



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOLDE
PERMANENTE PARA VACIADO POR GRAVEDAD
QUE SIRVA COMO MATERIAL DIDACTICO EN
UNA PRÁCTICA DE LABORATORIO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

P R E S E N T A N:

ALINE CANTERA RUBIO

ARTURO CHAVARRÍA RESENDIZ



DIRECTOR DE TESIS

DR. JOSÉ JAVIER CERVANTES CABELLO

CD. UNIVERSITARIA

2011



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

AGRADECIMIENTO

A mis Padres Rafaela y Salvador.

No dejo de pensar en los primeros pasos, cuando llega la recompensa por un esfuerzo no dejo de recordar su cercanía, complicidad, devoción....su ejemplo. Les dedico este triunfo por tantos años de entrega, desvelos, confianza, cariño, apoyo. Estamos juntos. Los quiero mucho

A mi hermano Fernando

Por tu comprensión, tolerancia y apoyo tanto moral como económico en los momentos que más lo necesité a lo largo de mi carrera, alentándome a seguir adelante, muchas gracias.

A mis hermanas Leslie y Mirell

Desde que nacimos me han enseñado el valor de un equipo, de la amistad y la complicidad, gracias por compartir uno más de nuestros sueños, por ser no solo mis hermanas si no también mis amigas

Expreso un agradecimiento a la universidad Nacional Autónoma de México, la mejor Universidad de América Latina y en especial a la Facultad de Ingeniería por darme la oportunidad de estudiar la carrera de Ingeniería Mecánica

ALINE CANTERA RUBIO

AGRADECIMIENTO

Gracias a DIOS por darme la oportunidad de vivir y bendecirme siempre para poder terminar una licencia.

Gracias a mis padres y a mis tíos quienes desde el inicio de mi vida me llevaron por un buen camino y aunque esta resulta ser una forma muy sencilla de agradecer por todo su esfuerzo y dedicación, sólo quiero que sepan que todos mis logros son sus logros.

A mis hermanos también les agradezco por el apoyo que me brindaron durante todos mis estudios y en los momentos difíciles de mi vida, ellos supieron como motivarme para seguir adelante.

Agradezco también a todos mis compañeros de la Facultad de Ingeniería que me apoyaron y confiaron en mí para lograr este objetivo y finalmente un eterno agradecimiento a la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme la oportunidad de estudiar la carrera de Ingeniería Mecánica.

ARTURO CHAVARRÍA RESÉNDIZ

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	6
	CAPÍTULO 1: CONCEPTOS FUNDAMENTALES	9
1.1	Equipos de fundición	9
1.1.1	Cubilote	9
1.1.2	Horno de crisol	10
1.1.3	Horno de cuba	11
1.1.4	Hornos de arco eléctrico	12
1.1.5	Horno de inducción	13
1.2	Clasificación de los Procesos de Fundición	13
1.2.1	Fundición en arena en verde	15
1.2.2	Fundición en molde permanente por gravedad	17
1.3	Características Básicas de un Molde	18
1.4	Factores Importantes en el Proceso de Fundición	20
1.4.1	Velocidad de solidificación	20
1.4.2	Tiempo de solidificación	20
1.4.3	Flujo del fluido y temperatura de vaciado	22
1.4.4	Contracción	25
2	CAPÍTULO 2: DISEÑO Y MANUFACTURA DEL MOLDE	28
2.1	Diseño del molde	28
2.1.1	Identificación del problema	29
2.1.2	Recomendaciones para el diseño de un molde	29
2.1.3	Ideas preliminares y propuestas	33
2.1.4	Elección de la pieza a fabricar	37
2.1.5	Dimensionamiento del molde	40
2.2	Manufactura del Molde	44
2.2.1	Selección de aceros para moldes permanentes	44
2.2.2	Selección de la herramienta y parámetros de corte	47
2.2.3	Simulación de la manufactura y fabricación del molde	51
2.2.4	Apertura y cierre del molde	54
2.2.5	Mecanismo de sujeción	55
2.3	Pruebas Primera Iteración	58
2.4	Diseño y Experimentación Segunda Iteración	62
2.5	Diseño y Experimentación Tercera Iteración	63

3	CAPÍTULO 3: DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE PARÁMETROS, CONSTANTE DE MOLDE Y TIEMPO DE SOLIDIFICACIÓN.....	66
3.1	Temperatura del Material	66
3.2	Temperatura del molde.....	67
3.3	Constante del Molde y Tiempo de solidificación.....	68
4	CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS.....	72
5	BIBLIOGRAFÍA	75
6	ANEXO.....	76

1 INTRODUCCIÓN

La fundición es el proceso por el cual los metales se funden mediante la acción del calor. Estos se dejan solidificar dentro de un molde, el cual contiene una cavidad cuya forma geométrica determina la forma de la pieza a fundir.

En principio, no existen limitaciones en cuanto al tamaño de las piezas que se pueden producir por fundición. Las limitaciones surgen primordialmente de las propiedades del material, las temperaturas de fusión y las propiedades – mecánicas, químicas, térmicas – del material del molde.

Los procesos de fundición son métodos de manufactura importantes y de uso extenso que permiten producir piezas complejas o intrincadas en casi todos los tipos de metales, con altos ritmos de producción, tolerancias y rugosidades aceptables. La competitividad de los procesos de fundición radica primordialmente en que permiten eliminar cantidades sustanciales del costo de maquinado que a menudo requieren los métodos alternativos de producción.

El plan de estudios 2009-1 de la carrera de Ingeniería Industrial, establece para la materia de Procesos de Manufactura 1, la práctica de laboratorio de Fundición en Arena, sin embargo en dicha materia no se contempla alguna práctica que muestre el mismo proceso utilizando un molde permanente, debido a la importancia que tiene la fundición en la industria, resulta necesario incluir en la formación académica de un ingeniero industrial los conceptos necesarios para comprender las ventajas y desventajas de generar una pieza en arena y en un molde permanente. Por tal motivo, el objetivo principal de este trabajo fue diseñar y manufacturar un molde permanente para vaciado por gravedad de fácil operación que pudiera ser implementado como material didáctico en una práctica de laboratorio, además de

determinar los parámetros de vaciado adecuados para la obtención de piezas de óptima calidad en este.

Respecto al contenido de este trabajo de tesis, en el capítulo 1 se describen los conceptos fundamentales para comprender el proceso de fundición; en primera instancia se ilustran los equipos y procesos de fundición más comúnmente empleados y la diferencia que hay entre estos, se presenta una clasificación de los procesos de fundición y se describe el proceso de arena en verde por ser uno de los más utilizados y el proceso en molde permanente por ser el que se utiliza en el presente trabajo. De igual manera se mencionan las características básicas de un molde y los factores a considerar en el proceso de fundición.

El segundo capítulo corresponde al diseño y manufactura del molde, en éste se describe el proceso que fue necesario para seguir para la elección de la pieza a fabricar. Se muestra además un análisis de las geometrías y ángulos que se deben evitar para lograr un producto de óptima calidad. Referente a la manufactura se hace mención del tipo de aceros empleados para la generación de moldes permanentes y se justifica el utilizado para el presente trabajo, se describen las herramientas utilizadas y se indican los parámetros de corte utilizados para la manufactura del corte. Previo al inicio del maquinado de la cavidad fue necesario generar una simulación que nos asegurara que los parámetros de corte asignados eran los adecuados por lo que en este capítulo se muestran los resultados arrojados por dicha simulación, podemos de igual manera encontrar el diseño del sistema de sujeción del molde y el sistema de apertura, además de las diferentes iteraciones efectuadas al diseño original necesarias para la obtención de un producto de calidad adecuada

En el capítulo tres se indican los parámetros de vaciado adecuados para generar una pieza completa y de calidad aceptable en el molde fabricado, haciendo hincapié en que dichos valores no aplican para otro tipo de moldes permanentes.

También en ese capítulo se calcula la constante del molde y el tiempo de solidificación teórico. Al final del presente trabajo se presentan las conclusiones y como Anexo 1 el formato propuesto para la realización de una práctica de laboratorio con el molde generado.

CAPÍTULO 1: CONCEPTOS FUNDAMENTALES

1.1 Equipos de fundición

La elección de un equipo de fundición depende básicamente de los requerimientos de temperatura y del volumen de metal líquido a emplear, ya vez que para la fabricación de una pieza se pueden necesitar desde unos gramos hasta varias toneladas de material líquido y temperaturas de fusión de entre 350° y 400° para el caso del plomo y tan altas como 1400° para aceros.

1.1.1 Cubilote

El cubilote es usado para la fundición de hierros colados, éste consiste de una chimenea cilíndrica de más de 4 metros de longitud y pueden tener desde 0.8 a 1.4 m de diámetro, compuestos de una envoltura de chapa de acero dulce de 5 a 10 mm. de espesor y un revestimiento interior de mampostería refractaria de unos 250 mm. de espesor. El horno descansa sobre cuatro columnas metálicas denominadas *pies de sostén* del cubilote (figura 1.1).

El cubilote se carga con capas de coque, arrabio, chatarra y material fundente en capas múltiples para fundir el volumen de metal, el proceso inicia cuando el coque se enciende, se introduce un sople de aire cerca de la base del cilindro a través de aberturas llamadas toberas. El metal fundido escurre hacia abajo a través de la cama de coque a un pozo en el fondo donde se acumula hasta que el horno se sangra.

Los hornos de cubilote pueden producir colados de hasta 20 toneladas cada tres horas. El mayor problema de estos hornos es que sus equipos para el control de

emisiones contaminantes son más costosos que el propio horno, por ello no es muy costeable su uso, además de que no se autoriza su operación fácilmente.

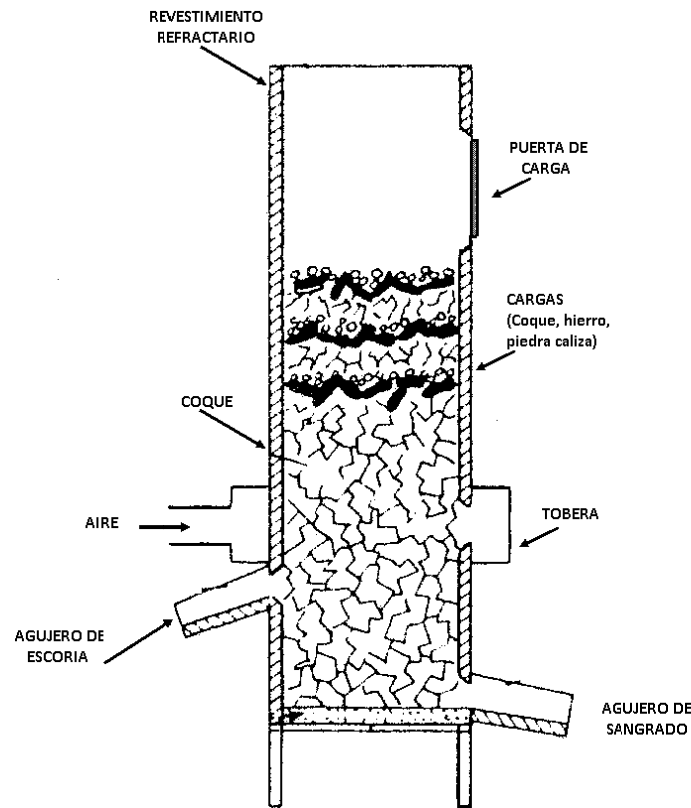


Figura 1.1. Horno de cubilote

1.1.2 Horno de crisol

Una gran cantidad de fundición no ferrosa para trabajo en pequeños volúmenes se lleva a cabo en este tipo de hornos. Se coloca un crisol dentro de un horno para quemar gas o aceite y se vierte arrabio y metal de chatarra (figura 1.2). El horno se enciende y se deja operando con un sople de aire para intensificar el calor y circularlo alrededor del crisol hasta que el metal se ha fundido y ha alcanzado la temperatura requerida para la colada. El crisol se levanta del horno con tenazas especiales y se coloca en un soporte con anillo que sirva como mango de colada.

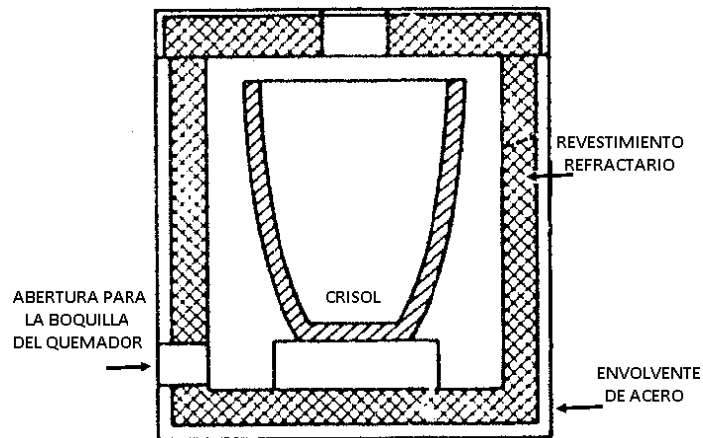


Figura 1.2 Horno de crisol

1.1.3 Horno de cuba

Los hornos de cuba son usados para fundir grandes cantidades de metales no ferrosos. La construcción general del horno es similar a la de un tipo crisol. Sin embargo la cuba es más grande que el crisol y es una parte permanente del horno. Las cubas son de acero o hierro fundido y deben revestirse con una capa delgada de material refractario para evitar la contaminación del metal fundido.

Los tamaños más pequeños son estacionarios, y el metal debe sacarse con cucharón. Los más grandes con capacidad para una tonelada o más de material, se diseñan de modo que puedan inclinarse para vaciar el metal fundido en cucharones para su distribución en los moldes.

1.1.4 Hornos de arco eléctrico

El arco eléctrico es una fuente de calor de alta intensidad que puede usarse para fundir cualquier metal. Existen dos clases de hornos calentados eléctricamente, el directo e indirecto. *El horno de arco eléctrico directo*, es aquel en el cual el arco corre del electrodo de carbono al metal que se va a fundir, se usa sobre todo para la fusión de aceros de herramienta y materiales de aleación en los cuales la composición y las propiedades desarrolladas deben controlarse con mucho cuidado.

Debido a que no es necesario el oxígeno para la combustión, el horno puede estar cerrado herméticamente para excluir el aire y otros gases. Los electrodos se espacian automáticamente por sí mismos de la superficie del charco fundido después de que el arco se ha iniciado, y el control de temperatura se establece por la potencia suministrada a los electrodos, los cuales pueden ser de más de un pie de diámetro en los hornos más grandes. El horno está montado de modo que puede inclinarse para vaciarlo después de que se ha terminado el proceso de fusión.

El horno de arco eléctrico indirecto se usa sobre todo para fusionar las aleaciones con base de cobre, pero se puede usar para otros metales de igual manera. El horno consiste en una envolvente cilíndrica de acero revestida con material refractario. El calor se produce por un arco que se inicia y mantiene entre electrodos opuestos. El calor se radía para aumentar la temperatura del revestimiento completo del horno lo mismo que de la carga. La oscilación en el horno hace que el metal fundido fluya sobre el material refractario calentado y capte calor por combustión lo mismo por radiación.

1.1.5 Horno de inducción

En apariencia un horno de fusión por inducción se asemeja a un horno del tipo crisol o de cuba. El calor se produce por un flujo interno de corriente inducida, la energía se suministra al horno en forma de corriente alterna que pasa a través de conductores en el cuerpo del horno para establecer un campo magnético variable de alta frecuencia, el cual pasa a través del metal que se calienta. El metal, que es en sí un conductor, tiene voltajes inducidos que causan el flujo de corriente y debido al flujo de la corriente eléctrica a través de la resistencia (del mismo metal) genera calor, elevando la temperatura del metal.

Finalmente debido a que no se necesitaban temperaturas demasiado elevadas además de requerir un pequeño volumen de material y como la Facultad de Ingeniería cuenta con varios hornos del tipo eléctrico, se utilizó uno de estos para el presente proyecto.

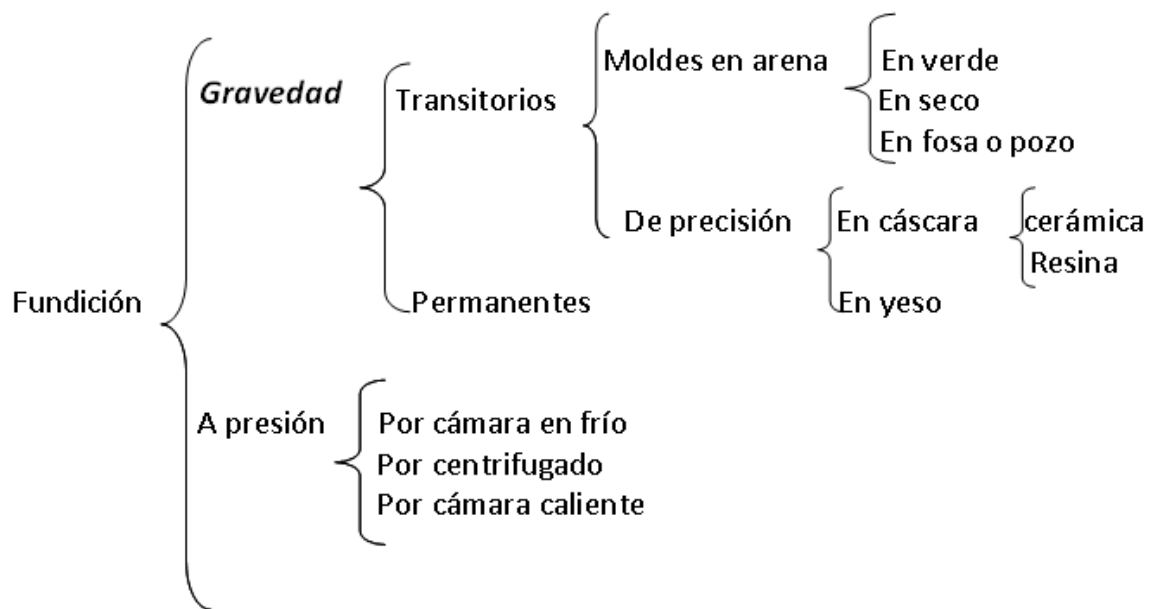
1.2 Clasificación de los Procesos de Fundición

El proceso de fundir o colar consiste de una serie de pasos secuenciales realizados en un orden definido, primero se debe construir o elegir un modelo que represente el producto terminado con el cual se decidirá el tipo de molde a utilizar. Los moldes se hacen de varios materiales que incluyen arena, yeso, cerámica y metal, los procesos de fundición se clasifican frecuentemente de acuerdo a los diferentes tipos de moldes, y esta clasificación es:

- 1) Procesos de fundición con molde desechable.
- 2) Procesos de fundición con molde permanente.

En la fundición con molde desechable (no permanente), el molde donde se solidifica el metal debe ser destruido para remover la fundición. Estos se hacen de arena, yeso o materiales similares que mantienen su forma, usando aglomerantes de varias clases. Por otra parte, un molde permanente puede usarse más de una vez y es utilizado para producir fundiciones en volumen. Está hecho de metal, o algunas veces de un refractario cerámico, que puede soportar las altas temperaturas de fundición.

El proceso de fundición puede usarse para trabajar casi cualquier metal, sin embargo ha sido necesario desarrollar diferentes métodos de fundición para satisfacer diversos requisitos, a continuación se presentan los procesos de fundición más importantes. Se describirá el de fundición en arena en verde, debido a que es uno de más los utilizados, y el proceso de fundición en molde permanente por gravedad, que es el tema que es el tema de interés en este trabajo.



1.2.1 Fundición en arena en verde

El material más usado para moldes es la arena, debido a su resistencia a altas temperaturas que combinada y mezclada con diferentes materiales tiene una enorme capacidad para conservar un perfil determinado y para soportar la carga mecánica impuesta por el metal líquido; además presenta una excelente permeabilidad (para permitir el escape de los gases) y compresibilidad (para permitir la contracción). La palabra verde se refiere a la existencia de humedad en la arena, la cual es de suma importancia en este proceso. Algunos ingredientes que ayudan a satisfacer los requerimientos de la arena son:

- Aglomerante, para proporcionar rigidez.
- Aditivos, que brindan compresibilidad.
- Agua, para activar al aglomerante.

El tipo de arena más usado en las fundiciones es la sílice (SiO_2) o arena cuarzosa, la cual es abundante y barata, pero debido a sus efectos perjudiciales sobre los pulmones, está siendo reemplazada hasta cierto punto por la arena olivínica. El aglomerante que junto con el agua proporciona resistencia y conformabilidad, puede consistir en: arcilla, cemento, silicato de sodio, aceites y resinas.

En la arena de moldeo generalmente se usa arcilla como aglomerante primario. Los tipos de arcilla son bentonita, caolinita o ilita. Las cantidades varían entre 5 y 20% de la arena, puede usarse cemento portland como aglomerante si se desean moldes resistentes. El contenido de agua en la arena de moldeo generalmente es de 4 a 8%, cuando se usa arcilla como aglomerante primario. Una vez hecho el modelo, se puede producir el molde. Estos se producen en cajas de moldeo que generalmente consisten en una semicaja superior y otra inferior. En un

molde de arena (y otros procesos de molde desechable) la cavidad del molde se forma mediante un modelo de madera, metal, plástico u otro material, que tiene la forma de la pieza que será fundida. La cavidad se forma al recubrir el modelo de ambas cajas con arena en partes iguales, de manera que al remover el modelo quede un vacío que tenga la forma deseada de la pieza (Figura 1.4).

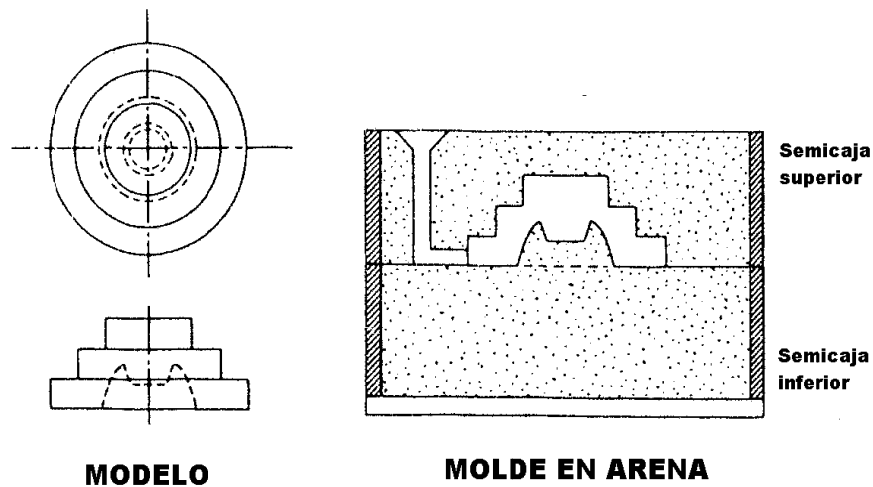


Figura 1.4. Molde en arena

La cavidad del molde proporciona las superficies externas de la fundición; pero además puede tener superficies internas, que se definen por medio de un corazón, el cual es una forma colada en el interior de la cavidad de molde para establecer la geometría interior de la pieza. En la fundición en arena, los corazones se hacen generalmente de arena, aunque pueden usarse otros materiales como metales y cerámicos. Para facilitar la producción de moldes se han desarrollado diferentes máquinas moldeadoras que apisonan la arena de moldeo a gran velocidad hasta que alcance una resistencia adecuada.

1.2.2 Fundición en molde permanente por gravedad

Los moldes permanentes son usados más de una vez, siendo el hierro colado y el acero los materiales más usados para la fabricación de este. La cavidad requerida se genera manufacturando un par de placas mediante el uso de una máquina herramienta, para incrementar la vida útil del interior del molde es necesario recubrirlo de barro refractario (silicato de sodio o arcilla) o negro de humo, el cual reduce los efectos de enfriamiento en el metal y facilita la remoción de la pieza de fundición, este tipo de moldes necesitan un precalentamiento previo al vaciado para facilitar el flujo del material y evitar el choque térmico. En el caso de la fundición por gravedad no se utiliza presión excepto la obtenida por la altura del metal del molde. El proceso se usa satisfactoriamente para piezas de fundiciones ferrosas y no ferrosas, aunque este último tipo no presenta muchos problemas como las piezas de fundición ferrosas, debido a las bajas temperaturas de vaciado.

Los moldes permanentes producen piezas con buen acabado y buenos detalles en la superficie. Se adaptan especialmente a la producción de piezas pequeñas y de tamaño medio y son capaces de mantener tolerancias que van desde 0.064 a 0.25 mm. El alto costo inicial del equipo y el costo del mantenimiento de los moldes puede considerarse una desventaja de este proceso.

Para diseñar el molde permanente se deben tomar en cuenta factores tanto metalúrgicos como mecánicos. Los rechupes, por ejemplo, son una falla que puede prevalecer si ocurren cambios abruptos de sección en el molde, por ello, deben evitarse estos cambios en el diseño del mismo. Debe también prevalecer el escape de aire, de la cavidad del molde al vaciar el metal fundido (Figura 1.5.).

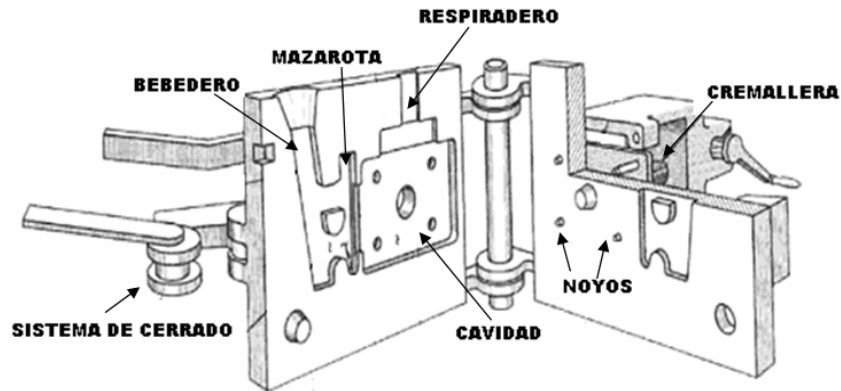


Figura 1.5. Molde Permanente

1.3 Características Básicas de un Molde

Para describir las características básicas del molde, nos apoyaremos en un molde de fundición en arena. Muchas de estas características y términos se aplican de igual modo a los modelos permanentes.

El molde consiste en dos mitades: la tapa y la draga, o semicaja superior, y la semicaja inferior. Ambas están contenidas en la caja del molde, que también se divide en dos partes: una para cada parte del modelo; las dos mitades del molde están separadas por un plano de separación.

El sistema de vaciado en un molde de fundición es el canal o red de canales por donde fluye el metal fundido hacia la cavidad desde el exterior del molde. El sistema de vaciado consiste típicamente de un bebedero de colada (también llamado simplemente bebedero) a través del cual entra el metal a un canal de alimentación que conduce a la cavidad principal. En la parte superior del bebedero existe frecuentemente una copa de vaciado para minimizar las salpicaduras y la turbulencia del metal que fluye en el bebedero.

En cualquier fundición cuya contracción sea significativa se requiere, además del sistema de vaciado, una mazarota conectada a la cavidad principal. La mazarota es una reserva en el molde que sirve como fuente de metal líquido para compensar la contracción de la fundición durante la solidificación.

A medida que el metal fluye dentro del molde, tanto el aire que ocupaba previamente la cavidad como los gases calientes formados por la reacción del metal fundido deben evacuarse para que el metal llene completamente el espacio vacío. En la fundición en arena, la porosidad natural del molde permite que el aire y los gases escapen a través de las paredes de la cavidad. En los moldes permanentes se taladran pequeños agujeros de ventilación dentro del molde o se maquinan en el plano de separación para permitir la salida del aire y los gases (Figura 1.6.).

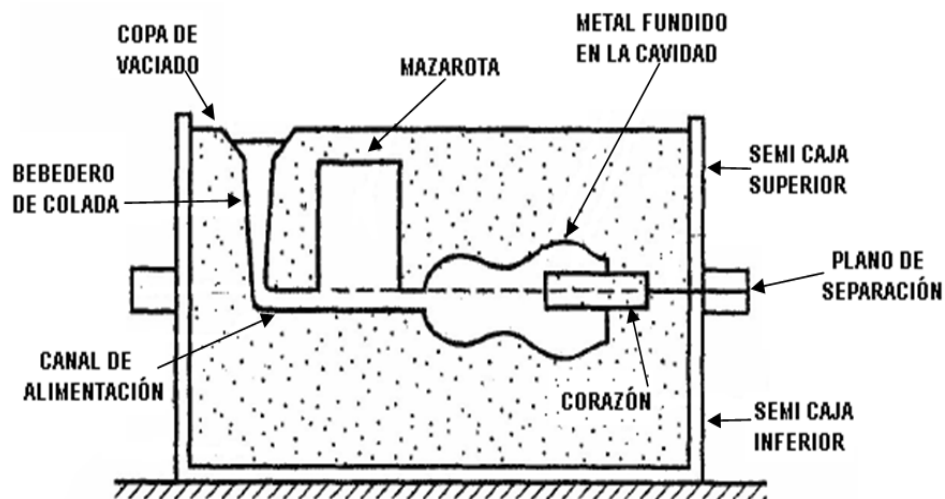


Figura 1.6. Partes de un molde en arena

Los moldes permanentes tienen de igual manera una cavidad, que es un negativo de la parte deseada, misma que se produce mediante maquinado, compresión o algún otro procedimiento. Para poder usar el molde, se debe tener una

junta (línea de separación) apropiada; dicha línea marca el plano donde se unen las dos mitades.

1.4 Factores Importantes en el Proceso de Fundición.

1.4.1 Velocidad de solidificación

La velocidad de solidificación consiste en la capacidad que tiene el molde para evacuar el calor. Bajas velocidades de enfriamiento producen la formación de granos grandes; a medida que la velocidad de enfriamiento va aumentando, los granos se hacen cada vez más pequeños. Si la velocidad es extremadamente elevada se pueden conseguir estructuras amorfas. A medida que el tamaño de grano se va reduciendo, la resistencia mecánica y la ductilidad aumentan, así como la reducción de microporosidades (microrechupes) y la tendencia de la aleación a agrietarse durante la solidificación.

1.4.2 Tiempo de solidificación

El proceso de solidificación comienza con la formación de una fina capa solidificada en la pared del molde y, a medida que transcurre el proceso, esta capa se va haciendo más gruesa. El tiempo total de solidificación es el periodo necesario para que la fundición solidifique después del vaciado. Este tiempo depende del tamaño y de la forma de la fundición, expresada por la relación empírica conocida como *Módulo de solidificación de Chvorinov* que establece que una fundición con una relación de volumen a área superficial se enfriará y solidificará más lentamente que otra con una relación más baja y se indica a continuación.

$$M_s = \frac{V}{A}$$

M_s = Módulo de solidificación

V = Volumen de la pieza

A = Área de transferencia de calor

De igual manera el Módulo de solidificación de Chvorinov nos ayuda a calcular el tiempo de solidificación de una pieza, mediante la expresión

$$M_s = k\sqrt{t_s}$$

M_s = Módulo de solidificación

k = Constante del molde

t_s = Tiempo de solidificación

El valor de la constante k 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. El valor de k para una operación dada se puede basar en datos experimentales de operaciones previas con el mismo material de molde, metal y temperatura de vaciado, incluso cuando la forma de la parte haya sido bastante diferente.

La regla de Chvorinov 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 cavidad. Es decir, el TS (Tiempo de solidificación) para la mazarota debe exceder el TS de la cavidad principal. Si se realiza un análisis de cuánto tarda en solidificar un mismo volumen

contenido en un cubo, un cilindro y una esfera, veremos que el área varía de la siguiente forma: Superficie esfera > Superficie cilindro > Superficie cubo, esto es, el cubo va seguido del cilindro, mientras que la esfera es la última en solidificarse.

1.4.3 Flujo del fluido y temperatura de vaciado

Durante el proceso de vaciado del metal fundido, éste discurre a través del bebedero, mazarotas o canal de alimentación. Un diseño y control adecuado de los conductos por donde fluye el metal fundido asegura un flujo correcto. Las condiciones que ha de cumplir el sistema de alimentación son las siguientes: evitar, en lo posible, enfriamientos prematuros, formación de bolsas de aire y turbulencias. La turbulencia de flujo se caracteriza por variaciones erráticas de la velocidad del fluido; cuando éste se agita, genera corrientes irregulares en lugar de fluir en forma laminar. El flujo turbulento debe evitarse durante el vaciado por varias razones, pues tiende a acelerar la formación de óxidos metálicos que pueden quedar atrapados durante la solidificación, degradando así la calidad de la fundición, además de provocar una erosión excesiva del molde, que es el desgaste gradual de las superficies del molde debido al impacto del flujo de metal fundido. La erosión es especialmente seria cuando ocurre en la cavidad principal porque afecta la forma de la pieza fundida.

El bebedero debe ser ahusado. El área de la sección transversal del canal debe reducirse conforme el metal se acelera durante su descenso en el bebedero de colada; de otra manera, puede aspirar aire dentro del líquido debido al incremento de la velocidad del metal que fluye hacia la base del bebedero y conducirlo a la cavidad del molde. El diseño de los canales de alimentación se basa en el Teorema de Bernoulli y la Ecuación de Continuidad.

- **El teorema de Bernoulli**, el cual establece que la suma de las energías (altura, presión dinámica, energía cinética y fricción) en dos puntos cualquiera de un líquido que fluye es igual. Esto se puede escribir en la siguiente forma:

$$h_1 + \frac{P_1}{g\rho} + \frac{v_1^2}{2g} + F_1 = h_2 + \frac{P_2}{g\rho} + \frac{v_2^2}{2g} + F_{1-2}$$

h= Altura [m]

P= Presión en el líquido (N/m²)

ρ = Densidad (kg/m³)

v= Velocidad de flujo (m/s)

g= constante de aceleración gravitatoria (9.8 m/s²)

F = pérdidas de carga debidas a la fricción

La ecuación de Bernoulli se puede simplificar de varias maneras. Despreciando las pérdidas por fricción y asumiendo que el sistema permanece a presión atmosférica en toda su extensión, entonces queda:

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g_1} = h_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

La cual puede usarse para determinar la velocidad del metal fundido en la base del bebedero de colada. Definiendo un punto (1) en la parte superior del bebedero y un punto (2) en la base (Figura 1.7). Si el punto (2) se usa como referencia, entonces la altura en ese punto es cero ($h_2=0$) y h_1 es la altura del bebedero.

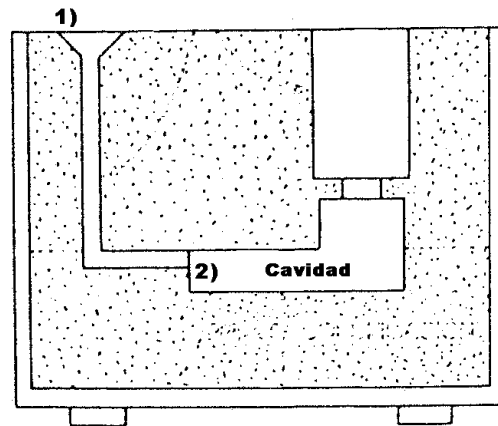


Figura 1.7. Molde de arena indicando punto (1) Y (2)

Cuando se vierte el metal en la copa de vaciado y fluye hacia abajo, su velocidad inicial en la parte superior es cero ($v_1= 0$). Entonces la ecuación anterior se simplifica

$$h_1 = \frac{v_2^2}{2g}$$

que se puede resolver para la velocidad de flujo:

$$v = \sqrt{2gh}$$

v = velocidad del metal líquido en la base del bebedero de colada (m/s)

$g = 9.81$ (m/s²)

h = altura del bebedero (m)

Para poder producir configuraciones complejas, el metal fundido se debe mantener entre 100° y 500° por arriba de su temperatura de fusión. El calor adicional arriba del necesario del punto de fusión se llama sobrecalentamiento, este es necesario para que el material tenga fluidez, ya que si la colada se efectúa a una temperatura demasiado baja, el metal puede empezar a solidificarse antes de que se llene el molde, causando malformaciones y otros defectos; por el contrario si ésta se lleva a cabo a una temperatura demasiado alta, el metal puede reaccionar con el material del molde, causando inclusiones gaseosas en la fundición. La sobrecarga térmica también puede causar deterioro del molde, por lo tanto la temperatura de colada o sangrado debe elegirse de tal manera que se eviten estos problemas.

Para poder obtener piezas fundidas sin defectos se depende de muchos factores. Uno de los más importantes es la manera de verter el metal en la cavidad del molde. Este proceso se puede caracterizar mediante la presión de colada o llenado y el sistema de conductos.

La presión de colada se puede clasificar como: alta (2-15 Mpa), baja (0.12-0.30 Mpa) o de gravedad. Las altas presiones permiten obtener secciones delgadas, de mayor calidad, pero al mismo tiempo requieren alta resistencia en el material del molde. Las presiones de colada altas o bajas normalmente requieren moldes metálicos permanentes, aunque se pueden usar otros materiales, tales como grafito, con las presiones más bajas.

1.4.4 Contracción

La contracción ocurre esencialmente en tres etapas y es uno de los problemas más importantes en el proceso de fundición, la cantidad de contracción varía según el material que se funde, aunque también está influenciado por el procedimiento y

técnicas de fundición, las tres etapas de contracción que ocurren conforme disminuye la temperatura, desde que el material se encuentra en estado líquido hasta la temperatura ambiente, son:

- 1) contracción líquida durante el enfriamiento anterior a la solidificación;
- 2) contracción durante el cambio de fase de líquido a sólido, llamada contracción de solidificación; y,
- 3) contracción térmica de la fundición solidificada durante el enfriamiento hasta la temperatura ambiente.

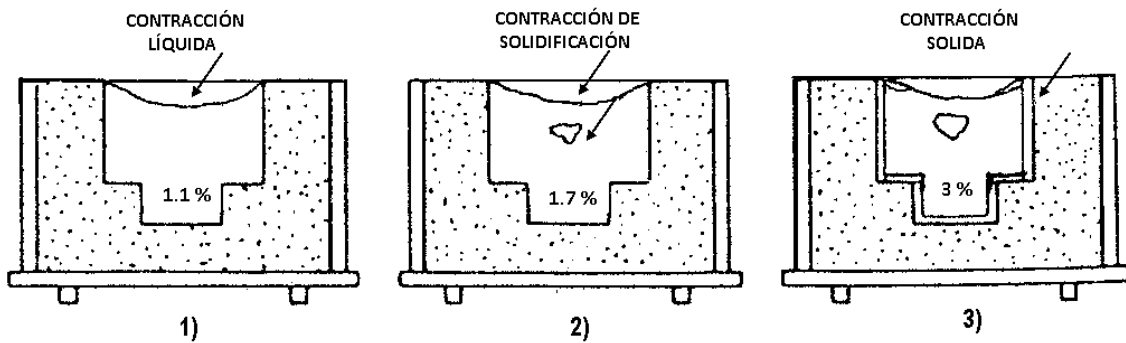


Figura 1.8. Etapas de la contracción. Los porcentajes mostrados son aproximados para el hierro fundido

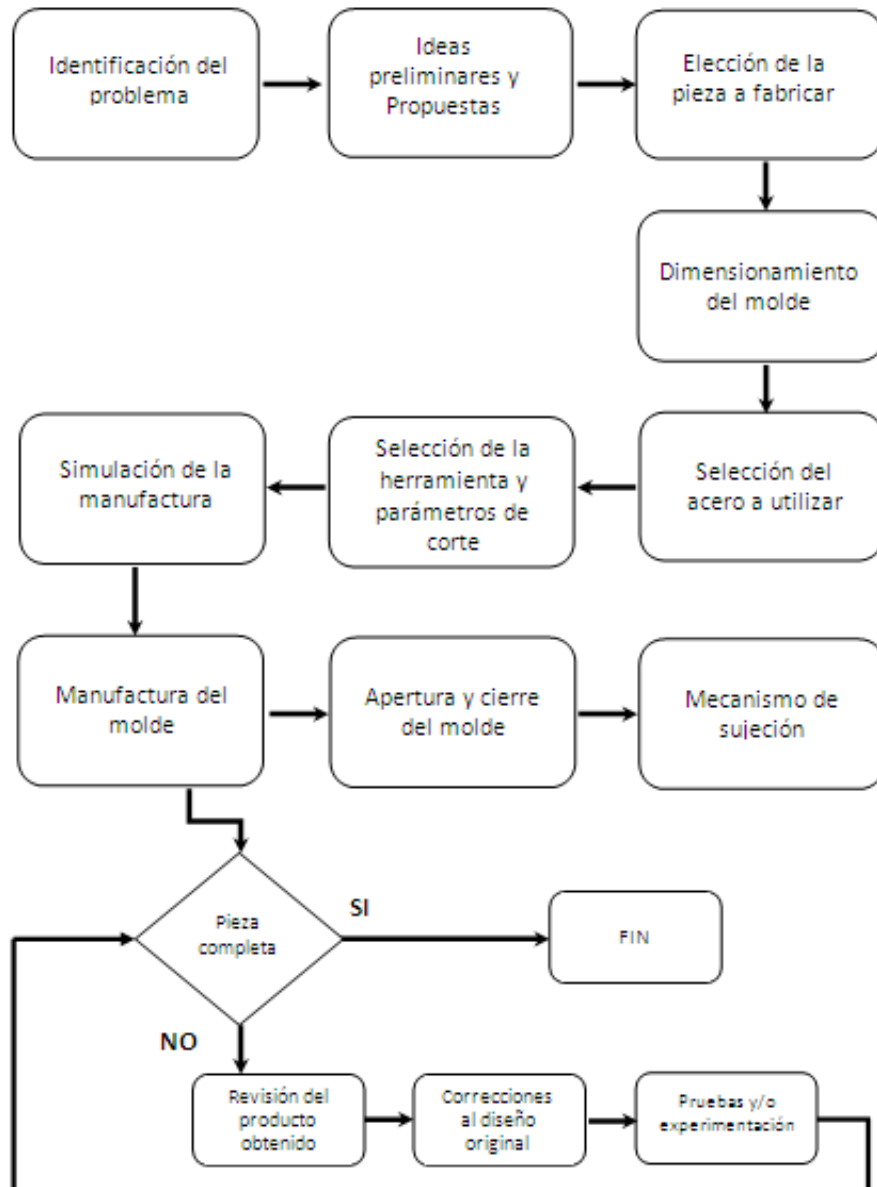
En la figura (1.8.1) se muestra la contracción del metal líquido durante el enfriamiento, desde la temperatura de vaciado hasta la temperatura de solidificación. La contracción de solidificación (figura 1.8.2), ocurre durante la transformación de líquido a sólido, donde el material se contrae conforme cambia de estado, la contracción en esta etapa puede reponerse en parte, debido a que el metal no está todavía solidificado, si se mantiene abierta una trayectoria adecuada, el metal líquido puede fluir de las zonas calientes para reponer la mayor parte de la contracción. La contracción en estado sólido (figura 1.8.3) esta etapa ocurre después de que tuvo

lugar la solidificación y es la causa principal del cambio dimensional a un tamaño diferente de la cavidad del molde, el cual debe compensarse si se hace un modelo más grande.

2 CAPÍTULO 2: DISEÑO Y MANUFACTURA DEL MOLDE

2.1 Diseño del molde

Después de consultar diversos libros y publicaciones referentes a fundición, se observó que no existía un proceso bien definido que estableciera que pasos se debían seguir para la generación de un molde permanente, por lo que se concluyó que el siguiente, era el más adecuado



2.1.1 Identificación del problema

Se requería un molde permanente que pudiera ser utilizado para la implementación de una práctica de laboratorio y se pretende que más de un alumno pueda llevarse un ejemplar de la figura fabricada, por lo tanto, sus dimensiones no tendrían que ser muy grandes, pues esto implicaría utilizar una cantidad de material considerable, por esto, el primer factor a considerar fue generar un molde cuyas dimensiones no excedieran los 10 cm de largo por 10 de ancho.

Se buscó también una figura que resultara atractiva para el alumno, que al observarla recordara la metodología a seguir para su fabricación y no olvidara los aspectos importantes en el proceso de fundición. Las posibilidades a simple vista podrían resultar muchas, sin embargo existen geometrías que se deben evitar para lograr una pieza de óptima calidad.

2.1.2 Recomendaciones para el diseño de un molde

Uno de los aspectos más importantes que se deben tomar en cuenta para el diseño de una cavidad es evitar en ésta las aristas con ángulos agudos y biseles, pues son fuente de generación de puntos calientes produciendo rechupes y tensiones que provocan grietas. Los puntos calientes usualmente se localizan en las áreas de mayores dimensiones seccionales. Si realizamos un análisis de los ángulos que pueden existir en el molde, considerando una misma superficie de enfriamiento, podremos ver las siguientes posibilidades (Figura 2.1).

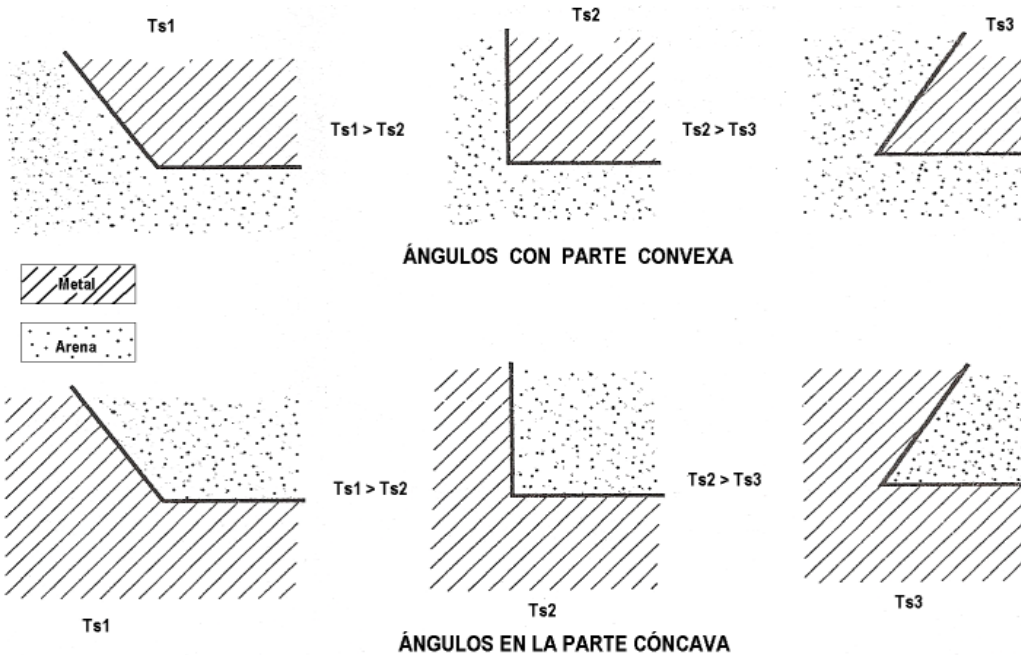


Figura 2.1 Tipos de ángulos dentro de un molde

Ángulos en la parte convexa: A menor ángulo, mayor velocidad de enfriamiento, porque, a medida que disminuye el ángulo, el volumen de metal que está en contacto con la superficie disminuye.

Ángulos en la parte cóncava: A menor ángulo, menor velocidad de enfriamiento, porque a medida que disminuye el ángulo, aumenta el volumen del metal que está en contacto con la superficie de enfriamiento. Estos son los ángulos que hay que evitar, porque, al tener una velocidad de solidificación lenta, se favorece la aparición de rechupes en esos puntos calientes. Esto se puede evitar sustituyendo los ángulos por redondeamiento o por uniones progresivas mejorando el proceso de llenado y reduciendo la posibilidad de aparición de turbulencias.

- Espesor de las secciones

Para que no se generen puntos calientes hay que procurar que la relación entre el volumen del metal de colada respecto a la superficie de enfriamiento ha de ser la mínima posible. Para facilitar el análisis de donde se van a generar puntos calientes, se recurre a la regla de los círculos inscritos en la pieza. Diseñada la pieza se procede a inscribir círculos, a lo largo de toda la pieza (Figura 2.2).

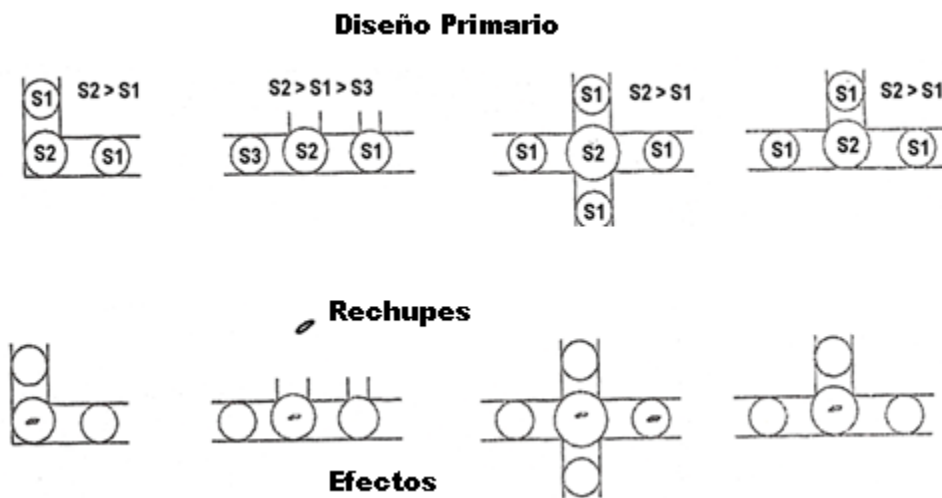


Figura 2.2. Regla de los círculos inscritos

Cuanto más grandes sean los círculos, la relación entre el volumen y la superficie de enfriamiento es mayor, de manera que hay más posibilidad de que en el interior del círculo se genere un rechupe. Como regla general, los cambios de sección deben reducirse al mínimo, cuando no es posible conseguir una uniformidad en la sección hay que procurar que el cambio de sección sea progresivo (Figura 2.3); esto

hace que el rechupe quede en la parte superior, ya que este diseño hace la función de mazarota.

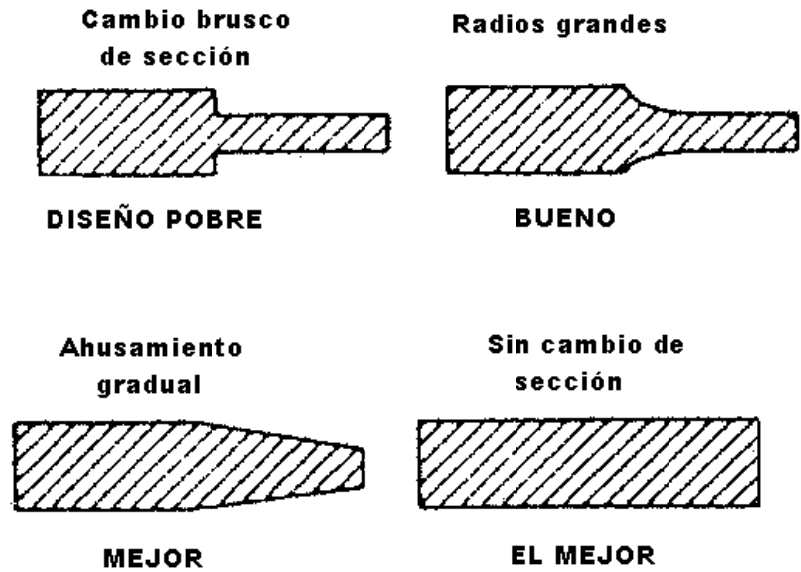


Figura 2.3. Cambios de sección en el diseño de fundiciones

En la medida de lo posible se tienen que evitar las superficies planas pues estas tienden a deformarse durante el enfriamiento, debido a los gradientes de temperatura. Cuando no se tiene opción, se recurre a la utilización de costillas para que la superficie no se deforme (Figura 2.4).

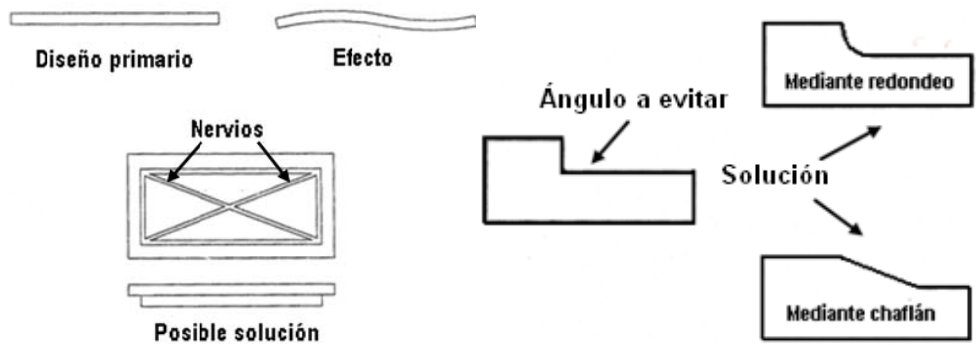


Figura 2.4. Geometrías a evitar

2.1.3 Ideas preliminares y propuestas

Después de analizar la información arriba descrita, sabemos que si bien es posible generar una gran cantidad de figuras por medio del proceso de fundición, existen ciertas geometrías que debemos evitar para la obtención de piezas completas, por lo tanto se buscaron figuras que no tuvieran demasiados ángulos agudos, ni biseles, con el fin de evitar la generación de puntos calientes, ya que estos a su vez nos producirán rechupes y por ende defectos estéticos, de igual forma se buscaron figuras simétricas pues así la pieza se podría desprender del molde con facilidad y por último que no se tuviera que implementar algún macho o corazón pues dificultaría en gran medida el diseño del molde y el uso de este en las prácticas de laboratorio.

Algunas geometrías propuestas fueron: un delfín, un pato, una foca y un pingüino. (Figura 2.5.

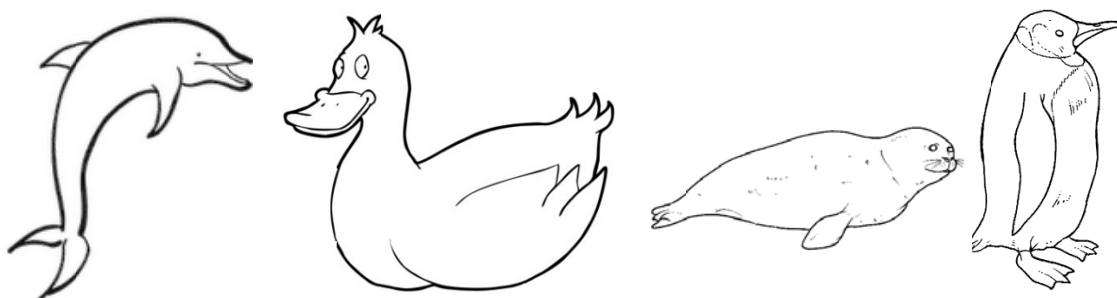
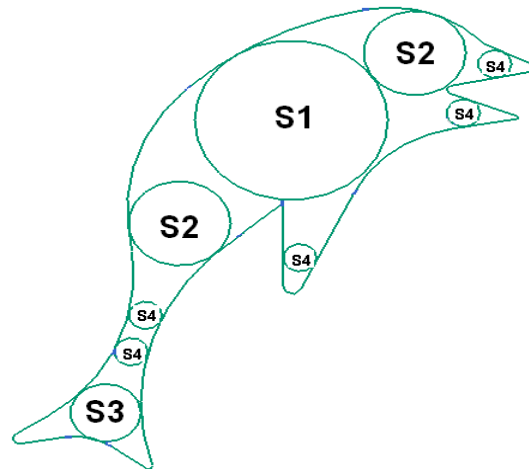


Figura 2.5. Geometrías propuestas

Se procedió a analizar cada una de las figuras arriba descritas utilizando en primera instancia la regla de los círculos inscritos, ya que dicha relación permitirá conocer los puntos donde se podrían presentar rechupes, situación que se deben evitar, pues ocasionaría una pieza incompleta.

El delfín (Figura 2.6), fue la primer figura analizada, aquí el área más grande se encuentra en la parte central, por ende en este lugar se presentaría un rechupe

que tendría que ser contrarrestado con una mazarota, al tener que localizar la mazarota en una zona visible sería necesario un proceso extra de manufactura al termino de la fundición, pues al removerla, esta dejaría un defecto estético que habría que minimizar para lograr una pieza de optima calidad. Se analizó de igual manera la boca, cola y aleta observando que en estas áreas se forman ángulos agudos en la parte convexa que provocarían una velocidad de solidificación alta en estas secciones, lo que a su vez generaría un llenado deficiente.



$$S1 > S2 > S3 > S4$$

Figura 2.6. Geometría del delfín

La segunda geometría analizada fue el pato (Figura 2.7), aquí la circunferencia más grande se localiza en la parte central del cuerpo, lugar donde de igual forma se tendría que situar un mazarota para contrarrestar el rechupe que ahí se generara, esta figura tiene la ventaja que al momento de remover la mazarota el defecto estético que esta dejaría sería poco visible, toda vez que el pato estaría diseñado para permanecer siempre en posición horizontal. Derivado del análisis al

pico y cola se observa que en estos también se forman ángulos menores a 90° en la parte convexa, lo que también generaría una velocidad de solidificación alta en estas dos secciones, sin embargo esta figura contiene menor número de ángulos agudos en comparación con el delfín arriba descrito. Se observa que las áreas que conforman el pato no se reducen abruptamente, situación que resulta favorable al momento del llenado de la cavidad, ya que disminuirían las turbulencias.

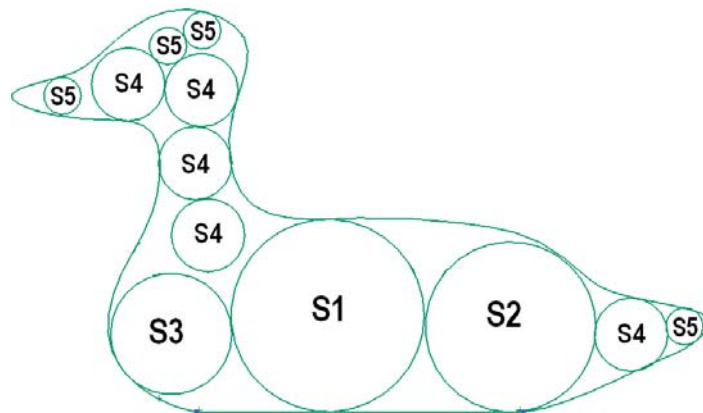
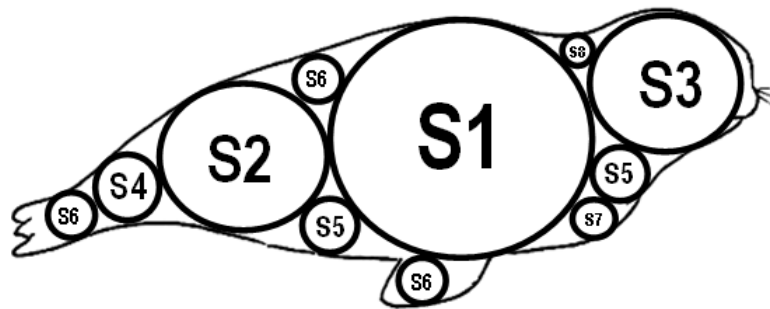


Figura 2.7. Geometría del pato

$$S1 > S2 > S3 > S4 > S5$$

La siguiente figura en analizar fue la foca (Figura 2.8), aquí se observa que el área más grande es la parte del torax, lugar donde se tendría un punto caliente, al igual que en los casos anteriores en esta zona debe situarse una mazarota, la foca se diseñaría para permanecer de forma horizontal, lo que también resulta una ventaja, ya que los vestigios de la mazarota se podrían ocultar, otra ventaja que tiene esta figura es que no presenta demasiados cambios de secciones abruptas, lo que

ayudaría a tener un flujo poco turbulento, y por tanto el llenado se realizaría de forma idónea. Las zonas que habría que considerar serían la cola y la aleta ya que aquí se tiene un ángulo agudo en la parte convexa, lo que generaría una mayor velocidad de enfriamiento en estas zonas en comparación con el resto de la figura, sin embargo el inconveniente de fabricar esta geometría se presentaría al momento de abrir el molde e intentar extraer la pieza, porque debido a la forma y ubicación que presentan las aletas y los bigotes, resultaría muy complicada la obtención completa de estas dos partes.

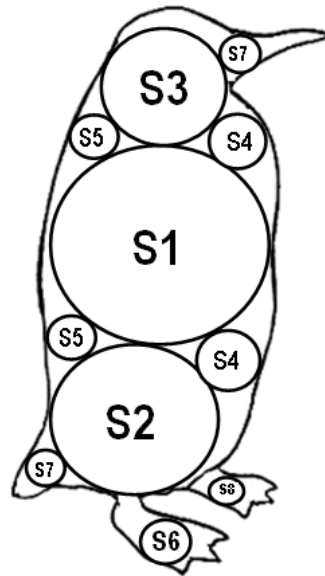


$$S1 > S2 > S3 > S4 > S5 > S6 > S7 > S8$$

Figura 2.8. Geometría de la foca

La última figura en analizar fue el pingüino (Figura 2.9), aquí se observa que toda la parte del cuerpo es una sección bastante regular lo que favorece de igual forma al momento del vaciado, ya que se lograría un óptimo llenado de la cavidad, el único problema se presentaría en la zona del pico, ya que al tener un ángulo agudo menor a 20°, se ocasionaría una solidificación más rápida en esta zona, lo que nos provocaría una pieza incompleta, se podría corregir dicho problema redondeando el pico, sin embargo se alteraría la forma básica del pingüino. Otro punto donde se podría complicar el llenado del material sería en la zona de las patas, ya que por la geometría de la figura, estas deben ser planas y conforme la pieza se estuviera

solidificando, habría un ondulamiento en la sección, lo que nos provocaría que el pingüino no se mantuviera de pie.



$$S1 > S2 > S3 > S4 > S5 > S6 > S7 > S8$$

Figura 2.9. Geometría del Pingüino

Después de analizar las diferentes propuestas se concluye que para la fabricación del pingüino y la foca el proceso de vaciado por gravedad no resulta ser el más conveniente pues presentan partes de difícil llenado como son el pico en el caso del pingüino y la cola y aleta para la foca, para obtener este tipo de geometrías resulta más adecuado generarlas mediante un proceso inyección.

2.1.4 Elección de la pieza a fabricar

Del análisis anterior, se determina que de las cuatro figuras propuestas sólo el pato y el delfín son viables y que de estas dos el pato es la más conveniente de fabricar

(Figura 2.10), ya que el punto donde se presentara el rechupe, resulta ser conveniente en comparación con el delfín, toda vez que al desprender la mazarota que contrarrestara la contracción, los vestigios que esta dejara en el pato serán menos visibles.

Se conoce el lugar donde se tendrá que situar la mazarota pero se requiere ubicar el área más apropiada para vaciar el material, por lo que se dibujó el pato en el software Unigraphics, para después importarlo al Mold Flow, un software utilizado en inyección de plásticos donde podemos predecir los puntos más apropiados de inyección, si bien este último es utilizado en plásticos, ayudó a conocer las zonas más adecuadas para el vaciado del material.



Figura 2.10. Pato dibujado en Unigraphics.

Después de ingresarlo al Mold Flow, las zonas idóneas para inyectar fueron las siguientes (Figuras 2.11, 2.12 y 2.13).

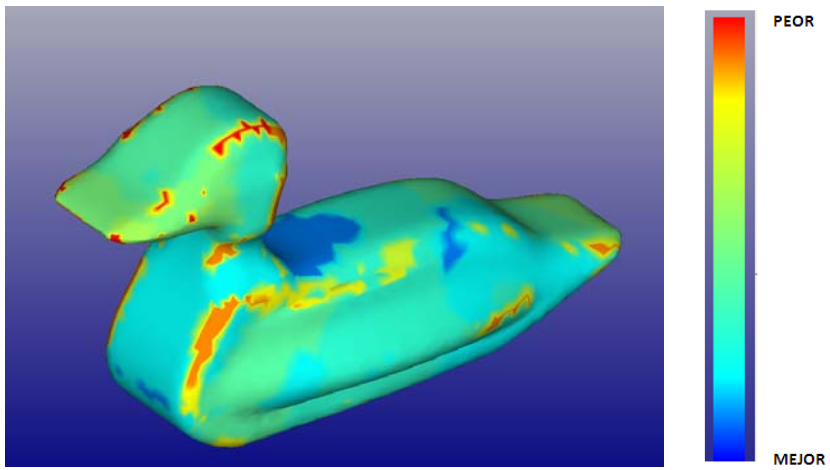


Figura 2.11. Resultados obtenidos en el Mold Flow, vista lateral

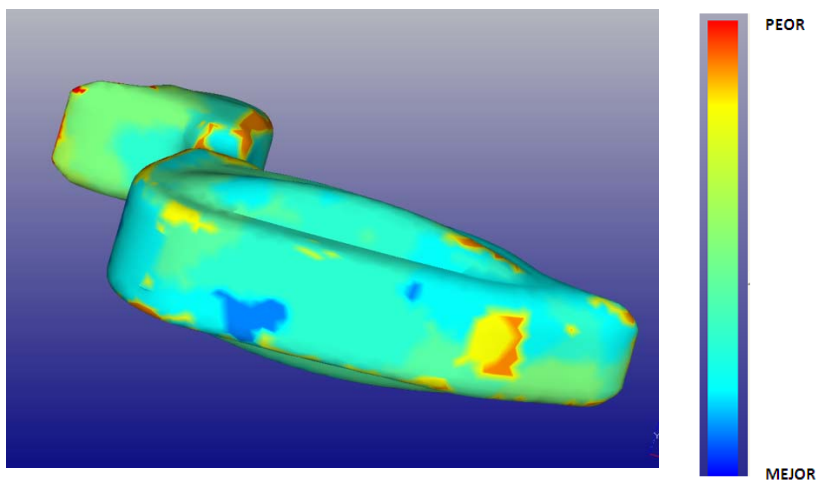


Figura 2.12. Resultados obtenidos en el Mold Flow, vista inferior

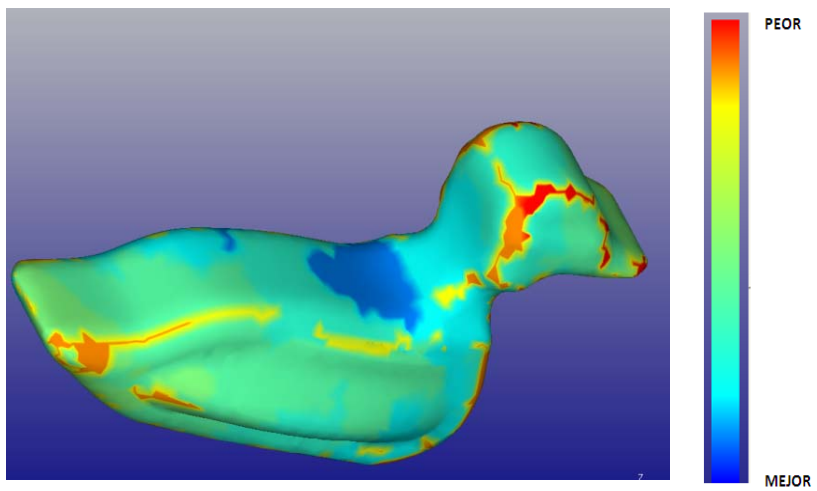


Figura 2.13. Resultados obtenidos en el Mold Flow, vista posterior

En las imágenes anteriores se puede observar que las mejores zonas para inyectar el material se encuentran localizadas en la parte superior e inferior del cuerpo del pato, la parte inferior resulta más conveniente para posicionar el bebedero pues ahí mismo se situará la mazarota y al eliminarlo en la etapa final las marcas que éste dejaría serían menos apreciables a la vista.

2.1.5 Dimensionamiento del molde

La pieza a fabricar tendrá un volumen de 15 cm^3 y un área superficial de 29.75 cm^2 , estos datos se obtuvieron del análisis realizado en Mold Flow, de este mismo corroboramos que la mazarota y bebedero se deben situar en la parte posterior del cuerpo del pato, por lo que este último tendrá ambas funciones.

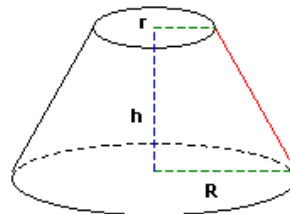
Con base en la tabla 2.1 se observa que el aluminio tiene una contracción por solidificación de aproximadamente el 7 %, como primer propuesta del volumen que debería tener la mazarota, calculamos el porcentaje de contracción por solidificación para el volumen total de nuestra pieza y tenemos que la cantidad de material a contraerse es de 1.05 cm^3 . Por lo que necesitaríamos una mazarota cuyo volumen contrarreste dicha cantidad.

Metal	Contracción volumétrica debida a:	
	Contracción por solidificación %	Contracción térmica del solido %
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	3.0
Fundición del acero al bajo carbono	3.0	7.2

Cobre	4.5	7.5
Bronce (CuSn)	5.5	6.0

Tabla 2.1 Contracción volumétrica para diferentes metales de fundición debida a la contracción por solidificación

Después de concluir que tanto la mazarota como el bebedero deberán estar situados en el mismo punto, se decide que la geometría de ambos sea un cono invertido trunco, ya que al reducirse gradualmente la sección se tiene un aumento en la velocidad del metal fundido, generándose así, un rápido llenado del molde, situación favorable en el proceso, ya que se evita que el material solidifique antes de llenar la cavidad, dicha geometría también ayuda a reducir la aspiración de aire; si se consideran las siguientes dimensiones $r= 3 \text{ mm}$, $R= 7.5 \text{ mm}$ y $h= 15 \text{ mm}$, se obtiene el volumen necesario para contrarrestar la contracción, de 1.05 cm^3 .



Las dimensiones anteriores resultan ser las mínimas requeridas para diseñar la mazarota del molde; sin embargo, resultaría un tanto arriesgado maquinarlo con estas dimensiones, pues si la pieza tuviera una contracción más grande a la esperada no habría manera de tener mayor material de reserva en ese punto. Con base en la expresión del Modulo de Chvorinov que establece que la relación de volumen entre área deberá ser mayor en la mazarota comparada con la cavidad principal se procedió a buscar las dimensiones necesarias de la mazarota que satisficieran dicha relación, estas fueron las siguientes:

$r = 4.5 \text{ mm}$

$R = 15 \text{ mm}$

$h = 46.67 \text{ mm}$

Si sustituimos estos valores se tiene un volumen de

$$V = 15.284 \text{ cm}^3$$

Con esto observamos que el volumen de la mazarota sería mucho mayor al que se requiere para contrarrestar la contracción; sin embargo, para poder afirmar que esta solidificaría después que la cavidad principal se procedió a calcular el mencionado Módulo. Se analizó el cono truncado y la cavidad de forma separada.

En el caso del cono tenemos un área de enfriamiento de 16.168 cm^2 y un volumen de 15.284 cm^3 .

$$M_s = \frac{16.168 \text{ cm}^3}{14.70 \text{ cm}^2} = 0.945 \text{ cm}$$

La cavidad tiene un volumen de 15 cm^3 y un área de enfriamiento de 29.75 cm^2

$$M_s = \frac{15 \text{ cm}^3}{29.75 \text{ cm}^2} = 0.504 \text{ cm}$$

Al observar los resultados obtenidos, se concluye que la mazarota solidificaría después que la cavidad principal, por ende ésta proveerá sin problemas el material necesario para contrarrestar la contracción.

A continuación se muestran las dimensiones finales, (Figuras 2.14 y 2.15)

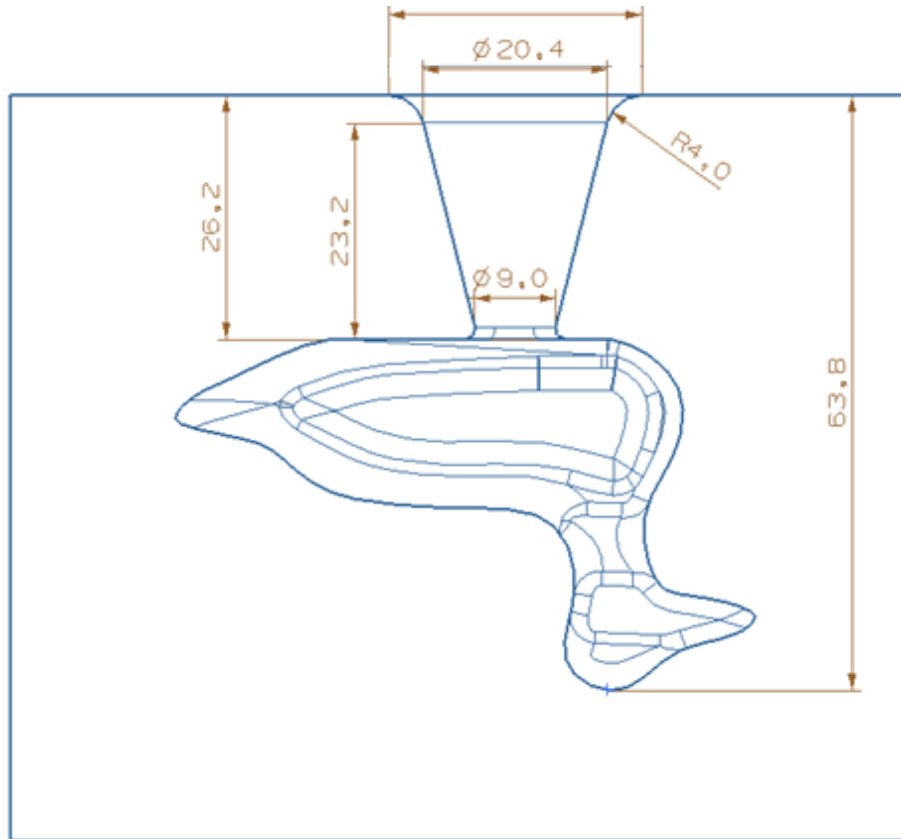


Figura 2.14. Dimensiones del molde

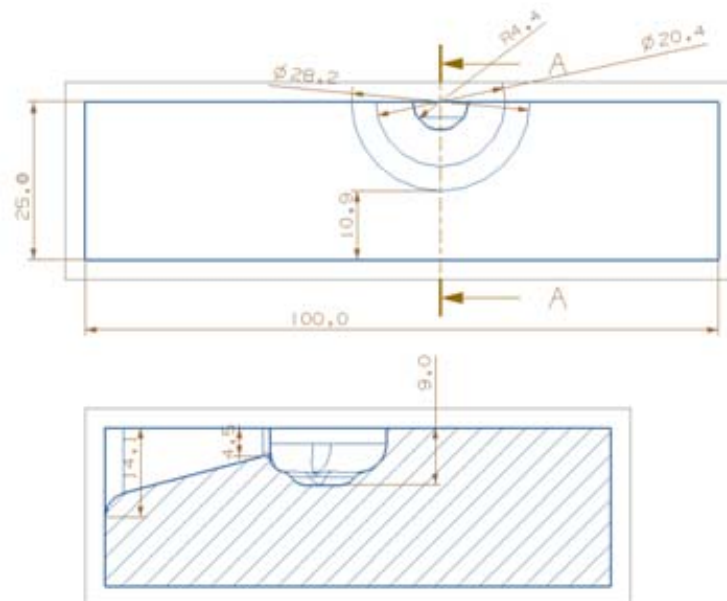


Figura 2.15. Dimensiones del molde

2.2 Manufactura del Molde

2.2.1 Selección de aceros para moldes permanentes

La selección del acero resulta ser un punto de suma importancia en la manufactura de moldes permanentes, para tener una idea general del tipo de material empleado en este proceso, se buscó información donde se indicara los diferentes tipos de aceros existentes y las aplicaciones de estos. (Tabla 2.2.).

Composición (%)									Aplicaciones	Tratamiento térmico sugerido
C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	V	W	C o		
0.45	0.6	-	-	-	-	-	-	-	Aleaciones de estaño y plomo o vaciados pequeños de aleaciones a base de cinc.	Generalmente no es necesario
0.3	0.7	0.5	-	0.8	0.2 5	-	-	-	Acero de aplicación general para aleaciones a base de cinc.	Frecuentemente se surte tratado térmicamente y puede maquinarse en ese estado) Calentado a 860° y templado en aceite. Revenido entre 420° y 650°, según la dureza requerida
0.4	0.7	0.15	-	2.0	-	0. 2	-	-	Producciones grandes de aleaciones a base de cinc. Vaciados pequeños en aleaciones a base de aluminio (5000 – 8000 piezas)	Calentado a 850° C y templado en aceite. Revenir entre 420° y 480° C, según la dureza requerida.
0.5	0.5	0.25	0.2	0.7 5	0.7 5	-	-	-	Aleación de aplicación general para vaciados de aleaciones ligeras.	Calentar lentamente a 750° C en atmósfera no descarburante. Elevar luego la temperatura a 850° C y templar en aceite o en aire. Revenir a 600° C por varias horas dependiendo de molde
0.4	-	1.0	-	5.0	1.3	1. 1	-	-	Producción en gran escala de aleaciones a base de aluminio	(Acero de endurecimiento al aire, que puede ser nitrurado). Calentar lentamente a 750°, empacado en material no descarburante. Elevar a 1000° C, reposar y enfriar en aire. Revenir durante varias horas a 550° C, enfriar y repetir el proceso de

											revenido
0.3 5	0.4 5	0.35	-	1.3	0.4	-	4. 5	5. 0	Aleaciones a base de cobre y servicio rudo con aleaciones de aluminio.	Endurecer al aire, según instrucciones del fabricante	
0.35	-	-	-	5.0	1.5	-	1. 5	1. 5	Aleaciones a base de cobre	Endurecer superficialmente a 925° C por 8 horas; enfriar en aire. Revenir a 570 ° C	

Tabla 2.2 Composición de los diferentes tipos de aceros

Con base a la tabla anterior se observa que para la fabricación de un molde permanente cuyo objetivo sea producir piezas en serie, se tendría que utilizar un acero que contenga: 0.4% C, 1.0% Si, 5.0 % Cr, 1.3% Mo y 1.1 V, marcado en negritas, sin embargo esto sería teóricamente, comercialmente, existen aceros con casi los mismos porcentajes.

Existen empresas como ADDEHOLM que cuentan con catálogos de los metales que fabrican. Para aceros de trabajo en caliente, manejan los siguientes aceros (Tabla 2.3).

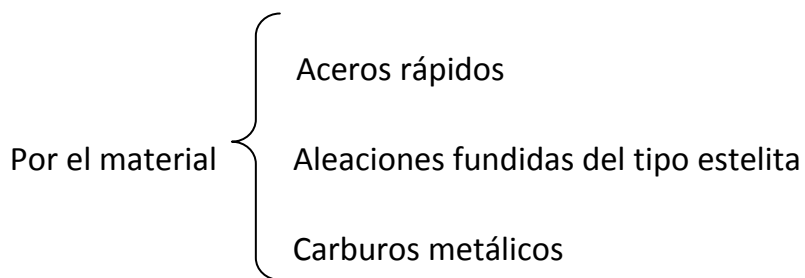
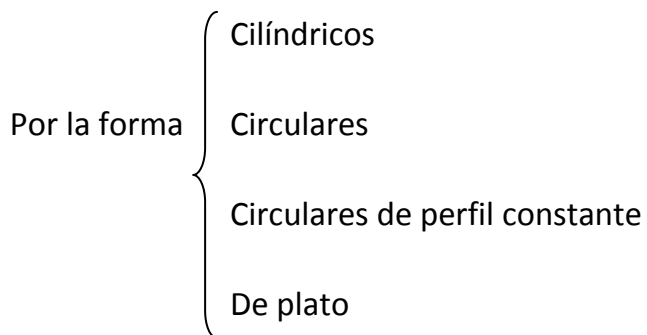
Calidades	Norma		Composición química						
	AISI	DIN	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W
Orvar Supreme	H13+	1,2344	0.39	1.0	0.40	5.30	1.40	0.90	-
Hotvar	Exclusivo		0.55	1.0	0.75	2.60	2.25	0.85	-
Dievar	Exclusivo		-	-	-	-	-	-	-

En los catálogos se mencionan las generalidades y principales aplicaciones, con base en esa información se tiene que el que más se apegaría a las necesidades del presente proyecto es el Orvar Supreme, toda vez que la composición de este es la que más se asemeja a la que teóricamente necesitamos, éste es un acero de alta calidad con buena resistencia a los choques térmicos y a la fatiga térmica. Buena resistencia mecánica y tenacidad a altas temperaturas, ideal para Estampado en caliente de Aluminio, Magnesio y Aleaciones de Cobre. Sus aplicaciones son: moldes y piezas de colada en caliente, matrices de extrusión, moldes de inyección de metales y plástico, troquelado frío hasta 30 mm. Éste se vende por kilo y su precio es de: 31.45 dólares/kilo, esto convertido a pesos mexicanos y con un valor de 12 pesos por dólar, tendríamos a \$377.40 kilo con IVA.

Al observar el costo del Orvar Supreme y considerando que el molde en cuestión será utilizado solo como material didáctico en una práctica de laboratorio, se decidió maquinar el molde en un acero de bajo contenido de carbono 1020, toda vez el costo de este no sobre pasa los \$15.00 por kilo y se encuentra disponible en una amplia gama de secciones, además esta aleación es fácilmente conformada y mecanizada. En este acero no se podrán realizar las 6000 coladas que nos indica el fabricante del Orvar Supreme y no se tendrá la misma resistencia a los choques térmicos o a la fatiga térmica, sin embargo servirá para poder realizar aproximadamente 500 vaciados sin que sufra daños significativos. Si se considera que se realizarán dos vaciados por grupo y que la Facultad tiene alrededor de 10 grupos por semestre, nos arroja un total de 40 vaciados por año, con lo que se tendría una vida útil de 12 años y medio, que resulta ser un periodo bastante aceptable en cuanto a funcionalidad del molde.

2.2.2 Selección de la herramienta y parámetros de corte

No existe alguna clasificación específica, sobre los tipos de cortadores existentes, sin embargo, una muy general sería a partir del material del cual están hechos o por la forma que estos presentan.



Como se trabajó en acero con bajo contenido de carbono era necesario utilizar cortadores de carburo de tungsteno estos son ideales para el caso de materiales especialmente duros, ya que estos son tres veces más rígidos que el acero, con un módulo de Young de aproximadamente 550 GPa.

El catálogo de herramientas de León Weill⁽¹⁾, anexa en sus últimas páginas una serie de tablas de consulta, en éstas se muestra una Guía de Selección de Cortadores de Carburo y nos indica cómo elegir la forma y el número de filos o gavilanes que

deberá tener nuestro cortador, dependiendo de la geometría a realizar. Dichas aplicaciones se muestran en la tabla 2.4

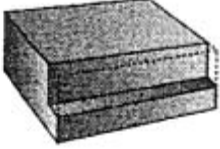
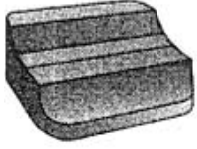
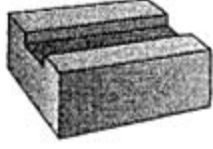
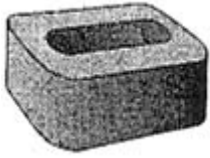
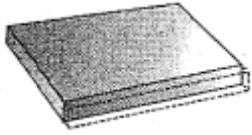
<p>Para Perfilado y Cortes para acabado se recomienda usar cortador recto con 4 filos</p>	
<p>Para acabado de contornos, se recomienda usar cortador de 3 ó 4 filos punta radial</p>	
<p>Para ranurado, usar cortador de 3 filos para evitar vibración, usar de 2 filos para obtener un máximo desalojamiento de rebaba</p>	
<p>En contorneo para hundimiento y ranurado, use de 2 filos con punta esférica para obtener un máximo desalojamiento de rebaba. Use de 3 filos punta esférica para un mejor acabado de la superficie</p>	
<p>Para perfilado de materiales delgados use cortador de 2 o 4 filos rectos</p>	

Tabla 2.4 Selección de cortadores de carburo, según la geometría a realizar

La preparación de las placas fue el primer paso para realizar la manufactura del molde. Estas necesariamente debían estar escuadradas y careadas, para esto se utilizó una fresadora frontal y en base al catálogo como herramienta de corte se implemento un cortador plano o recto de 4 filos o gavilanes.

(1) Catálogo León Weill, 2da edición, México. Páginas 745 y 746

Para la cavidad se observó que era necesario de igual manera un cortador plano de 4 gavilanes cuyo fin sería desbastar la mayor cantidad de material y acercarnos a la cavidad diseñada. Se requería por lo menos uno de bola o esférico de 4 filos que nos proporcionara los contornos requeridos, sin embargo al tener una geometría irregular, se observó que no era posible utilizar un solo cortador de bola, ya que si el diámetro de este fuera grande, no podría penetrar en todas las áreas de la cavidad, por el contrario, si se elegía uno de diámetro pequeño dicho problema se eliminaría, pero el tiempo de maquinado se elevaría mucho debido al poco arranque de viruta que este proporciona, por lo que se utilizaron dos cortadores de bola.

Para conocer los diámetros de todos los cortadores a utilizar en la cavidad, se trazaron circunferencias en las zonas de la cola y pico, pues éstas son las áreas más pequeñas de la figura y en la zona del cuello y cabeza. Se observó que la parte más crítica se tenía en la cola y pico del pato, donde encontramos diámetros de 2.7 mm, en el cuello se tiene un diámetro de 8.8 mm, por lo que no podíamos usar un cortador cuyo diámetro superara al que se tiene en la parte del cuello y el más pequeño a utilizar tendría que ser uno que asemejara los diámetros encontrados en pico y cola (Figura 2.16).

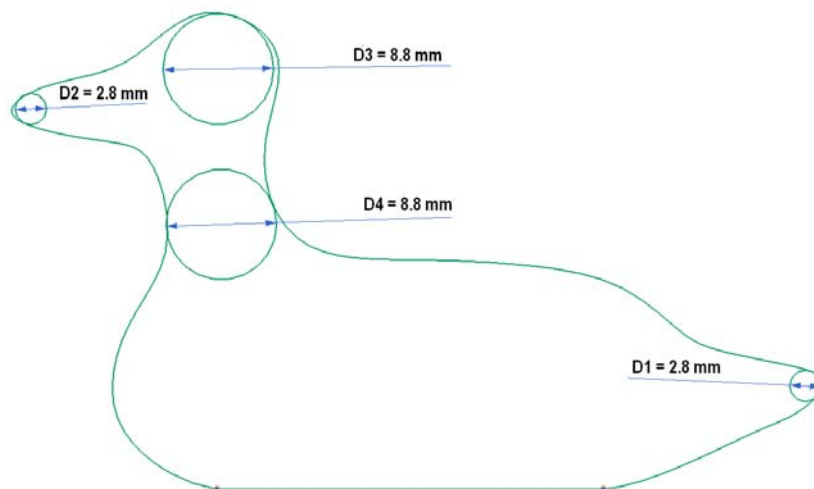


Figura 2.16 Trazo de circunferencias en la figura a fabricar

Se consultó el Catálogo de PH Horn, un fabricante de cortadores, para conocer los diámetros comercializados en México y las especificaciones de estos, con base en lo aquí revisado se decidió utilizar un primer cortador de 5/16" (7.9375 mm) plano, con cuatro filos o gavilanes marcado en el catálogo como serie DSTG. El segundo y tercer cortador fueron de bola o esféricos con un diámetro de 3/16" (4.7625 mm) y de 1/8" (3.175 mm) respectivamente, de cuatro filos o gavilanes, marcado como Serie DSKL, para el careado de las placas utilizamos uno de 3/4" serie DGST. Para determinar los parámetros de corte se consultó la tabla de uso general de cada cortador que se encuentran en el citado catálogo.

Por lo que los parámetros de corte fueron los siguientes

Cortador de 3/4" (19.05 mm)

Profundidad de corte: 0.8 mm

Velocidad de avance: 70 mmpm

Velocidad del husillo: 1000 rpm

Cortador de 5/16" (7.9375 mm)

Profundidad de corte: 0.5 mm

Velocidad de avance: 50 mmpm

Velocidad del husillo: 1000 rpm

Cortador de 3/16" (4.7625 mm)

Profundidad de corte: 0.3 mm

Velocidad de avance: 60 mmpm

Velocidad del husillo: 1200 rpm

Cortador de 1/8" (3.175 mm)

Profundidad de corte: 0.15 mm

Velocidad de avance: 60 mmpm

Velocidad del husillo: 1500 rpm

2.2.3 Simulación de la manufactura y fabricación del molde

Realizar la cavidad diseñada en una fresadora convencional resultaría un trabajo muy complejo, debido a las formas que requiere el molde. Por lo que se decidió trabajar con una fresadora CNC (Control Numérico por Computador), que cuenta con dispositivos electrónicos que mediante el auxilio de una computadora o controlador coordina los movimientos y funciones de la máquina-herramienta.

Para generar el código fuente requerido por la fresadora se utilizó uno de los módulos con los que cuenta Unigraphics (NX6), llamado "Manufacturing" en donde una vez generada la cavidad se introducen las herramientas a utilizar y los parámetros de corte de estas y como resultado nos arroja el tiempo de maquinado, una simulación del trabajo que generaría la maquina con las herramientas especificadas y el código fuente necesario para poder realizar la cavidad.

Para el caso de la primera herramienta (cortador plano de 4 gabilanes y 5/16" de diámetro) la simulación nos muestra (figura 2.17), la cavidad que generaría dicha herramienta y nos establece como tiempo de maquinado una hora con treinta y cinco minutos.

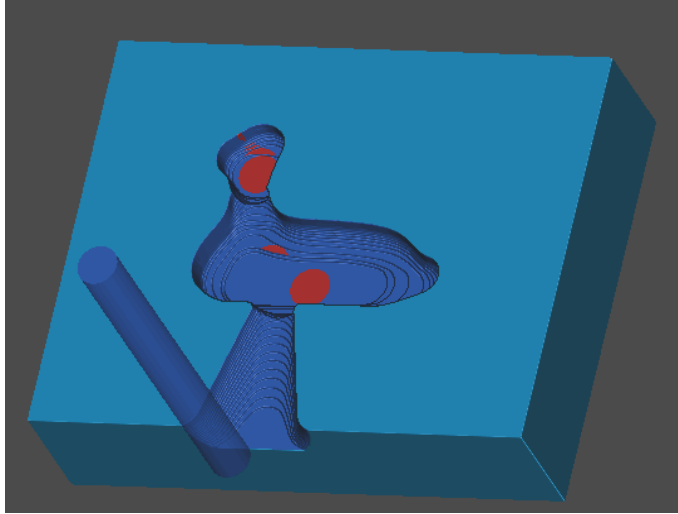


Figura 2.17 Simulación en Unigraphics para el cortador de 5/16"

Para la segunda y tercera herramienta (cortador de 3/16" y 1/8") la simulación arrojó un tiempo de maquinado de cuatro horas con diecisiete minutos y cuatro horas treinta y cinco minutos respectivamente, con lo que se obtuvo un tiempo total de maquinado de diez horas con veinte y siete , por cada placa (Figura 2.18 y 2.19).

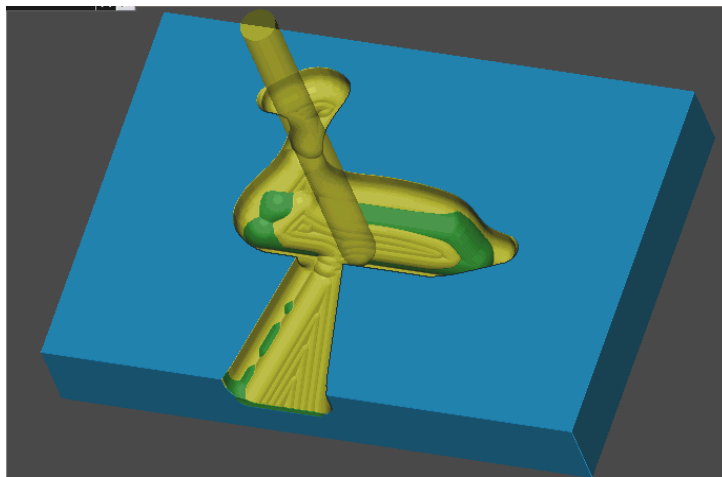


Figura 2.18 Simulación en Unigraphics con el cortador de 3/16"

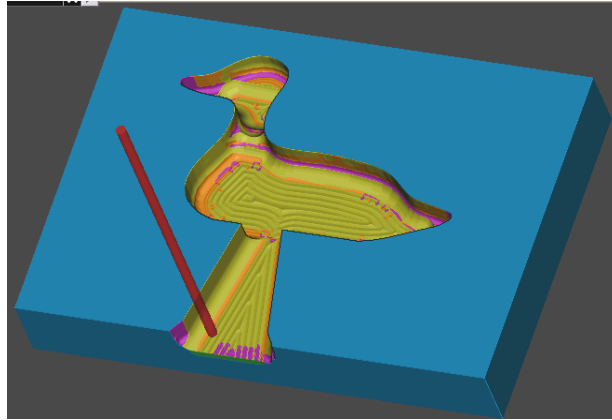


Figura 2.19 Simulación en el Unigraphics con el cortador de 1/8"

Una vez realizada la simulación de manufactura en Unigraphics, se obtuvo el código fuente para generar las dos cavidades del molde, sin embargo era necesario corroborar que este fuera correcto y que el centro de maquinado EMCO VMC300 que utilizaríamos lo reconociera, fue por esto que se introdujo a otro programa llamado Top Cam, el cual también simula el maquinado y nos indica de igual modo el tiempo que este tarda y en caso de haber algún error en la información ingresada, lo marca generando un error (Figura 2.20).

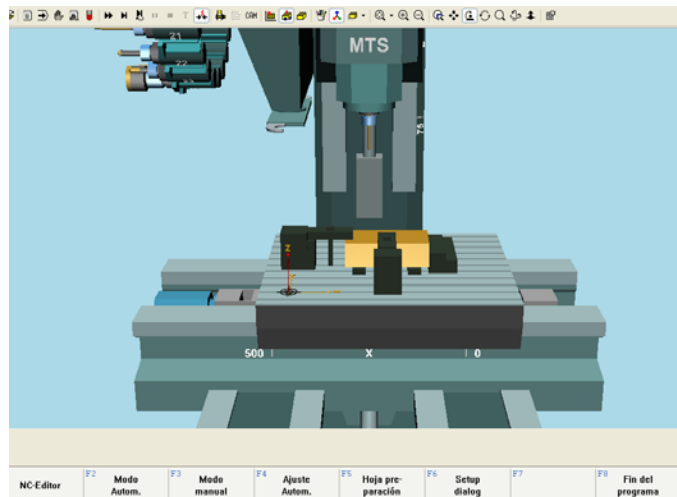


Figura 2.20. Análisis en TOPCAM

Corroborado el código fuente en su totalidad, se prosiguió a iniciar la manufactura del molde, por lo que se montaron las tres herramientas a utilizar y posteriormente se montó la placa de acero, se introdujo el código al centro de maquinado, siendo este previamente partido en 10, debido a que la memoria de la máquina utilizada no soporta archivos mayores a 43 KB. El tiempo real de maquinado por cada placa de acero fue de catorce horas y treinta y cinco minutos.

2.2.4 Apertura y cierre del molde

En la industria de la fundición para la apertura y cierre de moldes de inyección se emplea algún mecanismo ya sean hidráulico o mecánico, cuyo funcionamiento es parecido al de una mordaza, en este son montados los moldes y permite abrirlos de forma rápida dando lugar a una producción en masa efectiva, por el corto tiempo de dicha operación, para asegurar una perfecta coincidencia entre ambas partes del molde, el mecanismo es auxiliado por pernos guía los cuales son postes fijos que se localizan en una de las placas y se ajustan a casquillos que son colocados en la otra parte del molde.

En la industria, los moldes permanentes son precalentados mediante el uso de resistencias que se integran a las placas, para nuestro caso se tendrán que calentar en un horno eléctrico de resistencias, por lo que el uso de pernos guía no es conveniente, toda vez que para un correcto ensamble utilizando los pernos es necesario tener las placas correctamente alineadas, tarea que se dificultaría al tener que estarlos introduciendo y sacando del horno.

Por esta razón se optó por maquinar un par de barrenos de $\frac{1}{4}$ " en una de las placas, para posteriormente generar en cada barreno una cuerda interna en donde

se atornillarían prisioneros, en la otra sólo se hicieron los barrenos con una profundidad de 5 mm, y un diámetro de 8mm. Los prisioneros al ser apretados permitirían separar el molde y así obtener producto final (Figuras 2.21 y 2.22).

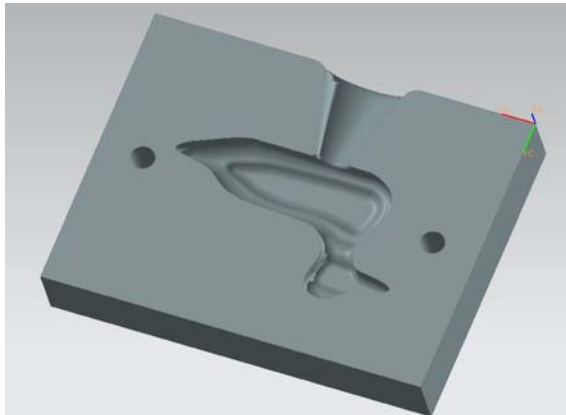


Figura 2.21 Placa con barrenos de 5 cm. de profundidad

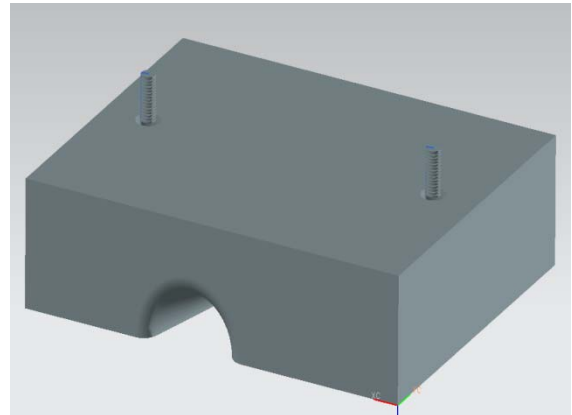


Figura 2.22 Placa donde se insertan los prisioneros

2.2.5 Mecanismo de sujeción

Hasta el momento se contaba con un mecanismo capaz de separar los moldes, sin embargo éste no los alineaba, ni era capaz de contener la presión generada dentro a causa del material.

En primera instancia se calculó la mencionada presión, pues conocer este dato nos daría pauta para proponer algún diseño, sin embargo no se debía dejar de lado el otro requerimiento que era poder introducir de manera fácil los moldes una vez calentados a la temperatura requerida. Para calcular la presión dentro del molde se recurrió a la ecuación 2.1

$$P = \rho gh \dots\dots\dots 2.1$$

P= presión

g = gravedad

ρ = densidad del material (aluminio en estado líquido 2670 kg/cm³)

$$P = (2670[\text{kg/m}^3])(9.78 [\text{m/s}^2])(0.08427 [\text{m}]) = 2.200 \times 10^3 [\text{Pa}] = 0.3190 [\text{lb/in}^2]$$

Al observar que la presión generada dentro del molde era pequeña, se optó por construir una caja de acero, ya que en esta se podría introducir las placas de manera sencilla por la parte superior. Al tener una presión mínima, resulta suficiente colocar un tope que evite que las placas se desplacen, para esto se barrenaron un par de cuerdas en dos de los costados de esta, donde se introducirían tornillos, los cuales tendrían que ser atornillados hasta tocar las placas, estos además de proporcionarles el tope alinearían el molde, ya que lo desplazarían hasta una de las escuadras de la caja. (Figura 2.23).

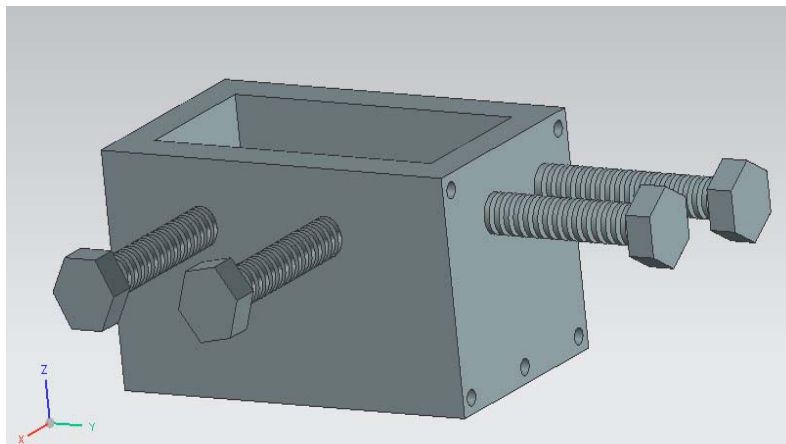


Figura 2.23 Sistema de Sujeción con tornillos

Para generar la caja se utilizaron 5 placas de acero 1018 de $\frac{1}{2}$ " de espesor con las siguientes dimensiones exteriores 14 cm de largo por 7.5 cm de ancho y 7.5 cm de alto. Para la construcción del mecanismo de sujeción fue necesario carear y escuadrar las placas a utilizar, posteriormente se puntearon con soldadura para así dar forma a la caja, los puntos la soldadura hubieran resultado suficientes, sin embargo se introdujeron tonillos en las uniones de las placas para reforzar la caja.

Para el caso de los barrenos frontales, se buscó que fueran coincidentes con el centro de las placas, para que al introducir el tornillo, este ejerciera de manera uniforme la presión aplicada, por lo tanto ambos se maquinaron a 4.635 cm de altura, y a una distancia horizontal de 2.5 cm y 3.75 cm respectivamente (Figura 2.24).

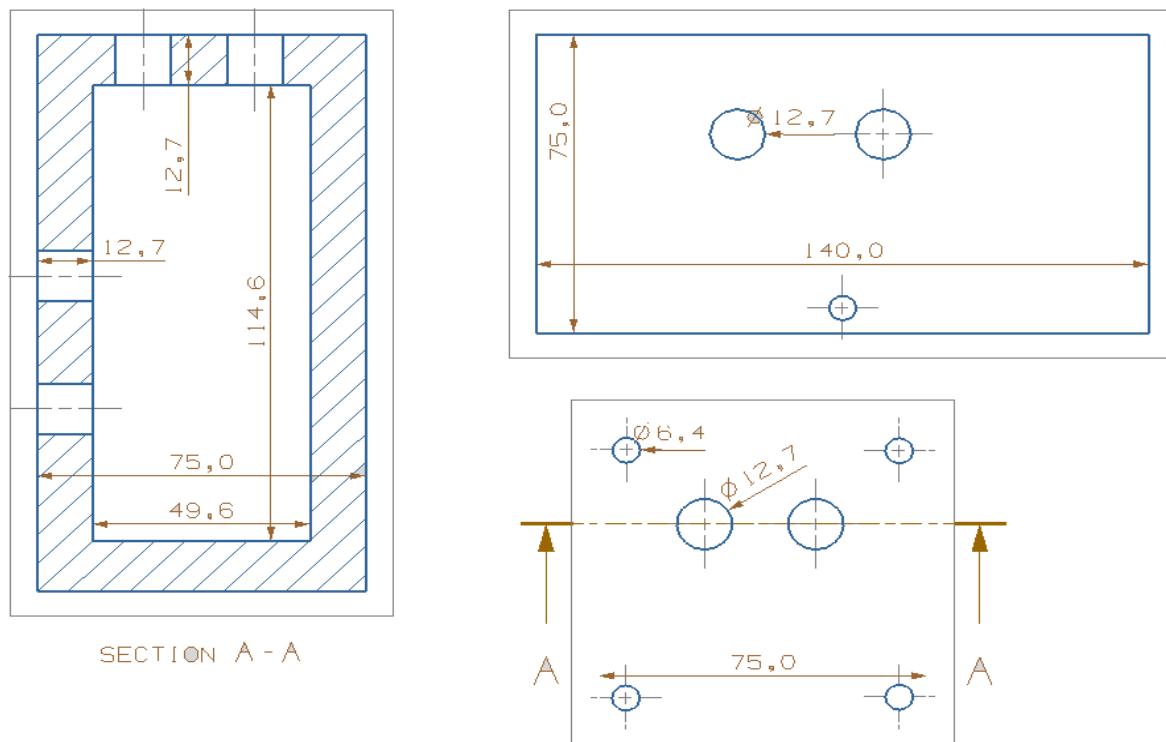


Figura 2.24. Dimensiones del mecanismo de sujeción

2.3 Pruebas Primera Iteración

Hasta este momento ya se tenía listo el molde, sin embargo era necesario experimentar en él para saber si se tenía que hacer algún tipo de ajuste al diseño original. Para poder dar inicio con la experimentación era necesario cubrir primero el molde con un desmoldante que ayudara a evitar que la pieza generada se quede pegada en alguna de las paredes del molde, por lo que se utilizó el equipo oxiacetilénico para cubrirlas con negro de humo. Este último consiste en partículas muy pequeñas y esencialmente esféricas de carbono producidas por la combustión incompleta que al encontrarse aplicado sobre la superficie de las placas trabaja como una capa repelente.

Para el proceso de fundición es necesario calentar el material por encima de su temperatura de fusión, esto para permitir las pérdidas de calor al medio ambiente y para aumentar la fluidez del material, para tener una primer propuesta de la temperatura a emplear se consultaron publicaciones referentes al tema, la publicación "*Modern Casting*" del mes de junio del 2010, publica un artículo de la Compañía Bremen Casting Inc. donde nos indica que esta se encontraba realizando una pieza de aluminio de 25 cm³ en un molde permanente y la temperatura de vaciado que esta utilizaba era 760°, por lo que se decidió utilizar este valor inicialmente.

Se procedió a realizar el primer vaciado obteniéndose el siguiente resultado (Figura 2.25). Como se puede observar la cavidad no se llenó completamente, quedando un rechupe de magnitud considerable en la parte lateral de la pieza (Punto A de la figura 2.25.) y otro más en la zona del pecho (Punto B figura 2.25.), se analizó también la mazarota (Figura 2.26).

Se observó que el rechupe por contracción en esta zona fue mínimo, lo que nos estaría indicando que se tuvo una baja velocidad de flujo o una baja temperatura.

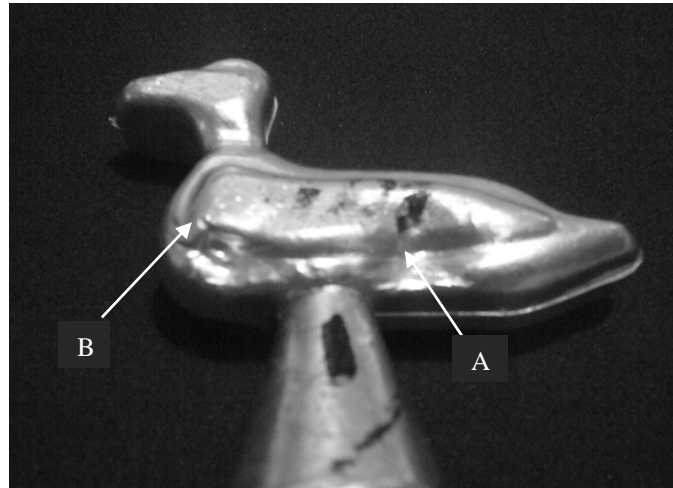


Figura 2.25 Pieza obtenida en el primer vaciado a una temperatura de 760° C, donde se obtuvo una pieza incompleta, quedando un rechupe en el punto A y B

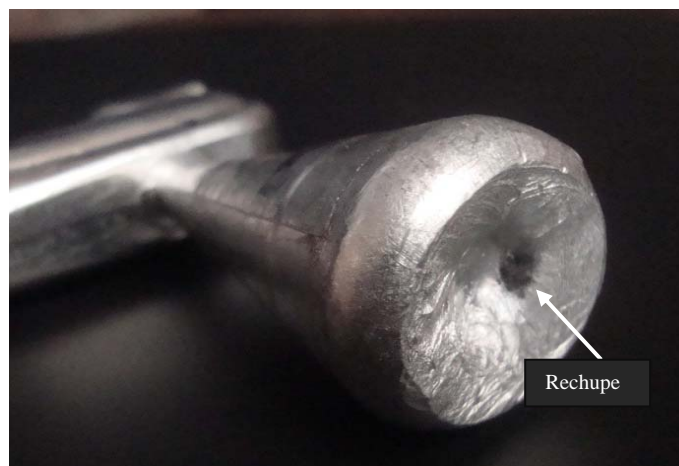


Figura 2.26 Mazarota de la primera experimentación a 750°, donde se observa que el rechupe en esta zona es mínimo

La solución sería aumentar la velocidad del fluido, o aumentar la temperatura del material, por lo que se tomó la decisión de variar la velocidad de flujo fabricando una reducción de 6 mm. de diámetro y se colocó en la entrada de la cavidad de la

pieza, con lo cual se generó un aumento en la velocidad del flujo, obteniéndose el siguiente resultado (Figura 2.27)

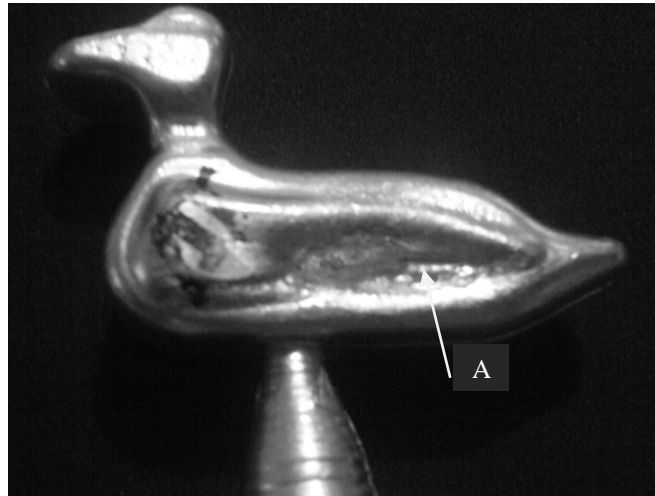


Figura 2.27. Pieza obtenida a una temperatura de 750° C y una reducción de 6 mm en la entrada de la cavidad, donde se observa una mejora en la zona del pecho

En la figura anterior se puede observar una mejora en el llenado de la cavidad, toda vez que la zona del pecho se llena mejor, sin embargo persiste el de la parte lateral (Punto A Figura 2.27). Si bien, la reducción ayudaba en el llenado de la cavidad la mejora no era suficiente por lo que se determinó variar la temperatura de vaciado del material, ya existía la posibilidad de que esta se encontrara a una temperatura inferior a la requerida para nuestro caso y nos estaría ocasionando que el material solidificara en la mazarota.

Se procedió a elevarla hasta 800° C y se retiró la reducción del molde, obteniéndose el resultado de la Figura 2.28, donde se observa que la parte posterior del cuerpo sigue sin llenarse totalmente.



Figura 2.28 Piezas obtenidas con una temperatura del aluminio de 800° C y sin reducción del diámetro en la entrada de la cavidad, donde se observa que el defecto continua pero en menor proporción.

Se analizaron también las coladas (Figura 2.29) y se observó que en estas el rechufe era mayor en comparación con los vaciados anteriores, con lo que se pudo asumir que la colada estaba realizando su función adecuadamente. Hasta este momento no se había considerado ningún respiradero para el molde y todo indicaba que el defecto lo estaba ocasionando aire atrapado en las zonas incompletas, debido a la turbulencia generada por el material.



Figura 2.29 Revisión de coladas, aquí se observa que el rechufe se da en mayor proporción que en los casos anteriores, lo que nos indica que la mazarota realiza su tarea de forma adecuada

2.4 Diseño y Experimentación Segunda Iteración

Se maquinaron tres cortes de salida de aire de 1 mm. de profundidad y 1 mm de ancho en una de las caras de ensamble del molde (Figura 2.30).

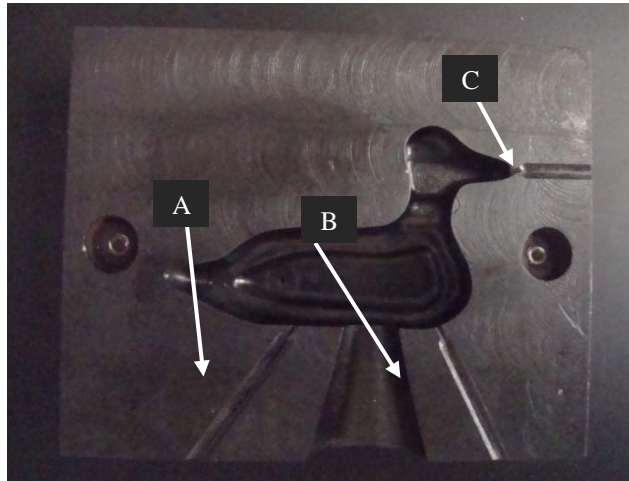


Figura 2.30. Líneas de salida de aire en una de las placas del molde

El corte de salida de aire (A), se maquinó para poder desechar el aire acumulado en la parte lateral de la pieza, con el corte (B) desaloja el aire que se atrapaba en la zona del pecho y el (C) para evitar problemas en el llenado en la zona del pico, con una temperatura de colada de 800° y las tres líneas de salida se obtuvo la siguiente pieza (Figura 2.31).



Figura 2.31. Piezas obtenidas con los cortes de salida de aire en una cara de las caras de ensamble del molde

Con los cortes de salida de aire maquinados, se observa una pieza ya casi completa, con lo que se pudo concluir que efectivamente se estaba quedando aire atrapado dentro de la cavidad, imposibilitando que esta se llenara por completo, sin embargo esta seguía presentando un muy ligero rechupe en la parte lateral del cuerpo (Punto A de la Figura 2.31). Este último rechupe manifestaba que el fluido seguía sin llenar totalmente la cavidad, por lo que se consideró nuevamente la posibilidad de utilizar la esprea para acelerar la entrada del material a la cavidad, toda vez que aumentar la temperatura del aluminio para mejorar la fluidez, podría ocasionar que el aluminio se oxidara, se procedió a realizar un nuevo vaciado dejando la temperatura del aluminio en 800° y utilizando la esprea, sin embargo no se mostró ninguna mejoría en la pieza.

2.5 Diseño y Experimentación Tercera Iteración

Después de realizar pruebas a 800° y con la esprea en la entrada de la cavidad, se siguió obteniendo el mismo resultado (Punto A de la Figura 2.31), se analizaron las

mazarotas y se observó un rechupe considerable en estas, con lo que se concluyó que estas estaban realizando adecuadamente su función y que no existía problema alguno con el flujo del material por ende, se dedujo que continuaba quedando aire atrapado en esa zona.

Se concluyó que era necesario un respiradero más en la parte lateral del cuerpo, se maquinaron un par de barrenos de $\frac{1}{4}$ " en la parte posterior del molde con una profundidad de 1 cm, para posteriormente encontrar el centro de estos y ahí maquinarse otro barreno de $\frac{1}{32}$ " en cada uno de los orificios ya generados, hasta atravesar el molde (Puntos A de la Figura 2.32).

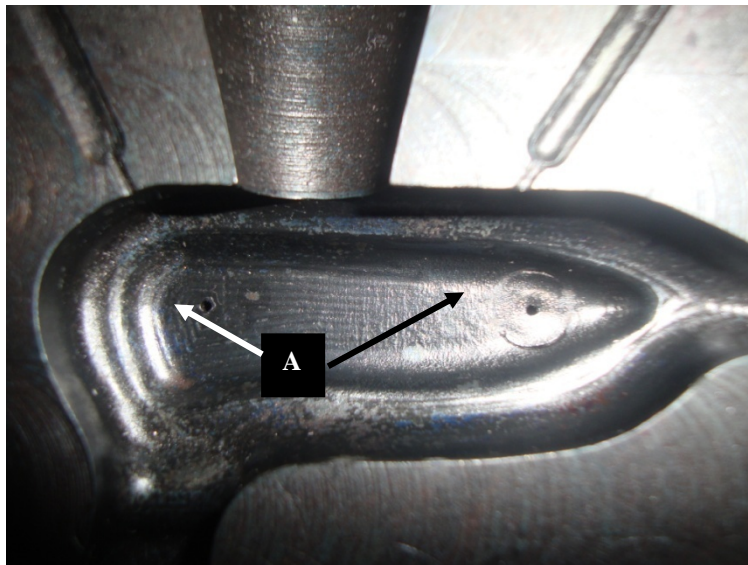


Figura 2.32. Barrenos de $\frac{1}{32}$ " en la parte lateral de la cavidad

Se procedió hacer un nuevo vaciado, con una temperatura de 800°C y utilizando la esprea obteniéndose finalmente la pieza completa. (Figura 2.33)



Figura 2.33. Pieza obtenida con las líneas de respiración de una de las placas, con barrenos en la parte lateral de la cavidad, una temperatura del aluminio de 800° y reducción en la entrada de la cavidad.

3 CAPÍTULO 3: DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE PARÁMETROS, CONSTANTE DE MOLDE Y TIEMPO DE SOLIDIFICACIÓN.

Después de experimentar con el molde se observó que para que de este se obtuvieran piezas de buena calidad, requería de modificaciones respecto al diseño inicial, como fueron las salidas de aire y la reducción del diámetro del bebedero, pero además también se pudo determinar que era necesario controlar dos parámetros, la temperatura del material y de los moldes.

3.1 Temperatura del Material

Es necesario elevar la temperatura del material a fundir por encima de su punto de fusión, esto con la finalidad de que tenga la fluidez necesaria para llenar completamente la cavidad, además dicha acción permite también maniobrar con el material, sin que este solidifique parcialmente. El aluminio empleado fue el tipo 1100 comercialmente puro, la temperatura de fusión de este material está perfectamente definida, por lo que pasa de estado sólido a líquido a una temperatura concreta, en este caso 660° , conocer esta propiedad hizo proponer una primera temperatura de vaciado a 760°C , dato que fue corroborado al consultar la publicación "*Modern Casting*", donde la empresa Compañía Bremen Casting Inc. menciona que la temperatura de vaciado que esta utiliza para el caso de fundición de aluminio en molde permanente es de 760° . Se consideró que este valor era el idóneo para nuestro caso ya que habría que compensar la transferencia de calor que existiría entre el material líquido y las placas, sin embargo se concluyó esta temperatura no era la adecuada, ya que después de realizar diferentes vaciados con el valor antes mencionado, se observó que la cavidad quedaba incompleta, por lo que se decidió

aumentar la temperatura del aluminio hasta 800°C, además de realizar otros ajustes al diseño del molde obteniéndose así el producto sin ningún defecto.

Para caso de este molde, se requirió que el material a fundir tuviera un sobrecalentamiento de 140°C, sin embargo no se puede concluir que esta temperatura sea la adecuada para vaciar en algún otro tipo de molde permanente, pues influyen diferentes factores como la temperatura ambiente, toda vez que al sacar el material del horno y realizar el vaciado, la temperatura disminuye de manera muy drástica, por lo tanto la temperatura deberá ser aún mayor si la distancia a recorrer del punto de fundición al de vaciado es de más de dos metros.

3.2 Temperatura del molde

Para poder realizar el vaciado en el molde es necesario evitar el choque térmico entre las placas y el material en estado líquido, por lo que es vital precalentar los moldes, no se tiene establecido algún rango de temperatura a la cual se deba calentar el molde, la literatura sugiere un rango de 100°C a 250°C. La temperatura de precalentamiento de las placas que contienen la cavidad, resulta de igual manera un parámetro importante para nuestro proceso, toda vez que realizar un vaciado en el molde sin haber efectuado previamente dicha acción, ocasionará que la cavidad no se llene correctamente esto al haber un rápido enfriamiento del material, como se utilizó acero 1020 para la generación del molde, calentarlo a una temperatura demasiado elevada provocaría en este un defecto llamado “quemado” del acero, que a su vez originara un desgaste excesivo en las placas.

Se realizaron diferentes vaciados con un precalentamiento inicial en las placas de 100°C y fue aumentando la temperatura hasta 230°C, al observar el producto obtenido con cada experimentación, se concluyó que si bien este es un parámetro importante, la variación después de 150°C no influía en la calidad de nuestra pieza.

Tomando en cuenta que el aluminio tendría una temperatura de 800° C al momento de ser vaciado, se decidió mantener la temperatura del molde en 150°C, para corroborar que este valor resultaba suficiente para que el aluminio fluyera de forma correcta dentro del molde, se hicieron pruebas una vez finalizado el rediseño y no se encontró defecto alguno.

3.3 Constante del Molde y Tiempo de solidificación

Para conocer el Tiempo de solidificación teórico del material dentro de la cavidad, era necesario calcular primero la constante del molde, ésta se obtiene de la ecuación del Modulo de Solidificación de Chvorinov.

$$M_s = k\sqrt{t_s}$$

$$M_s = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{T_V - T_0}{\rho_s H + \rho_L C_L \Delta T} \right) \sqrt{k_m \rho_m C_M} \sqrt{t}$$

M_s = Módulo de solidificación

T_m = Temperatura de solidificación del metal (puro)

T_0 = Temperatura del molde

H = Entalpia promedio de solidificación

ρ_s = Densidad del sólido

ρ_L = Densidad del líquido

ΔT = $T_v - T_m$

C_L = Calor específico del líquido

K_m = Conductividad térmica del medio de moldeo

ρ_m = Densidad del medio de moldeo

Cm = Calor específico del medio de moldeo

t = tiempo de solidificación

Se buscaron los valores arriba descritos para el acero 1020 que fue el material del molde y para el aluminio puro y se sustituyeron en la ecuación antes mencionada.

$$T_m = 660^\circ$$

$$T_o = 150^\circ$$

$$H = 95 \left[\frac{\text{cal}}{\text{g}} \right]$$

$$\rho_s = 2.7 \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$$

$$\rho_L = 2.67 \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$$

$$\Delta T = T_v - T_m = 800^\circ - 660 = 140^\circ$$

$$C_L = 0.26 \left[\frac{\text{cal}}{\text{g}^\circ\text{C}} \right]$$

$$K_m = 0.1195 \left[\frac{\text{cal}}{\text{cm s } ^\circ\text{C}} \right]$$

$$\rho_m = 7.86 \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$$

$$C_m = 0.1201 \left[\frac{\text{cal}}{\text{g}^\circ\text{C}} \right]$$

$$t = 1.5990 \text{ seg}$$

$$M_s = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{800^\circ - 150^\circ}{2.7 \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right] 95 \left[\frac{\text{cal}}{\text{g}} \right] + 2.67 \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right] 0.26 \left[\frac{\text{cal}}{\text{g}^\circ\text{C}} \right] 140^\circ} \right) \sqrt{0.1195 \left[\frac{\text{cal}}{\text{cm s } ^\circ\text{C}} \right] 7.86 \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right] 0.1201 \left[\frac{\text{cal}}{\text{g}^\circ\text{C}} \right] \sqrt{t}}$$

$$M_s = 0.4133 \left[\frac{\text{cm}}{\text{s}^{\frac{1}{2}}} \right] \sqrt{t}$$

Con lo que la constante de nuestro molde es $k = 0.4133$

Para obtener el tiempo de solidificación teórico recordamos que $M_s = \frac{V}{A}$

Donde:

V = Volumen del metal

A = Área de transferencia de calor

La cavidad generada tiene un volumen de 15 cm^3 y un área de 29.75 cm^2 , sustituyendo en la ecuación de Chovorinov y despejando t, se obtiene

$$\frac{15 \text{ cm}^3}{29.75 \text{ cm}^2} = 0.4133 \left[\frac{\text{cm}}{\text{s}^2} \right] \sqrt{t}$$

$$t = 1.488 \text{ [s]}$$

Para corroborar el tiempo obtenido teóricamente, se colocó un termopar tipo K en la mazarota, por ser la zona que solidifica al último, este fue conectado a un multímetro digital que censaría la temperatura del material. Al momento de hacer el vaciado el aluminio entraba en contacto con el termopar y este indicaba la temperatura en ese instante, cuando nos marcaba una temperatura de 660° C , sabíamos entonces que la pieza se encontraba totalmente solidificada, se realizó en cinco ocasiones este procedimiento para conocer el tiempo de solidificación promedio, obteniéndose los resultados de la tabla 3.1 y un tiempo de solidificación promedio de 2.848 [s]

No.	Tiempo registrado [s]
1	2.11
2	2.5
3	3.13
4	3
5	3.5

Tabla 3.1. Tiempos de solidificación obtenidos experimentalmente

Esperar a que transcurra alguno de los tiempos antes mencionados, no asegura que la pieza se encuentra totalmente solidificada o que esté lista para desprenderse del molde, por lo que se recomienda esperar a que el molde tenga una temperatura superficial de 130°. Por lo que a continuación se muestra la tabla 3.2 con los parámetros necesarios para realizar un vaciado en el molde.

PARÁMETROS NECESARIOS PARA EL VACIADO
Temperatura del aluminio al momento del vaciado: 800°C
Temperatura del molde: 150 ° C
Temperatura de apertura del molde: 130° C
Diámetro inferior del bebedero: 6 mm.

Tabla 3.2. Parámetros requeridos para el vaciado en el molde

4 CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

El proyecto consistió en diseñar y manufacturar un molde permanente para vaciado por gravedad, que pudiera ser utilizado como material didáctico en la implementación de una práctica de laboratorio, se buscó una figura que resultara agradable a la vista y que con ello el alumno no olvidara la metodología a seguir para la obtención de esta pieza; si bien el proceso de fundición es muy vasto y es posible generar un sinfín de geometrías, se concluyó que por el tipo de vaciado que se realizaría en el molde no era posible generar piezas con cambios de sección abruptos, de igual manera se deberían evitar ángulos agudos y biseles, pues dificultarían la extracción de la pieza una vez solidificada en el molde.

Después de analizar las diferentes propuestas se observó que la figura de un pato cumplía con los requerimientos antes establecidos, además de que dicho diseño nos brindaba la posibilidad de situar el bebedero y la mazarota en la parte posterior de la pieza, situación que nos permitió ocultar el área de inyección, por tanto esta fue la cavidad generada.

Para la manufactura del molde se determinó que utilizar una fresadora convencional resultaba poco práctico, por la figura a manufacturar y para este fin fue necesario dibujar la pieza en un software de CAD llamado Unigraphics, donde se generó un código que fue introducido en un Controlador Numérico por Computadora (CNC). Una vez maquinado el molde, se procedió a la experimentación en él y con los resultados obtenidos se llegó a las siguientes resultados:

- Para obtener piezas de buena calidad es fundamental calcular los Módulos de solidificación de la cavidad principal y de la mazarota, donde esta última debe tener un modulo mayor al de la cavidad, dicho cálculo es indispensable para

poder proponer un primer diseño del molde a generar, pues nos da una idea general de las dimensiones que debe tener nuestra mazarota.

- La temperatura del material resulta ser un punto crítico, pues si se tiene una temperatura baja en el material este solidifica antes de haber llenado por completo la cavidad, para nuestro caso la temperatura adecuada de vaciado es de 800°C, pero no se sugiere utilizar esta temperatura para otra cavidad diferente a la generada en este trabajo.
- La temperatura de precalentamiento de los moldes es de suma importancia, pues con esta se evita que el choque térmico entre las placas y el material fundido sea severo, y no es conveniente elevar demasiado dicha temperatura ya que ocasiona un desgaste excesivo en el molde.
- La temperatura ambiente juega un papel muy importante al momento de realizar el vaciado, por lo que se recomienda tener una temperatura ambiente controlada.
- Debemos evitar un flujo turbulento pues atrapa aire dentro de la cavidad, generando defectos en la pieza, toda vez que el aire ocupara un espacio dentro de la cavidad imposibilitando la entrada de material líquido en esa zona, por lo que es necesario un diseño adecuado de salidas de aire, la profundidad y dimensiones de estas no se señalan en la literatura pero podemos recomendar profundidades alrededor de 1mm.
- Si bien teóricamente se tiene que la pieza solidifica en cuando mucho 3.5 segundos, no se recomienda abrir el molde, sino hasta alcanzar una temperatura superficial de 130°C en el molde, toda vez que en ese lapso, la figura está sufriendo la última etapa de contracción que es la contracción en estado sólido.

Podemos afirmar que el molde se encuentra listo para su implementación en una práctica, sin embargo, se necesitaría una clase de 2.30 horas para que 2 alumnos se pudieran llevar una pieza, ya que se contabilizó el tiempo que tarda el material en alcanzar los 800°C y es alrededor de 1.10 horas, sin embargo se tiene que esperar hasta que las placas lleguen a una temperatura de 130° para poder abrir el molde, como el horno ya se encuentra a la temperatura requerida al volverse a introducir el material tarda un tiempo aproximado de 30 minutos para alcanzar la temperatura de trabajo y al realizar el segundo vaciado se tendría que volver a esperar a que las placas alcancen la temperatura arriba mencionada para extraer la pieza, cabe destacar que el tiempo de apertura del molde es muy relativo ya que depende directamente de la temperatura ambiente.

PARÁMETROS REQUERIDOS PARA UN VACIADO ADEUCADO
Temperatura de vaciado del aluminio: 800°C
Temperatura del molde: 150 ° C
Temperatura de apertura del molde: 130° C
Diámetro inferior del bebedero: 6 mm.

5 BIBLIOGRAFÍA

- Camarero de la Torre, Julián; Martínez Peña, Arturo. Moldes, matrices y utillajes. Editoriales Dossat, 1era. Edición. Madrid. 2000
- Raymond A. Higgins. Ingeniería Metalúrgica. Compañía Editorial Continental, S.A. 3era edición. México. 1971.
- Alting Leo. Procesos para ingeniería de Manufactura. Alfaomega. 3era Edición. México
- Smithells, Colin James. Smithells Metals Reference Book. 7ma edición. Oxford. 1992.
- ASM Metals Handbook. Properties and Selection irons and steels.
- Sharer Sauberli Ulricj. Ingeniería de Manufactura. Compañía editorial continental, S.A. de C.V. 1era Edición, México. 1984.
- Catálogo León Weill, 2da edición, México. Páginas 745 y 746.
- Catálogo PH Horn, 3era edición, Estados Unidos de Norteamérica. 2008. Páginas M44-M80.
- Fleming. Solidification Procesing. Mcgraw-Hill. Cambridge. 1974
- Publicación Modern Casting. American Foundry Society. Estados Unidos de Norteamérica. marzo 2010. Páginas 67-69

6 ANEXO

	<p>UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA</p>
<p>DEPTO. MATERIALES Y MANUFACTURA</p>	

CARRERA	PLAN DE ESTUDIO	CLAVE DE LA ASIGNATURA	NOMBRE DE LA ASIGNATURA
Ingeniería Industrial		1744	Procesos de Manufactura I

PRÁCTICA NO.	LABORATORIO DE	NOMBRE DE LA PRÁCTICA	DURACIÓN
2	Procesos de Manufactura I	Fundición en Molde Permanente	2 horas

OBJETIVO DE LA PRÁCTICA

- Obtención de una pieza mediante el proceso de fundición en molde permanente donde la presión de inyección será ejercida por la acción de la gravedad.
- Comprender la función de cada una de las partes que integran el molde.
- Analizar los parámetros de fundición necesarios para lograr una pieza completa y de buena calidad.
- Comparar la calidad de una pieza obtenida mediante el proceso de fundición en molde permanente con el obtenido en un molde desechable y analizar las ventajas que ofrece cada uno de estos procesos.

CUESTIONARIO PREVIO

1. Dibuje un molde permanente y mencione las partes que lo conforman
2. Describa las etapas de contracción en metales
3. Mencione los parámetros a tomar en cuenta en el proceso de fundición en molde permanente.
4. Explique las medidas de seguridad a considerar cuando se trabaja en un proceso de producción por fundición.

INTRODUCCIÓN

La fundición es el proceso por el cual los metales se funden mediante la acción del calor, el material se deja solidificar dentro de un molde, obteniéndose piezas de diversas formas y dimensiones. Existen básicamente dos tipos de moldes, desechables y permanentes, en los primeros el molde debe ser destruido para obtener la pieza, estos se hacen de arena, yeso o materiales similares que mantienen la forma deseada usando aglomerantes de varias clases. Por otra parte, un molde permanente puede usarse más de una vez, ya que está hecho de metal o algunas veces de un refractario cerámico que puede soportar las altas temperaturas de fundición, en este tipo de moldes es necesario aplicar en las placas un desmoldante que evitara que la pieza se quede pegada a la cavidad además de facilitar su extracción. Para la obtención de figuras con una buena calidad es necesario, para nuestro caso, considerar dos parámetros, la temperatura de precalentamiento del molde y la temperatura del material al

momento del vaciado, ya que una mala elección en alguna de estas, provocara que el metal no llene completamente la cavidad.

MATERIAL Y/O EQUIPO NECESARIO

- 2 Hornos eléctricos para fundición u horno de crisol
- Molde de acero
- Caja de sujeción
- Crisol de grafito
- Trozo de aluminio 1100
- Pinzas en "C"
- Llave Allen de 1/8"
- 1 pirómetro

DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

Para evitar que la pieza fundida se pegue al molde es necesario aplicar un desmoldante, en este caso será negro de humo, el cual será aplicado por el profesor con ayuda de la soldadura oxiacetilénica. Posteriormente se realizarán los siguientes pasos:

1. Introducir el molde en uno de los hornos eléctricos y programarlo hasta una temperatura de 150°C, en el otro se introducirá el crisol con el aluminio dentro y se programará el horno hasta una temperatura de

820° C, es necesario utilizar las pinzas en “C” para introducir el molde al horno (figura 1) e introducir el crisol con precaución, toda vez que se puede dar el caso que el horno este caliente.



Figura 1

2. Una vez alcanzadas las temperaturas arriba mencionadas, se sacara primero el molde sujetándolo con las pinzas en “C” y se introducirá en la Caja de sujeción, posteriormente se apretaran los tornillos de la Caja, con la finalidad de que las placas queden alineadas (figura 2).



Figura 2

3. Se verterá el metal líquido contenido en el crisol dentro del molde (Figura 3)



Figura 3

4. Una vez solidificada la pieza, se sacara el molde de la caja de sujeción y se harán girar los prisioneros en sentido horario, para así poder despegar los semimoldes y sacar la pieza de la cavidad



Figura 4

5. Introducir nuevamente los moldes y crisol a los hornos y programar hasta una temperatura de 150°C y 820° C respectivamente, y repetir los pasos 2 al 4.

PRECAUCIONES Y/O MEDIDAS DE SEGURIDAD

Para que la presenta práctica se realice en forma, es necesario, seguir las siguientes indicaciones:

- Utilizar los guantes al momento de introducir o sacar el crisol o el molde de los hornos y utilizar respectivamente tanto la varilla de sujeción como las pinzas en “c”.
- Al momento de sacar el crisol, una persona tendrá que abrir la compuerta del horno, mientras otra extrae el crisol, dicha tarea, tendrá que realizarse de manera rápida, toda vez que la el calor que irradia

el horno puede ocasionar molestia tanto a la persona que abre el horno como al que saca el material.

- Mientras se realiza el vaciado en el molde, se recomienda que los alumnos guarden cierta distancia de este, toda vez que si la persona encargada de realizar el vaciado, llega a derramar aluminio en el piso, este tiende a salpicar y como se encuentra a una temperatura elevada, puede ocasionar quemaduras.
- Para despegar los moldes, es necesario utilizar la llave allen y será necesario utilizar en todo momento los guantes.
- Después de realizar el vaciado, por ningún motivo se podrá poner el crisol en el suelo, se deberá introducir lo más pronto posible al horno

RESULTADOS

Los datos obtenidos serán registrados en la siguiente tabla y se señalará la calidad de la pieza obtenida

	Temperatura molde [°C]	Temperatura aluminio [°C]	Calidad de la pieza
1	250	820	
2	150	820	

ANALISIS DE LOS RESULTADOS

--

CONCLUSIONES Y/O COMENTARIOS

--