

Trabajo de Diploma

Determinación de la distancia de alimentación
en piezas tipo láminas de Acero AISI 1045

Autor: Amaya Pérez Hernández
Tutor: MSc. Lázaro Humberto Suárez Lisca



**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
Facultad de Ingeniería Mecánica
Departamento de Ingeniería Mecánica**



TRABAJO DE DIPLOMA

**Determinación de la distancia de alimentación en piezas tipo láminas de
Acero AISI 1045**

Autor: Amaya Pérez Hernández
aphernandez@uclv.edu.cu

Tutor: MSc. Lázaro Humberto Suárez Lisca
Profesor Asistente, Departamento Ingeniería Mecánica, Facultad Ingeniería
Mecánica, lazarosl@uclv.edu.cu

Santa Clara

2013

"Año del 55 aniversario de la Revolución"



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería Mecánica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Autor

Firma del Jefe de
Departamento donde se
defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

El buen éxito da a veces a un acto, todo el honorable esplendor de la buena conciencia; un fracaso pone la sombra del remordimiento sobre la acción más respetable. El éxito no está siempre en la victoria, sino también en el deseo de vencer...

FRIEDERICH NIETZCHE.

DEDICATORIA

- A mi tío Noel que ha sido lo más cercano a un padre para mí y le debo la persona que soy hoy.
- A mi madre por su sacrificio por mi superación.
- A mi novio Freddy por el amor y comprensión durante mi carrera, por ser mi guía en los momentos difíciles.
- A mis tíos Nelson, Numancia Nivaldo y Lisbeisy, mis primos Daniellys, Yailen, Emilio, Patricia y Noelito.
- A mis amigos Gretel, Anelys, Aldo, Gabriela y otros por su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

- A mi tutor Lázaro Humberto y al Departamento de Fundición de Planta Mecánica.
- Al colectivo de profesores de la Facultad de Mecánica que me impartieron los conocimientos alcanzados.

TAREA TECNICA

Tareas para la confección del informe final:

1. Caracterización del estado del arte sobre la determinación de la distancia de alimentación.
2. Realizar el diseño de experimento y el cálculo para determinar la distancia de alimentación en piezas de acero 1045.
3. Realizar la simulación del llenado de piezas de acero AISI 1045.
4. Comprobar mediante la simulación si la pieza tiene defectos.

Firma del Autor

Firma del Tutor

RESUMEN

El presente trabajo de diploma que se desarrolló en la Empresa de Construcciones Mecánica "Fábric. Aguilar Noriega "más conocida por Planta Mecánica donde se realizó el análisis experimental para las piezas tipo láminas de acero AISI 1045 y el cálculo de la geometría de las mazarotas por el método de la distancia de alimentación, la velocidad del flujo de llenado, la distancia de alimentación de cada pieza entre otros valores.

Se brinda una panorámica del estado del arte sobre un estudio de los cálculos de la distancia de alimentación en mazarotas de acero, donde se recopila toda la información sobre la mazarota.

Se realizó la simulación para los modelos con una relación ancho espesor (W/T) de 2, 5.5, 8, 12, donde se comprobó si las piezas quedaban con defectos.

ABSTRACT

The following work was developed in mechanical construction fabric "Aguilar Noriega" knowledge by "Mechanical Plant". In this factory was developed the experimental analysis of pieces type laminds of steel AISI 1045 calculating the geometry of the riser by the method of the alimentation distance, the flu of full speed and the alimentation distance of every piece between others values.

This work allow as a panoramic of the art state over the study of the calculation for the alimentation distance on the steel riser, gathering all the information of them.

Then develop the simulations for all the models with a wide and thin relation (W/T) of 2, 5.5, 8 and 12 doing the process for the analysis of the pieces defects.

INDICE

Introducción.....	13
Organización del informe.....	15
CAPÍTULO I. Estado del arte sobre métodos de cálculo de la distancia de alimentación.....	17
1.1 Aspectos generales sobre la utilización de mazarotas en el proceso de fundición de piezas de acero.....	17
1.2 Tipos de mazarotas.....	24
1.3 Métodos para calcular la geometría de las mazarotas.....	26
1.3.1 Solidificación dirigida.....	26
1.3.2 Métodos de cálculo.....	29
1.4 Métodos de cálculo de la distancia de alimentación.....	36
1.4.1 Distancia de alimentación.....	36
1.4.2 Factores que influyen en la distancia de alimentación.....	37
1.5 Conclusiones parciales.....	40
CAPÍTULO II. Experimentación y cálculo para determinar la distancia de alimentación.....	42
2.1 Etapas del proceso de fundición.....	42
2.1.1 Preparación de la mezcla.....	42
2.1.2 Elaboración de la tecnología de fundición.....	43
2.2 Calidad de fundición.....	45
2.2.1 Métodos de inspección en la fundición.....	48
2.3 Cálculo de la velocidad de vertido para cada pieza.....	48

2.4	Cálculo de la geometría de las mazarotas necesarias para cada pieza	50
2.5	Análisis del diseño de experimento para determinar la distancia de alimentación en piezas tipo láminas de acero1045.....	53
2.6	Conclusiones parciales.....	56
Capítulo III. Simulación del llenado y enfriamiento de piezas tipo láminas		58
3.1	Simulación del llenado y enfriamiento de las de piezas.....	58
3.1.1	El proceso de fundición.....	60
3.2	La simulación en la fundición.....	61
3.2.1	Construcción del modelo.....	62
3.2.2	La modelación de la transferencia de calor.....	64
3.2.3	La modelación del llenado (Fluid Flow modelling).....	65
3.2.4	Modelación de superficie libre.....	66
3.3	Valoración de los resultados obtenidos en la simulación en el software Click2Cast.....	67
3.3.1	Análisis de la simulación.....	67
3.4	Conclusiones parciales.....	71
Conclusiones.....		73
Recomendaciones.....		75
Referencias Bibliográficas.....		77
Anexos.....		80

The background of the page is white, featuring several thin, hand-drawn purple lines. These lines are abstract and intersecting, creating a sense of movement and depth. Some lines are straight, while others are curved, and they cross each other at various points across the page.

Introducción
Introducción

Introducción

En 1973, La Sociedad de Fundidores de América (SFSA) publicó el mazarotado de piezas fundidas de acero, un manual de la fundición con el propósito de proporcionar las pautas del mazarotado para su uso en las fundiciones de acero. Las pautas contenidas en el Mazarotado de Piezas Fundidas de Acero fueron desarrolladas basadas en trabajos experimentales de piezas fundidas y soportado por las simulaciones en la computadora.

La industria de piezas fundidas de acero se ha aprovechado de este manual desde su publicación; ya que siguiendo sus pautas generalmente el resultado en las piezas fundidas ha sido la obtención de piezas sanas.

Sin embargo, los ejemplos que han aparecido en el último cuarto de siglo indican que las reglas contenidas en Mazarotado para Piezas Fundidas de acero para la distancia de alimentación de las mazarotas son demasiado conservadoras en ciertos casos, sobre todo donde los resultados se han extrapolado, reglas de distancia de alimentación conservadoras llevan al uso de más mazarotas que las necesarias en una pieza fundida, que a su vez lleva a una reducción en el rendimiento de la pieza fundida.

Empezando a mediados de 1990, fue emprendido un esfuerzo en la investigación para desarrollar un nuevo conjunto de directrices para el mazarotado [2, 3]. Esta investigación fue basada en un conjunto extenso de experimentos en placas fundidas de aceros de baja aleación, que se realizaron en varias fundiciones en toda América del Norte. Se utilizó una gran variedad de dimensiones de placas en los ensayos, los que produjeron piezas fundidas que fluctúan radiográficamente sólidas con el nivel 5 de porosidad de la ASTM. Las condiciones de las piezas fundidas (la composición de la aleación, el material del molde, el sobrecalentamiento, el tiempo de vertido, etc.) se registró por cada fundición para cada placa fundida, y esta información fue utilizada para simular numéricamente la fundición de cada plato, usando un software moderno de simulación de piezas fundidas. Una vez que era determinado que había una buena correspondencia entre el resultado del ensayo fundido y sus correspondientes simulaciones, un número grande de simulaciones se realizó para las geometrías y/o las condiciones de fundición que no se usaron en los ensayos de fundición, de este modo se produjo un juego de datos más completo. Analizando todos estos datos, un nuevo juego de reglas para la distancia de alimentación fue desarrollado para la obtención de piezas fundidas sanas.

El acero al carbono contrae aproximadamente 3% durante la solidificación según la experiencia. Un volumen adicional en la reducción ocurre durante el enfriamiento del metal líquido después del vertido. Estas reducciones crearán discontinuidades internas (es decir, cavidades o porosidad) a menos que una mazarota que es el depósito de metal líquido proporcione el metal necesario para alimentar la pieza hasta el final del proceso de la solidificación.

La mazarota también sirve como un depósito de calor, creando un gradiente de temperatura que induce a la solidificación dirigida. Sin la solidificación dirigida que no solo debe garantizarse en la mazarota, sino en toda la geometría de la pieza fundida, no se logra un producto con calidad porque presentarían muchas porosidades internas que comprometerían su utilización.

Problema científico.

La utilización de los resultados obtenidos experimentalmente y con la utilización de la simulación, pueden ser muy válidos para nuestra industria de la fundición; pero carece de datos para una aleación ampliamente utilizada en ellas, el acero 1045, por tal motivo se hace necesaria la realización de los experimentos para dicho material.

Hipótesis.

Con la realización de experimentos, cálculos y simulaciones con software modernos de fundición se pueden obtener juegos de datos válidos para determinar la distancia de alimentación en piezas tipo ruedas de acero 1045.

Objetivo general.

Determinar la distancia de alimentación para piezas fundidas tipo ruedas de acero 1045.

Objetivos específicos.

- Caracterización del estado del arte sobre los métodos de cálculo de la distancia de alimentación.
- Determinar de forma experimental y calcular la distancia de alimentación para piezas fundidas de acero 1045.
- Simulación del llenado y enfriamiento de las piezas de acero 1045 para comprobar si la pieza quedó con defectos.

Organización del informe.

Capítulo I: Estado del arte sobre métodos de cálculo de la distancia de alimentación.

- 1.1 Aspectos generales sobre la utilización de mazarotas en el proceso de fundición de piezas de acero.
- 1.2 Tipos de mazarotas.
- 1.3 Métodos para calcular la geometría de las mazarotas.
- 1.4 Métodos de cálculo de la distancia de alimentación.
- 1.5 Conclusiones parciales.

Capítulo II: Experimentación y cálculo para determinar la distancia de alimentación.

- 2.1 Análisis del diseño de experimento para determinar la distancia de alimentación en piezas tipo láminas de acero 1045.
- 2.2 Calidad de la fundición.
- 2.3 Cálculo de la velocidad de vertido para cada pieza.
- 2.4 Cálculo de la geometría de las mazarotas necesarias para cada pieza.
- 2.5 Análisis del diseño de experimento para determinar la distancia de alimentación en piezas tipo láminas de acero 1045.
- 2.6 Conclusiones parciales.

Capítulo III: Simulación del llenado y enfriamiento de piezas tipo láminas.

- 3.1 Simulación del llenado y enfriamiento de las piezas analizadas.
- 3.2 La simulación en la fundición.
- 3.3 Valoración de los resultados obtenidos en la simulación en el software Click2Cast.
- 3.4 Conclusiones parciales.

Conclusiones generales.

Recomendaciones.

Referencias y Bibliografía.

Anexos.

An abstract graphic design featuring several thin, purple, hand-drawn lines on a light lavender background. The lines are irregular and overlapping, creating a sense of movement and depth. Some lines are straight, while others are curved, and they intersect to form various shapes and patterns. Two small, solid purple dots are placed on the lines, one near the bottom left and another near the center right.

Capítulo I

Capítulo I

Capítulo I: Estado del arte sobre métodos de cálculo de la distancia de alimentación.

Las mazarotas se utilizan durante la elaboración de piezas fundidas principalmente de acero, estas son utilizadas para la alimentación de piezas en el período de solidificación, con el fin de compensar las contracciones del metal, y evitar la formación en las piezas de rechupes y porosidades. A continuación se reflejan algunos de los métodos más utilizados y referenciados en la literatura para determinar las dimensiones de las mazarotas en piezas fundidas de acero.

1.1 Aspectos generales sobre la utilización de mazarotas en el proceso de fundición de piezas de acero.

La fundición es un proceso altamente complejo, donde se combinan el flujo de metal en la cavidad del molde y la transferencia de calor. La consolidación del método de los elementos finitos ha permitido que este fenómeno entre tantos otros, se pueda simular con ventajas evidentes. La tecnología de piezas fundidas tiene como uno de sus últimos pasos la comprobación de la misma en la práctica, paso que desperdicia una gran cantidad de recursos en caso de tener errores la misma. Con mucha frecuencia se realizan tecnologías en las que mayormente interviene la experiencia de los especialistas y estas necesitan de un número grande de pruebas para llegar al éxito, por supuesto con una considerable pérdida para la empresa. La simulación del proceso en los últimos años ha permitido disminuir grandemente los costos de fabricación, aumentando considerablemente la calidad del producto final y la disminución del tiempo de reaprovisionamiento del mismo en el mercado.

Las mazarotas se colocan sobre las partes más densas, los nudos térmicos de las piezas, en las cuales, como resultado de una solidificación lenta, se forman los rechupes y se manifiesta una aguda porosidad.

Las mazarotas son reservas de metal líquido conectados a una pieza que al adicional el metal para alimentarla durante el proceso de su solidificación, a consecuencia del requerimiento de los fenómenos de rechupe y de contracción en estado líquido como se muestra en la figura 1; por lo tanto cualquier método cuantitativo a ser usado para el dimensionado de la alimentación de piezas vaciadas con intenciones de controlar su sanidad, se debe fundamentar en dos criterios de naturaleza metalúrgica que son: [4;5]

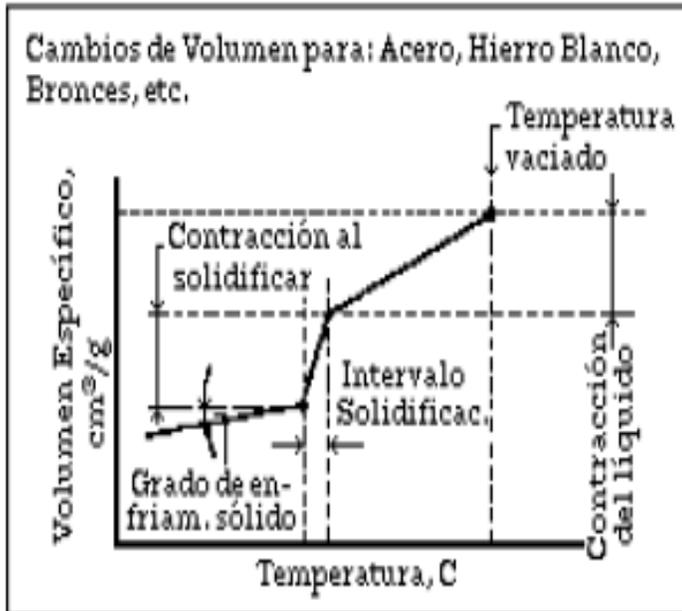


Figura 1. Proceso de solidificación [4]

- La magnitud de la contracción de solidificación, es decir, del rechupe y de la contracción en el estado líquido, magnitudes que dependen de la composición del metal o aleación; de la temperatura de vertido; y de la rigidez del molde. [6]
- Como el efecto de la contracción en el estado líquido depende de la intensidad de intercambio calórico cuando la intensidad de enfriamiento es baja no se producen dificultades particulares en los cálculos del rechupe. El cambio volumétrico que sucede en el estado líquido cuando la pieza se está enfriando, ΔV_L , se determina a partir de la ecuación:

$$\Delta V_L = \gamma_L V_M \Delta T_L \quad (1)$$

Donde γ_L es la contracción volumétrica del metal líquido, a una temperatura $^{\circ}\text{C}-1$, como se muestra en la figura 1; V_M es el volumen de la cavidad del molde y se da en cm^3 y ΔT_L es el sobrecalentamiento, $(T_m - T_L)$, $^{\circ}\text{C}$. Si el enfriamiento es muy intenso, la contracción del metal líquido es muy importante en la solidificación, bajo estas condiciones tan pronto como se ha extraído el calor de sobrecalentamiento se forma una capa sólida sobre la superficie del molde, figura 2. Esta capa inicia la armadura de la pieza y la posterior reducción del volumen de metal líquido conduce al aumento de las cavidades de rechupe.

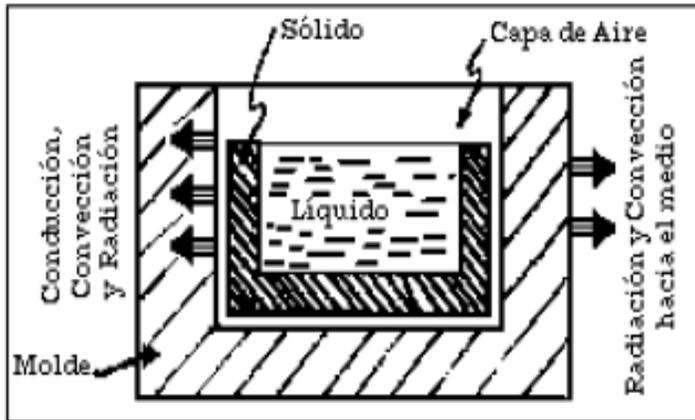


Figura 2. Demostración de una superficie de moldeo [3].

Durante la solidificación el cambio volumétrico o rechupe conduce a la formación de cavidades en el interior de la pieza. Al existir solidificación progresiva en dicha pieza, es decir que la relación $[(\Delta T_s / \Delta T_{12}) \ll 1]$, indica que el espesor de la capa solidificada progresa desde la superficie de extracción de calor hacia el eje central de la sección y el líquido que la rodea se contrae a medida que desciende la temperatura. Si el enfriamiento es intenso la relación $[(\Delta T_s / \Delta T_{12}) \gg 1]$ se define dicha condición, lo que conduce a que la temperatura prácticamente caiga a la misma velocidad en todos los puntos de la pieza. En la zona pastosa, es decir a temperaturas menores que se encuentra la temperatura del estado líquido de la aleación se forman dendritas a través de todo el volumen de la pieza, para formar una red de cristales o celdas que crecen de manera individual donde su propia contracción por rechupe conduce a porosidad distribuida en toda la pieza. Los cambios volumétricos producidos durante la transformación líquido-sólido a la temperatura de solidificación o por debajo de ella conducen a la generación de esfuerzos de fase que pueden conducir a desgarramiento en caliente. [4,6]

Consideraciones de los siguientes aspectos metalúrgicos:

El frente de solidificación, es decir en la zona pastosa ella puede ser, suave o rugosa, así como también puede ser estrecha o amplia y es esquematizada en la figura 3, lo cual depende de la composición de la aleación.

La naturaleza del crecimiento cristalino de las intercaras esquematizado en el la figura 4 esquematiza las isotermas del sólido desde la zona borde o parte externa en placas en ella se muestran los frentes de solidificación para dos casos diferentes que conducen a establecimiento de diferentes gradientes de temperaturas dentro de la pieza que está solidificando. [4]

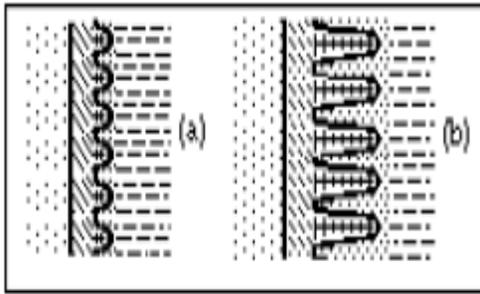


Figura 3. Esquemática de las zonas pastosa de la mazarota. [5]

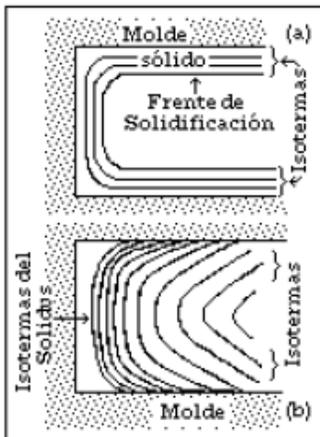


Figura 4. Solidificación para dos casos de las partes externa en placas y muestra los gradientes de temperaturas dentro de la pieza [2].

La nucleación de cavidades, como se ha esquematizado en la figura 5.

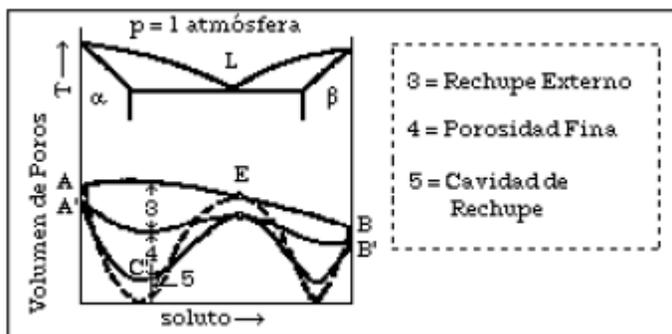


Figura 5. Diagrama de nucleación de las cavidades [2].

La distribución espacial de la temperatura de la dirección del frente de solidificación es decir, de los gradientes de temperatura determinados por ejemplo a partir de las ecuaciones de la solución general de Schwartz.

La presión de alimentación, ecuaciones (3) y (4) y en su forma más simple es importante el factor a ser considerado en el diseño de mazarotas. La presión total de alimentación, h_f , tiene dos componentes, la presión hidrostática, h_g , y la atmosférica h_a . La presión total por unidad de área a una profundidad h dentro del molde es: $h_f = h_g + h_a$; es decir: $p = h \rho + p_a$ (2); donde ρ es la densidad del metal y p_a es la presión atmosférica. Un hecho muy importante a considerar es que el sobredimensionado de las mazarotas crea una excesiva presión metalostática sobre las paredes de los moldes y sobre el metal líquido, lo que conduce a expansión de los mismos y se produce el defecto conocido como movimiento de las paredes de los moldes. [2]

$$\frac{dg_L}{dX_L} = - \left[\frac{1 - \beta}{1 - k_0} \right] \left[1 + \frac{\nabla \cdot \nabla T}{\varepsilon} \right] \frac{g_L}{X_L} \quad (2)$$

Siendo: g_L , la fracción volumétrica de líquido; ε , es la velocidad de enfriamiento; v , es la velocidad de flujo metálico en los espacios ínter dendríticos. Es importante hacer notar, que es este flujo ínter dendrítico la causa primaria de la macro segregación existente en las piezas vaciadas y en lingotes.

$$P = \rho h A \quad (3)$$

Donde P es la presión metalostática total para un metal líquido de densidad ρ a una profundidad h para un área A .

La composición del líquido alimentador, ecuaciones (2, 4, 5), o ecuación de Scheil, con modificaciones y se muestra en la figura 6. [5]

$$\frac{df_L}{dX_{Lm}} = - \left[\frac{1}{1 - k_{\alpha m}} \right] \frac{f_L}{X_{Lm}} - \left[\frac{k_{\beta m} - k_{\alpha m}}{1 - k_{\alpha m}} \right] \frac{df_{\beta}}{dX_{Lm}} \quad (4)$$

$$\frac{df_L}{dX_L} = - \left[\frac{1}{1 - k_0} \right] \frac{f_L}{X_L} \quad (5)$$

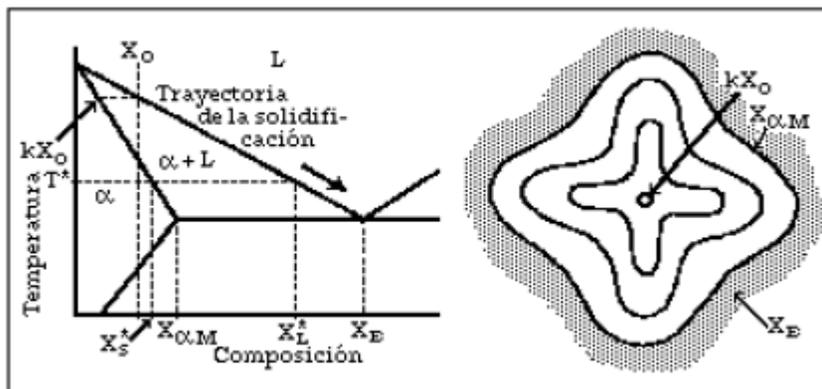


Figura 6. Diagrama de la composición del estado líquido del alimentador [5].

El número de mazarotas que requiere una pieza depende del rango de alimentación de las piezas así como también de otros factores que incluyen a los diseños de moldeo como son los canales de entrada y la direccionalidad de la solidificación. Las mazarotas se utilizan durante la elaboración de piezas de acero, de fundición blanca, de bajo carbono, nodular y altamente aleadas, piezas fundidas de paredes gruesas elaboradas de hierros comunes y también piezas de metales de aleaciones no ferrosas.

Como regla las mazarotas se colocan sobre las partes más densas de los nudos térmicos de las piezas en las cuáles como resultado de una solidificación lenta se forman rechupes y se manifiesta una aguda porosidad. En aquellos puntos de aglomeramientos de metales donde por cualquier causa no se puedan colocar mazarotas por ejemplo, en los nudos térmicos y paredes comprimidas, se utilizan enfriadores. El punto donde se deben colocar y sus dimensiones dependen del tipo de aleación, de la magnitud de la contracción volumétrica (Tabla 1), de la configuración y posición de la pieza en el molde.

Tabla 1 Tipo de aleación, de la magnitud de la contracción volumétrica [5]

Aleación	Contracción volumétrica (%)
Acero (con 0.3% de carbono)	2.5 a 3.0
Acero (1.0% de carbono)	4.0
Aluminio puro	6.6
Cobre puro	4.92
Hierro gris	1.9 hasta negativo, de acuerdo a su composición, grado de grafitización, etc.
Hierro blanco	4.0 a 4.5

Existe un aspecto muy importante a tratar cuando se habla de diseño y cálculo de mazarotas, la solidificación dirigida.

La solidificación dirigida consiste en colocar a las piezas cilíndricas una porción de metal, donde la mazarotas usualmente de forma cilíndrica, con dimensiones tales que solidifica después que la pieza, si suministrando metal líquido que compensa la contracción de solidificación de la pieza sin embargo colocar simplemente una mazarota grande a la pieza no es suficiente para asegurar que la alimentación será de forma apropiada y que la pieza quedará sana. Las mazarotas tienen que estar colocadas de forma que la solidificación se dirige desde las partes más finas de la pieza hacia la mazarota.

Antes hacíamos referencia a los enfriadores esta técnica es de aplicación limitada debido a que los enfriadores no pueden utilizarse si el espesor de la sección de interconexión es menor que un 50% del espesor de la sección del nudo térmico (J. L. Martínez Méndez) y cuando dos secciones pesadas están separadas por una sección intermedia ligera, la solidificación dirigida puede a menudo estabilizarse usando un forro de metal exotérmico de la sección intermedia, este sobre espesor de metal exotérmico también puede usarse para asegurar la correcta alimentación de las secciones cuyo largo excede del rango de alimentación de la mazarota y que no pueden ser alimentados. El uso de estos sobre espesores si no es necesario maquirarlos puede ser económico, pero si deben ser eliminados este método resulta costoso. En tal caso es mejor utilizar casquillos exotérmicos. El elemento que más influye es el volumen de contracción en piezas de aceros porque su contenido de carbono el cuál a medida que aumenta hace mayor la contracción como se puede apreciar en la tabla 2.

Tabla 2 Contracción del acero en función de su contenido de carbono. [2]

Carbono en %	0.1	0.35	0.45	0.7
Contracción en %	2.0	3.0	4.3	5.3

Teóricamente la mazarota debe compensar la contracción volumétrica y contener metal líquido hasta la total solidificación de la pieza o del nudo alimentado. En los cálculos teóricos de las mazarotas se toma en cuenta este volumen mínimo de contracción de metal líquido.

Para ser eficaz, una mazarota debe alimentar de forma continua el metal líquido a la pieza fundida hasta que esta haya solidificado completamente. Así, la mazarota debe tener un tiempo de solidificación más largo que la pieza fundida, ya que el factor crítico que afecta el tiempo de la solidificación es la pérdida de calor, minimizar la pérdida de calor de la mazarota es una consideración importante. Para una mazarota de volumen fijo, una cantidad mínima de pérdida de calor ocurrirá cuando la geometría de la mazarota tiene un área superficial muy pequeña. Una esfera representa el máximo volumen en proporción al área de la superficie (V/A , el módulo de la solidificación máxima), y por consiguiente la proporción más lenta de enfriamiento según la regla de Chvorinov. Sin embargo, las mazarotas esféricas presentan problemas durante su moldeo. Un cilindro con una altura, H , igual a su diámetro, D_m , es la geometría de la mazarota típicamente recomendada, Ya que es simple, de forma fácil para el moldeo teniendo una proporción volumen/superficie alta. Sin tener en cuenta su forma, la mazarota debe ser bastante grande para proporcionar el metal de alimentación suficiente sin porosidad en el conducto de la mazarota que se extiende dentro de la pieza fundida. Como se muestra en la figura 8, hay dos configuraciones de las mazarotas comunes: la mazarota superior que es típicamente más eficaz, y la mazarota lateral. El fondo hemisférico en la mazarota lateral previene el enfriamiento prematuro de la unión mazarota/pieza fundida.

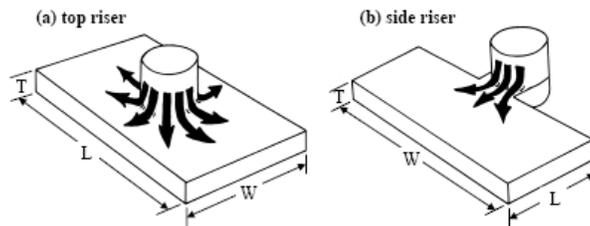


Figura 7. Estructura de la mazarota superior y lateral.

1.2 Tipos de mazarotas.

Los principales tipos de mazarotas se clasifican de acuerdo con el lugar donde se colocan, configuración y forma geométrica, por el principio de funcionamiento y construcción, por los métodos de separación de la pieza.

1. Por el lugar de colocación se clasifican en: superiores y laterales (Figura 7).
2. Por la configuración y forma geométrica en: planas, cónicas, semicirculares, circulares
3. Por el principio de funcionamiento y construcción: abiertas y cerradas; de acción simple, calentada y exotérmica por presión atmosférica y por presión de gas.
4. Por el método de separación de la pieza en: trozadas, golpeadas y de fácil desprendimiento.
5. Por el método de vertido en: mazarotas en la pieza, en el sistema y de acción independiente.

Las mazarotas superiores se colocan directamente en los nudos térmicos de las piezas, estas pueden ser abiertas o cerradas. Las mazarotas abiertas sirven a la vez de respiraderos ya que se utilizan para la salida de los gases y aires del molde, y señalan cuando el molde está lleno. El inconveniente de ella es un aumento del gasto del metal, su altura tiene relación con la altura de la tapa superior y es frecuente que se aumente injustificadamente. La plantilla de la mazarota separable se elabora a parte de la plantilla de la pieza y se extrae del molde como la plantilla del tragadero, en cambio las cerradas permiten disminuir el gasto del metal en ellas y son más económicas.

Las mazarotas superiores cerradas garantizan una alimentación intensiva de la pieza, especialmente cuando se utiliza la presión atmosférica o por presión de gas en el metal líquido. Las mazarotas cerradas se utilizan cuando el moldeo es a máquina y también en aquellos casos que la caja superior es muy grande. Estas mazarotas se elaboran en unas plantillas enterizas con la plantilla de la pieza y se extrae de la cavidad del molde conjuntamente con esta.

Son preferibles por su forma las mazarotas circulares y esferoidales, ya que en estas en comparación con las abiertas hay una relación mínima de la superficie exterior de la mazarota con el área de su sección. Las mazarotas circulares deben tener protector de mazarotas cuyo radio debe ser igual a la mitad del radio de la mazarota.

Las mazarotas laterales alimentan la pieza considerablemente menos y deben colocarse más arriba del nudo alimentado y el cuello que une la mazarota con el nudo debe ser corto y tener una sección mínima de enfriamiento. Estas se deben utilizar en caso extremo al mismo tiempo que se recomienda acelerar su acción por medio de presión atmosférica o de gas. En las mazarotas cerradas después del vertido en el molde y durante la solidificación de la pieza se forma una capa endurecida de metal, la cual aísla la mazarota de la atmósfera. Con el fin de conservar el máximo de tiempo posible una alta temperatura del metal, en la mazarota se utiliza mezclas especiales termo aislador y exotérmico, con las cuales se reviste el molde alrededor de la mazarota. Estas mezclas termo aisladoras poseen poca conductividad del calor, durante el moldeo la plantilla se recubre con esta mezcla como mezcla de cara y se apisona. Las mezclas exotérmicas no solo demoran el enfriamiento, sino que en ellas por la acción del metal líquido se produce una reacción química con desprendimiento de calor a consecuencia de la cual la mazarota se calienta. Con estas mezclas se elaboran boquillas, vasos de diferentes dimensiones con cavidades interiores que poseen la forma de la mazarota. Los vasos y los bujes, se colocan en el molde para formar las mazarotas en la pieza. El metal en la mazarota permanece un largo tiempo líquido y alimenta perfectamente la pieza.

En aquellos casos cuando las dimensiones de las mazarotas sobrepasan los límites de las boquillas y los vasos normalizados se utilizan mezclas exotérmicas para el calentamiento de la mazarota. La plantilla de la mazarota es recubierta por esta mezcla y el espesor de la capa de mezcla debe ser mayor o igual que 0.15 del diámetro de la mazarota.

Para facilitar la separación de la pieza se utilizan mazarotas de fácil desprendimiento. Entre la pieza y la mazarota se coloca un diafragma con un orificio en el centro a través del cual se efectúa la alimentación de la pieza con metal líquido desde la mazarota. Por las dificultades que surgen en las condiciones de alimentación estas mazarotas se recomiendan para piezas de poca importancia.

Los diafragmas se elaboran de láminas finas de acero que se pintan y recubren con arena, también se usan como diafragmas, machos en forma de placas finas con orificios, utilizando mezclas especiales de moldeo para su preparación.

1.3 Métodos para calcular la geometría de las mazarotas.

Se debe realizar el cálculo de las mazarotas y del sistema de alimentadores. Las mazarotas, los respiraderos y los sistemas de alimentación se utilizan para la obtención de las piezas de fundición blanca, de aleación de alta resistencia, como también para piezas con paredes gruesas de fundición, ellos sirven para alimentar las partes gruesas de la pieza.

Las mazarotas se disponen de tal manera que la masa fundida en ellas se solidifique en último término con el propósito de que vaya cediendo metal líquido a la pieza. En la pieza además hay que dirigir la solidificación desplazando el nudo (la parte más masiva) hacia la parte superior de la misma, siempre que sea posible o utilizando enfriadores, evitando aglomeraciones locales de metal.

Antes de comenzar a hablar sobre los cálculos de las mazarotas es necesario que conozcamos el concepto de solidificación dirigida.

1.3.1 Solidificación dirigida.

La medida principal que asegura la obtención de piezas fundidas sin defectos de contracción es la solidificación dirigida. Sin embargo, el diseño teniendo en cuenta este principio lleva en muchos casos un gasto grande de metal líquido a la complicación del modelado, el aumento del peligro es la aparición de grietas causadas por una diferencia grande de temperaturas en diversas partes de la pieza fundida y a una contracción frenada de la pieza.

Por eso, en concordancia con el principio de solidificación dirigida, generalmente se construyen piezas fundidas en las cuales se plantean exigencias elevadas con respecto a la densidad y hermeticidad. En el caso de la solidificación dirigida de la pieza fundida la cristalización del metal ocurre desde las secciones más finas de la pieza hasta situarse en la parte inferior del molde hacia las macizas que se sitúan en la parte superior del mismo. En este caso cada parte de la pieza que está situada más arriba se alimenta con metal líquido a las partes inferiores sirviendo para estas las mazarotas. Para asegurar la solidificación dirigida se comprueba la regularidad del diseño tecnológico de la pieza fundida por el método de las circunferencias inscritas.

Otro elemento a tener en cuenta en el diseño de la mazarota es la distancia de alimentación cuando una mazarota alimenta una placa o una barra cilíndrica, lo hará de forma efectiva hasta una distancia determinada (figura 8), de hecho en el acero por ejemplo, la distancia que ella alimentará es muy limitada, existiendo reglas bien definidas que establecen estos límites para formas simples como placas, barras, entre otras.

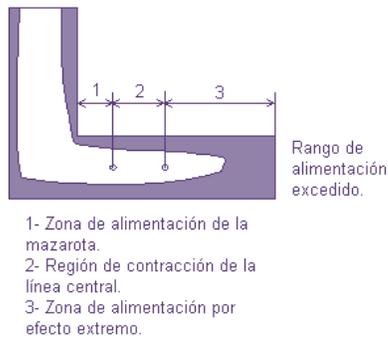


Figura 8. Diseño de la distancia de alimentación en la mazarota. [6]

Existen tablas donde se muestran las distancias de alimentación para las distintas aleaciones, si los extremos de la pieza están fuera del rango de alimentación de la mazarota resultará un rechufe central en la región de los frentes de solidificación. Si se requiere de una alta sanidad de la pieza, es imprescindible, que estas reglas para los rangos de alimentación sean cumplidas. Sin embargo hay muchas piezas fundidas comerciales donde se permiten rechufes centrales en áreas no críticas, en estos casos el rango de alimentación de las mazarotas puede extenderse en un 25 o 30%, en el servicio de la pieza.



Figura 9. Rangos de alimentación para una pieza [4, 6,7].

El rango de alimentación de las piezas consta de dos zonas, figura 8-9, una se produce en el extremo de la pieza por el rápido enfriamiento causado por la presencia de bordes y esquinas, la otra se produce ya que el alimentador retarda la solidificación de las partes adyacentes de la pieza, en ambas zonas los frentes de solidificación son cónicos y el rechufe central ocurre en la sección intermedia, donde los frentes de solidificación opuestos son paralelos. Es ventajosa la preparación de las piezas, sacar tanto partido como sea posible de los bordes y extremos de la pieza, ya que esto ayuda considerablemente la alimentación y minimiza el número de mazarotas requeridas.

La figura 10 indica que donde no existen los efectos de extremo, como en el caso de una llanta de una rueda o de una placa grande que debe ser alimentada con varias mazarotas, las distancias de alimentación y por lo tanto las distancias entre mazarotas son muy cortas, como por ejemplo de placas donde la distancia entre mazarotas puede ser solo cuatro veces el espesor de la sección si el rechufe tiene que ser extraído.

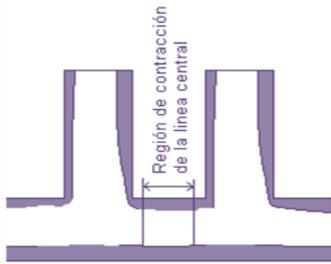


Figura 10. Demostración donde no ocurre los efectos de extremos [4, 6,7].

Las distancias entre mazarotas siempre se miden desde los bordes de las mismas y no desde su centro, cuando se usan mazarotas termoaislantes las distancias de alimentación se miden desde el diámetro exterior del casquillo, sin embargo hay un método muy útil para extender los rangos de alimentación en estos casos consisten en un enfriamiento sustancial en el medio de la distancia entre las mazarotas, figura 11 (a-b).

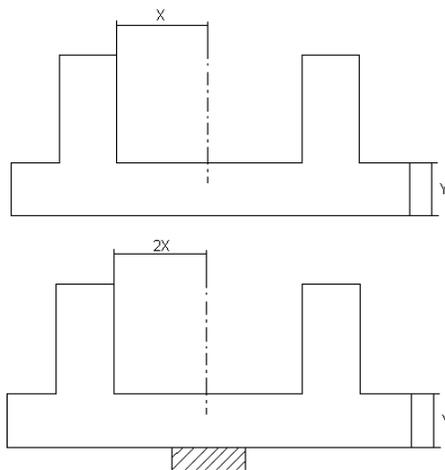


Figura 11. a-b Las geometría entre dos mazarotas [4, 6,7]

Con placa fundida este sistema extiende la distancia admisible entre mazarotas en más de un 100%, ejemplo una placa con Y mm de espesor, la distancia de alimentación se extiende desde X mm hasta 2X mm por mazarota.

Como resultado en la llanta de una rueda puede usualmente omitirse cualquier mazarota, los enfriadores usados para este propósito deben ser de sección cuadrada, cuyo lado sea aproximadamente igual al espesor de la sección de la pieza.

También puede obtenerse cierta extensión del rango de alimentación, aumentando el efecto de enfriamiento de los cantos de la pieza, mediante enfriadores situados en los extremos de la misma, sin embargo dicha extensión no es muy grande, generalmente unos 50 mm así que este método a menudo no es conveniente, no obstante puede ser económico en los casos donde ubicar un enfriador en el extremo de la pieza hace posible eliminar una mazarota. [4, 6,7]

A continuación se reflejan algunos de los métodos más utilizados y referenciados en la literatura para determinar las dimensiones de las mazarotas en piezas fundidas de acero.

1.3.2 Métodos de cálculo.

Método de Caine.

Está basado en la experimentación y puede ser aplicable a todos los metales y aleaciones; se fundamenta en los principios de la Regla de Chvorinov que establece que el tiempo de solidificación de una pieza está gobernado por la relación $(\text{Volumen}/\text{Área})^2$, mediante el uso de la hipérbola:

$$x = \frac{a}{y-b} + c \quad (6)$$

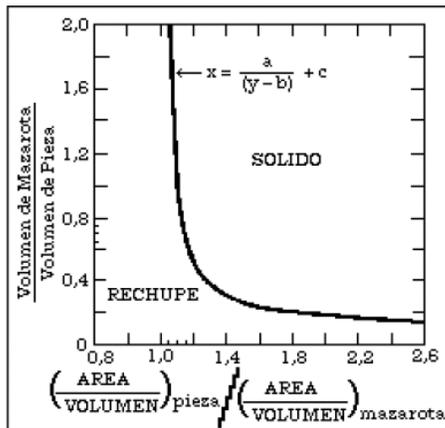


Figura 12. Gráfica resultante de la aplicación de la ecuación de Caine.

Donde, a x se le denomina la relación de solidificación, que corresponde al tiempo relativo necesario para que se complete la solidificación; y es la relación volumétrica, dadas por las expresiones:

$$x = \frac{\left(\frac{\text{Area}}{\text{Volumen}} \right)_{\text{Pieza}}}{\left(\frac{\text{Area}}{\text{Volumen}} \right)_{\text{Mazarota}}} \quad (7)$$

$$y = \frac{\text{Volumen}_{\text{Mazarota}}}{\text{Volumen}_{\text{Pieza}}} \quad (8)$$

a es una constante característica de la solidificación;

b es la contracción de solidificación líquido-sólido;

c es la velocidad relativa de enfriamiento entre la mazarota y la pieza.

De manera gráfica, esto se presenta en la figura anterior donde se puede ver que la curva expresada por la ecuación 6 divide la gráfica en dos regiones, una sólida que corresponde a la pieza sana y otra en donde la pieza presenta rechupe y por lo tanto es insana. Esta figura puede interpretarse como si la curva nos indicara que para un volumen dado de pieza, existe un tamaño mínimo requerido de mazarota; lo cual representa la cantidad de metal requerida para alimentar el rechupe de solidificación.

La figura 13 coteja los resultados experimentales con los dados por la curva hiperbólica para un conjunto de piezas manufacturadas en un determinado acero, que solidifica bajo específicas condiciones de enfriamiento que siempre son las mismas. Cuando en una pieza se requieren múltiples mazarotas, la determinación del tamaño de ellas se basa en la relación Área Superficial a Volumen de la porción de la pieza alimentada por esta mazarota. Si la pieza es de forma irregular, es de esperarse que las mazarotas sean de diferentes tamaños.

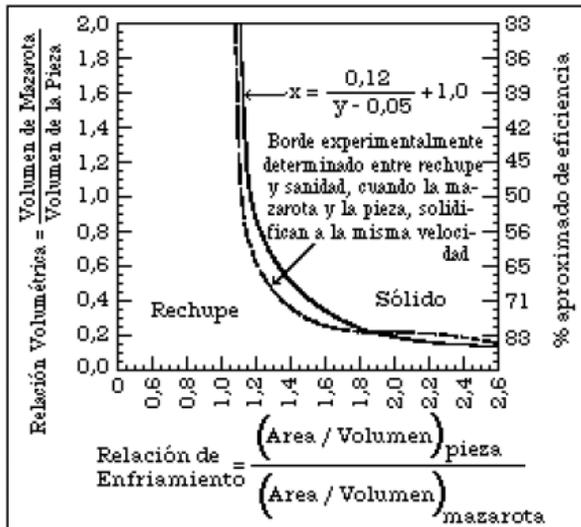


Figura 13. Curva arreglada.

Método de N. R. L.

Fue desarrollado en el Naval Research Laboratory, para obtener el mínimo tamaño de mazarota cilíndrica, capaz de alimentar piezas cuyas geometrías son cubos, barras, y placas, manufacturadas en aceros. Usa el concepto del Factor de Forma, F_f , para sustituir la relación (área Superficial/Volumen) desarrollado por Caine. $F_f = (L + W)/T$ donde L es longitud, W es ancho, y T es espesor de la sección considerada.

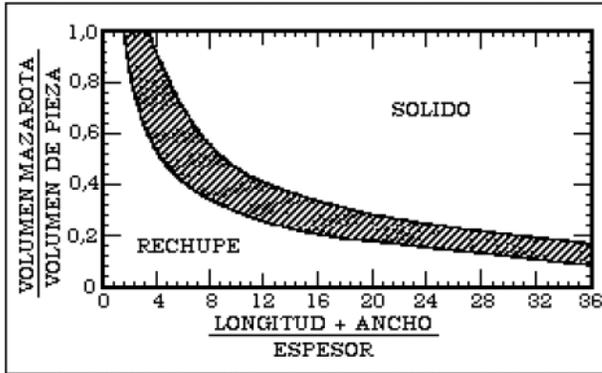


Figura 14. Gráfico de la relación V_m/V_p .

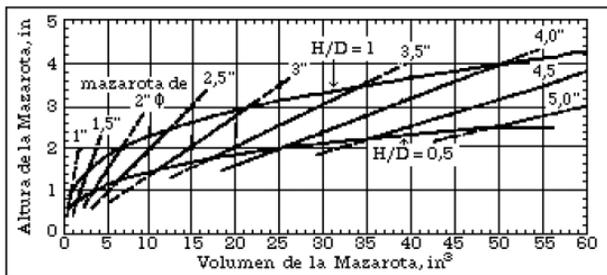


Figura 15. Gráfico de H vs V_m .

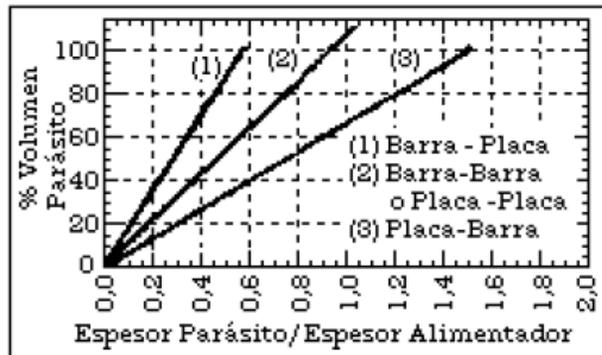


Figura 16. Gráfico de la relación δ apéndice/ δ pieza principal.

En forma gráfica se expresa en la figura 14 para una determinada relación (H/D), siendo H y D la altura y el diámetro de la mazarota, respectivamente. El procedimiento utilizado para el cálculo de la mazarota consta de cuatro etapas y es el siguiente:

- Determinación de F_f mediante el uso de las dimensiones del cuerpo principal de la pieza ó de la sección a ser considerada.
- Derivación de la relación (V_m/V_p) a partir de la figura 14.
- Se calcula el volumen de la mazarota, V_m , a partir del de la pieza.

- Para obtener el diámetro de la mazarota, D , se utilizan gráficas de volumen de mazarota en función de su altura para la relación (H/D) , figura 15 donde la altura de la mazarota que corresponde a las líneas inclinadas están delimitadas por $(H/D) = 1$ y $(H/D) = 0,5$ como valores extremos. Es conveniente seleccionar el tamaño de la mazarota en función de la curva para $(H/D) = 1$ y ajustarla experimentalmente.

Para piezas de geometría complicada, se usa la figura 17, donde cada sector de la pieza se ajusta con las figuras simples de placa y barra, donde una de ellas alimenta a la otra y la mazarota se coloca en la pieza alimentadora. A partir de la relación (espesor del apéndice/espesor de la pieza principal), su resultado se usa para determinar el tamaño de la mazarota.

Método del módulo de enfriamiento.

Desarrollado por R. Wloadawer basado en la Regla de Chvorinov extendido a consideraciones sistemáticas sobre materiales exotérmicos, rellenos, enfriadores, y otras ayudas para lograr solidificación direccional. Consiste este método en determinar el Módulo de Enfriamiento, M , dado por la relación:

Módulo de Enfriamiento, $M = [\text{Volumen} / (\text{Área Superficial de Extracción de Calor})]$

La pieza se divide en tantas formas básicas como sean necesarias, a las cuales se les determina sus módulos de enfriamiento, teniendo cuidado de no considerar áreas comunes entre secciones donde no se extrae el calor. Para aceros, la cavidad máxima de rechupe es de aproximadamente 14% y se toma: $M_m \geq 1,2 M_p$, siendo M_m el módulo de la mazarota y M_p el módulo de la pieza. Se parte del principio de que dos piezas con igual valor del módulo, solidifican en el mismo tiempo, independiente de la forma geométrica que ellas tengan.

La ubicación de las mazarotas puede ser sobre la zona a ser alimentada y se les llama mazarotas superiores, figura 17 a o pueden ser mazarotas laterales; de igual manera, pueden ser abiertas a la atmósfera o ser mazarotas ciegas, figura 17 b, donde su conexión con la atmósfera se realiza a través de un macho hecho en arena.

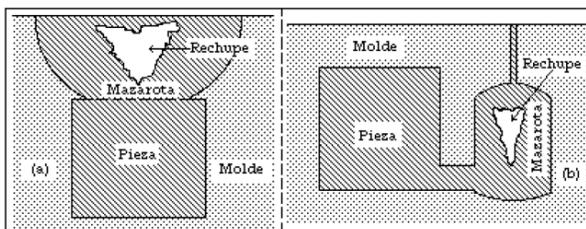


Figura 17. Principales formas de las mazarotas por su localización en la pieza.

Método de los círculos inscritos.

Este método es uno de los más utilizado por nuestros tecnólogos, es el que aparece en la guía tecnológica de Belay, el método de los círculos circunscritos.

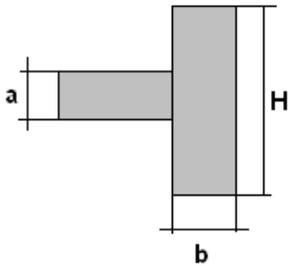
Por este método se determina el ancho B o el diámetro de la sección inferior de la mazarota D_m , a la vez que se resuelve el problema de la necesidad de márgenes

tecnológicos utilizando el principio de la solidificación dirigida. Se determina el volumen de metal necesario para compensar los rechupes que se forman en la pieza.

Como nuestro caso es una rueda y el principal tipo de nudo térmico que aparece es el que forma la llanta con los rayos o disco interior y este se toma como una unión en T se muestran los pasos para la determinación de las dimensiones de las mazarotas:

Determinar, a partir de conocer el espesor de la llanta la altura de la pieza y el espesor del nervio, el diámetro del nudo térmico.

$$d = b + \frac{(3*a + b)^2}{8*(a + b)} \quad (\text{El significado se aprecia en la figura}) \quad (9)$$



Determinar el ancho de la base de la mazarota B.

$$B = d + 0.4 * H * \text{tg} 3^{\circ} = d + 0.02 * H \quad (10)$$

Calcular el diámetro de la circunferencia para el metal de compensación (d_0).

$$d_0 = 0.2 * \sqrt{H * b + 2 * a^2} \quad (11)$$

Determinar el diámetro de la mazarota:

$$D_m = b + d_0 \quad (12)$$

Determinar la altura:

$$H_m = d_0 + 1.35 * D_m \quad \text{Mazarotas abiertas} \quad (13)$$

$$H_m = d_0 + 0.85 * D_m \quad \text{Mazarotas cerradas} \quad (14)$$

Método de la distancia de alimentación.

Este estudio realizado por Beckermann y al cual se hacía referencia anteriormente aplica varios de los conocimientos que se aprecian en otros métodos, fundamentalmente la determinación del factor de forma y la división de la pieza en partes simples. Su metodología de cálculo es la siguiente:

(1) Con el conocimiento de W y T, se calcula la distancia de alimentación ($F_D = \text{EZL} + \text{RZL}$) en la figura 20 se determinan estos valores, para la configuración bajo la consideración (note que para las mazarotas laterales, una estimación del

diámetro de la mazarota puede también necesitarse; vea el próximo paso). Decida si usar enfriadores o no.

(2) Usando la distancia de alimentación como base, estime el número de mazarotas requerido, así como la longitud L de la sección de la pieza fundida a ser alimentada por cada mazarota. Si se necesita más de una mazarota para alimentar la sección, estime el diámetro de la mazarota (D_R), se puede tomar un diámetro inicial de $D_R = 3T$ (o $2T$ para cuando $W/T \ll 1.0$) debe estar relativamente cerca.

(3) Se calcula el factor de forma, $SF = (L + W)/T$, de la sección que alimenta la mazarota.

(4) Se determina el volumen de la pieza fundida, $V_C = L \times W \times T$, alimentado por la mazarota.

(5) Se obtiene el volumen de la mazarota, V_R , usando Figura 11 ó la expresión siguiente:

$$V_R = 2.5V_C(SF)^{-0.74} \quad (15)$$

Calculando el diámetro de la mazarota D_R si se conoce el volumen V_R y la forma de la mazarota. Si la mazarota es un cilindro con la altura $H = D_R$, el diámetro puede calcularse directamente de:

$$D_R = \sqrt[3]{3.20V_C(SF)^{-0.74}} \quad (16)$$

(6) Se chequea si el diámetro de la mazarota calculado está razonablemente cerca de la estimación inicial. Si no, se va a la segunda etapa, y se usa el diámetro calculado de la mazarota como la próxima suposición para D_R .

(7) Se calcula la distancia del borde de la mazarota al punto más distante en la sección de la pieza fundida a ser alimentada por esa mazarota.

(8) Por último se chequea que la distancia de alimentación es mayor o igual a la distancia encontrada en el paso 7 para esa sección de la pieza fundida. En ese caso, el procedimiento de dimensionamiento de la mazarota está completo. Si no, las mazarotas necesitan ser redistribuidas, y los pasos del 1 al 7 deben repetirse.

Aquí se usan un grupo de datos experimentales dados en tablas lo que presupone la incorporación de ciertos errores en los cálculos anteriores.

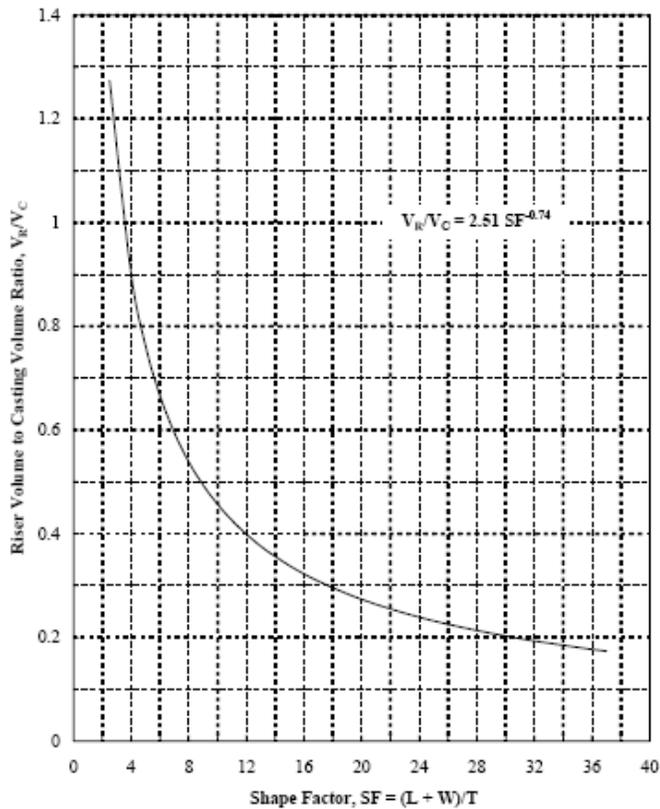


Figura 18. Relación volumen de la mazarota/volumen de la pieza fundida en función del factor de forma.

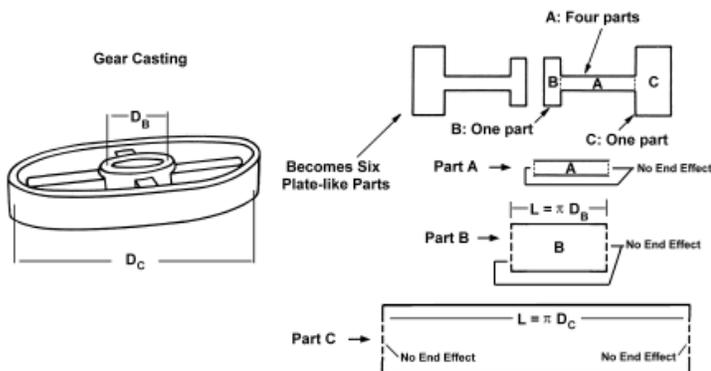


Figura 19. División de una pieza tipo rueda en partes simples.

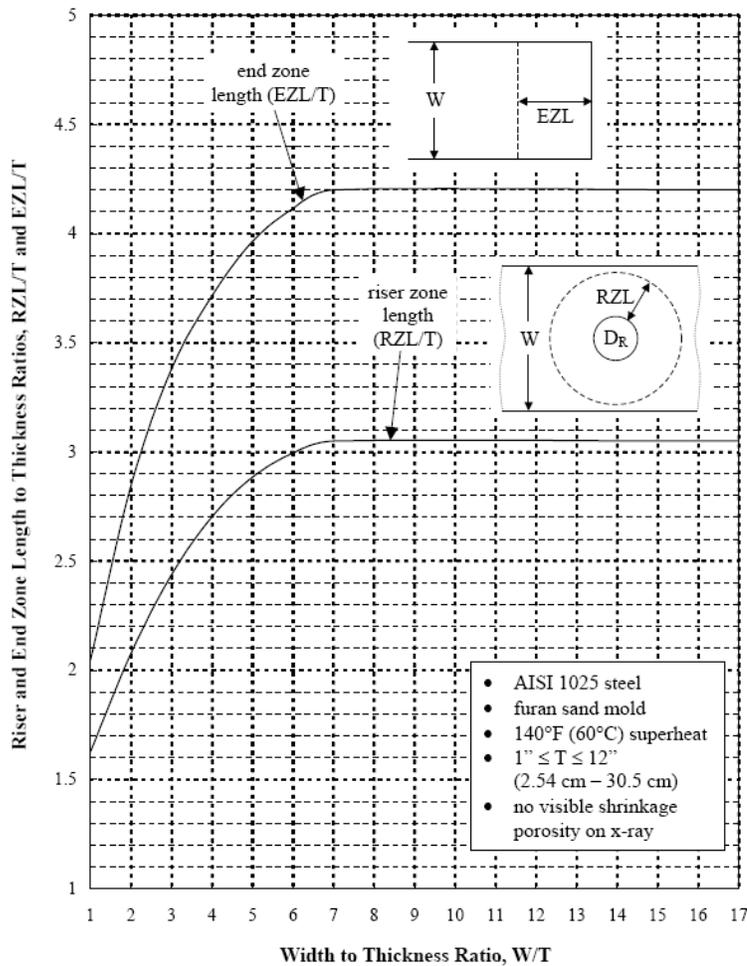


Figura 20. Longitud de la zona de la mazarota y final en función del ancho y el espesor de la pieza fundida.

1.4 Métodos de cálculo de la distancia de alimentación.

1.4.1 Distancia de alimentación.

La distancia de alimentación (D_a) es la distancia máxima a la cual una mazarota puede alimentar y proporcionar el metal que la sección de la pieza fundida necesita para permanecer relativamente libre de la porosidad interior [1].

La distancia de alimentación determina el número de mazarotas necesarias siempre es medida desde borde de la mazarota al punto más alejado en la sección de la pieza fundida a ser alimentada por ella. Esto se ilustra para un plato con una mazarota superior en la figura 21, y para un plato con una mazarota lateral en la figura 22. Cuando tenemos mazarotas múltiples, la distancia de alimentación entre las mazarotas se llama alimentación lateral. La distancia de la alimentación lateral (LFD) es de nuevo la distancia máxima a la cual una sola mazarota puede alimentar y proporcionar el metal líquido.

Si uno dibujara una línea que separara la sección de la pieza fundida a ser alimentada por la mazarota y la sección a ser alimentada por una mazarota adyacente, la distancia de alimentación lateral LFD es entonces la distancia del borde de la mazarota al punto más alejado en la pieza fundida a lo largo de esta línea. Esto se ilustra en la figura 8.

Otra manera de explicar cómo las distancias de alimentación son medidas es dibujando un círculo centrado alrededor de la mazarota con un radio igual a la distancia de alimentación más el radio de la mazarota (vea las figuras 21-23).

Entonces la sección de la pieza fundida dentro del círculo se alimenta por esa mazarota. Para piezas fundidas con múltiples mazarotas como en la alimentación lateral, los círculos deben solaparse de forma tal que todas las secciones de la pieza fundida estén dentro de ellos.

1.4.2. Factores que influyen en la distancia de alimentación.

La distancia de alimentación depende en parte del gradiente de temperatura, que es el cambio en la temperatura por unidad de longitud durante la solidificación. La figura 17 b ilustra cómo un gradiente de temperatura alto facilita la alimentación de una pieza fundida. La forma de la capa superficial sólida que rodea el metal líquido varía con la pendiente del gradiente de temperatura durante el enfriamiento. Los gradientes grandes proporcionan pasajes abiertos de alimentación, más accesibles, allí existe un ángulo estrecho crítico para que la parte líquida alimente la contracción de la solidificación también existe otros ángulos más pequeños que la línea central de la contracción estará formada por pequeñas cantidades de líquido aisladas del camino de la alimentación. Esto se muestra en figura 17 a.

La distancia de alimentación también depende de la velocidad de enfriamiento del acero durante la solidificación, y del espesor de la sección.

Para grandes velocidades de enfriamiento/solidificación (pequeño espesor de la sección), la distancia de alimentación es más pequeña porque la velocidad a que el metal de alimentación debe fluir para compensar la contracción, acompañando esta gran velocidad de alimentación del metal se incrementa la caída de la presión a lo largo del camino de la alimentación que a su vez promueve la formación de porosidad, ya que ambas el gradiente de temperatura y la velocidad de enfriamiento, son influenciadas por factores tales como:

- La geometría de la sección.
- Las condiciones de colada.
- El tipo de acero.
- El material de moldeo.

Por tanto la distancia de alimentación variará con todos estos parámetros.

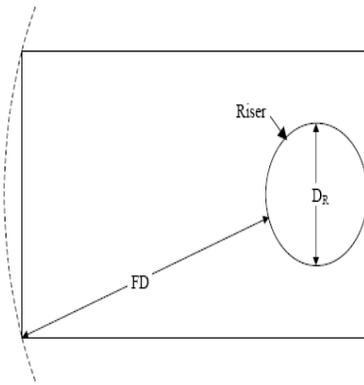


Figura 21. Ilustración del concepto de distancia de alimentación D_a : la distancia de alimentación se mide siempre desde el borde de la mazarota hasta el punto más alejado de la sección de la pieza fundida a ser alimentado por esa mazarota.

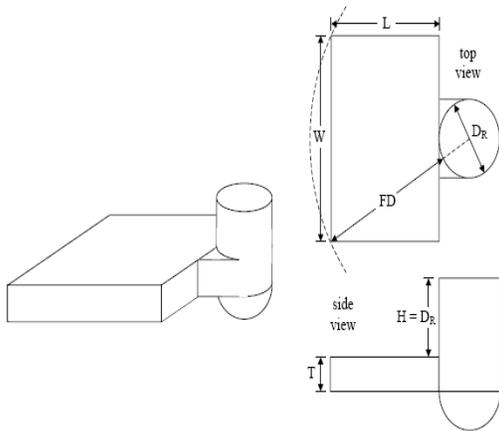


Figura 22. Definición de las dimensiones de la placa para mazarota lateral con efecto final de enfriamiento. [4]

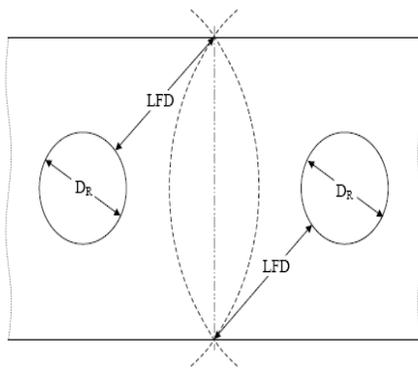


Figura 23. Ilustración de la alimentación lateral entre dos mazarotas, la distancia de alimentación lateral (LFD) se mide siempre desde el borde de la mazarota hasta el punto más alejado de la sección de la pieza fundida a ser alimentado por esa mazarota. [4]

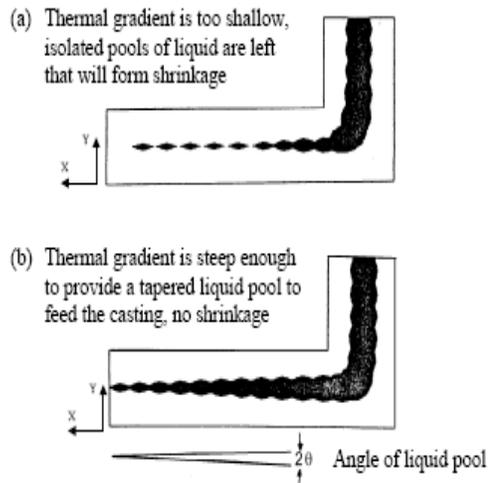


Figura 24. Ilustración de una placa fundida con (b) y sin (a) el adecuado gradiente. [4]

Hay dos términos que son importantes entender cuando consideramos las distancias de alimentación: la zona de la mazarota y zona final. Ya que la mazarota permanece más caliente que la sección de la pieza fundida a alimentar, esto proporciona un gradiente de temperatura que facilita la alimentación. La longitud sobre la cual la mazarota actúa efectivamente para prevenir la porosidad de contracción es llamada longitud de la zona de la mazarota (RZL). Esto se ilustra para una mazarota superior en la figura 25. El efecto del enfriamiento del molde al final de una sección de la pieza fundida también proporciona un gradiente de temperatura a lo largo de la longitud de la sección de la pieza fundida que será alimentada. Esto se llama efecto final, y produce una pieza fundida sana sobre la así llamada zona de longitud final (EZL). Esto se describe en la figura 26. Las distancias de alimentación son funciones de RZL y EZL; esto será discutido en la sección 4.

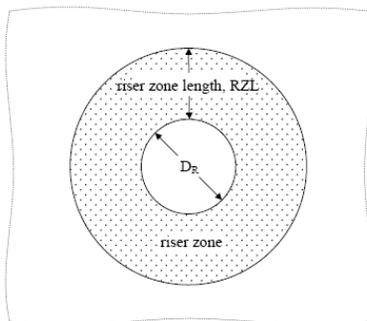


Figura 25. Ilustración de la zona de alimentación de la mazarota (RZL sin efecto final: note que la distancia de alimentación de la mazarota (RZL) es independiente del diámetro de la mazarota (D_R)).

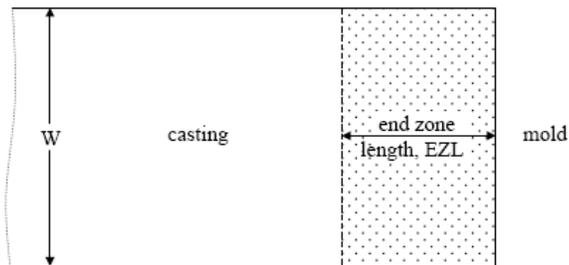


Figura 26. Ilustración del efecto de la zona final (EZL) en la sección de la pieza fundida: note que (EZL) es función de W para valores de W/T menores que 7.

A veces se usan métodos para aumentar las distancias de alimentación. Los enfriadores finales crean un gradiente de temperatura adicional y refuerzan la longitud de la zona final (y así la distancia de alimentación); pero no tiene efecto en la longitud de la zona de la mazarota. La distancia de alimentación lateral puede reforzarse por el uso de enfriadores inferiores. Un enfriador inferior no aumenta la longitud de zona de la mazarota, sino causa un gradiente de temperatura que esencialmente crea un efecto final entre las mazarotas contiguas. Un camino de alimentación abierto también se promueve por una conicidad dónde el espesor de la sección continuamente aumente hacia la mazarota. De hecho, una conicidad suficientemente grande puede producir una distancia de alimentación infinitamente larga.

1.5 Conclusiones parciales.

Al final la forma más eficiente que debe tener una mazarota, es aquella que sea capaz de minimizar las pérdidas de calor, de manera que el metal permanezca en estado líquido el mayor tiempo posible y la mazarota solidifique después de la pieza, garantizando que el rechazo que necesariamente va ocurrir quede dentro de la mazarota y la pieza se obtenga sana. Estos diversos métodos de calcular las mazarotas para piezas fundidas de acero son muy eficientes, aunque algunos de ellos tienen que usar menos metal que otro, por lo que la distancia de alimentación es menor, al igual que el diámetro de la mazarota.

The background of the page is white, featuring several thin, hand-drawn purple lines. These lines are abstract and intersecting, creating a complex, geometric pattern. Some lines are straight, while others are curved, forming loops and shapes that resemble a stylized sketch or a technical drawing. The lines are scattered across the page, with a higher concentration in the right half.

Capítulo II

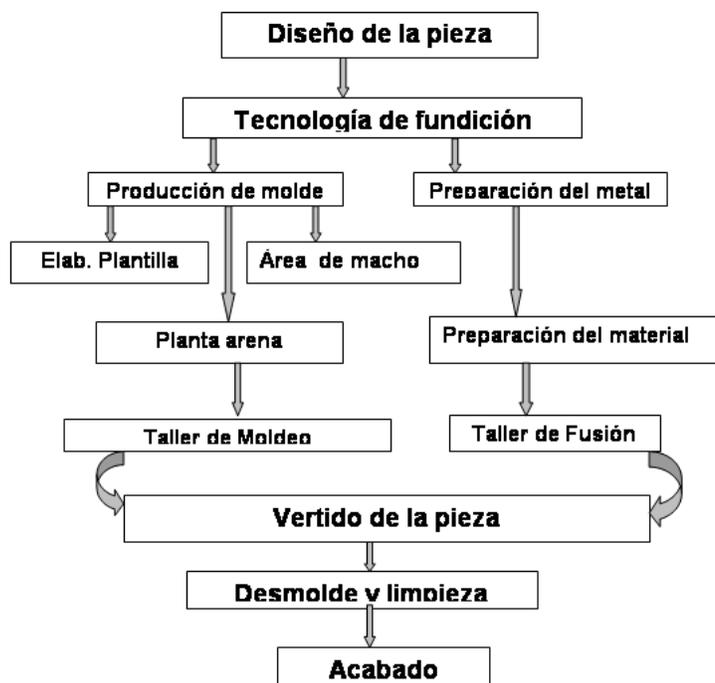
Capítulo II

Capítulo II: Experimentación y cálculo para determinar la distancia de alimentación.

En este capítulo se realizó el análisis de los experimentos de las piezas fundidas en la Empresa Planta Mecánica con el objetivo de determinar la distancia de alimentación teniendo en cuenta el tipo de mazarota que se debe usar, los materiales empleados en el proceso, así como la metodología de fundición, se utilizó el método de la distancia de alimentación para calcular la geometría de la mazarotas y se valoró la calidad de la fundición.

2.1 Etapas del proceso de fundición.

1. Moldeo.
2. Fusión.
3. Vertido.
4. Desmolde, limpieza, acabado.



Esquema 1. Proceso de fundición de una pieza.

2.1.1 Preparación de la mezcla.

Una mezcla de moldeo en su forma más simple es la unión de diferentes materiales capaces de producir un material de construcción con el cual se puede elaborar el molde, o sea la cavidad donde se verterá el metal fundido. Cuando se preparan las mezclas para el moldeo de la plantilla, estas deben responder a determinadas exigencias impuestas por el proceso tecnológico como son: permeabilidad, resistencia en verde, resistencia en seco, plasticidad

y otros, por lo tanto la selección de los materiales de moldeo responderá por tanto a determinadas normas, que depende fundamentalmente de la complejidad de la pieza y el peso de esta. Cuando algunos de los parámetros citados no corresponde a los admisibles, se deben regenerar las propiedades de las mezclas corrigiendo su composición.

En el caso del molde, el mismo se elaborará con las siguientes mezclas:

MC -1: Mezcla de cara para piezas fundidas de acero en base a arena de sílice y silicato de sodio para moldes. Composición: Arena de Sílice 94% y silicato de sodio 6%. La cual ocupará en el molde en un 30%.

2.1.2 Elaboración de la tecnología de fundición.

Esta etapa resulta fundamental en la posterior obtención de un semiproducto sano. En el diseño de la tecnología, se debe valorar, la posibilidad de obtener la pieza fundida de la forma más económica, para ello se debe seleccionar el método de moldeo más correcto en dependencia del material y condiciones de trabajo de la pieza. En la empresa a desarrollar dicha tecnología se utiliza el moldeo a mano con la ayuda del pisón neumático. En el caso de la presente pieza, se realizará un moldeo en seco, con el proceso Silicato-CO₂ se utilizarán dos cajas de moldeo una superior y otra inferior cuyas dimensiones serán 1000 x 300 x 200/200 respectivamente. La caja de moldeo sirve para dar a la arena apisonada un sostén adecuado a fin que las partes del molde no se desmoronen, así como para poder ser transportadas sin dificultad.

Otro requisito a tener en cuenta a la hora de elaborar la tecnología es el plano divisor del molde y de la plantilla. Y la posición de la pieza durante el vertido. Dicho plano división se determinará según la forma de la pieza, las exigencias técnicas y las posibilidades técnicas del taller, se debe tener en cuenta también que la cantidad de divisiones del molde sea la mínima, siguiendo una forma geométrica simple. El plano divisor debe asegurar la comodidad del moldeo y fácil extracción de la plantilla además que debe asegurar la salida fácil de las cavidades del molde.

Se debe realizar el cálculo de las mazarotas y del sistema de alimentadores. Las mazarotas, los respiraderos y los sistemas de alimentación se utilizan para la obtención de las piezas de fundición blanca, de aleación de alta resistencia, como también para piezas con paredes gruesas de fundición, ellos sirven para alimentar las partes gruesas de la pieza.

Las mazarotas se disponen de tal manera que la masa fundida en ellas se solidifique en último término con el propósito de que vaya cediendo metal líquido a la pieza. En la pieza además hay que dirigir la solidificación desplazando el nudo (la parte más masiva) hacia la parte superior de la misma, siempre que sea posible o utilizando enfriadores, evitando aglomeraciones locales de metal. El espesor de la mazarota tiene que ser mayor que el espesor pieza de esta forma las cavidades por rechupe y las intensas porosidades que como resultado de la solidificación del metal ocurren se forman en la mazarota que es la última en enfriar y que posteriormente luego de solidificada la pieza se oxican y se desechan, quedando una pieza sana.

Los alimentadores son canales destinados a conducir el metal líquido directamente a la cavidad del molde. La sección de los alimentadores debe tener una configuración tal que la masa fundida llegue suavemente a la cavidad del molde, y se enfríe poco en el trayecto.

La pieza en análisis por su forma y diseño presenta una mazarota, un alimentador y un tragadero. Para determinar los mismos se realizaron los cálculos y esbozos de los elementos del sistema de alimentación, de las mazarotas, nervios, etc. los cuáles serán mostrados posteriormente.

Plantillería.

En esta área, operarios de alta calificación y pericia elaboran en madera las plantillas con la configuración de la pieza fundida que servirán de modelos para elaborar la cavidad vacía del molde, que posteriormente se llenará con metal líquido.

Planta Arena.

En esta área se preparan las mezclas con las composiciones adecuadas, en mezcladoras especiales para el efecto.

Moldeo.

Es una de las áreas más compleja del proceso, en ella se elaboran los moldes y los machos. Se pintan y se ensamblan dejándolos listos para el vertido del metal.

Fusión.

Para poder vertir el metal en los moldes el metal debe pasar por un proceso de fusión, en el cual se le elevará la temperatura hasta su punto de fusión llevándolo a un estado líquido y suministrándole determinados elementos los cuales llevaran a la obtención del metal deseado, en este caso el acero AISI 1045.

Tabla 3 Composición química del acero AISI 1045.

Carbono	Silicio	Manganeso	Fosforo	Azufre
0.43 -0.50 %	0.2-0.5%	0.6-0.9 %	=0.04%	=0.05%

Un factor determinante en este proceso es la elección del horno. Existen varios tipos de hornos entre ellos tenemos:

El cubilote: Es un horno utilizado en la mayoría de las fundiciones por razón del buen aprovechamiento de los combustibles, facilidad de maniobra y pequeños gastos en la instalación y conservación.

Horno de reverbero: Indicado cuando se trata de fundir piezas de gran tamaño.

Horno de crisol: Tiene la ventaja de que se elimina el contacto del hierro con los combustibles, pero a su vez es muy costoso y se emplea en fundiciones de alta calidad.

Horno eléctrico: Posee ventajas indiscutibles sobre cualquier otro tipo de horno como sencillez y rapidez de las operaciones, la ausencia de ventiladores, combustibles etc.

Es frecuente el empleo de este tipo de horno, con una capacidad nominal de 6.2 toneladas, de revestimiento básico con ladrillos de magnesita en la parte del crisol, en las paredes de cromo-magnesita y en la bóveda ladrillos de alta alúmina, un voltaje mayor de 240 V, con una corriente de 6 kA. Presenta una potencia instalada de 3 MW y un consumo tecnológico de 720 kWh/ton.

2.2 Calidad de fundición.

Hay numerosas contingencias que causan dificultades en una operación de fundición y originan defectos de calidad en el producto. En esta sección recopilamos una lista de defectos comunes que ocurren en la fundición e indicamos los procedimientos de inspección para detectarlos.

Defectos de la fundición Existen defectos comunes en todos los procesos de fundición. Estos defectos se ilustran en la figura 27 y se describen brevemente a continuación:

a) **Llenado incompleto.** Este defecto aparece en una fundición que solidificó antes de completar el llenado de la cavidad del molde. Las causales típicas incluyen: 1) fluidez insuficiente del metal fundido, 2) muy baja temperatura de vaciado, 3) vaciado que se realiza muy lentamente y/o 4) sección transversal de la cavidad del molde muy delgada.

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

c) **Metal granoso o gránulos fríos.** Las salpicaduras durante el vaciado hacen que se formen glóbulos de metal que quedan atrapados en la fundición. Un buen diseño del sistema y de los procedimientos de vaciado que eviten las salpicaduras puede prevenir este defecto.

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

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

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

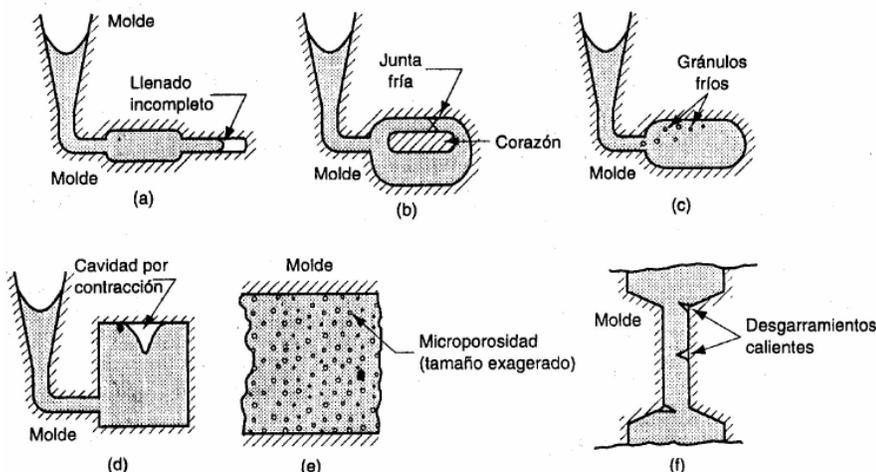


Figura 27. Algunos defectos comunes en las fundiciones: (a) llenado incompleto, (b) junta fría, (c) gránulos fríos. (d) cavidad por contracción, (e) microporosidad y (f) desgarramientos calientes.

Algunos defectos se relacionan con el uso de moldes de arena y, por tanto, ocurren solamente en la fundición en arena. Aunque en menor grado, los otros procesos de molde desechable son también susceptibles a estos problemas. En la figura 28 se muestran algunos de los principales defectos que ocurren en la fundición en arena.

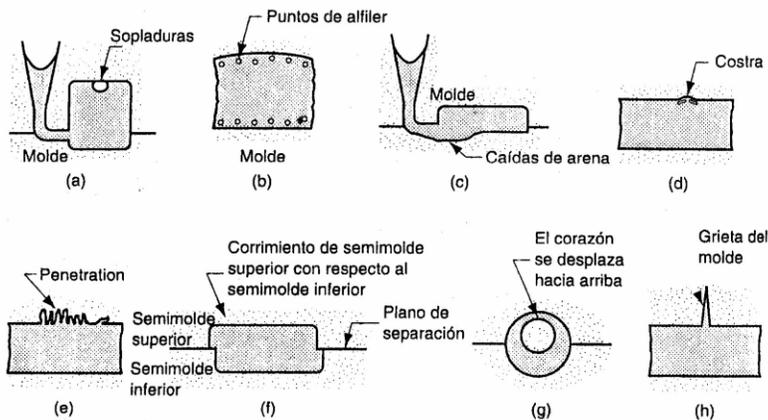


Figura 28. Defectos comunes de fundiciones en arena: (a) sopladuras (b) puntos de alfiler, (c) caídas de arena, (d) costras, (e) penetración, (f) corrimiento del molde (g) corrimiento del corazón y (h) molde agrietado.

a) **Sopladuras.** Este defecto es una cavidad de gas en forma de pelota causada por un escape de gases del molde durante el vaciado. Ocurre en la superficie de la parte superior de la fundición o cerca ella. La baja permeabilidad, pobre ventilación y el alto contenido de humedad en la arena del molde son las causas generales.

b) **Puntos de alfiler.** Es un defecto similar al de las sopladuras que involucra la formación de numerosas cavidades pequeñas de gas en la superficie de la fundición o ligeramente por debajo de ella.

c) **Caídas de arena.** Este defecto provoca una irregularidad en la superficie de la fundición, que resulta de la erosión del molde de arena durante el vaciado. El contorno de la erosión se imprime en la superficie de la fundición final.

d) **Costras.** Son áreas rugosas en la superficie de la fundición debido a la incrustación de arena y metal. Son causadas por desprendimientos de la superficie del molde que se descascaran durante la solidificación y quedan adheridas a la superficie de la fundición.

e) **Penetración.** Cuando la fluidez del metal líquido es muy alta, éste puede penetrar en el molde o en el corazón de arena. Después de la solidificación, la superficie de la fundición presenta una mezcla de granos de arena y metal. Una mejor compactación del molde de arena ayuda a evitar esta condición.

f) **Corrimiento del molde.** Se manifiesta como un escalón en el plano de separación del producto fundido, causado por el desplazamiento lateral del semimolde superior con respecto al inferior.

g) **Corrimiento del corazón.** Un movimiento similar puede suceder con el corazón, pero el desplazamiento es generalmente vertical. El corrimiento del corazón y del molde es causado por la flotación del metal fundido.

h) **Molde agrietado (venas y relieves).** Si la resistencia del molde es insuficiente, se puede desarrollar una grieta en la que el metal líquido puede entrar para formar una aleta en la fundición final.

2.2.1 Métodos de inspección en la fundición.

Los procedimientos de inspección en la fundición incluyen:

- 1) inspección visual para detectar defectos obvios como llenado incompleto, cortes fríos y grietas severas en la superficie.
- 2) medida de las dimensiones para asegurarse que están dentro de las tolerancias
- 3) pruebas metalúrgicas, químicas, físicas y otras relacionadas con la calidad inherente del metal fundido.

Las pruebas de la categoría 3 incluyen:

- a) pruebas de presión para localizar fugas en la fundición;
- b) métodos radiográficos, pruebas de partículas magnéticas, uso de líquidos penetrantes fluorescentes y pruebas supersónicas para detectar defectos superficiales o internos en la fundición;
- c) ensayos mecánicos para determinar propiedades, tales como la resistencia a la tensión y dureza.

Si se descubren defectos, pero éstos no son serios, muchas veces es posible salvar la fundición por soldadura, esmerilado y otros métodos de recuperación que se hayan convenido con el cliente.

2.3 Cálculo de la velocidad de vertido para cada pieza.

La correcta determinación de la velocidad de vertido de una pieza define la posible ausencia de errores como turbulencia, mal llenado, enfriamiento inadecuado, etc.

$$V = \frac{C}{\tau} \quad (17)$$

Dónde:

C --- altura de la pieza en (cm)

τ --- tiempo de vertido en (seg.)

Recomendaciones:

- Con espesores (δ) de paredes de 7–10 mm la velocidad debe ser mayor o igual a 2 (cm/seg.)
- Con espesores (δ) de paredes de 10 – 40 mm la velocidad debe ser mayor o igual a 1 (cm/seg.)
- Con espesores (δ) de paredes de > 40 mm la velocidad debe ser mayor o igual a 0.8 (cm/seg.)

Nota: Si la velocidad no es suficiente se recomienda cambiar posición de la pieza en el molde o disminuir el tiempo de vertido.

El tiempo de vertido se calcula como:

Para Acero.

Para piezas menores de 15 toneladas:

$$\tau = S_1 \sqrt[3]{\delta * G} \quad (18)$$

Dónde:

G --- peso del metal que pasa por los alimentadores. (kg)

S1 --- coeficiente de tiempo. (Tabla TSA – 44 – A Pág. 206, Guía Tecnológica)

δ --- espesor predominante de la pieza (mm)

$T_v = 1530^\circ\text{C}$

Malla 8

Relación 2

G=3.713 kg (Calculada en el software Solidwork)

S1=1.1

$\delta = 13$

C=13

$$\tau = 1.1 \sqrt[3]{13 * 3.713} = 4\text{s}$$

$$V = \frac{13}{4} = 3.25\text{mm/s} = 0.00325\text{m/s}$$

Relación 5.5

G=21kg

S1=1

$\delta = 25$

C=25

$$\tau = 1 \sqrt[3]{25 * 21} = 8\text{s}$$

$$V = \frac{25}{8} = 3.125\text{mm/s} = 0.003125\text{m/s}$$

Relación 8

G=25.359 kg

S1=1

$\delta = 25$

$$C=25$$

$$\tau = 1\sqrt[3]{25 * 25.359} = 8.59s$$

$$V = \frac{25}{8.59} = 2.91\text{mm/s} = 0.00291\text{m/s}$$

Relación 12

$$G=7.657 \text{ kg}$$

$$S1=1.1$$

$$\delta=13$$

$$C=13$$

$$\tau = 1.1\sqrt[3]{13 * 7.657} = 5s$$

$$V = \frac{13}{5} = 2.6\text{mm/s} = 0.0026\text{m/s}$$

2.4 Cálculo de la geometría de las mazarotas necesarias para cada pieza. Procedimiento.

El procedimiento correcto para el cálculo de las dimensiones de las mazarotas se puede resumir en las siguientes etapas:

1. Con el conocimiento de W y T, calcule la distancia de alimentación ($F_D = EZL + RZL$), (RZL) distancia que alimenta la mazarota y (EZL) por la distancia sana debido al efecto de enfriamiento final se extraen de la figura 20 para la configuración bajo la consideración (note que para las mazarotas laterales, una estimación del diámetro de la mazarota puede también necesitarse; vea el próximo paso).

Pieza 1

$$F_D = EZL + RZL = 27.3 + 37.05 = 64.4\text{mm.} \quad (19)$$

$$RZL/T = 2.1 \quad (20)$$

$$EZL/T = 2.85 \quad (21)$$

Pieza 2

$$F_D = EZL + RZL = 73.75 + 101.25 = 175 \text{ mm}$$

$$RZL/T = 2.95 \text{ (Figura 20)}$$

$$EZL/T = 4.05 \text{ (Figura 20)}$$

Pieza 3

$$F_D = EZL + RZL = 76.25 + 105 = 181.25\text{mm}$$

$$RZL/T = 3.05$$

$$EZL/T = 4.2$$

Pieza 4

$$F_D = EZL + RZL = 76.25 + 105 = 181.25 \text{ mm}$$

$$RZL/T = 3.05$$

$$EZL/T = 4.2$$

- Usando la distancia de alimentación como base, estime el número de mazarotas requerido, así como la longitud L de la sección de la pieza fundida a ser alimentada por cada mazarota. Si se necesita más de una mazarota para alimentar la sección, estime el diámetro de la mazarota, DR se puede tomar un diámetro inicial de $DR = 3T$ (o $2T$ para cuando $W/T \ll 1.0$) debe estar relativamente cerca.

Pieza 1

$$DR = 3T = 3 * 13 = 39$$

Pieza 3

$$DR = 75$$

Pieza 2

$$DR = 75$$

Pieza 4

$$DR = 39$$

- Calcular el factor de forma, $SF = (L + W)/T$, de la sección que alimenta la mazarota.

Pieza 1

$$SF = (L + W)/T = 171 + 25/13 = 15$$

Pieza 3

$$SF = 25$$

Pieza 2

$$SF = 25$$

Pieza 4

$$SF = 30$$

- Calcular el volumen de la pieza fundida, $VC = L \times W \times T$, alimentado por la mazarota.

Pieza 1

$$VC = L \times W \times T = 171 * 25 * 13 = 55575 \text{ mm}^3$$

Pieza 2

$$VC = 1645000 \text{ mm}^3$$

Pieza 3

$$VC = 2192400 \text{ mm}^3$$

Pieza 4

$$VC = 462384 \text{ mm}^3$$

- Calcular el volumen de la mazarota, VR

$$V_R = 2.51 * V_C (SF)^{-0.74}$$

Pieza 1

$$V_R = 2.51 * 55575 * (15)^{-0.74} = 18803.8 \text{ mm}^3$$

Pieza 2

$$V_R = 2.51 * 1645000 * (25)^{-0.74} = 381385.36 \text{ mm}^3$$

Pieza 3

$$V_R = 2.51 * 2192400 * (25)^{-0.74} = 508297.42 \text{ mm}^3$$

Pieza 4

$$V_R = 2.51 * 462384 * (30)^{-0.74} = 93671.35 \text{ mm}^3$$

6. Calcular el diámetro de la mazarota DR conociendo el volumen VR y la forma de la mazarota. Si la mazarota es un cilindro con la altura H = DR, el diámetro puede calcularse directamente de:

$$D_R = \sqrt[3]{3.20 * V_C * (SF)^{-0.74}}$$

7. Chequear si el diámetro de la mazarota calculado está razonablemente cerca de la estimación inicial. Si no, se va a la segunda etapa, y se usa el diámetro calculado de la mazarota como la próxima suposición para DR.
8. Calcular la distancia del borde de la mazarota al punto más distante en la sección de la pieza fundida a ser alimentada por esa mazarota.
9. Chequear que la distancia de alimentación es mayor o igual a la distancia encontrada en paso 7 para esa sección de la pieza fundida. En ese caso, el procedimiento de dimensionamiento de la mazarota está completo. Si no, las mazarotas necesitan ser redistribuidas, y los pasos del 1 al 7 deben repetirse.

2.5 Análisis del diseño de experimento para determinar la distancia de alimentación en piezas tipo láminas de acero 1045.

W/T	Hr/Dr	T	W	L	Dr	Hr	H	D	Distancia De Alim.	Temp. Vertido	Sobre-calenta-miento	Tipo de Molde
2	4,67	13	25	171	39	178	10	25	64.4	1530	100	1000x300 x 200/200
2	4,67	13	25	171	39	178	10	25	64.4	1530	100	1000x300 x 200/200
2	4,67	13	25	171	39	178	10	25	64.4	1530	100	1000x300 x 200/200
5,5	1	25	140	470	75	102	10	80	175	1530	100	1000x300 x 200/200
5,5	1	25	140	470	75	102	10	80	175	1530	100	1000x300 x 200/200
5,5	1	25	140	470	75	102	10	80	175	1530	100	1000x300 x 200/200
8	1	25	203	432	75	102	10	80	181.25	1530	100	1000x300 x 200/200
8	1	25	203	432	75	102	10	80	181.25	1530	100	1000x300 x 200/200
8	1	25	203	432	75	102	10	80	181.25	1530	100	1000x300 x 200/200
12	3	13	152	234	39	152	10	40	181.25	1530	100	1000x300 x 200/200
12	3	13	152	234	39	152	10	40	181.25	1530	100	1000x300 x 200/200
12	3	13	152	234	39	152	10	40	181.25	1530	100	1000x300 x 200/200

Tabla 3 Dimensiones usadas en el diseño de experimento.

W- Ancho

T- Espesor

L- Largo

Dr- Diámetro de la mazarota

H_r - Altura de la mazarota.

H - Altura del cuello.

D - Diámetro del cuello.

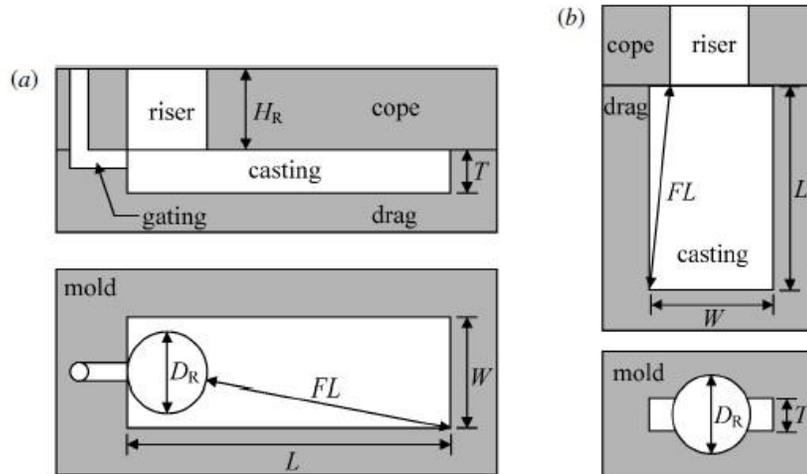


Figura 29. Planos del molde y la pieza.

Las dimensiones de las piezas y las mazarotas usadas para el experimento fueron empleados en estudios anteriores; pero para piezas de acero 1025.

Resultados obtenidos.

A la pieza se le realizó un análisis visual en el cual se valoró la calidad de la fundición, no se encontraron poros en la superficie, la mazarota alimentó correctamente la pieza, No se realizaron inspecciones con rayos x debido a la ausencia del equipamiento, no obstante se realizaron un grupo de simulaciones utilizando el Click2Cast.

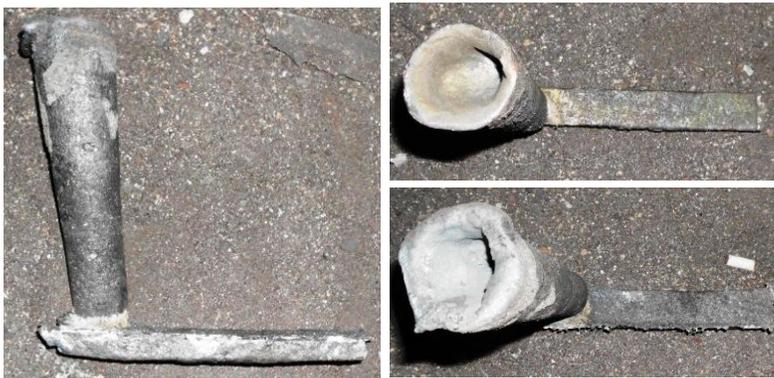


Figura 30. Pieza fundida con una relación ancho/espesor igual a 2.

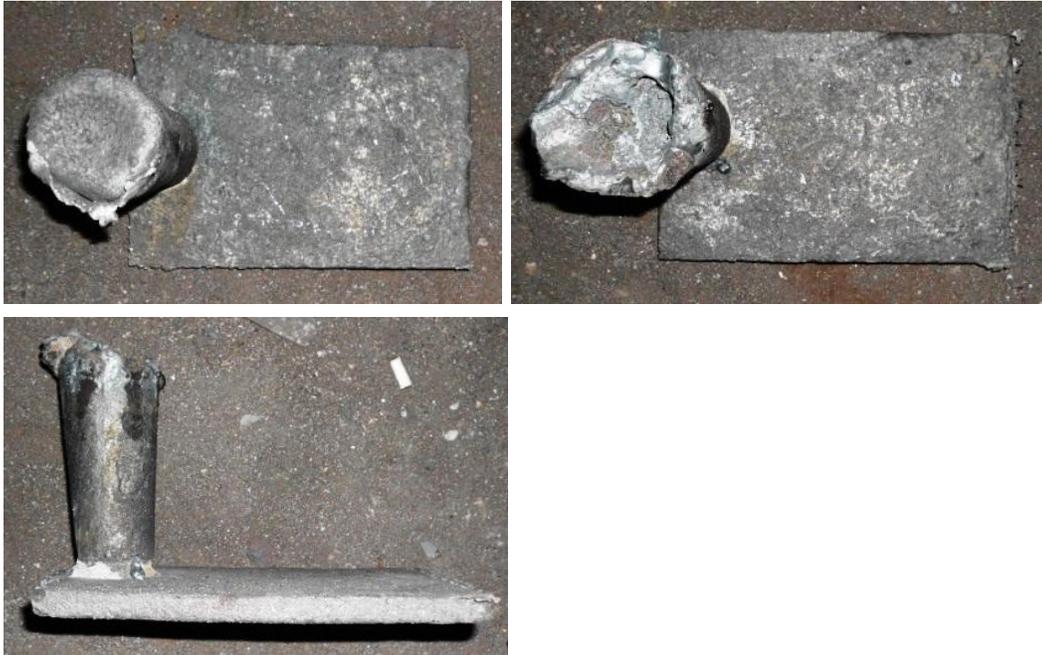


Figura 31. Pieza fundida con una relación ancho/espesor igual a 5.5.



Figura 32. Pieza fundida con una relación ancho/espesor igual a 8.



Figura 33. Pieza fundida con una relación ancho/espesor igual a 12.

2.6 Conclusiones parciales.

En este capítulo se realizó una inspección visual del diseño de experimento para piezas de acero 1045 donde se valoró la calidad de la fundición, así como el cálculo de las dimensiones de la mazarota, la distancia de alimentación (Tabla 3) y el cálculo de la velocidad de vertido para cada pieza que será utilizada en capítulos posteriores.

The background of the page features several thin, hand-drawn purple lines. These lines are mostly straight but include some curves and loops, creating a complex, abstract pattern. Two small purple dots are placed at specific points where the lines intersect or curve. The overall aesthetic is minimalist and artistic.

Capítulo III

Сабитио III

Capítulo III: Simulación del llenado y enfriamiento de piezas tipo láminas.

En este capítulo debe hacerse el análisis de los resultados alcanzados, realizándose la simulación de grupo de piezas de acero 1045.

3.1 Simulación del llenado y enfriamiento de las de piezas.

En la actualidad casi no se concibe un proceso de la vida cotidiana que no se pueda simular. Por ejemplo, ya nadie aprende a pilotar un avión sin antes haber pasado innumerables horas frente a un simulador de vuelo. Todo aquel proceso que ya sea por su alto costo o por su imposibilidad de hacerlo real en determinado momento, puede dejar de utilizar exitosamente este tipo de técnicas. Como planteó el profesor Scalla Estalella: “La ingeniería también modeliza sus situaciones. Al fin y al cabo, un modelo no es más que un sistema ideal que se comporta como el real con el grado de aproximación suficiente, pero que es más sencillo de calcular, más fácil de construir, más rápido en reaccionar ó más seguro de utilizar. Cualquiera de estas cuatro situaciones puede conducir al ingeniero mecánico a modelizar su problema. Pero los modelos son cada vez más complejos, es decir más próximos a la situación real. La computadoras han permitido llevar el cálculo numérico a donde nunca hubiera podido llegar el análisis matemático.” [2]

La simulación de procesos es una de las más grandes herramientas de la ingeniería industrial, la cual se utiliza para representar un proceso mediante otro que lo hace mucho más simple. A través del método de elementos finitos es posible generar sólidos de aspecto casi real, comprobar su comportamiento bajo diversas condiciones de trabajo, estudiar el movimiento conjunto de grupos de sólidos. Esto permite un conocimiento mucho más profundo de un producto antes de que exista físicamente, siendo posible detectar muchos de los problemas que de otro modo se hubieran detectado en el servicio real. Este método (M.E.F.) puede ser entendido como una generalización de estructuras al análisis de sistemas continuos. El principio del método consiste en la reducción del problema con infinitos grados de libertad, en un problema finito en el que intervenga un número finito de variables asociadas a ciertos puntos característicos (nodos) [3]. Las incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas cuando para pasar a ser los valores de dichas funciones en un número infinito de puntos. En realidad no se trata de nada nuevo. El cálculo de estructuras se efectúa también restringiendo el análisis de corrimientos de los nudos de unión. En el M.E.F se supone que el comportamiento mecánico de cada parte o elemento, en los que se subdivide queda definido por un número finito de parámetros (grados de libertad) asociados a los puntos que en dicho momento se une al resto de los elementos de su entorno (nodos). Para definir el comportamiento en el interior de cada elemento se supone que dentro del mismo, todo queda perfectamente definido a partir de lo que sucede en los nodos a través de una adecuada fusión de interpolación.

Actualmente el método de los elementos finitos ha sido generalizado hasta constituir un potente método de cálculo numérico, capaz de resolver cualquier problema de la física a partir de un sistema de ecuaciones, abarcando los problemas de la mecánica de fluidos, de la transferencia de calor, del magnetismo [4].

A pesar de su carácter aproximado, este método es una herramienta muy útil que permite realizar una gran cantidad de análisis en componentes y estructuras complejos, difícilmente por los métodos analíticos clásicos, en estas recomendaciones del empleo de los elementos finitos coinciden [5] y definen las siguientes ventajas que ofrece el método de elementos finitos.

El método de los elementos finitos ha sido aplicado a numerosos problemas estructurales y no estructurales. Este método tiene un número significativo de ventajas que lo han hecho muy popular. Estas incluyen la capacidad de:

1. Modelar cuerpos con formas complejas con relativa facilidad.
2. Manipular condiciones de carga generales sin dificultad.
3. Modelar cuerpos compuestos de diferentes materiales debido a que las ecuaciones de elementos son evaluadas individualmente.
4. Manipular un ilimitado número y tipos de condiciones de fronteras.
5. Variar las dimensiones de los elementos y usar elementos pequeños donde sea necesario.
6. Es fácil y barato alterar el modelo de elementos finitos.
7. Se pueden incluir efectos dinámicos.
8. Soluciona problemas de no linealidad material y geométrica con grandes deformaciones y rotaciones.

El método de los elementos finitos de análisis estructural permite al diseñador detectar tensiones, deformaciones en zona plástica, vibraciones y problemas térmicos, así como la interacción multi-físicas de estos durante el proceso de diseño lo que posibilita evaluar y pronosticar el comportamiento del sistema mecánico antes de su construcción eliminando en muchos casos la necesidad de construir prototipos.

La fundición es un proceso altamente complejo donde se combinan el flujo de metal en la cavidad del molde y la transferencia de calor. La consolidación del método de los elementos finitos ha permitido que este fenómeno entre tantos otros se pueda simular con ventajas evidentes. El uso de computadoras cada vez más potentes ha permitido la creación de modelos cada vez más exactos y cercanos a la situación real. En el mundo existen diversos software comerciales para simular la solidificación en piezas fundidas (Magmasoft, NovaFlow & Solid, ViewCast, CastCAE, MAVIS, etc.), los cuales están muy extendidos en países desarrollados. En los Estados Unidos se estimaba hace unos años que al menos la mitad de las piezas que se fundían habían sido simuladas [6]. En Cuba, no hay fundiciones que simulen sus tecnologías de fundición y el uso de este tipo de programas está poco difundido en el campo de la fundición de piezas.

3.1.1 El proceso de fundición.

Uno de los métodos más extendidos en la producción de piezas metálicas es la fundición.

Las piezas obtenidas por colada resultan en general menos costosas que por otros métodos como la forja, estampación ó soldadura, además de obtener buenas características mecánicas. Entre los múltiples problemas que se producen para una obtención de piezas de fundición sanas, encontramos la optimización del sistema de llenado del molde. Este sistema es el conjunto de conducciones realizadas en el molde con el fin de llevar el metal líquido hasta el interior del molde. Este paso es muy importante, ya que un llenado deficiente del molde puede provocar múltiples defectos en las piezas, de forma que éstas sean desechadas.

El aumento en la complejidad de las piezas, la necesidad de una mayor calidad y la optimización de la producción, hace que la dificultad en la obtención de un buen molde sea cada día mayor.

En los últimos años se están produciendo diversos estudios encaminados a obtener la simulación por ordenador del llenado de los moldes.

Actualmente existen programas comerciales de simulación numérica, para el estudio de moldes. De esta forma simulan el avance del frente del material por la aproximación mediante superficies y volúmenes, trabajando en tres dimensiones. Además se necesitan grandes computadoras para poder hacer estas simulaciones, siendo el costo de éstos no asumible para la gran mayoría de las empresas.

Los principales procesos en la producción de piezas fundidas son: la fusión del metal, la elaboración de moldes, el llenado del molde, el enfriamiento, el desmoldeo, la limpieza, el desbarbado, el tratamiento térmico y el control de la calidad de las piezas.

El método principal de fabricación de piezas fundidas es el vertido en moldes de arena en los que se obtiene cerca de un 80 % de la cantidad total de artículos fundidos. Sin embargo, la precisión y la rugosidad de la superficie de las piezas, obtenidas en moldes de arena, en muchos casos no satisfacen las exigencias de la industria de construcción de maquinaria.

La modelación de la solidificación puede ser investigada en dos niveles. El primero es experimental e involucra la investigación del proceso físico para establecer datos termo-físicos y criterios de defectos. El segundo nivel involucra la construcción y la prueba del modelo computacional. Esto se logra con la estrategia siguiente:

- Una revisión de la literatura para examinar los aspectos más importantes y novedosos del tema.
- La revisión de los modelos existentes para determinar su conveniencia.
- La construcción y/o modificación de un modelo computacional.

- Las mejoras al modelo para aumentar velocidad y exactitud.
- La validación teórica y práctica del modelo.
- La simulación de piezas comerciales, donde el flujo del fluido juegue un papel primordial.

3.2 La simulación en la fundición.

Las metodologías tradicionales para proyectar piezas fundidas contienen simplificaciones debido a las dificultades para relacionar un gran número de variables envueltas en los procesos de vertido y solidificación. Esto conduce a veces a proyectos súper dimensionados, para garantizar la producción de piezas con calidad. Dada la complejidad de los procesos de intercambio de calor, del comportamiento del material durante la solidificación, de la geometría de las piezas etc., no siempre es simple prever el tipo, tamaño y localización de los defectos de fundición, siendo estos identificados en el producto final. Si los defectos conducen el producto a la chatarra será necesario hacer un nuevo proyecto aumentando los costos.

La búsqueda continua por el aumento de la competitividad, explica por qué las fundiciones modernas invierten en el desarrollo o la adquisición de software que simulen matemáticamente los fenómenos de vertido y solidificación.

Según Quintero la solidificación «es el área del conocimiento relacionada a la generación independiente, bajo condiciones de no-equilibrio, de un sólido metaestable a partir de un líquido con el cual está en contacto» [7], la predicción numérica de la microestructura generada durante la solidificación, es extremadamente compleja. Para poder predecirla es necesario disponer de facilidades computacionales que simultáneamente permitan resolver todo un conjunto de ecuaciones diferenciales que, bajo específicas condiciones de borde, matemáticamente describan dichos fenómenos físico-químicos. Para ello, se requiere adquirir software extremadamente costoso e inalcanzable en muchos casos por empresas pequeñas.

Aun cuando la solución no es tan fácil de alcanzar la realidad es que la vía de la modelación es la única que permite disminuir los costos de obtención de las piezas fundidas, que en el caso de los cilindros de laminación son bastante elevados.

En la figura 34 se muestra una comparación entre un proceso de obtención de piezas fundidas, donde no se utiliza la técnica de comprobación por simulación y uno en que sí, la fundamental conclusión está dada por la tasa de rechazo en ambos casos.

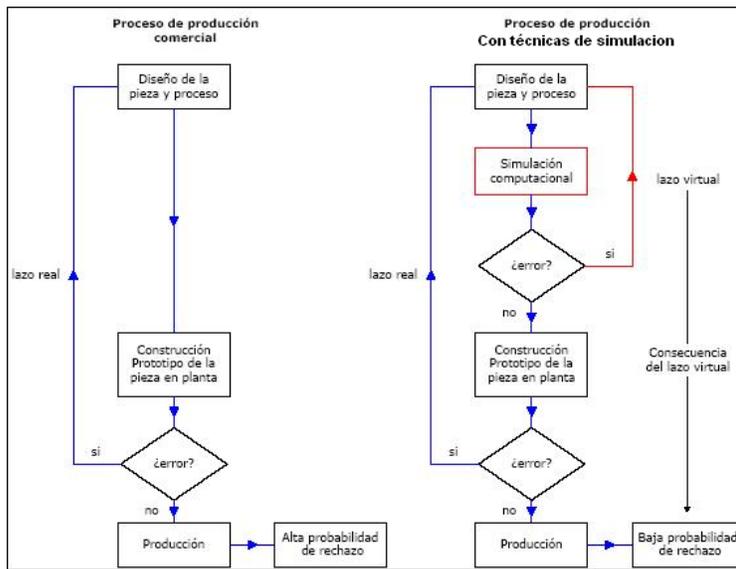


Figura 34. Comparación gráfica entre simular o no.

En los últimos años se están produciendo diversos estudios encaminados a obtener la simulación por ordenador del llenado de los moldes.

Los factores que influyen en el resultado del proceso de obtención de piezas de fundición son numerosos y la interacción entre ellos intrincada. Es por esto que lograr el diseño de un proceso que produzca una estructura que alcance las propiedades mecánicas esperadas requiere de una gran experiencia y, en muchos casos, cumplir con el desarrollo de etapas de prueba y error muy costosas en tiempo y dinero. La modelización y simulación computacional resultan entonces herramientas de gran importancia, ya que contribuyen a ajustar las condiciones de fundición y el diseño de la pieza, disminuyendo así la necesidad de largos y numerosos ensayos con prototipos.

3.2.1 Construcción del modelo.

La construcción del modelo computarizado puede dividirse en varias etapas evolutivas, comenzando con el modelo físico que está basado en un número simplificado de suposiciones físicas. Estas suposiciones pueden hacerse a la luz de nuestra comprensión de los procesos físicos que están incluidos. A partir del modelo físico y una serie de ecuaciones diferenciales, podemos construir un modelo matemático. En un proceso físico típico estas ecuaciones diferenciales no pueden resolverse analíticamente; pero pueden resolverse numéricamente. Normalmente, la naturaleza del modelo matemático dictaría el tipo de modelo numérico empleado y una revisión de la literatura actual haría pensar en el modelo numérico más apropiado a usar. Una combinación del modelo matemático y del modelo numérico conduce a un número de ecuaciones gobernantes. Antes de que estas ecuaciones gobernantes puedan resolverse, se debe desarrollar un algoritmo de solución que pueda resolver las ecuaciones rápida y correctamente.

Una vez más la opción es determinada de una revisión de la literatura. La validez del modelo computacional se revisa contra los efectos de la fluidez conocidos en la solidificación del metal. Una vez que el modelo se ha validado puede entonces usarse para realizar las simulaciones. Cuando estas simulaciones se comparan con los resultados experimentales, la conclusión puede dibujarse. El algoritmo para esta construcción se muestra en la figura 35.

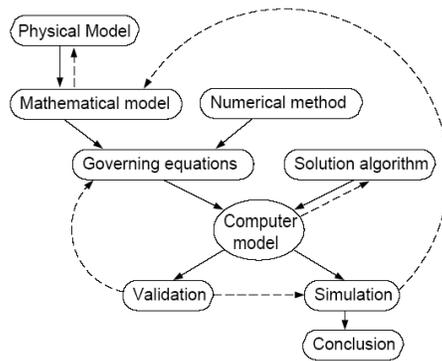


Figura 35. Construcción del algoritmo para el modelo computacional.

Durante la construcción del modelo en la computadora, varias suposiciones pueden y deben hacerse. La validez de estas suposiciones limita la utilidad de la simulación. Para decidir qué suposiciones son importantes y relevantes en nuestra aplicación particular hay un número de lazos de retroalimentación que se pueden utilizar (Figura anterior). La primera opción puede hacerse considerando la escala del proceso físico e ignorando aquéllos que son asumidos por el más dominante.

Esto se llama análisis adimensional y se realiza durante la construcción del modelo matemático. La segunda opción se realiza cuando se comparan los resultados simulados. Si no hay ninguna diferencia apreciable entre las simulaciones, entonces se puede asumir que no es relevante y puede abandonarse. Cuando esta técnica se ejerce formalmente se llama análisis de sensibilidad, y se realiza durante la validación del modelo. La tercera opción se realiza cuando se comparan los resultados experimentales con la simulación. Si la modelación de un aspecto particular de la solidificación no tiene efecto sobre los defectos predichos, entonces se puede asumir que no es relevante a esa simulación en particular. Dado estas opciones, es importante recordar que un fluido, el menor progreso puede tener efectos significativos en el resultado final. Por esta razón las suposiciones y decisiones que se tomen deben ser cuidadosa y continuamente revaluadas.

El modelado de la solidificación puede ser dividido en tres modelos separados donde cada modelo se identifica por la solución dada por un grupo separado de ecuaciones: modelado de la transferencia de calor resuelto por la ecuación de energía; modelado del llenado resuelto por la ecuación de la continuidad y del momento; y modelado de la superficie libre resuelto por las condiciones de superficies de frontera (de una superficie que es libre de movimiento). Para una descripción completa del modelado de la solidificación, todas estas ecuaciones necesitan ser resueltas simultáneamente; pero bajo circunstancias especiales, las

ecuaciones pueden ser desconectadas y modeladas independientemente. Éste es el caso para la modelación de la transferencia de calor la cual ha sido usada ampliamente y su aplicación ha mejorado significativamente la calidad de la fundición. Por otro lado, el llenado, y en particular el modelado de la superficie libre, han sido dejadas de lado últimamente.

Aunque ambas se han reconocido por su importancia en el proceso de fundición, ellos son demasiado complejos para una pieza fundida comercial. El rango de aplicación y actuación de cada tipo de modelo está definido por el defecto que se tome como criterio.

La modelación de la solidificación también requiere muchos datos termo-físicos, y a partir de que la solidificación es un proceso dinámico, la mayoría de estos datos cambian en el tiempo y en el espacio (La mayoría de los datos termo-físicos están en función de la temperatura o la presión, la temperatura y la presión a su vez están en función del tiempo y del espacio, por consiguiente los datos termo-físicos pueden cambiar con el tiempo y el espacio. Aunque en muchos casos estos datos pueden promediarse, las mejoras pueden ser hechas por la modelación del proceso dinámico en detalle. En casos donde la solidificación de metal es detrítica, puede ser importante modelar la nucleación y el crecimiento de estas dendritas. Esto es llamado modelación micro-estructural. Por último, para metales que contienen los gases disueltos, puede ser importante modelar la presión parcial del gas en el metal. Esto se logra por la modelación de la concentración del gas en el metal como el gas extraído del sólido. Esto es llamado como modelación de micro-porosidad.

3.2.2 La modelación de la transferencia de calor.

El mayor desafío en la simulación de la transferencia de calor en el metal fundido ha sido el cambio de fase. Considerando la solidificación de una aleación, hay tres regiones distintas: una región del sólido, una región totalmente líquida, y una región blanda que consiste en líquido disperso entre las dendritas sólidas. Para modelar este cambio de fase se requiere una estricta imposición de condiciones de frontera. Normalmente, esto podría lograrse con un elemento finito que se transforma para ajustarse a la interface, sin embargo, esto es computacionalmente caro.

Para superar la pérdida de información de frontera se necesita desarrollar tratamientos especiales que reconozcan esta discontinuidad. El más simple está basado en la fracción de sólido en cada celda computacional. Este fragmento puede calcularse de varias formas: la teoría de la nucleación; la extrapolación lineal; la regla de la palanca (the lever rule); o la ecuación de Scheil. El comportamiento físico de la aleación debe determinar la opción a tomar.

Una vez que esto ha sido calculado es necesario tener consideración del calor latente perdido durante la solidificación. Esto puede hacerse de varias formas: el término fuente puede agregarse a la ecuación de energía; el calor específico puede modificarse; o puede adoptarse la formulación de la entalpía (sensible-enthalpy formulation).

Como la diferencia física entre estos métodos es pequeña, la opción está basada en la estabilidad numérica y la exactitud del método. El método de la entalpía es el que se está utilizando con mayor frecuencia.

Después de muchos años de experiencia, el modelado de la transferencia de calor se ha hecho muy popular dentro del ambiente ingenieril de la industria de la fundición. Su popularidad está basada en el hecho que en muchos casos es eficaz prediciendo los defectos. Su éxito comercial ha sido el hecho que es computacionalmente barato. Sin embargo, el modelado de la transferencia de calor tiene muchas limitaciones que deben tenerse en cuenta siempre que las predicciones sean hechas.

3.2.3 La modelación del llenado (Fluid Flow modelling).

El desafío que enfrenta el modelado del llenado, es el desarrollo de un algoritmo de solución que pueda resolver las ecuaciones de momento y de continuidad simultáneamente. Aunque hay una diversidad de vías para ello, esto puede hacerse, en el campo de la modelación de la solidificación, los métodos dominantes han sido reiterativos. Los métodos más populares fueron: SMAC, SOLA, y SIMPLE. Aunque cada método fue diseñado para ser una mejora en su predecesor, en la práctica cada método tiene un elemento que lo distingue. Por ejemplo, en varias aplicaciones que involucran el modelado de la superficie libre y el llenado, el método de SOLA se demostró ser el algoritmo de solución más eficaz y estable.

El desafío que enfrenta el modelado de flujo de metal durante la solidificación ha sido simular la disminución de la velocidad durante la interfaz sólido/líquido. La técnica más fácil ha sido "apagar" la velocidad en el sólido. Una segunda técnica ha sido agregar un término fuente a la ecuación de momento que modera la velocidad del fluido en la región blanda. Esto corresponde a una situación donde el metal líquido pasa entre las dendritas. La tercera técnica ha sido modificar la viscosidad basada en la fracción sólida. Esto corresponde a una situación, donde los cristales que flotan viajan libremente con el baño de metal líquido. Aunque estas interpretaciones físicas hacen cada método más simple, en la práctica, es su comportamiento numérico el que a menudo dicta su uso.

Ésta área necesita mucha más investigación experimental y teórica. Mientras el progreso sustancial en la última década se ha hecho en la modelación del llenado, es solamente en los últimos años que la atención ha estado centrada en el modelado de la solidificación. El uso comercial de la simulación del llenado y de la transferencia de calor se ha restringido a solidificación donde para la fase inicial del llenado es irrelevante la velocidad y la distribución de presión. El modelado del llenado no puede, por sí solo, usarse en una situación donde el llenado inicial de la pieza tiene un gran efecto sobre el perfil de velocidad inicial. Desafortunadamente, esto corresponde a la mayoría de las piezas comerciales. La colada continua es una excepción. En muchas ocasiones las simulaciones del llenado se ha usado para mejorar el diseño del proceso. Sin embargo, se ha encontrado que tales modelos son muy sensibles a la selección de parámetros numéricos.

3.2.4 Modelación de superficie libre.

El mayor desafío para la modelación de la superficie libre ha sido la habilidad de rastrear su movimiento. Si el modelo puede seguir el movimiento de las superficies libres, debe tenerse cuidado aquí: hay varios paquetes de simulación del llenado que pueden modelar la superficie libre, pero ellos no pueden simular su movimiento, particularmente cuando se trata de distancias grandes, entonces puede usarse para predecir el flujo de metal fundido durante el llenado de una cavidad del molde. El método más simple está basado al buscar la altura del fluido en su movimiento sobre la base de molde. Esto puede mejorarse para modelar la viscosidad con el método de Darcy. Otro método es reducir la cavidad del molde en una serie de alimentadores uni-dimensionales que muestren la resistencia hidráulica, o para diseñar una red de análisis de flujo que esté basada en modelos reológicos. Aunque todas estas técnicas tuvieron éxito para la aplicación que fueron concebidos, ellas no lograron modelar el movimiento de la superficie libre en una aplicación general. Esto fue debido al hecho de que estos no pudieron modelar el movimiento del fluido bajo la superficie libre.

En 1965, la modelación de la superficie libre y del llenado se combinaron en un solo modelo el que se llamó (MAC). Esta técnica empleó un número de partículas marcadas dispuestas a lo largo del fluido para rastrear el movimiento de la superficie libre. Aunque este método era relativamente simple requirió mucha memoria de la computadora. En 1980, un método alternativo llamado VOF fue desarrollado, requiriendo un almacenamiento mínimo. Estaba basado en una fracción del volumen del fluido en cada celda computacional. Durante los años, con los adelantos en ambas técnicas, la ventaja del VOF se hizo menos importante. Más adelante se empezaron a usar ambas técnicas.

En 1983, W. S. Hwang y R. A. Stoehr reportaron la primera aplicación de las técnicas MAC para modelar la entrada del metal líquido en una cavidad horizontal del molde. Este trabajo fue mejorado para incluir: una razón del flujo variable y una distribución de velocidad a la entrada basada en la energía de Bernoulli y las fuerzas de arrastre desde las paredes laterales. Se realizaron las Simulaciones en una geometría compleja y realista (una rueda con tres rayos) y fue comparada con los modelos de flujo de películas a elevadas velocidades vistas a través de vidrios Pyrex.

En 1988, el modelo de SOLA-VOF fue modificado para incluir la transferencia de calor. Fue escogido en lugar de la técnica de MAC debido a las dificultades encontradas al calcular la transferencia de calor entre las celdas superficiales. El método de SOLA-VOF tenía la ventaja que la tensión superficial y la adherencia a las paredes podría evaluarse desde la orientación de la superficie libre. Las mejoras siguientes se hicieron a SOLAVOF:

- R. Stoehr y C. Wang modificaron la ecuación de la continuidad para responder al cambio en la densidad durante la solidificación. Una función del error fue usada para modelar la transferencia de calor en la dirección z. La disminución de velocidad fue simulada cuando la fracción de sólido

- excedió 0.7, y el método de la entalpía lineal fue usado para considerar el calor latente.
- H. Walther y P. Sahm parametrizaron la fricción en la pared del molde para incluir las pérdidas de energía causadas por la rugosidad superficial, y la
- comprobación experimental se realizó con una cámara de video de alta velocidad.
- B. Minaie, K. Stelson y V. Voller modelaron aluminio en arena prestando una atención particular a las velocidades residuales en la superficie libre. Las comparaciones fueron hechas entre la convección natural y residual para descubrir que velocidad residual tenía un efecto sobre la forma de la interfaz del sólido/líquido cuando la convección natural y residual eran dirigidas en direcciones opuestas.

Optimización.

En cualquier tiempo cada empresa necesita buscar soluciones que mejoren su proceso productivo, con nuevas estrategias o nuevas tecnologías que le permita automatizar aspectos clave de su actividad, reducir tiempos y minimizar errores.

Sólo así es posible conseguir una línea ascendente en la calidad de los productos y ajustar sus costos de fabricación, en definitiva, incrementar la competitividad a medio y largo plazo [8].

Para la realización de la simulación del llenado y el enfriamiento de las piezas analizadas se utilizó el software de simulación Click2Cast, que es un software diseñado por el CIMNE especialmente para la industria de la fundición. La licencia del mismo fue donada por este centro a nuestra universidad a través del convenio del aula CIMNE radicada en la misma.

3.3 Valoración de los resultados obtenidos en la simulación en el software Click2Cast.

3.3.1 Análisis de la simulación.

- Llenado.
- Solidificación.

Después del mallado de las piezas se escoge el tipo de material a utilizar de la pieza y el molde, la temperatura de vertido y del molde, por último la velocidad del flujo.

Etapa de llenado se obtienen los modelos de:

- Flujo de llenado.
- Distribución de la temperatura al final del llenado.
- Distribución de la velocidad del flujo dentro de la pieza.
- Atrapamientos de aires.
- Erosión del molde Tiempo de llenado.
- Fracción sólida.

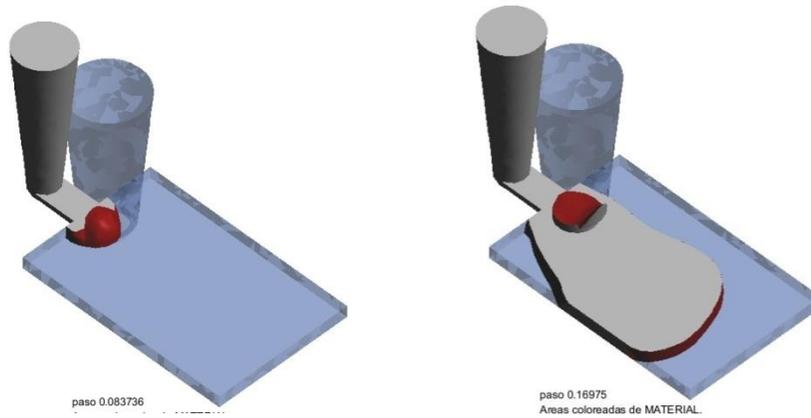


Figura 36. Flujo de llenado de la pieza a) y b).

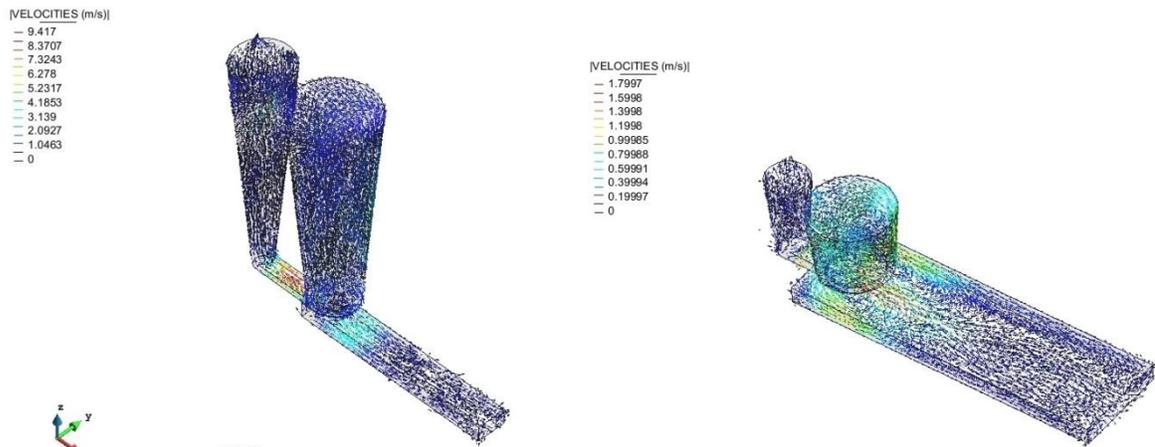


Figura 37. Distribución de la velocidad del flujo dentro de la pieza.

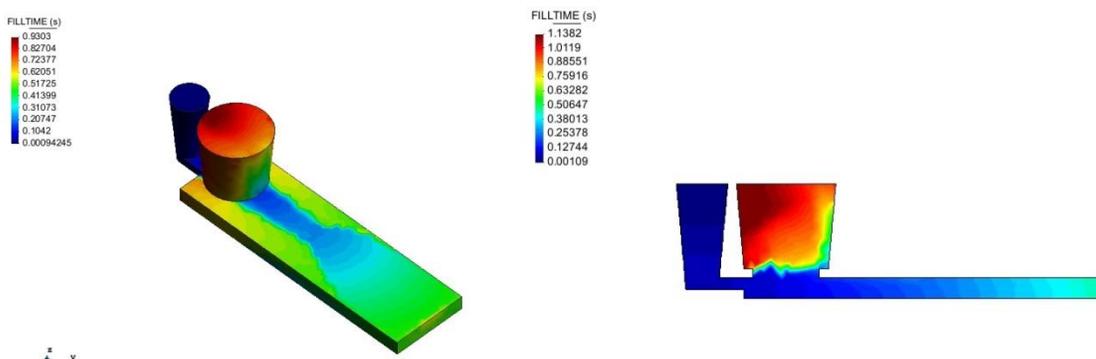


Figura 38. Tiempo de llenado.

Etapas de solidificación de la pieza se obtienen los modelos de:

- Distribución de la temperatura al final de la solidificación.
- Fracción sólida.
- Tiempo de solidificación
- Porosidad ocasionada por contracción.
- Módulo de contracción.

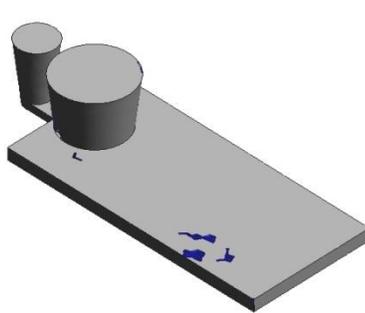


Figura 39. Porosidad ocasionada por contracción.

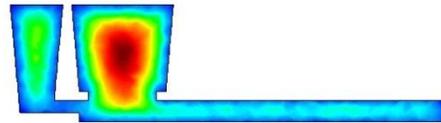
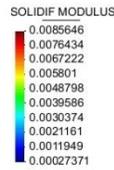


Figura 40. Módulo de contracción.

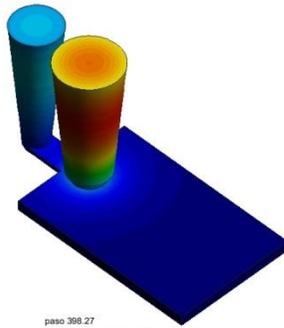
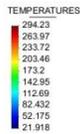


Figura 41. Distribución de la temperatura

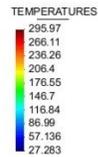


Figura 42. Tiempo de solidificación al final de la solidificación

Gráficos resultantes

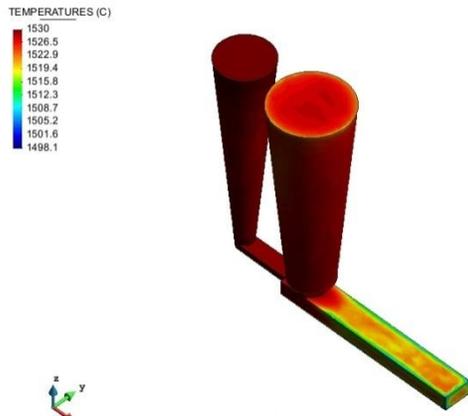


Figura 43. Modelación para una relación Ancho-Espesor de 2.

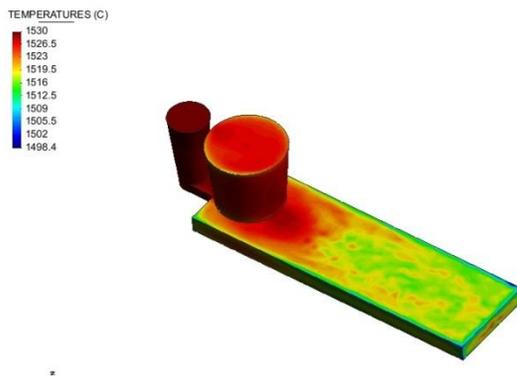


Figura 44. Modelación para una relación Ancho-Espesor de 5.5.

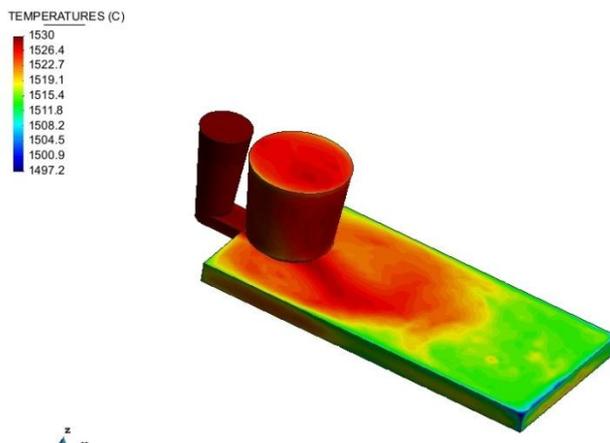


Figura 45. Modelación para una relación Ancho-Espesor de 8.

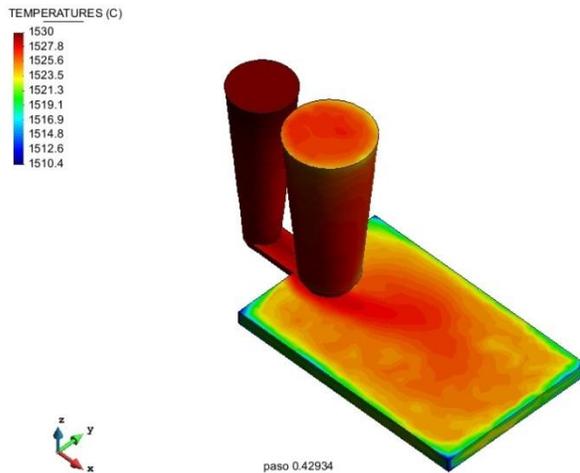


Figura 46. Modelación para una relación Ancho-Espesor de 12.

Resultados obtenidos.

Se obtuvo mediante la simulación los siguientes aspectos:

- La mazarota fue la última en llenarse por tanto cumplió su función.
- En la distribución de la velocidad se puede observar el incremento en el alimentador producto al cambio de sección.
- Existe agrietamiento que debido al buen funcionamiento fueron asumidos por mazarota.
- En el gráfico de fracción sólida debido a que las piezas son muy delgadas se solidifica más rápido en las esquinas.
- Existe porosidad por contracción pero no son relevantes.
- La mazarota fue la última en solidificarse.
- En la temperatura final ocurre una distribución del gradiente de temperatura.

3.4 Conclusiones Parciales.

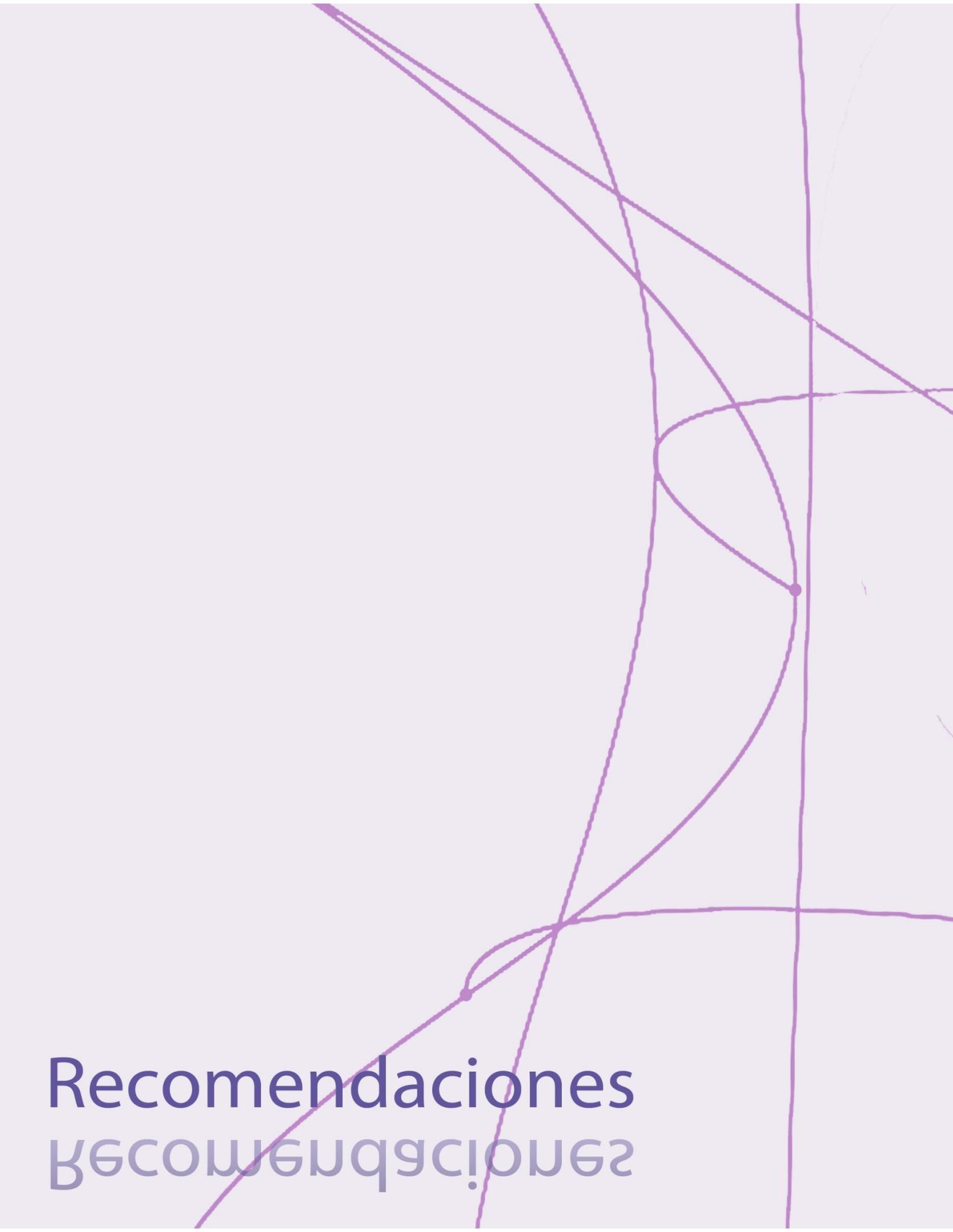
En este capítulo se realizó el análisis de una comparación entre un proceso de obtención de piezas fundidas, donde no se utiliza la técnica de comprobación por simulación y uno en que si, la fundamental conclusión está dada por la tasa de rechazo en ambos casos, lo que quiere decir que, la simulación de pieza nos facilita el porcentaje de error que puede presentar una pieza y por lo tanto existiría poca posibilidad de rechazo.

The background of the page is white, featuring several thin, hand-drawn purple lines. These lines are abstract and intersecting, creating various shapes and patterns. Some lines are straight, while others are curved. There are two small purple dots placed at specific intersection points of the lines. The overall aesthetic is minimalist and artistic.

Conclusiones
CONCLUSIONES

Conclusiones.

1. En la literatura se recoge la efectividad probada de la aplicación del método de la distancia de alimentación tanto por la sociedad americana de fundición de acero, como por el Laboratorio de solidificación del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Iowa.
2. En la literatura consultada no se encontró datos para la aplicación de esta metodología en piezas que se fabriquen con acero AISI 1045.
3. Se realizó una inspección visual a las piezas experimentales y se calculó la distancia de alimentación.
4. Se determinó la geometría de las mazarotas usadas en las piezas fundidas de acero 1045 que se muestran en la tabla 3.
5. Se realizó la simulación de los modelos para comprobar si quedaban con defectos.

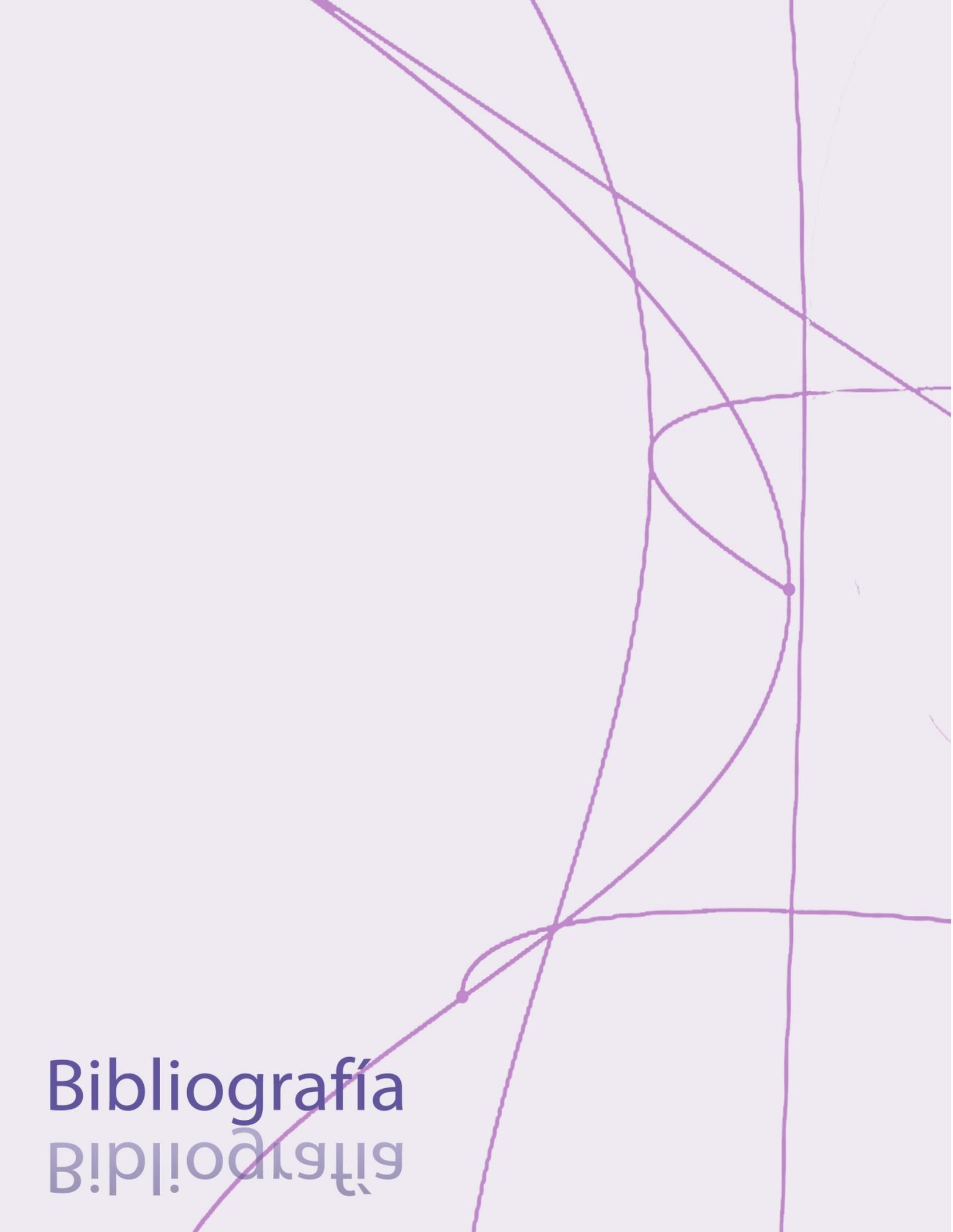
The background features several thin, hand-drawn purple lines that intersect and curve across the white space, creating an abstract, sketch-like pattern.

Recomendaciones
RECOMENDACIONES

Recomendaciones.

Después de analizado el trabajo realizado se pueden realizar las siguientes recomendaciones:

- Continuar con los estudios de la determinación de la distancia de alimentación en otras relaciones ancho /espesor sobre todo aquellas que estén más cercanas a las piezas reales utilizadas en la industria de la fundición en Cuba.
- Realizar una mejor observación de los defectos internos de las piezas obtenidas y de futuros experimentos utilizando técnicas de inspección por rayos x entre otros.

An abstract graphic design featuring several thin, purple, hand-drawn lines on a white background. The lines are irregular and overlapping, creating a sense of movement and depth. Some lines are straight, while others are curved or looped. There are two small, solid purple dots placed at specific points where the lines intersect or end. The overall composition is minimalist and artistic.

Bibliografía

Βιβλιογραφία

Bibliografía.

Referencias:

- [1]. Beckermann, C. and K.D. Carlson, Prediction of shrinkage pore volume fraction using a dimensionless Niyama criterion. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2009. **40A**: p. 163-175.
- [2]. Scalla Estalella, J.J., Fundamentos científicos de la Ingeniería Mecánica, in I Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica.
- [3]. Matsii, S.I. and F. Derevenets, Application of finite-element method to investigate interaction between slide-prone soils and piles. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2005. **42**(4).
- [4]. Friedel Hartmann, F., *Structural Analysis with Finite Elements.*, Springer-Verlag, Editor. 2004: Berlin. p. 484.
- [5]. Hutton, D.V. and W.A. Pullman, *Fundamental of Finite Elements Analysis*, ed. McGraw-Hill. 2006, EE.UU.
- [6]. Rodriguez Moliner, T., A. Parada Expósito, and U. Ordóñez, El uso de técnicas de simulación para la predicción de defectos en piezas fundidas. *Ingeniería Mecánica*, 2004. **3**: p. 65-69.
- [7]. Quintero Sayago, O. and P. Delvasto. Evaluación microestructural de solidificación usando perfiles numéricos T vs t. in X Congreso Iberoamericano de Metalurgia y Materiales Iberomet. 2008. Cartagena de Indias (Colombia).
- [8]. AMV, Optimización de cargas en fundición: software amv alea. *Fundidores*, 2009. **166**: p. 27-28.
- [9]. Scalla Estalella, J.J., Fundamentos científicos de la Ingeniería Mecánica, in I Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica.
- [10]. Matsii, S.I. and F. Derevenets, Application of finite-element method to investigate interaction between slide-prone soils and piles. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2005. **42**(4).
- [11]. Friedel Hartmann, F., *Structural Analysis with Finite Elements.*, Springer-Verlag, Editor. 2004: Berlin. p. 484.
- [12]. Hutton, D.V. and W.A. Pullman, *Fundamental of Finite Elements Analysis*, ed. McGraw-Hill. 2006, EE.UU.
- [13]. Rodriguez Moliner, T., A. Parada Expósito, and U. Ordóñez, El uso de técnicas de simulación para la predicción de defectos en piezas fundidas. *Ingeniería Mecánica*, 2004. **3**: p. 65-69.
- [14]. Quintero Sayago, O. and P. Delvasto. Evaluación microestructural de solidificación usando perfiles numéricos T vs t. in X Congreso Iberoamericano de Metalurgia y Materiales Iberomet. 2008. Cartagena de Indias (Colombia).

1. Steel Founders'society of America, Steel Risering Castings, Steel Founders'society of America, 1973
2. R.A. Hardin, S. Ou,K. Carison, and C Beckemarn "Relationship between Casting Simulation and radiographic Testing: Result from the SFSA Plate Casting Trials"1999
3. ASM, Metals Handbook, Vol. 15, 9th Nineth Edition, 1988
4. V. Kondic, Metallurgical Principles of Founding, Edward Arnold Pub.1968
 - a. I. Veinik, Thermodynamics for the Foundryman, Maclaren and Sons, 1968
5. R. Wloadawer, D directional S solidification of Steel C castings, Pergamon Press, 1966
6. Beckermann, C. and K.D. Carlson, Prediction of shrinkage pore volume fraction using a dimensionless Niyama criterion. Metallurgical and Materials Transactions A, 2009. **40A**: p. 163-175.
7. Scalla Estalella, J.J., Fundamentos científicos de la Ingeniería Mecánica, in I Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica.
8. Matsii, S.I. and F. Derevenets, Application of finite-element method to investigate interaction between slide-prone soils and piles. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2005. **42**(4).
9. Friedel Hartmann, F., Structural Analysis with Finite Elements., Springer-Verlag, Editor. 2004: Berlin. p. 484.
10. Hutton, D.V. and W.A. Pullman, Fundamental of Finite Elements Analysis, ed. McGraw-Hill. 2006, EE.UU.
11. Rodriguez Moliner, T., A. Parada Expósito, and U. Ordóñez, El uso de técnicas de simulación para la predicción de defectos en piezas fundidas. Ingeniería Mecánica, 2004. **3**: p. 65-69.
12. Quintero Sayago, O. and P. Delvasto. Evaluación microestructural de solidificación usando perfiles numéricos T vs t. in X Congreso Iberoamericano de Metalurgia y Materiales Iberomet. 2008. Cartagena de Indias (Colombia).
13. AMV, Optimización de cargas en fundición: software amv alea. Fundidores, 2009. **166**: p. 27-28.

The background of the page is a light purple color with several thin, dark purple lines. These lines are abstract and geometric, including straight lines, curves, and loops that intersect and cross each other. Two small dark purple dots are placed at specific points where the lines intersect or curve.

Anexos
ANEXOS

Anexos.**Anexo I** Imágenes del proceso de fundición.

Plantillas de madera de las placas y las mazarotas.



Plantillas de madera de las mazarotas



Plantillas de madera de las piezas.



Caja de moldeo.



Se colocan las mazarotas en posición para el moldeo.



Se tapan las piezas con Arena Silicia.



Molde de las mazarotas y alimentador.



Molde de las piezas.



Tapa superior de la caja de moldeo.



Horno de fundición.



Caja de moldeo después del proceso de fundición.



Plataforma vibradora para la extracción de las piezas fundidas.



Piezas fundidas con restos del molde.



Extracción de los restos.



Se retiró el sistema de alimentación .



Piezas fundidas sin la extracción de las mazarotas.