro de los rangos de tolerancias establecidos por la norma, además de obtener un tiempo total de mecanizado de 70 horas, dato que varía con la simulación en un rango de ± 15 min, avalando así la simulación de maquinado.

Mediante la obtención de la pieza fundida se validó la simulación del proceso de fundición, logrando identificar que los defectos (rechupes, porosidades) generados en la pieza son bastante aproximados a los obtenidos en simulación, esto nos garantiza que la simulación realizada en el capítulo IV es bastante confiable, ya que permitió mejorar la calidad y el rendimiento del proceso de fundición.

Gracias al análisis de composición química y ensayos destructivos realizados en la empresa ILPM, se logró analizar las características de la aleación 356.0, verificando que los resultados obtenidos en el ensayo químico no cumplen con los porcentajes de los elementos de la aleación (magnesio y titanio) establecidos por la norma.

5. Bibliografía

- [1] L. M. Gonzáles Aquino, J. E. Ramírez Alfonso y A. R. Villalta Valenzuela, «Elaboración e implementación de manuales de diseño y construcción de modelos y moldes de arena para fundición de aleaciones de aluminio,» San Salvador, 2015.
- [2] M. Gutiérrez Cabanes, «Diseño y fabricación de un molde para el estudio de la influencia de la geometría de los sistemas de distribución en el atrapamiento de aire en procesos de fundición por inyección a alta presión,» Cartagena, 2013.
- [3] P. Corrado, *Desing for Manufacturing*, Boston: Elsevier, 2001.
- [4] M. Kutz, *Hanbooks of Materials Seleccion*, Canada: Copyright, 2002.
- [5] ASTM B-108, «Standard Specification for Aluminum-Alloy Permanent Mold Castings,» PA, West Conshohocken.
- [6] S. Kalpakjian y S. R. Schmid, «Manufactura ingeniería y tecnología,» Pearson Education, México, 2008.
- [7] J. G. Kaufman y E. L. Rooy, «Aluminum Alloys Castings,» ASM International, United States of America, 2004.
- [8] ASTM A36, «Standar Specification for carbon structural steel,» PA, West Conshohocken, 2008.
- [9] P. L. Mangonon, «Ciencia de los materiales selección y diseño,» Pearson Education, México, 2001.
- [10] M. P. Groover, «Fundamentos de manufactura moderna,» McGrawHill, México, 2007.
- [11] D. R. Poirier y G. H. Geiger, «Transport phenomena in materials processing,» TMS, United States of america, 1994.
- [12] C. F. Giménez y M. P. Guillamón, «Ciencia y tecnología de materiales Problemas y cuestiones,» PEARSON EDUCATION, S.A., 2005, Madrid.
- [13] J. Carrasco y S. Mallorquín, «Prácticas y procesos de taller de mecanizado, Fabricación por arranque de viruta,» 2012.
- [14] A. L. Casillas, «Cálculos de taller,» Copyright, España, 2008.
- [15] H. Gerling, *Alrededor de las máquinas herramientas*, Barcelona: Reverté, S.A., 2006.