

**Universidad Nacional de Ingeniería**  
**Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica**



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

**Diseño de colada por software SolidCast, para la fabricación de  
carros porta barrotes por fundición - FUNCAL - SIDOR**

Para obtener el título profesional de Ingeniero Metalurgista.

Elaborado por

Wesphoyen Rosas Gómez

 [0009-0002-5746-0684](https://orcid.org/0009-0002-5746-0684)

Asesor

MSc. Felix Mauricio Perez

 [0009-0000-8447-0684](https://orcid.org/0009-0000-8447-0684)

LIMA – PERÚ

2024

---

Citar/How to cite	Rosas Gómez [1]
Referencia/Reference	[1] W. Rosas Gómez, “ <i>Diseño de colada por software SolidCast, para la fabricación de carros porta barrotes por fundición - FUNCAL - SIDOR</i> ” [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2024.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

---



---

Citar/How to cite	(Rosas, 2024)
Referencia/Reference	Rosas, W. (2024). <i>Diseño de colada por software SolidCast, para la fabricación de carros porta barrotes por fundición - FUNCAL - SIDOR</i> . [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

---

***Dedicatoria***

Para mis padres Ernestina y Mario allá en el cielo, a  
mis hermanos por su apoyo incondicional y para el  
motor de mi vida Izán Rosas.

## **Agradecimientos**

En primer lugar, deseo expresar mi más sincero agradecimiento a mis hermanos (Wilfredo Joel, Dora Lilia, Luis Alberto y Edith) por sus constantes apoyo incondicional, sabios consejos en momentos difíciles, sus soportes fueron fundamental para mantenerme motivado y enfocado por el buen camino.

En segundo lugar, agradecer infinitamente a los estimados catedráticos de la FIGMM, por sus enseñanzas y compartir sus valiosas experiencias durante mi etapa de estudiante y egresado, en especial a: M. Sc. ING. Felix, Mauricio Perez y M. Sc. ING. Jorge Alfonso, Ugarte Diaz, por su asesoramiento, dedicación y guía para el desarrollo del trabajo de suficiencia profesional.

Por último, no puedo dejar de agradecer a mis amistades cercanos, por su apoyo desinteresado, sus ánimos y su apoyo emocional en los momentos difíciles, fueron de gran soporte que equilibraron mi vida académica y personal.

## Resumen

El objetivo del presente trabajo de suficiencia profesional es, desarrollar el diseño de colada para la fabricación de los carros porta barrotes por fundición (Fundición Callao S.A), en acero de baja aleación ASTM A217-WC6, aplicando el software para la simulación de la solidificación de piezas "SolidCast".

El procedimiento se basa en: modelado en el software SolidCast, simulación de la colada, análisis de resultados, ajustes y controles en la fabricación, mediante reportes de calidad (composición química, control dimensional, dureza, ensayo de tracción, ensayo metalográfico y líquidos penetrantes).

Durante el proceso de fabricación de los carros porta barrotes por fundición, el diseño de colada final, es validado mediante reportes de controles de calidad, ensayos destructivos (ED) y ensayos no destructivos (END).

Al desarrollar el diseño de colada final para la fabricación de carros porta barrotes por fundición, se consigue eliminar posibles problemas de defectos y elevar la calidad del producto terminado.

El uso de software (SolidCast), se justifica económicamente, ya que se obtiene un ahorro de \$42356 para la fabricación de 100 carros porta barrotes

Palabras claves: Software, Diseño, Colada, Acero, Fabricación, SolidCast, Simulación, ASTM A217-WC6

## **Abstract**

The objective of this professional work is to develop the casting design for the manufacture of the bar carrying cars by foundry (Fundición Callao S.A), in low alloy steel ASTM A217-WC6, applying the software for the simulation of solidification of "SolidCast" parts.

The procedure is based on: modeling in SolidCast software, casting simulation, analysis of results, adjustments and controls in manufacturing through quality reports (chemical composition, dimensional control, hardness, tensile test, metallographic test and penetrating liquids).

During the manufacturing process of the cast iron bar carriages, the final casting design is validated through quality control reports, destructive tests (ED) and non-destructive tests (NDT).

By developing the final casting design for the manufacture of cast iron bar carriages, it is possible to eliminate possible defect problems and increase the quality of the finished product.

The use of software (SolidCast) is economically justified, since a saving of \$42,356 is obtained for the manufacture of 100 bar-carrying cars.

Keywords: Software, Design, Casting, Steel, Manufacturing, SolidCast, Simulation, ASTM A217-WC6.

## Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen .....	v
Abstract .....	vi
Introducción .....	xiv
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo .....	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Descripción del problema de investigación.....	2
1.3 Objetivos del estudio.....	2
1.3.1 Objetivo general.....	2
1.3.2 Objetivos específicos .....	3
1.4 Antecedentes investigativos .....	3
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual .....	7
2.1 Marco teórico .....	7
2.1.1 Mecanismo de nucleación.....	7
2.1.2 Crecimiento dendrítico en materiales puros. ....	13
2.1.3 Crecimiento dendrítico en aleaciones.....	15
2.1.4 Sistema de Colada.....	16
2.1.5 Diseño de colada en SolidCast .....	30
2.1.6 Aceros bajo la norma ASTM A217 .....	41
2.2 Marco conceptual.....	43
2.2.1 Acero.....	43
2.2.2 Acero Aleado .....	43
2.2.3 Ferrita.....	44
2.2.4 Perlita.....	44
2.2.5 Cementita.....	44
2.2.6 Desfogues o respiraderos .....	45

2.2.7	Rechupe.....	45
2.2.8	Canalizaciones y refractarios especiales.....	45
2.2.9	Arena Cromita.....	45
2.2.10	Eficiencia de colada .....	46
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación .....		47
3.1	Diseño de colada en SolidCast (pieza sola) .....	47
3.1.1	Selección de la aleación.....	47
3.1.2	Selección del material del molde.....	47
3.1.3	Importando sólido a SolidCast.....	48
3.1.4	Generando malla del modelo y molde .....	49
3.1.5	Ejecutando la simulación (pieza sola) .....	50
3.1.6	Análisis de resultado utilizando plano de corte.....	50
3.1.7	Calculo de riser en SolidCast .....	52
3.2	Cálculos teóricos.....	53
3.2.1	Método teórico del cálculo de número de alimentadores.....	53
3.2.2	Método teórico del cálculo del sistema de llenado.....	54
3.3	Primer diseño de colada en SolidCast (pieza con sistema de alimentación) .....	56
3.3.1	Generando malla del primer diseño de colada .....	56
3.3.2	Ejecutando la simulación (pieza con sistema de alimentación) .....	57
3.3.3	Análisis de densidad del material utilizando iso superficie al 0.995 .....	59
3.4	Segundo diseño de colada en SolidCast (pieza con sistema de alimentación)..	61
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados .....		65
4.1	Diseño de colada final.....	65
4.2	Eficiencia de colada .....	68
4.3	Ensayos realizados a los carros porta barrotes fabricados en FUNCAL.....	68
4.3.1	Reporte de composición química .....	69
4.3.2	Reporte de inspección dimensional.....	70
4.3.3	Reporte de dureza .....	72



4.3.4	Reporte de ensayo de tracción.....	73
4.3.5	Reporte de ensayo metalográfico.....	75
4.3.6	Reporte de líquidos penetrantes. ....	77
4.3.7	Reportes adicionales.....	78
4.4	Justificación económica. ....	78
4.5	Garantía del carro porta barrotos y tiempo de vida útil. ....	79
	Conclusiones .....	81
	Recomendaciones .....	83
	Referencias bibliográficas.....	84
	Anexos .....	1

## Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: Elección de diámetro del bebedero, en función al flujo.....	29
Tabla 2: Elección de la boquilla del canal de ataque.....	30
Tabla 3: Materiales de uso para el diseño de colada final.....	65
Tabla 4: Costo de producción (\$/kg), para un acero ASTM A217-WC6 .....	79

## Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Funcionamiento de la parrillera móvil, entrada y salida dentro del horno .....	5
Figura 2: Medidas teóricas del carro porta barrote (medidas en milímetro).....	5
Figura 3: Carro porta barrotes fabricado en Fundición Callao SA .....	6
Figura 4: Representación esquemática de una estructura .....	7
Figura 5: Dependencia de la temperatura en la energía libre del volumen de las fases sólida y líquida .....	9
Figura 6: Energía libre de formación de un núcleo como una función de su radio.....	10
Figura 7: a) Geometría del casquete esférico. b) Diagrama de tensión superficial en el borde del casquete .....	12
Figura 8: Crecimiento dendrítico .....	14
Figura 9: Área sobreenfriada - región sombreada.....	15
Figura 10: Transición de morfologías de crecimiento de planar a celular y posteriormente a dendrítica.....	16
Figura 11: Elementos del sistema de colada.....	17
Figura 12: Esquema del rechupe de un acero de bajo carbono .....	20
Figura 13: Solidificación progresiva y direccional en una pieza con mazarota .....	20
Figura 14: Aplicación de alimentadores para mazarotas.....	21
Figura 15: Eficiencia óptima de la mazarota .....	21
Figura 16: Zona de influencia de la mazarota para placa y barra, con y sin enfriadores .	22
Figura 17: Relación del módulo de enfriamiento entre la pieza y mazarota.....	23
Figura 18: Uso de enfriadores o chills.....	24
Figura 19: Representación de la solidificación direccional .....	25
Figura 20: Información técnica del canal de ataque (en cerámico).....	30
Figura 21: Pantalla de los parámetros del sistema SolidCast.....	32
Figura 22: Pantalla de base de datos SolidCast.....	33
Figura 23: Pantalla de la curva de enfriamiento SolidCast .....	34

Figura 24: Pantalla de materiales del molde SolidCast .....	35
Figura 25: Pantalla generar malla SolidCast .....	36
Figura 26: Generando malla del modelo .....	37
Figura 27: Generando malla del molde rectangular .....	37
Figura 28: Ejecución de la simulación, llenado del molde de metal al 93.49% .....	38
Figura 29: Ejecución de la simulación, porcentaje de sólido al 3.19%.....	38
Figura 30: Pantalla iso-superficie (tiempo de solidificación) .....	39
Figura 31: Imagen iso-superficie, solidificación de la pieza a 10 minutos.....	39
Figura 32: Plano de corte, fracción crítica tiempo sólido, en la orientación XY.....	40
Figura 33: Plano de corte, difusión de calor en el molde, en la orientación XY .....	41
Figura 34: Composición química ASTM A217.....	42
Figura 35: Requisitos de tracción ASTM A217.....	43
Figura 36: Refractarios especiales (cerámicos), para el sistema de colada .....	45
Figura 37: Composición química de acuerdo al requerimiento de SIDOR.....	47
Figura 38: Pantalla generar malla, material del molde arena cromita.....	48
Figura 39: Sólido 3D del carro porta barrotes en SolidCast.....	48
Figura 40: Imagen para generar malla de la pieza sola.....	49
Figura 41: Generando malla del modelo, pieza sola (carro porta barrotes) .....	49
Figura 42: Generando malla del molde, pieza sola (carro porta barrotes) .....	50
Figura 43: Simulación de la pieza sola (carro porta barrotes) .....	50
Figura 44: Vista de planta del carro porta barrotes .....	51
Figura 45: Vista en el plano de corte BB' .....	52
Figura 46: Imagen cálculo de mazarota en SolidCast, zona 3.....	53
Figura 47: Imagen carro porta barrotes, zona 1 delineado de rojo .....	53
Figura 48: Imagen para generar malla de la pieza con sistema de alimentación.....	56
Figura 49: Generando malla del modelo, pieza con sistema de alimentación .....	57
Figura 50: Generando malla del molde, pieza con sistema de alimentación .....	57
Figura 51: Llenado del molde de metal líquido al 12.98 % .....	58

Figura 52: Llenado del molde de metal líquido al 90.63 % .....	58
Figura 53: Representación gráfica del sólido al 99.5 % de solidificación total .....	59
Figura 54: Vista planta inferior del carro porta barrotes (presencia de rechupes).....	59
Figura 55: Vista lateral del carro porta barrotes (presencia de rechupes) .....	60
Figura 56: Vista frontal esquelética del carro porta barrotes (presencia de rechupes) ....	60
Figura 57: Vista en el plano de corte BB' de la pieza con sistema de alimentación.....	61
Figura 58: Vista isométrica del carro porta barrotes con padding entre los rieles 2,3y4 ..	61
Figura 59: Vista en el plano de corte BB' del diseño de colada final .....	62
Figura 60: Vista tiempo de fracción crítica sólida del carro porta barrotes.....	63
Figura 61: Vista del análisis de temperaturas del carro porta barrotes .....	63
Figura 62: Vista del gradiente de temperatura del carro porta barrotes.....	64
Figura 63: Diseño de colada final, sección de corte A-A y vista de planta.....	66
Figura 64: Diseño de colada final, sección B-B, detalle E y sección C-C .....	67
Figura 65: Diseño de colada final, vista isométrica de fondo y planta, sección D-D .....	68
Figura 66: Reporte de composición química .....	69
Figura 67: Plano de fundición del carro porta barrotes.....	70
Figura 68: Reporte de control dimensional.....	71
Figura 69: Reporte de dureza .....	72
Figura 70: Reporte de ensayo de tracción .....	73
Figura 71: Gráfica fuerza vs alargamiento .....	74
Figura 72: Reporte de ensayo metalográfico .....	75
Figura 73: Reporte de líquidos penetrantes .....	77
Figura 74: Reporte de seguimiento de garantía de los carros porta barrotes .....	80

## Introducción

El presente trabajo de investigación, está enfocado en desarrollar el diseño de colada para la fabricación de los carros porta barrotes por el método de fundición. El trabajo de investigación se desarrolló en las instalaciones de la empresa FUNCAL SA.

Los carros porta barrotes, son fabricados en acero de baja aleación ASTM A217 - WC6 y son exportados a la empresa SIDOR - VENEZUELA. Los carros porta barrotes tienen como función transportar las pellas verdes a través del horno para su cocción.

Para desarrollar el diseño de colada de los carros porta barrotes, se realizó en un software para la simulación de la solidificación de piezas (SolidCast), con soporte de cálculos matemáticos teóricos y utilizando ciertos artificios (criterios), como el uso de placas enfriadoras, padding, alimentadores curvos, alimentadores ciegos y desfogues tipos chavetas. Con el fin de priorizar la sanidad de la pieza y obtener una eficiencia aceptable del 69%.

Aunque el software para la simulación de la solidificación (SolidCast), predice la sanidad de la pieza, las validaciones adicionales se realizaron durante la fabricación de los carros porta barrotes a través de reportes de control de calidad, ensayos destructivos (ED) a muestra probeta y ensayos no destructivos (END) a piezas.

Los controles que se realizaron durante la fabricación de los carros porta barrotes son como: reporte de composición química, reporte de inspección dimensional, reporte de inspección de dureza, reporte de ensayo de tracción, reporte de ensayo metalográfico, reporte de líquidos penetrantes. Los cuales validaron la sanidad íntegra de la pieza y las propiedades del acero ASTM A217 - WC6, que son aspectos críticos para asegurar la calidad y conformidad del producto terminado.

Por los resultados obtenidos, demostramos que el uso de los softwares para la simulación de la solidificación de piezas en una fundición, es de vital importancia para el desarrollo del diseño de colada óptimo, además que también se ahorra tiempo y contribuye a una gestión más eficiente de los recursos económicos de la empresa.

# Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

## 1.1 Generalidades

La fundición es el procedimiento más antiguo para dar forma a los metales. Fundamentalmente radica en fundir y colar metal líquido en un molde de la forma y tamaño deseado para que allí solidifique. Al penetrar el metal líquido en el molde comienza el proceso de transferencia de calor que provoca en tiempo la solidificación del metal. Para los aceros en comparación con la fundición de hierros, poseen menor fluidez y exige una temperatura más alta para su vertido en los moldes, lo que provoca que se experimente una mayor contracción 2% y mayores defectos en las piezas fundidas.

La obtención de piezas de acero sin defectos depende decisivamente de la construcción correcta de la pieza a moldear, es decir, de que no surjan acumulaciones locales del metal y existan pasos suaves de una sección a otra de un correcto cálculo de los sistema de alimentación que permita el llenado de metal en el molde de una forma suave y sin turbulencia para evitar acumulaciones y absorciones de gases en el mismo, de propiedades específicas en los materiales de moldeo que garanticen la solidificación del metal en el mismo y de la composición química del metal que se quiera obtener.

Por ello para garantizar piezas sanas, libre de defecto el 1er paso es desarrollar un buen diseño de colada, apoyado con la tecnología de un programa para visualizar el fenómeno de solidificación en fundición en base a simulación, nos permite observar cómo el proceso de fundición solidificara antes de realizar patrones, moldes y evitar errores costosos.

La simulación en fundición es el uso de software especializado para modelar y predecir el comportamiento de los fluidos, transferencia de calor, solidificación y otros fenómenos relevantes en los procesos de fundición. Esto permite evaluar y optimizar virtualmente el diseño del proceso antes de la fabricación física, minimizando costos y tiempo de desarrollo.

## **1.2 Descripción del problema de investigación**

Aunque el Perú es un país tradicionalmente minero, la industria manufacturera de aleaciones no se encuentra lo suficientemente desarrollada como para satisfacer la demanda de aleaciones y piezas metálicas de la industria nacional e internacional.

Esta realidad que es preocupante en la capital –donde se encuentra el mayor número y mejores industrias metalúrgicas del país, lo es mucho más en las provincias donde la capacidad de inversión en tecnología y las oportunidades de capacitación son mucho menores. Identificando los principales problemas tecnológicos y de gestión que presenta esta actividad industrial, así como, los factores que dificultan su despegue.

El proceso de fabricación de carros porta barrotes por fundición, es más complejo de lo que se cree y si a esto además le añadimos que, son pocas las fundiciones que utilizan software para la simulación de solidificación de piezas, el resultado final será desfavorable, obteniendo piezas con defectos, piezas de mala calidad, o por último piezas rechazadas.

Por lo expuesto líneas arriba, el problema que se advierte actualmente, es la falta de conocimientos en los cálculos de los diseños de coladas para la fabricación de piezas (utilizando Software para la simulación de solidificación de piezas), en el mercado nacional son pocos los profesionales que dominan la simulación y calculo en el diseño de colada, debido a la falta de capacitaciones y actualizaciones por parte del sector público y privado.

En el Perú son pocas las fundiciones peruanas que están en la capacidad de fabricar los carros porta barrotes por fundición, por considerar su gran peso (aproximadamente 5.1 tn), sino también por la forma compleja del carro porta barrotes, el reto fue asumido por la empresa peruana FUNDICION CALLAO S.A. que cuenta con personal calificado para este tipo de proyectos de gran envergadura.

## **1.3 Objetivos del estudio**

### ***1.3.1 Objetivo general***

Desarrollar el diseño de colada por software SolidCast, para la fabricación de los carros porta barrotes por fundición.



### **1.3.2 Objetivos específicos**

Identificar los puntos críticos durante el proceso del desarrollo de diseño de colada, para la fabricación de los carros porta barrotes por fundición.

Validar las propiedades del material en estudio (ASTM A217-WC6) durante el proceso de fabricación de los carros porta barrotes por fundición, mediante reportes de controles de calidad, ensayos destructivos (ED) y ensayos no destructivos (END).

Demostrar que el uso de un software para la simulación de la solidificación en las fundiciones, es de vital importancia para el desarrollo del diseño de colada óptimo, ahorrar tiempo y contribuir a una gestión más eficiente de los recursos económicos de la empresa.

### **1.4 Antecedentes investigativos**

El diseño de colada requiere de tres pasos fundamentales, localización, diseño y tamaño, que siempre siguen los principios físicos del flujo libre de un líquido. Por lo que el uso de las reglas y ecuaciones que dictan los teoremas y leyes físicas son básicas para iniciar el cálculo geométrico de la colada.

#### **En general una buena colada:**

- Reduce la turbulencia del metal fundido.
- Eliminar los gases y el aire atrapado.
- Disminuye la rapidez del líquido.
- Previene la solidificación prematura.
- Desarrolla gradientes térmicos apropiados.

#### **El diseño de colada debe realizarse de acuerdo a varias consideraciones.**

- Del modelo.
- De morfología.
- De dimensionado.
- De posicionamiento.

Las simulaciones informáticas son uno de los pilares de la industria actual. El ahorro que supone a una empresa poder anticipar el resultado de sus procesos, conlleva en muchos casos la decisión de invertir en I+D+i (investigación, desarrollo e innovación) con

sus productos o simplemente, limitarse a reproducir lo ya existente.

Aplicado al campo de la fundición de metales, existen potentes empresas de creación de software, que ofrecen multitud de módulos capaces de simular los diferentes procesos de fundición existentes.

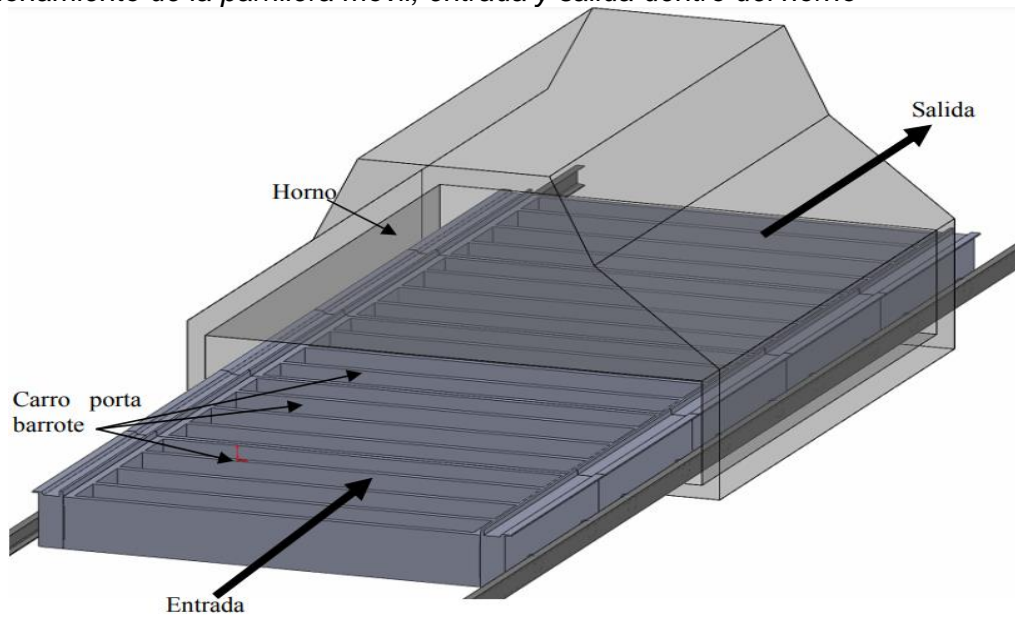
Dentro de la industria, simular los procesos ha sido desde la antigüedad una herramienta eficaz, económica y sobre todo útil para el desempeño de cualquier empresa. Si bien, la esencia del método es la misma, realizar de manera controlada y fácil un proceso que deseamos llevar a cabo, pero con el control de los factores que intervienen y los hechos derivados de la conjunción en el orden deseado de los mismos.

Los métodos para llegar a simular los procesos han ido evolucionando con el tiempo hasta llegar a la introducción de la informática en la ecuación. El salto técnico producido en el siglo XX y continuado en nuestros días, ha supuesto una variación tan grande en apenas 50 años, que muchas de las herramientas usadas hoy en día en cualquier fábrica, taller u oficina, son de tal calidad, que permiten estar en la vanguardia de la industria sin necesidad de realizar una inversión desmesurada. Esto supone un beneficio a la sociedad y a la propia tecnología, ya que la dota de una gran accesibilidad que revierte directamente en su evolución.

La parrillera móvil también conocida como máquina de induración de las pellas, está formada por una cadena sin fin de 208 carritos de parrillera o carros porta barrotes. La parrillera móvil tiene como función transportar las pellas verdes a través del horno para su cocción. En la figura 1 se puede observar una representación de cómo la parrillera móvil entra y sale del horno.

**Figura 1**

*Funcionamiento de la parrillera móvil, entrada y salida dentro del horno*

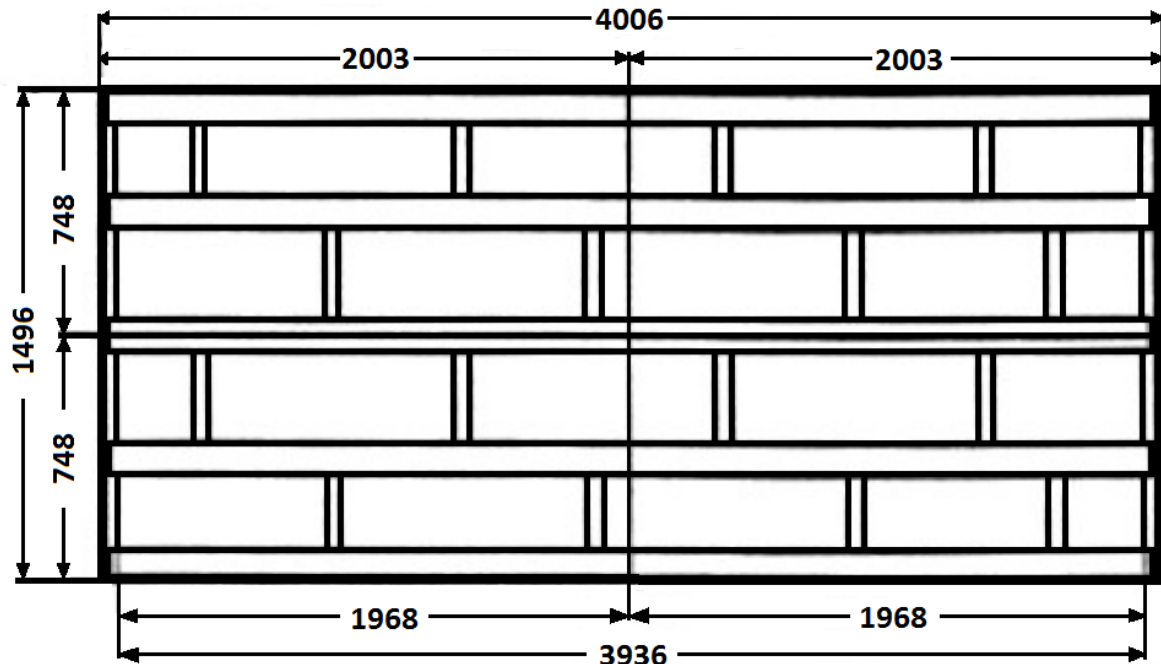


Fuente: Daniel Esteban Alfonzo / 2010 / Diseño de un sistema de sujeción con rotación 360° para la reparación de carros porta barros.

El carro porta barros es una estructura de acero altamente aleado ASTM A217-WC6, que tiene una longitud de 4006 mm, un ancho de 1496 mm y altura 435 mm. En la Figura 2 se puede visualizar las dimensiones de la estructura del carro porta barros.

**Figura 2**

*Medidas teóricas del carro porta barros (medidas en milímetro)*



Fuente: Daniel Esteban Alfonzo / 2010 / Diseño de un sistema de sujeción con rotación 360° para la reparación de carros porta barros.

En la Figura 3 podemos visualizar el carro porta barrotes fabricados por FUNCAL SA y ver la magnitud real de la pieza.

**Figura 3**

*Carro porta barrotes fabricado en Fundición Callao SA.*



Fuente: Fundición Callao SA.

## Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

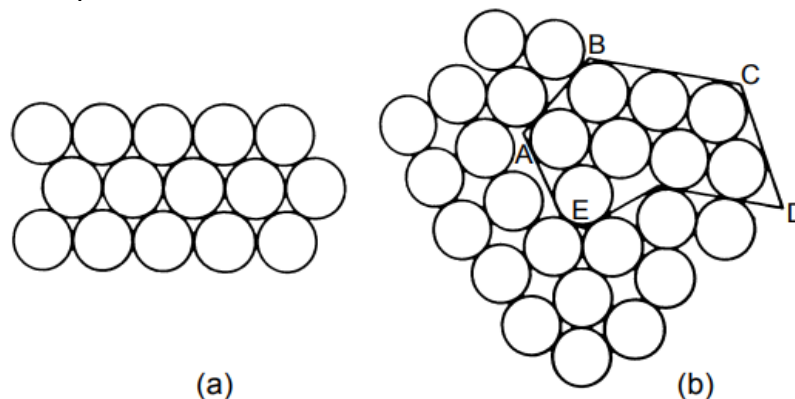
### 2.1 Marco teórico

#### 2.1.1 Mecanismo de nucleación

Aunque en el estado líquido los átomos no tienen una distribución ordenada definida, puede ocurrir que, en un instante cualquiera, algunos de ellos se agrupen ocupando posiciones muy similares a las que les corresponde en la red espacial que se forma al solidificar el líquido. Representación esquemática de una estructura (a) cristalina y (b) de un líquido. El área ABCDE presenta la misma ordenación en el líquido y en el cristal (Figura 4).

**Figura 4**

*Representación esquemática de una estructura.*



Fuente: Sidney H. Avner, McGraw-Hill /1964 / Introduction to Physical Metallurgy.

Estos conglomerados atómicos no son permanentes, sino que se forman y destruyen rápidamente, su duración depende de la temperatura del medio y de su tamaño, de tal modo que cuanto mayor es la temperatura, mayor es la energía cinética de los átomos y más corta la vida de los grupos. Los conglomerados pequeños son muy inestables, porque están formados por un número pequeño de átomos y la pérdida de uno de ellos puede ocasionar su destrucción. A medida que disminuye la temperatura del líquido, los átomos pierden libertad de movimiento, lo que da lugar a un aumento de la vida del conglomerado, coexistiendo al mismo tiempo un número mayor de ellos; este aumento en la vida del conglomerado está acompañado de un aumento gradual de su tamaño, si

esta partícula alcanza un tamaño crítico, será considerada un núcleo, a partir del cual crecerán los cristales metálicos.

Existen dos tipos de procesos de nucleación:

**Nucleación homogénea:** En este proceso la nueva fase sólida se forma uniformemente en todo el volumen de la fase líquida madre.

**Nucleación heterogénea:** En este proceso la nueva fase sólida no se forma en toda la fase madre, sino que busca sitios preferenciales para solidificar.

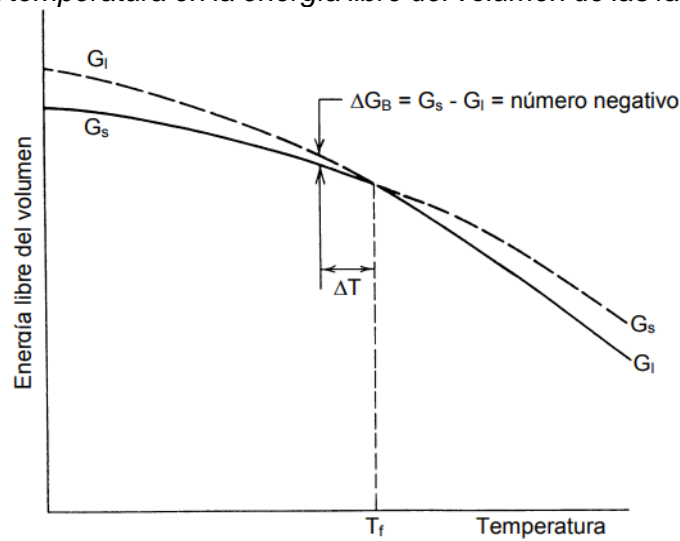
**2.1.1.1 Nucleación homogénea.** Si se considera el proceso de solidificación dentro de la teoría clásica de la nucleación de Volmer y Weber, se podría considerar sólo el cambio de energía libre durante la solidificación:

$$\Delta G_V = G_S - G_L \quad (1)$$

Donde  $\Delta G_V$  es la energía libre del volumen,  $G_S$  es la energía libre del sólido y  $G_L$  es la energía libre del líquido, en esta ecuación el cambio de la energía libre de volumen durante la solidificación se vuelve negativo, ya que la energía libre del sólido es menor a la del líquido conforme disminuye la temperatura a partir del punto de fusión. Esto se puede observar en la Figura 5 en la que se grafica la energía libre del volumen como una función de la temperatura en ambas fases. A la temperatura de solidificación ambas fases deben tener la misma energía libre, ya que están en equilibrio termodinámico a esta temperatura. Supóngase que el líquido se enfría por debajo de su temperatura de fusión sin solidificar, a este intervalo de temperatura se le llama sobreenfriamiento.

**Figura 5**

*Dependencia de la temperatura en la energía libre del volumen de las fases sólida y líquida.*



Fuente: John D. Verhoeven, /1987 / Fundamentals of Physical Metalurgy.

Se considerará primero la nucleación homogénea. En este caso el sólido empieza a formarse como regiones muy pequeñas a través del volumen del líquido. Estas pequeñas partículas se llamarán núcleos y se considerará que tienen forma esférica. Cuando estos núcleos se forman, primero son muy pequeños, probablemente del orden de 10 Å en diámetro. Por consiguiente, su relación superficie a volumen es muy alta. Como habrá una energía libre asociada con la formación de la superficie del núcleo, esta energía superficial actuará como una barrera para la formación de núcleos pequeños. Para tomar en cuenta este efecto superficial se escribe el cambio de energía libre para formar un núcleo como:

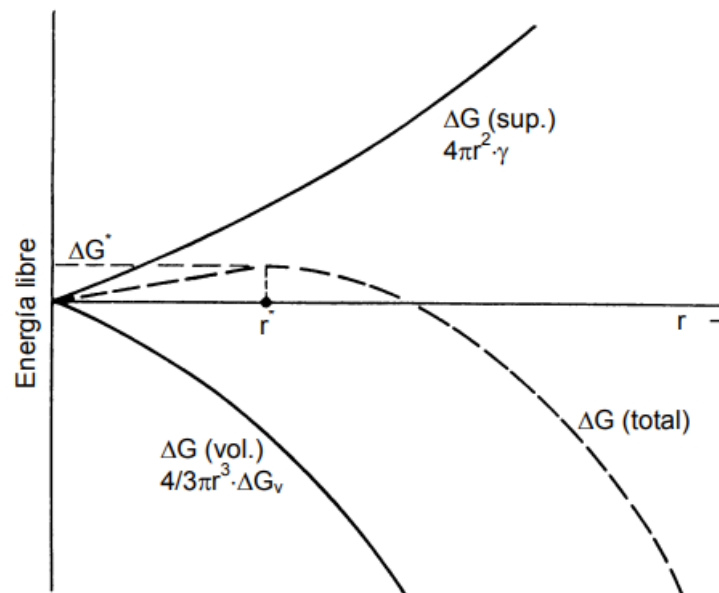
$$\Delta G = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_V + 4\pi r^2 \gamma \quad (2)$$

Donde la energía libre superficial se ha tomado simplemente como la tensión superficial  $\gamma$ . Lo anterior es correcto en materiales puros, pero introduce un pequeño error en las aleaciones, el cual no se considerará.  $\Delta G_V$  es el cambio de energía libre del volumen, definido en la Figura 5. Los dos términos de la ecuación (2) se grafican en la Figura 6 mostrando el término energía libre del volumen negativo que hace que se realice el proceso y el término energía libre superficial positivo que lo inhibe, y se ve que el cambio de energía libre total es máximo en  $r^*$ . La Figura 6 da el cambio de energía libre total para un proceso en el que un número  $n$  de átomos de líquido se combinan entre sí para dar un

sólido de tamaño  $r$ . Se supone que el proceso de nucleación real no se presenta con este tipo de nucleación a gran escala donde  $n$  átomos de líquido se vuelven repentinamente sólidos. Se cree que existe una distribución de tamaños de pequeños aglomerados de átomos en el líquido en cualquier tiempo y estos aglomerados se consideran como núcleos potenciales. Debido a fluctuaciones térmicas, dichos aglomerados ganan y pierden átomos continuamente. El fenómeno de nucleación se presenta cuando uno de estos aglomerados gana más átomos de los que pierde.

**Figura 6**

*Energía libre de formación de un núcleo como una función de su radio*



Fuente: John D. Verhoeven, /1987 / Fundamentals of Physical Metalurgy.

Si el cambio de energía libre para esta reacción es negativo se favorece entonces el fenómeno de nucleación. Al observar la Figura 6 se puede ver que, para todos los valores de  $r > r^*$ , esta reacción tiene un cambio negativo de energía libre; es decir, arriba de  $r^*$  el crecimiento de un núcleo disminuye la energía libre. Por consiguiente,  $r^*$  es un radio crítico y su valor se determina derivando la Ecuación (2):

$$r^* = \frac{-2\gamma}{\Delta G_v} \quad (3)$$

El cambio de energía libre para formar un núcleo de tamaño crítico,  $\Delta G^*$ , se encuentra substituyendo en la Ecuación (2)

$$\Delta G^* = \frac{16\pi\gamma^3}{3(\Delta G_v)^2} \quad (4)$$



La nucleación es el resultado de la formación de núcleos con un tamaño que los hace estables para el crecimiento de la nueva fase, formándose a partir de pequeños aglomerados atómicos en la matriz líquida.

**2.1.1.2 Nucleación heterogénea.** Quedará claro del análisis anterior que la razón para que no haya nucleación inmediatamente después de alcanzar la temperatura de transformación es la barrera presentada por los requerimientos de energía libre superficial de los núcleos. Por consiguiente, los sistemas físicos que sufren transformaciones de fase intentan reducir esta barrera de energía libre superficial al hacer que la nucleación se presente sobre una intercara preexistente (paredes del molde y partículas suspendidas en el metal líquido). De esta forma, la intercara preexistente se borra y, entonces, el cambio neto de energía libre superficial puede reducirse un poco. Este proceso se ilustra considerando la formación de una nueva fase  $\beta$ , fuera de la fase  $\alpha$ , en la pared del recipiente. La Figura 7a muestra la nueva fase  $\beta$  formándose como un casquete esférico sobre la pared es decir, la fase  $\beta$  es una porción de la esfera que tiene radio  $r_{\alpha\beta}$ . Una vista superior de la Figura 7a mostraría la fase  $\beta$  como un círculo con radio proyectado  $R$ . Para obtener el cambio de energía libre superficial producido por la formación de esta fase se toma la energía libre superficial igual a la tensión superficial y se tiene:

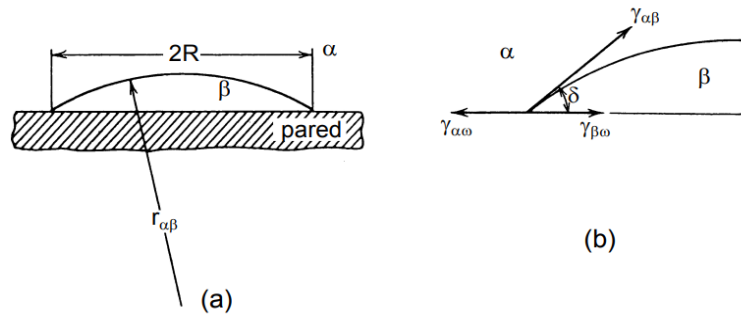
$$\Delta G(sup.) = [A_{\alpha\beta}\gamma_{\alpha\beta} + A_{\beta w}\gamma_{\beta w}] - A_{\beta w}\gamma_{\alpha w} \quad (5)$$

donde  $A_{\alpha\beta}$  es el área de la intercara  $\alpha$ - $\beta$  y  $A_{\beta w}$  es el área de la intercara  $\beta$ - $w$ . Nótese que se debe restar la energía libre superficial de la interfase  $\alpha$ - $w$  que fue borrada cuando se formó la fase  $\beta$ , y el área de esta interfase  $\alpha$ - $w$  borrada es exactamente  $A_{\beta w}$ . Para proseguir, se construye el balance de fuerzas de tensión superficial en el borde de las fases como se muestra en la Figura 7b.

$$\gamma_{\alpha w} = \gamma_{\beta w} + \gamma_{\alpha\beta} \cos\delta \quad (6)$$

## Figura 7

a) Geometría del casquete esférico. b) Diagrama de tensión superficial en el borde del casquete.



Fuente: John D. Verhoeven, /1987 / Fundamentals of Physical Metallurgy.

Sea  $S = \cos \delta$  y haciendo  $A_{\beta w} = \pi R^2$  se obtiene, al combinar las Ecuaciones 5 y 6:

$$\Delta G(\text{sup.}) = A_{\alpha\beta}\gamma_{\alpha\beta} - \pi R^2(\gamma_{\alpha\beta} * S) \quad (7)$$

La expresión para el cambio total de energía libre en la formación del núcleo del casquete esférico se escribe como:

$$\Delta G = \Delta G(\text{volumen}) + \Delta G(\text{sup.}) \quad (8a)$$

$$= V_{\beta}\Delta G_{\beta} + (A_{\alpha\beta} - \pi R^2 S)\gamma_{\alpha\beta} \quad (8b)$$

Para ampliar esta ecuación se necesitan las expresiones siguientes del volumen y el área de la superficie del casquete esférico:

$$V_{\beta} = \pi r_{\alpha\beta}^3 \left[ \frac{2-3S+S^3}{4} \right] \quad (9a)$$

$$A_{\alpha\beta} = 2\pi r_{\alpha\beta}^2 [1 - S] \quad (9b)$$

$$R = r_{\alpha\beta} \text{sen} \delta \quad (9c)$$

Sustituyendo en la Ecuación (8), se obtiene:

$$\Delta G = \pi r_{\alpha\beta}^3 \left[ \frac{2-3S+S^3}{4} \right] * \Delta G_V + [2\pi r_{\alpha\beta}^2 (1 - S) - \pi r_{\alpha\beta}^2 (\text{sen}^2 \delta) S] \gamma_{\alpha\beta} \quad (10)$$

Como el seno<sup>2</sup>δ es 1-S<sup>2</sup>, por álgebra, se obtiene:

$$\Delta G = \left[ \frac{4}{3} \pi r_{\alpha\beta}^3 \Delta G_V + 4\pi r_{\alpha\beta}^2 \gamma_{\alpha\beta} \right] \left[ \frac{2-3S+S^3}{4} \right] \quad (11)$$

Comparando este resultado con la Ecuación (2) se ve que la única diferencia es el término entre corchetes del lado derecho. Para obtener el valor crítico de  $r^*_{\alpha\beta}$  se deriva y, en forma similar a los resultados de la Ecuación (2), se obtiene:

$$r_{\alpha\beta}^* = -\frac{2\gamma_{\alpha\beta}}{\Delta G_V} \quad (12)$$

Comparando este resultado con la ecuación (3) se ve que el radio de curvatura de la cubierta esférica es idéntico al radio de la esfera que se obtendría por nucleación homogénea. Entonces, comparando las Ecuaciones (2) y (11) resulta evidente que el  $\Delta G^*$  para la nucleación heterogénea será idéntico al de la nucleación homogénea, excepto por el término de los corchetes que implica S de la Ecuación (11).

$$\Delta G^*(het) = \Delta G^*(hom) \left[ \frac{2-3S+S^3}{4} \right] \quad (13)$$

El término entre corchetes varía desde 0 hasta 1 conforme el ángulo dihedral  $\delta$  de la Figura 4b varía desde  $0^\circ$  hasta  $180^\circ$ . Desde luego,  $\Delta G^*(het.) < \Delta G^*(hom.)$ , lo cual demuestra que para la nucleación heterogénea se requiere menor energía y, por consiguiente, se presenta con mayor facilidad. Este resultado puede verse también si se observa que:

$$R^* = -\frac{2\gamma_{\alpha\beta}}{\Delta G_V} \text{sen}\delta = r_{\alpha\beta}^* \text{sen}\delta \quad (14)$$

Cuando  $\delta$  disminuye, el valor de  $R^*$  se reduce también, lo cual indica que el volumen del núcleo heterogéneo se hará más y más pequeño y, por lo tanto, requerirá cada vez menos átomos para su formación. En  $\delta = 0$ , el volumen se hace cero, de tal manera que se espera que se produzca la nucleación sin que se requiera ningún sobreenfriamiento.

### **2.1.2 Crecimiento dendrítico en materiales puros.**

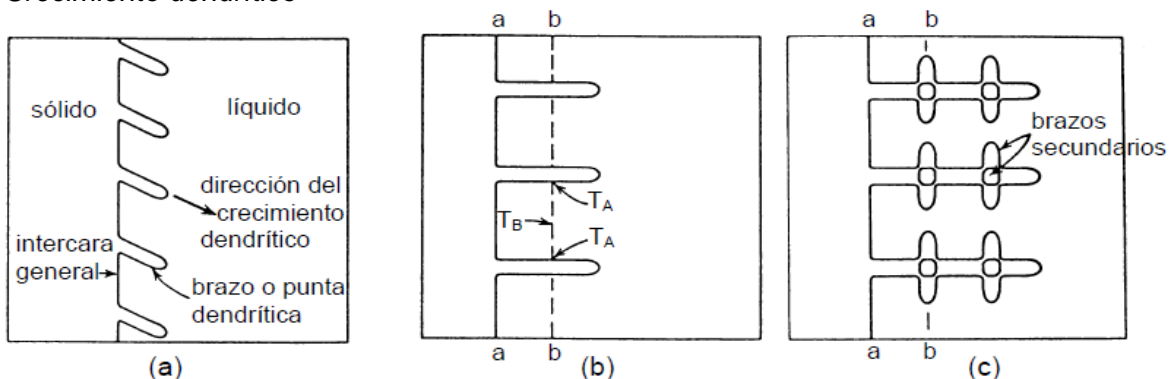
Es interesante conocer los mecanismos por los cuales es posible obtener durante la solidificación la llamada morfología dendrítica. En el caso en los metales puros, se debe primordialmente a heterogeneidades en la temperatura del líquido sobreenfriado que se encuentra en las inmediaciones del frente de solidificación.

Debido a esta heterogeneidad de temperaturas cada vez que un punto en el frente de solidificación se encuentre enfrente de él con un punto de líquido más sobreenfriado que sus alrededores, se producirá un aumento en la velocidad de solidificación en esa área, la cual trae como resultado la formación de una punta metálica, Este crecimiento

puntual está acompañado del desprendimiento de una cierta cantidad del calor latente de fusión, el cual hace que el líquido adyacente a la punta se caliente un poco, eliminando la posibilidad de que crezcan más puntas en la vecindad. Por lo que a final de cuentas se obtiene un frente de solidificación con un número finito de puntas distribuidas a intervalos regulares de distancia, a estas puntas se les conoce como los brazos primarios de las dendritas (**Figura 8a** - Representación esquemática del primer paso en el crecimiento dendrítico). Luego de la formación de estos primeros brazos, en el frente de solidificación (sección a-a) (**Figura 8b** - Los brazos dendríticos secundarios se forman porque hay un descenso en el gradiente de temperatura en un punto intermedio entre los brazos primarios), la temperatura es mayor a la de la zona intermedia alrededor del brazo primario (sección b-b), debido a que el líquido cercano a la intercara de solidificación se calienta por el calor latente de fusión desprendido en la intercara, por este mismo motivo, la temperatura de la zona aledaña a la punta del brazo primario (sección c-c) se encuentra a una temperatura más elevada que la de la zona intermedia b-b. Por lo que al estar expuesta la zona intermedia a un líquido más sobreenfriado que el resto del brazo principal, se genera el crecimiento de los brazos secundarios, creciendo éstos a intervalos regulares por un mecanismo similar al de los brazos primarios (**Figura 8c** - Diagrama donde se muestra la formación de los brazos secundarios). El crecimiento de los brazos dendríticos sigue hasta donde la geometría lo permite, seguido de un engrosamiento de los brazos hasta unirse y formar un cristal casi homogéneo.

**Figura 8**

*Crecimiento dendrítico*



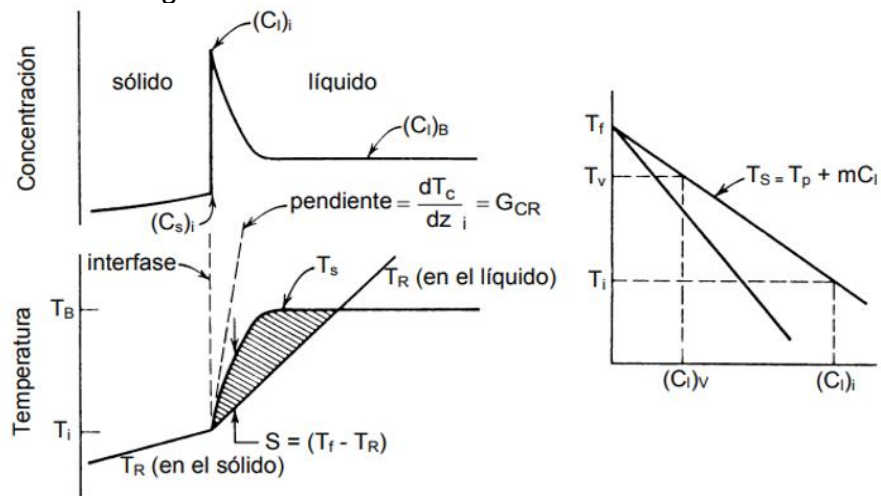
Fuente: R. E. Reed-Hill, Van Nostrand Company /1973 / Physical Metallurgy Principles

### 2.1.3 Crecimiento dendrítico en aleaciones

Como se observó en la Figura 8 durante la solidificación de aleaciones puede haber segregación de elementos, lo que, a su vez provoca cambios en el proceso de crecimiento de la fase sólida, esto se debe a que el cambio de composición química local frente a la intercara de solidificación (Figura 8c) provoca un fenómeno llamado sobreenfriamiento constitucional; la región sombreada muestra el área sobreenfriada, producida por la acumulación de soluto en la solidificación de una aleación de gradiente positivo (Figura 9), el cual consiste en una disminución local de la temperatura de solidificación, obteniendo de esta manera el sobreenfriamiento necesario para obtener estructuras celulares y dendríticas, provocadas por el aumento del sobreenfriamiento constitucional (a) Esquemáticamente y (b) Físicamente para un acero de baja aleación (Figura 10), sin la necesidad de tener un gradiente negativo en el frente de solidificación.

**Figura 9**

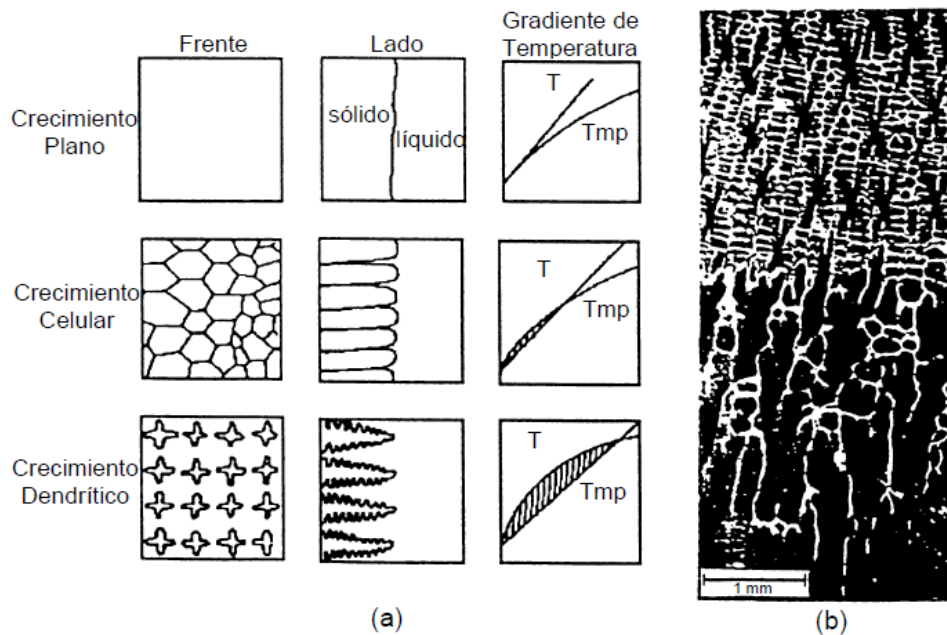
Área sobreenfriada - región sombreada



Fuente: John D. Verhoeven, /1987 / Fundamentals of Physical Metallurgy.

**Figura 10**

*Transición de morfologías de crecimiento de planar a celular y posteriormente a dendrítica*



Fuente: J. Campbell, "Castings", Butterworth-Heinemann Ltd, 1991.

#### **2.1.4 Sistema de Colada**

Los sistemas de colada son dispositivos necesarios para conducir el metal líquido a la cavidad del molde (ver Figura 11).

Los requerimientos de un sistema de colada:

- Llenado tranquilo para evitar la tenencia a atrapar gases, la oxidación del metal y la presencia de flujos turbulentos.
- Facilitar el atrapamiento y desalojo de escoria e impurezas. Controlar velocidades de llenado de tal forma que no provoquen la erosión del molde.
- Tener las suficientes dimensiones para llenar la cavidad del molde, sin un tamaño excesivo para obtener un mejor rendimiento.
- Promover gradientes de temperatura para inducir la solidificación direccional hacia los alimentadores.

El concepto de colada consiste en la introducción del metal fundido en un molde para su posterior solidificación y obtención de la forma final deseada.

Por lo general, el proceso de fundición nos permite tener cierta flexibilidad a la hora de obtener distintas geometrías para las piezas, pudiendo obtener formas irregulares e

incluso cavidades interiores.

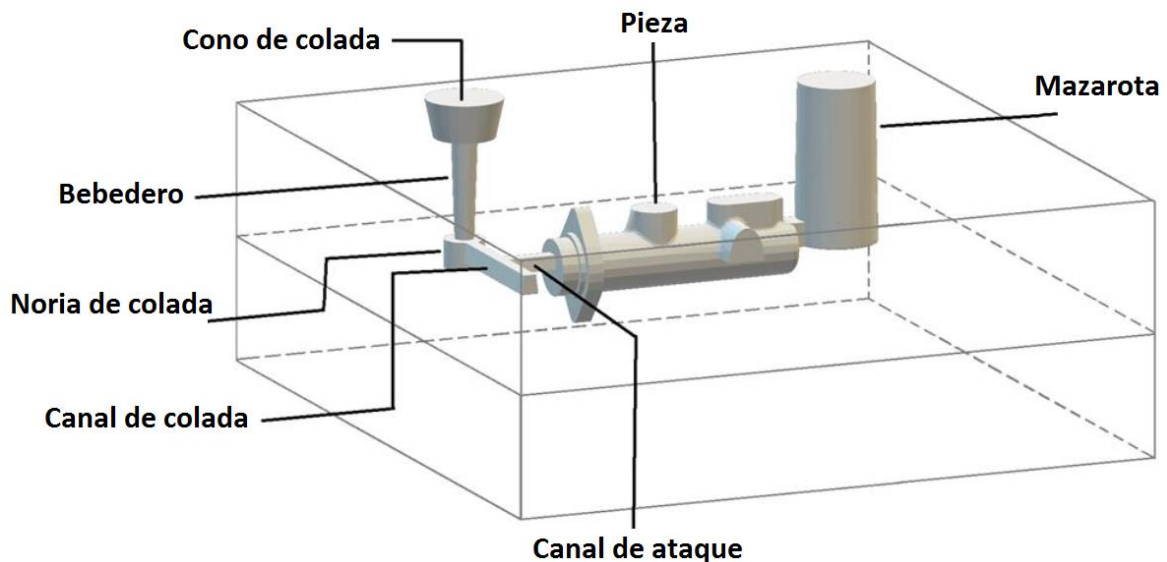
En el proceso de solidificación, no todo el metal solidifica al mismo tiempo, sino que se van formando pequeños núcleos de cristalización conforme se va extrayendo calor del metal fundido de manera que los átomos pierden energía y se van uniendo en torno a estos núcleos de cristalización o dendritas.

El metal en contacto con las paredes del molde solidificará más rápidamente debido a que la formación de los núcleos de cristalización tiene lugar antes en los puntos más fríos. Así, con el tiempo, los cristales que han ido solidificando estarán en contacto unos con otros, por lo que la única dirección de crecimiento que podrá experimentar será hacia el centro.

Es en este punto donde cobra importancia el tiempo de solidificación del metal cómo es un factor fundamental para el diseño de los sistemas de distribución ya que, un menor tiempo para la solidificación provocará la formación de más núcleos de cristalización, la formación más granos y de menor tamaño.

**Figura 11**

*Elementos del sistema de colada*



Fuente: A. Sanchez /2019 / Innovación a un sistema de colada para una aleación de rango corto

**2.1.4.1 Contracción volumétrica.** Cuando los metales o aleaciones solidifican sufren una contracción volumétrica. Esta contracción volumétrica consiste de 3 contracciones: contracción líquida (temperatura de vertido a temperatura de líquidus),

contracción de solidificación (temperatura de líquidos a temperatura de sólidos), y contracción sólida (temperatura de sólidos a temperatura ambiente).

Al defecto originado por la contracción volumétrica, se le llama rechupe. El rechupe es una discontinuidad del material producto de su contracción natural. La forma de evitar este defecto es simple, solo debemos alimentar con metal líquido las zonas que van quedando discontinuas durante la solidificación. Para poder identificar las zonas que debemos alimentar, debemos tener presente la geometría de la pieza, una regla básica y utilizada actualmente, es la de analizar las secciones más gruesas de la pieza, ya que estas serán las últimas en solidificar, por lo tanto, estas son las zonas más propensas a presentar rechupe. Más adelante conoceremos un parámetro llamado módulo de enfriamiento, el cual resume todos los aspectos de la contracción del material y nos ayudara en el diseño del alimentador.

**2.1.4.2 Alimentador, riser o mazarota.** El alimentador, también conocido como Riser (bibliografía en inglés) o mazarota, es el elemento que nos permitirá suministrar metal líquido durante la colada y antes de la solidificación, para evitar de esta forma la generación de rechupe en la pieza. El diseño del riser es de fundamental importancia, en la obtención de piezas sanas, ya que estos son empleados, fundamentalmente, para prevenir el defecto del rechupe en la pieza. Normalmente, los risers se colocan en la sección de mayor espesor de la pieza. En el caso de piezas complejas o muy grandes, éstas se dividen en varias secciones y el problema de la ubicación de los risers se examina en conexión con la distancia de alimentación.

El tamaño y forma del riser debe satisfacer dos requerimientos principales:

- Primero. El riser debe enfriarse lentamente (más lento que la pieza), para asegurar que el metal líquido será suministrado a la pieza durante todo el tiempo que dure su solidificación.
- Segundo. El riser debe tener un volumen suficiente de metal para compensar la contracción total.

Estos dos requerimientos, se pueden referir respectivamente a los conceptos de:



tiempo de solidificación y capacidad de volumen de alimentación del riser. El volumen de metal requerido para compensar el rechupe es pequeño, alrededor del 7%, para la mayoría de aleaciones. Además, basados en este mismo principio geométrico, se pueden incorporar factores de corrección al tener cambios en la velocidad de enfriamiento producidos cuando se utilizan enfriadores o compuestos aislantes.

Otros factores que intervienen en el funcionamiento efectivo del riser son:

La necesidad de mantener una presión diferencial en este sistema, ya que la presión atmosférica (en mayor parte), es la encargada de llevar el metal líquido desde el riser a la pieza, además esta misma presión se requiere para vencer la resistencia al flujo, el cual es bastante alto al final de la solidificación y es lo que en suma determina la distancia de alimentación. Otro factor sería, el correcto dimensionamiento de la unión del riser y la pieza (neck), de tal manera que el flujo de metal de alimentación, continúe durante todo el tiempo que dure la solidificación de la pieza.

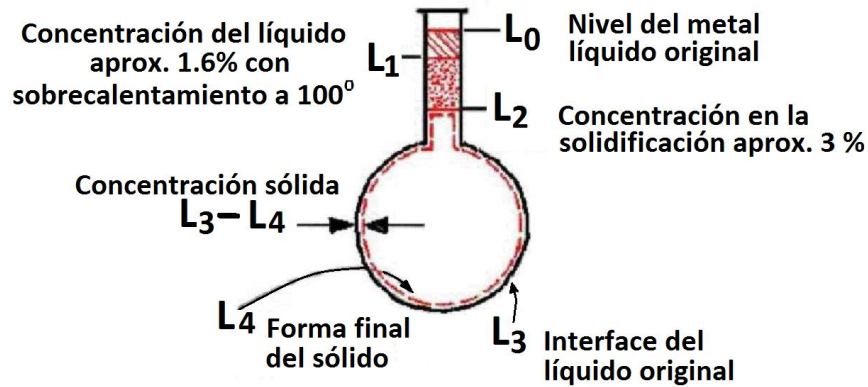
El peso total de alimentación (peso de todos los alimentadores) debe ser en promedio del [30-50]% del peso de la pieza. Este factor varía según la contracción del material y según la eficiencia de alimentación, y si la pieza es mecanizada. Para el acero de baja aleación la eficiencia promedia debe ser de aproximadamente [65-70]%.

Estas etapas se muestran esquemáticamente en la Figura 12, y son:

- Contracción líquida
- Contracción al solidificar
- Contracción sólida.

## Figura 12

Esquema del rechupe de un acero de bajo carbono.



Fuente: A. Rodolfo, L. Aguirre / 2010 /Piezas fundidas diseño y sistema de alimentación

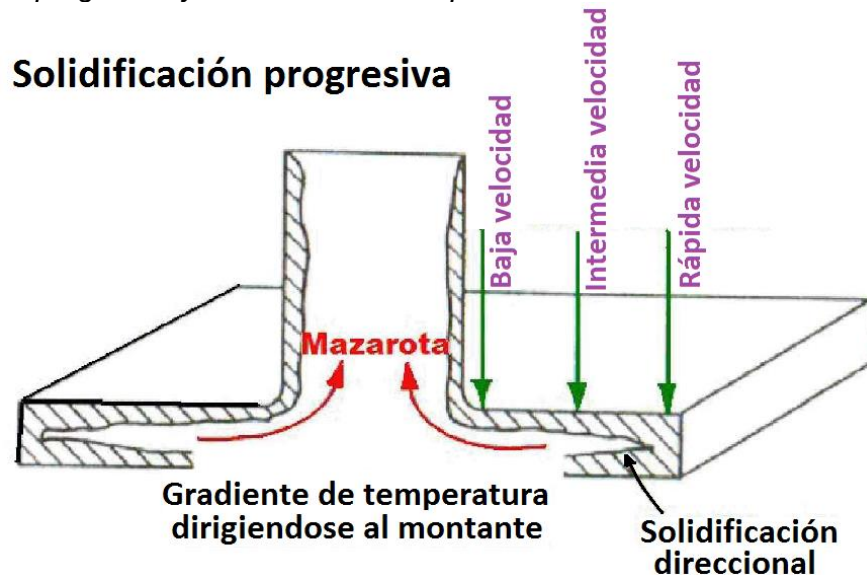
### Ubicación del riser.

Los métodos de ingeniería deben usar el concepto de solidificación dirigida (ver Figura 13). La habilidad para lograr dicha direccionalidad en la solidificación dependerá de:

- La aleación y su forma de solidificar
- El molde y sus elementos
- El diseño de la pieza.

## Figura 13

Solidificación progresiva y direccional en una pieza con mazarota



Fuente: A. Rodolfo, L. Aguirre / 2010 /Piezas fundidas diseño y sistema de alimentación

### Mejoras implementadas en el diseño de los risers.

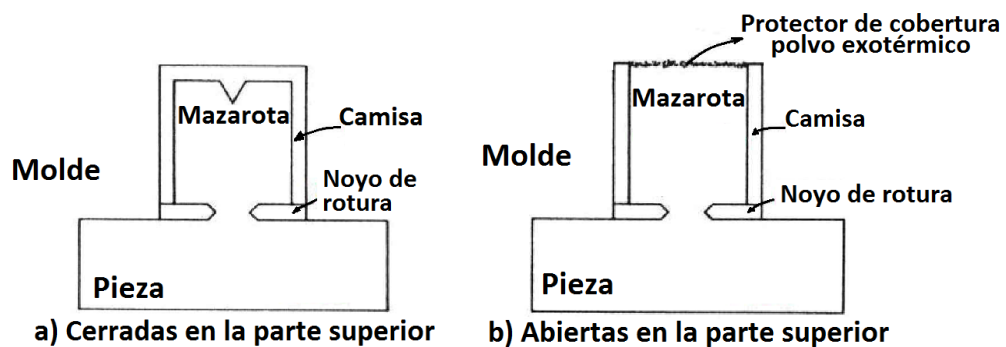
En la industria de la fundición se utiliza varios elementos que contribuyen a mejorar la alimentación e incrementar la sanidad y reducir costos en la confección de piezas

fundidas. Las ayudas en la alimentación reducen la velocidad en la transferencia de calor desde la mazarota hacia el molde y la atmósfera (Ver Figura 14). En el diseño de mazarotas, existen tres tipos de ayuda en la alimentación frecuentemente usadas:

- Camisas exotérmicas, paneles o manguitos exotérmicos.
- Cubrientes de superficie o polvo exotérmicos
- Noyos de rotura, next (cuello) o galleta

**Figura 14**

*Aplicación de alimentadores para mazarotas*

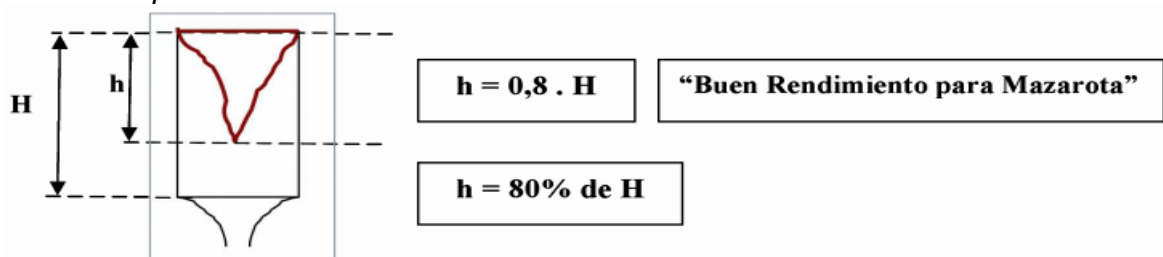


Fuente: A. Rodolfo, L. Aguirre / 2010 /Piezas fundidas diseño y sistema de alimentación

Se dice que la mazarota posee un buen rendimiento cuando la altura o profundidad alcanzada en la mazarota por el rechupe representa un 80% de la altura de la mazarota (Ver Figura 15).

**Figura 15**

*Eficiencia óptima de la mazarota.*



Fuente: A. Rodolfo, L. Aguirre / 2010 /Piezas fundidas diseño y sistema de alimentación

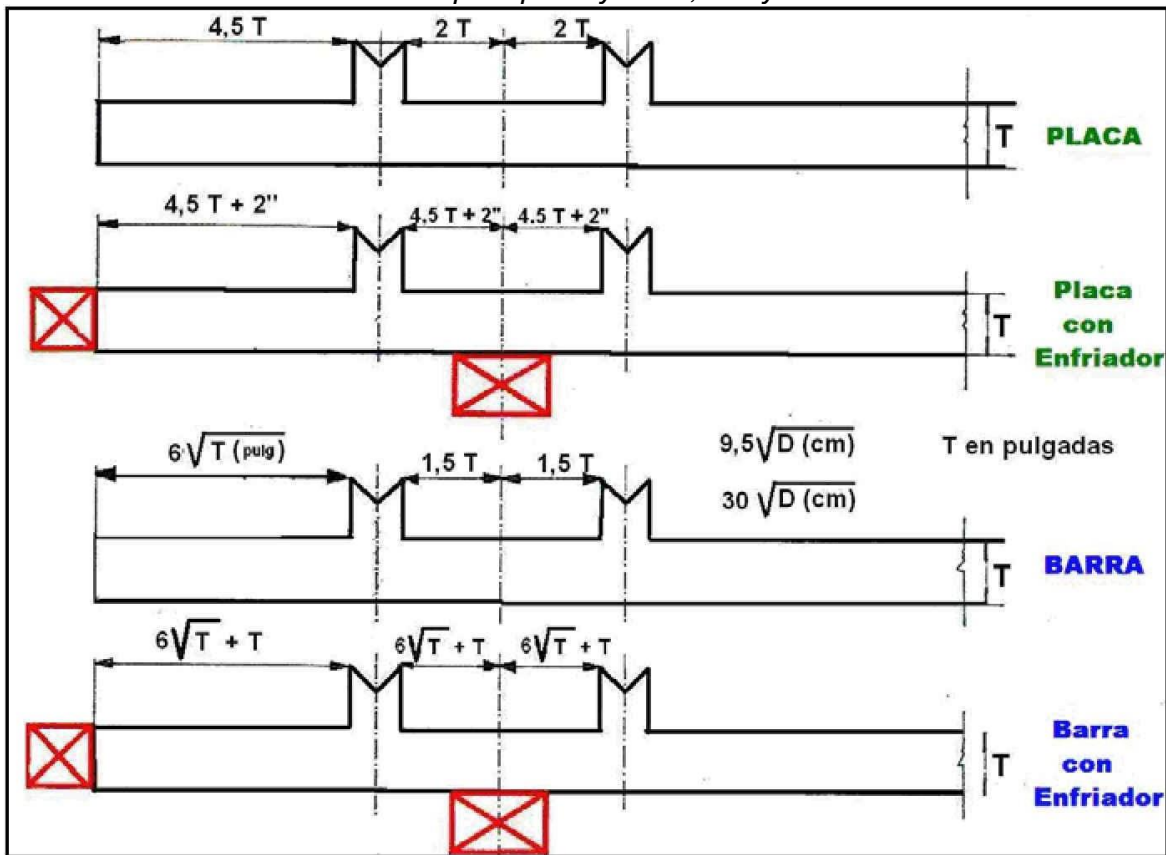
**Calculo del número de mazarotas por zona de influencia.**

Para este caso en particular vamos a considerar la influencia de las mazarotas utilizando placas enfriadoras o chills (bibliografía en inglés) en los extremos. El efecto es que sobre el borde de la pieza la velocidad de enfriamiento es más rápido por el efecto de

las placas enfriadoras y el radio de acción es mayor (Ver Figura 16).

**Figura 16**

*Zona de influencia de la mazarota para placa y barra, con y sin enfriadores.*



Fuente: A. Rodolfo, L. Aguirre / 2010 /Piezas fundidas diseño y sistema de alimentación

**2.1.4.3 Modulo de enfriamiento.** El módulo de enfriamiento (Me) es la relación entre el volumen (Vo) o parte del volumen de la pieza que estamos estudiando (o alimentando) y la superficie específica de enfriamiento (Ao).

$$Me = \frac{V_o}{A_o} \quad (15)$$

A medida que el volumen se hace más chico a igual superficie, se hace más chico el módulo de enfriamiento.

A medida que aumenta el módulo de enfriamiento, mayor es la dificultad para alimentar la pieza y además la velocidad de enfriamiento es menor.

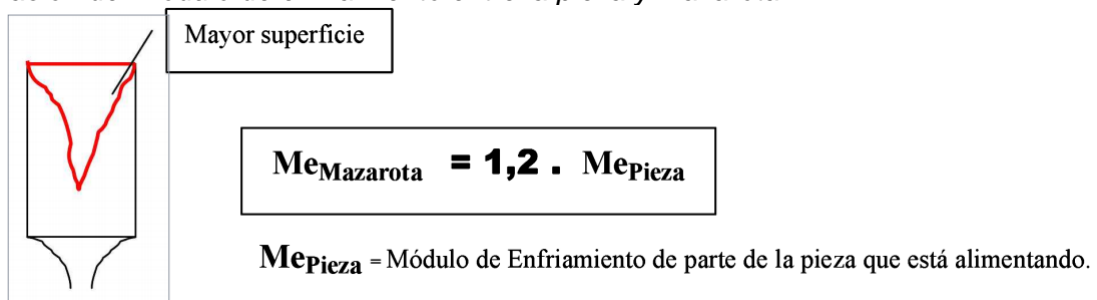
Una mazarota siempre debe poseer un módulo de enfriamiento mayor que el de la pieza que tiene que alimentar (la mazarota debe poseer el mayor módulo de enfriamiento de todo mi sistema de colada).

$$Me_{\text{mazarota}} \gg Me_{\text{pieza}}$$

Si se considera que la mazarota se encuentra llena con el metal fundido cuando se va enfriando lo que se produce es un aumento de la superficie de enfriamiento y esto provoca una disminución del módulo de enfriamiento y provoca una mala alimentación por no prever este problema, por este motivo se le da un incremento del 20% al módulo de enfriamiento de la mazarota (Ver Figura 17).

### Figura 17

Relación del módulo de enfriamiento entre la pieza y mazarota.



Fuente: A. Rodolfo, L. Aguirre / 2010 /Piezas fundidas diseño y sistema de alimentación

1.2 es un coeficiente compensatorio que compensa la disminución del módulo de enfriamiento de la mazarota por haber aumentado la superficie de enfriamiento debido al rechufe.

**2.1.4.4 Placas enfriadoras o chills.** Sin modificar la pieza podemos colocar placas enfriadoras para variar su módulo de enfriamiento a nuestra conveniencia. A mayor espesor de placa enfriadora, mayor disipación de calor hasta un espesor máximo que no varía.

La esfera es la pieza que más problema de solidificación presenta. Los enfriadores de cabeza no se recomienda su utilización por la pérdida de su rendimiento, al contraerse el metal se despegar del enfriador de cabeza y no trabaja como corresponde. Los enfriadores de base con los enfriadores de mayor rendimiento. En las placas laterales su rendimiento es del 50%.

Se pueden producir cambios bruscos de enfriamiento por utilización excesiva de placas enfriadoras, provocándose fisuras, por este motivo para piezas grandes no debe ocuparse toda la superficie de enfriamiento con placa, solo debe utilizarse el 50% de la superficie.

En piezas de acero se utiliza placas enfriadoras, porque este material es el que habitualmente tiene mayor contracción volumétrica. La temperatura de la placa enfriadora no debe superar más de 700°C pues se corre el riesgo de que la placa se pegue a la pieza.

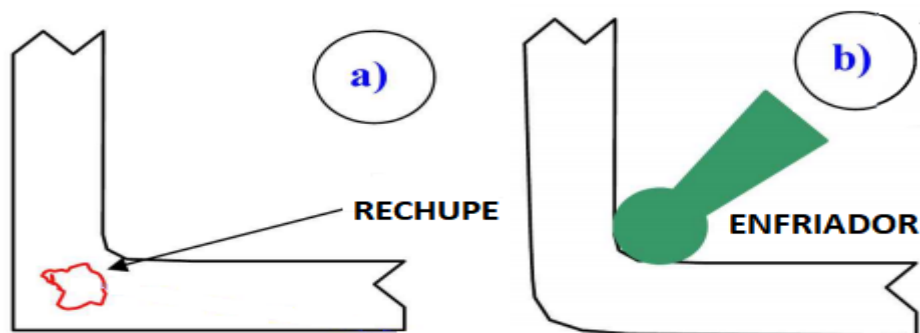
Otro problema debe evitarse que las placas enfriadoras no deben poseer óxidos, pues el carbono del acero con el óxido (FeO) forma monóxido de carbono (CO) que este gas se ocluye en la pieza.

Las placas enfriadoras tienen que ser granalladas, no arenada pues la limpieza no es profunda.

Las funciones de la placa enfriado o chills es, reducir mazarotas en cantidad y dimensión, y modificar modulo con el propósito de acelerar sus condiciones de enfriamiento y evitar las consecuencias de las disparidades de secciones (Ver Figura 18).

**Figura 18**

*Uso de enfriadores o chills.*

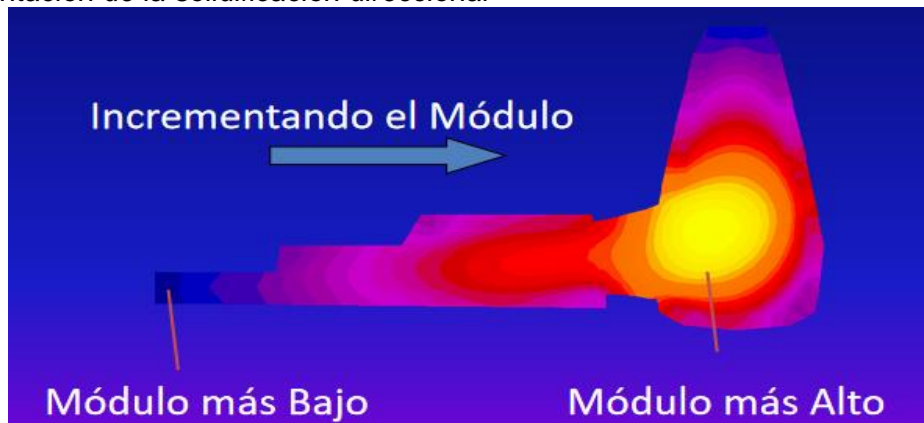


Fuente: A. Rodolfo, L. Aguirre / 2010 /Piezas fundidas diseño y sistema de alimentación

**2.1.4.5 Padding.** El padding o relleno es muy usado en las fundiciones, y consiste en aumentar el espesor de la pieza, específicamente en las secciones transversales durante la fabricación del modelo o durante la etapa de moldeo; con la finalidad de controlar la solidificación progresiva y direccional en una pieza (Ver Figura 19).

**Figura 19**

*Representación de la solidificación direccional*



Fuente: Manual SolidCast

Es recurrente encontrar geometrías complejas, con zonas delgadas, intermedias y gruesas; es decir piezas de espesor variable. Por lo tanto, las velocidades de enfriamiento y la solidificación serán irregulares por lo que no existe mejor manera de apoyarnos en los rellenos, luego estos rellenos se retirarán durante el desbaste mecánico.

A causa de que la fundición es más delgada en los puntos distantes del riser, la solidificación se completa primero en estas regiones. Las secciones se hacen gradualmente más gruesas hacia el riser, de manera que el enfriamiento progrese direccionalmente, y cada región sucesiva en el enfriamiento esté abastecida con suficiente metal fundido para alimentarla con propiedad.

Estos rellenos pueden eliminarse al maquinarse, o bien la pieza puede diseñarse con secciones decrecientes como partes integrales y útiles del conjunto final. Generalmente, los rellenos constituyen un medio extremo, ya que los ingenieros prefieren no aumentar peso adicional; sin embargo, a la larga se ahorraría mucho haciendo del diseño decreciente una regla (especialmente en fundiciones de acero).

**2.1.4.6 Bebedero.** Es el primer canal usualmente vertical, que conecta la balsa con el canal de colada. Cuando un líquido cae, permanece unido, siendo su volumen constante (ecuación de continuidad), pero debido a la creciente velocidad con que cae, la sección del chorro disminuirá.

Al descender el metal por el bebedero, su velocidad aumenta debido a la

aceleración de la gravedad, y si el bebedero no se ahusa, el metal jala las paredes del molde con la turbulencia y aspiración consiguientes. Al ahusar convenientemente las paredes, como para que el metal las oprime firmemente durante su caída, se elimina la aspiración.

Durante la última década se han perfeccionado mucho, empleándose en su fabricación material cerámico resistente a la presión y al desgaste.

**2.1.4.7 Canal de colada.** Es un canal horizontal que transporta el metal líquido del bebedero al canal de ataque o al riser. Se le denomina también canal distribuidor. Los canales de sección trapezoidal son los que han dado mejores resultados. En el extremo del canal, en la parte de arriba, se dispone a veces una cavidad mayor, conocida como trampa de escorias, en la que se acumula el primer metal entrante junto con algunas impurezas.

Otra forma de evitar el ingreso de impurezas en el molde, es usando cucharas de tapón y sifón, así como ataques o entradas en rebaba combinadas con ensanchamientos de sección.

Los fundidores deben tener en cuenta, que el principio fundamental para evitar las impurezas, es no dejar salir, de la cuchara de colada, ninguna escoria con el chorro de metal.

Cuando del canal de colada salen varias entradas, la sección del canal irá estrechándose a veces hacia cada entrada.

Al tener contracciones o ensanchamientos súbitos de los canales de flujo, se origina turbulencia y la posible aspiración.

El acodamiento en el sistema de alimentación siempre es deseable para obtener piezas macizas y limpias, además desde el punto de vista económico es más ventajoso, debido a que las velocidades de flujo pueden ser aumentados por medio del acodamiento, de manera que los diversos componentes puedan disminuir de tamaño y se obtenga un mayor rendimiento en la fundición.



Durante la última década se han perfeccionado mucho, empleándose en su fabricación material cerámico resistente a la presión y al desgaste.

**2.1.4.8 Canal de ataque.** Denominadas también entradas, son canales que conectan el canal de colada con la cavidad del molde, o al riser con la cavidad del molde.

Son más ventajosas las entradas planas, pues reparten el metal uniformemente en el molde, produciendo poco trabajo para su separación. Desde el punto de vista técnico, las entradas de sección triangular son menos favorables.

En la colada directa o en lluvia han dado buen resultado las entradas en forma de dedos o lápices, se trata de canales verticales muy delgados (unos 5 a 10 mm de diámetro), abastecidos de metal por un canal recto o circular.

Durante la última década se han perfeccionado mucho, empleándose en su fabricación material cerámico resistente a la presión y al desgaste.

La diferencia entre un sistema presurizado y no presurizado, reside en la elección del lugar donde diseñamos el canal frenante que controlará el flujo líquido, que determinará la velocidad del flujo final del sistema de coladas. Esta decisión incluye la determinación de la velocidad deseada en la colada, o sea, la relación relativa entre la sección transversal del canal de descenso, distribuidor y ataques. Esta relación, expresada numéricamente en el orden: descenso, distribuidor, ataque (D:E:A), define si el sistema de coladas se va incrementando en sección (no presurizado) o bien disminuyendo en sección (presurizado).

Los valores comunes de un sistema no presurizado son 1:2:2, 1:2:4 y 1:4:4. un sistema típico presurizado es 4:8:3.

**2.1.4.9 Tiempo de vertido.** Es indeseable vertir el metal demasiado frío, debido a que el metal puede solidificarse demasiado rápido para llenar el molde o puede desarrollar uniones frías o misruns. También, a pesar de tener un adecuado sistema de alimentación, un llenado muy rápido del molde puede producir problemas, tales como la erosión de las paredes del molde, superficie rugosa, rechupe excesivo, y otros defectos posibles.

Por lo tanto, existe una óptima velocidad de vertido, o rango de velocidad de vertido, para la mayoría de las aleaciones que deben establecerse por la experiencia.

En la fundición convencional en moldes de arena, el establecimiento de la óptima velocidad de vertido es el primer paso en el diseño del sistema de alimentación. Una vez que se hace esto, el siguiente paso es la adecuada proporción y distribución de las diversas partes del sistema de alimentación, a fin de obtener esta velocidad.

Las características de las diversas aleaciones fundidas, tienen una fuerte influencia sobre la importancia de este primer paso. Desde luego, la geometría de la pieza, también es un factor.

Un metal similar al acero, necesita vertir rápido para evitar la solidificación prematura, debido a que tiene un alto rango de solidificación, comparado con la mayoría de las aleaciones fundidas.

Las velocidades de vertido para todas las aleaciones fundidas comerciales, no han sido publicadas. Esto es de esperarse, ya que refleja en cierta forma la práctica en una fundición dada o las limitaciones del equipo disponible, tanto como la geometría de la pieza.

Determinamos el tiempo de vertido de la pieza aplicando la siguiente fórmula (ecuación de Mikhailov):

$$T = A * \delta^m * W^n \quad (16)$$

T: Tiempo de vertido (seg)

W: Peso de metal líquido requerido (Kg)

$\delta$ : Espesor mínimo de la pieza (mm)

A, m y n: Constantes que para el acero tienen valores de 1.5, 0.21 y 0.34 respectivamente.

#### **2.1.4.10 Cálculo de la medida del bebedero, canal y ataque.**

##### **Cálculo de la medida del bebedero**

Aplicamos el concepto de flujo.

$$\text{Flujo} = \frac{W_{\text{PESO DE METAL LIQUIDO REQUERIDO (kg)}}}{T_{\text{TIEMPO DE VERTIDO (seg)}}} \quad (17)$$

Una vez determinado el flujo, seleccionaremos el diámetro de bebedero apropiado según la siguiente Tabla 1.

**Tabla 1**

*Elección de diámetros del bebedero, en función al flujo.*

SPRUE/PIEZA RELATIONSHIP		
SPRUE DIAMETER (mm)	SPRUE AREA (mm <sup>2</sup> )	FLOW RATE (kg/seg)
30	710	10
40	1260	15
50	1960	23
60	2830	28
70	3830	39
75	4420	45
80	5030	60
90	6360	90
100	7850	135

Fuente: Refrata Refractarios Ltda.

### **Cálculo de la medida del canal de colada**

Los valores comunes de un sistema no presurizado son 1:2:2, 1:2:4 y 1:4:4. Un sistema típico presurizado es 4:8:3.

Usaremos un sistema A:B:C

$$\frac{A_{be}}{A} = \frac{A_{cc}}{B} = \frac{A_{ca}}{C} \quad (18)$$

A<sub>be</sub> : Área transversal del bebedero (mm<sup>2</sup>)

A<sub>cc</sub> : Área transversal del canal de colada (mm<sup>2</sup>)

A<sub>ca</sub> : Área transversal del canal de ataque (mm<sup>2</sup>)

A, B, C : Valores numéricos

Relacionamos A<sub>be</sub> (cálculo de bebedero) ya definido, con A<sub>cc</sub> en la Tabla 1.

### **Cálculo de la medida del canal de ataque**

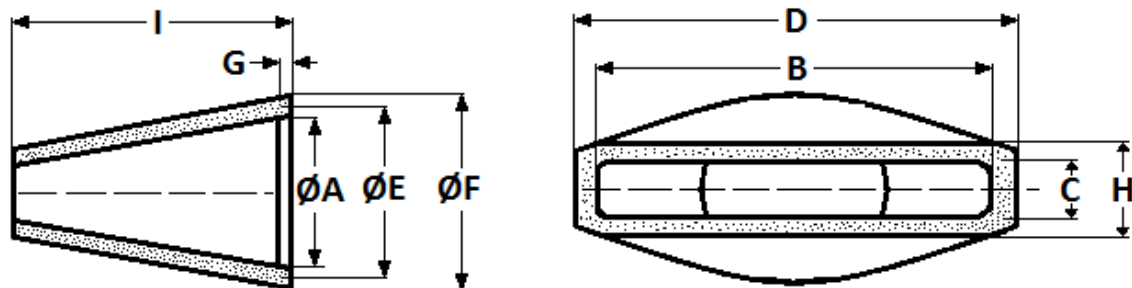
Usaremos un sistema A:B:C (ecuación 18).

El canal de ataque tiene una forma de ingreso circular, y forma de salida rectangular B x C (Ver Figura 20).

Relacionamos A<sub>cc</sub> (cálculo del canal de colada) ya definido, con A<sub>ca</sub> en la Tabla 2.

**Figura 20**

Información técnica del canal de ataque (en cerámico).



Fuente: Refrata Refractarios Ltda.

**Tabla 2**

*Elección de la boquilla del canal de ataque*

Referencia	ØA	B	C	D	ØE	ØF	G	H	I	Área (mm <sup>2</sup> )	
										Entrada	Salida
CA50/20	50	100	20	116	58.5	66	5	38	75	1964	2000
CA-60/10	60	140	10	160	70.5	80	5	30	90	2827	1400
CA-60/15	60	140	15	160	70.5	80	5	35	90	2827	2100
CA-60/20	60	140	20	160	70.5	80	5	40	90	2827	2800
CA-80/30	80	170	30	196	95	104	7	54	120	5027	5100
CA-90/34	90	190	34	220	105	120	9	61	135	6362	6460
CA-100/38	100	212	38	245	116	130	9	68	150	7854	8056

Fuente: Refrata Refractarios Ltda.

### 2.1.5 Diseño de colada en SolidCast

**2.1.5.1 Descripción del proceso de simulación en SolidCast.** SolidCast es una herramienta de software basada en PC que simula el vertido de metal caliente de prácticamente cualquier aleación de fundición en moldes de arena, cáscara, revestimiento o permanentes, y el posterior proceso de solidificación y enfriamiento.

SolidCast utiliza el método de diferencias finitas (FDM) para calcular la transferencia de calor, combinado con un seguimiento único de los cambios volumétricos en el metal, para predecir los cambios de temperatura y volumen en una pieza fundida a medida que se vierte, solidifica y enfría.

Este enfoque combinado térmico-volumétrico ha demostrado ser un método extremadamente preciso para predecir diversos problemas de fundición, incluida la micro y macro porosidad, los puntos calientes y otros defectos.

Los pasos básicos para realizar el diseño del proceso de fundición:

- Especificaciones y datos del cliente.
- Concepto de diseño inicial.
- Verificación del diseño.
- Optimización del diseño.

Los pasos básicos para realizar una simulación:

- Crear un modelo 3D
- Seleccionar material y condiciones iniciales
- Enmallado del modelo
- Ejecutar simulación
- Analizar resultado

**2.1.5.2 Configuración de los parámetros del sistema.** El % sólido de fracción crítica predeterminada (CFS) es el valor que se supone es el final de la alimentación, o el movimiento del metal, para una aleación de fundición. A medida que comienza la congelación, el metal se vuelve más grueso y pastoso, hasta que, en el CFS, deja de moverse por completo. Si el metal de alimentación no ha estado disponible para contrarrestar cualquier contracción que haya estado ocurriendo, no podrá llegar a ese punto una vez que haya alcanzado el CFS. Este valor varía según el tipo de aleación y el tamaño de la sección, pero buenos puntos de partida serían:

- Aceros al carbono: 50% - 35%
- Aceros aleados: 45% - 30%
- Aluminio: 30% - 20%
- Cobre: 35% - 25%
- Hierros fundidos: Ajustados por el software

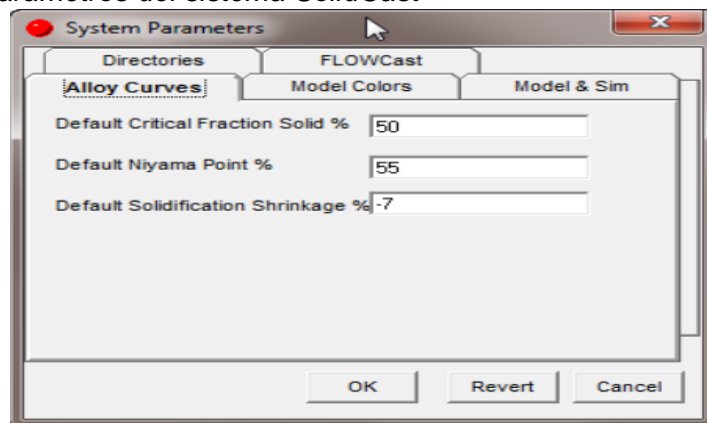
El % del punto de Niyama predeterminado es el porcentaje sólido en el que se calcula el valor de Niyama. El criterio de Niyama se compone del gradiente de temperatura en un punto, dividido por la raíz cuadrada de la tasa de enfriamiento en el mismo punto. Este valor es un indicador del grado de solidificación direccional y la probabilidad de

formación de contracción. Cuanto menor sea el valor, mayor será el potencial de formación de contracción. Esto normalmente se calcula en un punto inmediatamente posterior al CFS. Un buen punto de partida es el 5% después del punto CFS.

El % de contracción de solidificación predeterminado es la cantidad de expansión o contracción que sufre un metal durante el proceso de enfriamiento y solidificación. Un valor negativo indica una contracción general o una contracción, mientras que un valor positivo indica una expansión. La mayoría de los materiales se encogen al enfriarse, por lo que el valor debería ser negativo en la mayoría de los casos. Un valor típico sería  $-7\%$  para aleaciones retráctiles (ver figura 21).

### Figura 21

*Pantalla de los parámetros del sistema SolidCast*



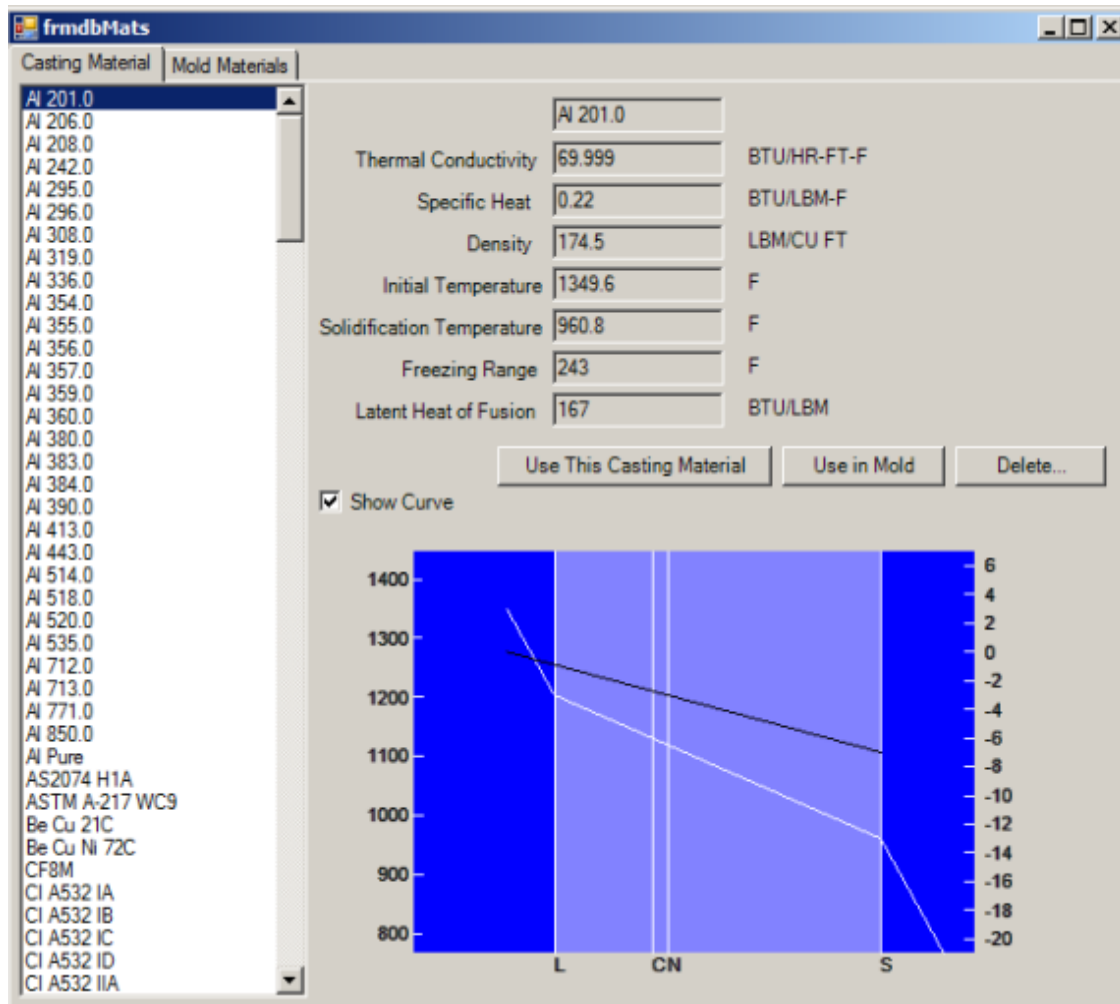
Fuente: Manual SolidCast

**2.1.5.3 Selección de la aleación de fundición.** Esto muestra la aleación de fundición seleccionada actualmente y sus propiedades. Tenga en cuenta que la temperatura inicial se refiere a la temperatura de vertido de la aleación. Debe ajustar esto para que coincida con la temperatura de vertido real en su fundición. Los valores enumerados en la base de datos para Temperaturas iniciales son solo marcadores de posición y no deben considerarse como temperaturas de vertido recomendadas.

Esta pantalla le permite seleccionar una aleación de la base de datos de materiales SolidCast (Ver Figura 22).

**Figura 22**

*Pantalla de base de dato SolidCast.*



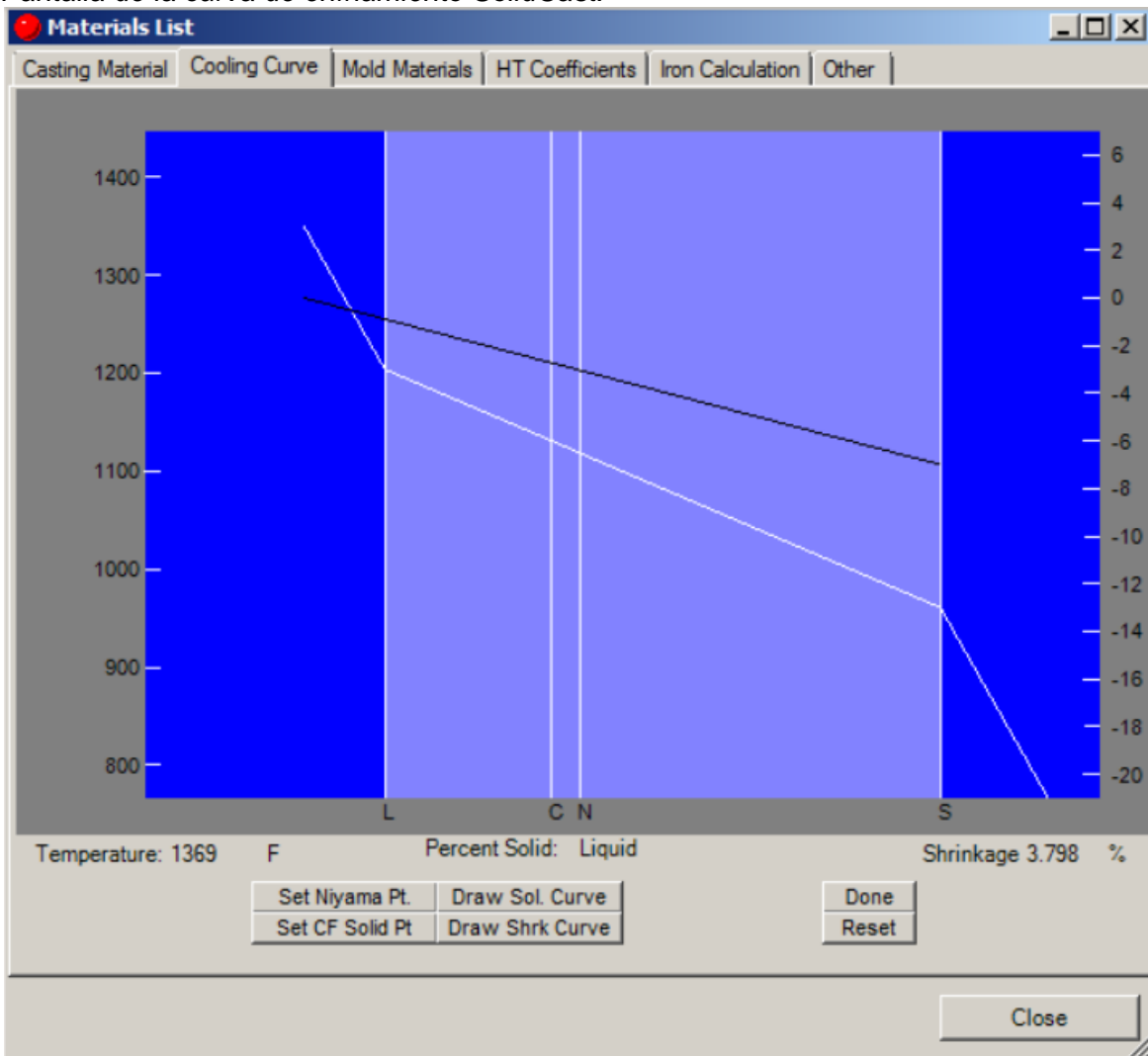
Fuente: Manual SolidCast

También se puede seleccionar los materiales que estarán en el molde, como arena de contacto, enfriadoras, alimentadores, filtros cerámicos y similares.

**2.1.5.4 Curva de enfriamiento y curva de cambio volumétrico.** La curva de enfriamiento y la curva que describe el cambio volumétrico (contracción o expansión) de la aleación seleccionada, se verá de la siguiente manera (Ver Figura 23):

**Figura 23**

*Pantalla de la curva de enfriamiento SolidCast.*



Fuente: Manual SolidCast

La línea blanca indica la curva de enfriamiento (porcentaje sólido frente a temperatura), donde las temperaturas se leen en la escala de la izquierda. La línea negra indica el cambio de volumen (en%), leído en la escala de la derecha. Un valor positivo indica expansión y un valor negativo indica contracción.

El área azul oscuro de la izquierda corresponde al estado líquido. El área azul más clara en el medio representa la transición de líquido a sólido, y el área oscura de la derecha es el estado sólido.

La línea vertical con una C es el punto sólido de la fracción crítica y la línea vertical con una N es el punto de Niyama (donde el gradiente de temperatura y la tasa de

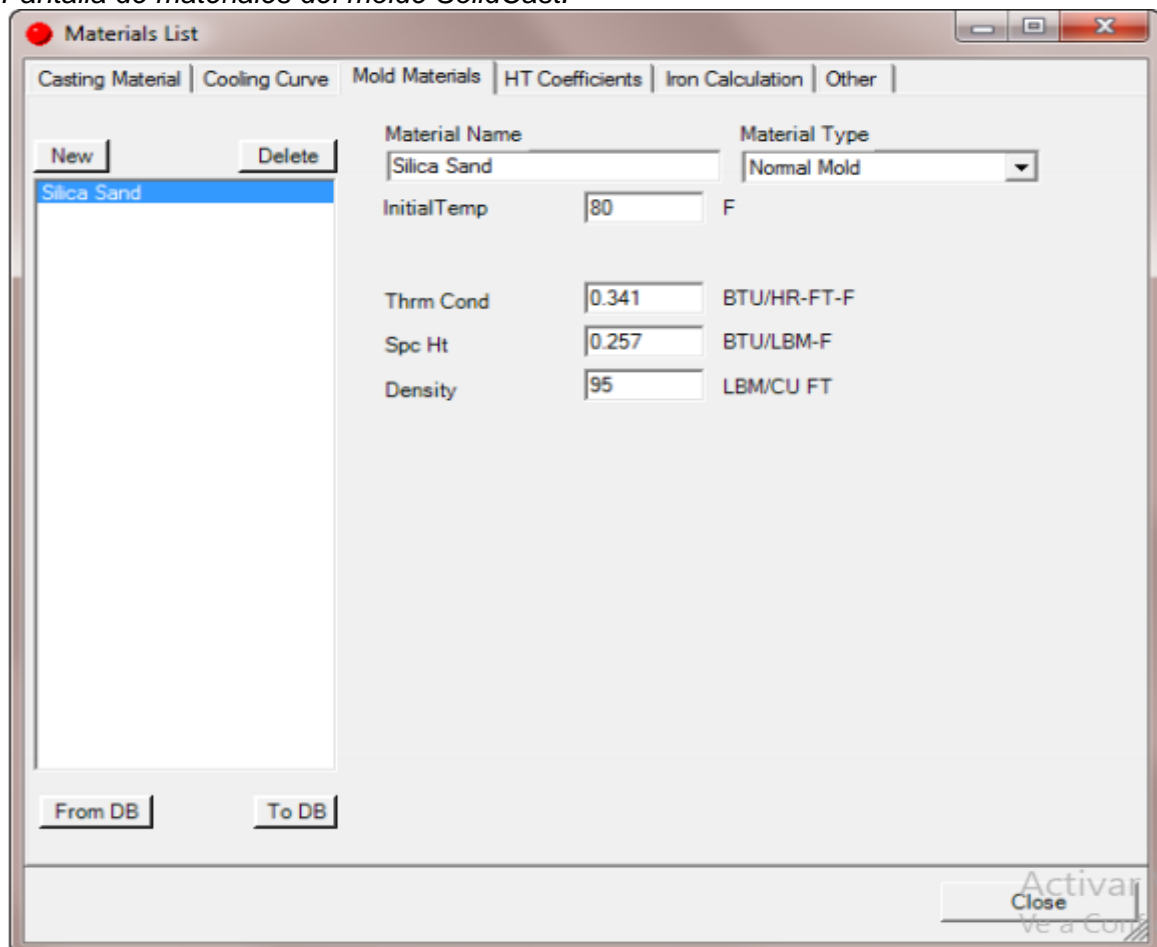


enfriamiento se calculan durante una simulación). Las líneas L y S son las líneas Líquidus (inicio de solidificación) y Sólidus (final de solidificación).

**2.1.5.5 Selección de materiales del molde.** SolidCast contiene una serie de lista de materiales del molde. Verá una ventana que aparece de la siguiente manera (Ver Figura 24):

**Figura 24**

*Pantalla de materiales del molde SolidCast.*



Fuente: Manual SolidCast

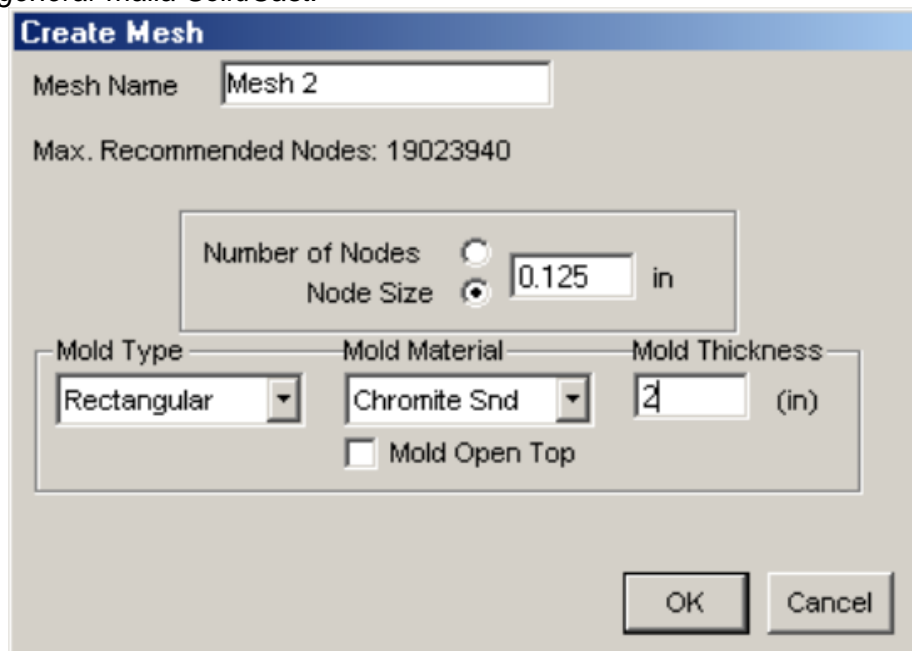
En esta pantalla, los materiales que están disponibles para usar en un modelo se muestran en la ventana de la izquierda. El objetivo es crear una lista de materiales a partir de los materiales disponibles en la base de datos.

Puede ingresar sus propios materiales de molde haciendo clic en el botón Nuevo. Esto abrirá una nueva entrada en la Lista de materiales. A continuación, puede introducir los valores adecuados para las propiedades del material.

**2.1.5.6 Generando una malla.** Una vez que se tenga cargado un modelo, y los materiales seleccionados, el siguiente paso antes de ejecutar una simulación es generar una malla (enmallado). El sistema mostrará la pantalla de generar malla, aquí es donde describe cómo se generará la malla, y puede aparecer de la siguiente manera (Ver Figura 25).

**Figura 25**

*Pantalla generar malla SolidCast.*



Fuente: Manual SolidCast

Aquí puede ingresar un nombre descriptivo para la malla. También puede seleccionar el número de nodos (elementos) o el tamaño de los nodos (en pulgadas o mm). Generalmente, la mayoría de las simulaciones se ejecutan con entre 500.000 y 20.000.000 elementos. Una fundición "gruesa" generalmente requerirá menos elementos, mientras que una fundición de sección delgada requerirá más elementos. El número máximo de elementos permitidos depende de la cantidad de memoria RAM instalada.

El sistema creará automáticamente un molde alrededor de la pieza fundida si así lo desea. (Nota: puede crear el molde como parte del modelo, en cuyo caso no utilizaría la función de creación automática de moldes).

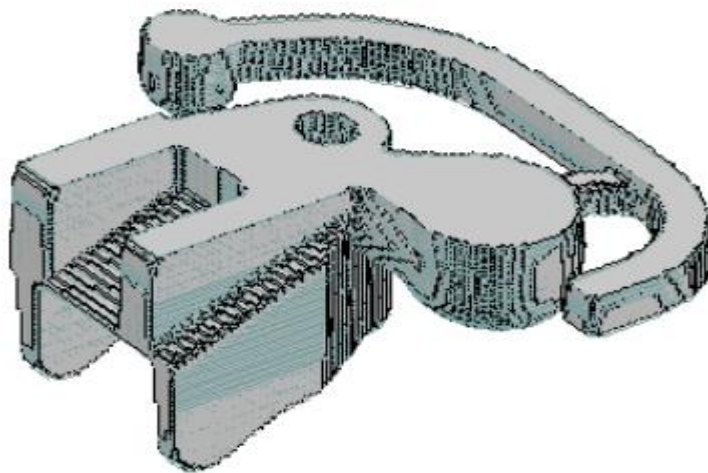
Aquí se tiene tres opciones:

- Rectangular
- Con espesor uniforme a la pieza (cascara)
- Ninguna

El sistema primero mallará el modelo de fundición y mostrará la malla a medida que se crea, como se ve aquí (Ver Figura 26).

**Figura 26**

*Generando malla del modelo.*

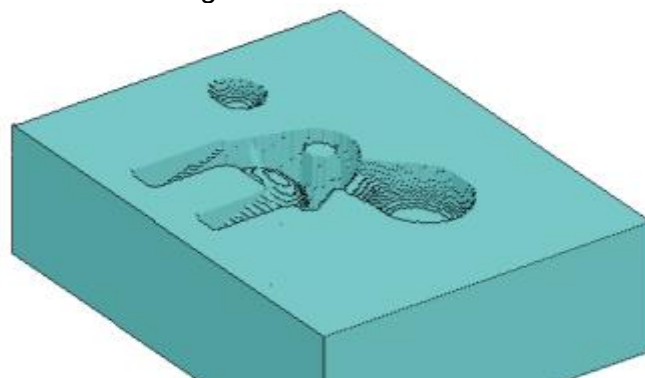


Fuente: Manual SolidCast

A continuación, el sistema enmallará el molde alrededor de la pieza fundida, como se muestra a continuación (en este caso se aplica un molde rectangular), ver Figura 27.

**Figura 27**

*Generando malla del molde rectangular.*



Fuente: Manual SolidCast

**2.1.5.7 Ejecución de una simulación.** Para ejecutar una simulación, debe haber creado previamente una malla. El nombre de la malla aparecerá en el árbol del proyecto

en el lado izquierdo de la pantalla principal de SolidCast. Resalte este nombre de malla, luego, en la barra de menú, seleccione Malla. Iniciar simulación.

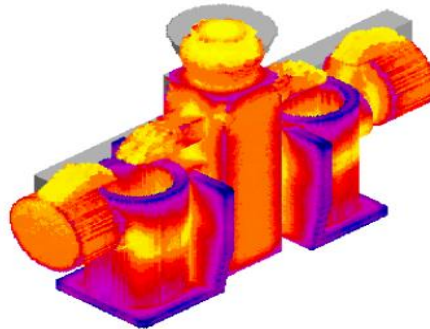
El criterio de parada más común es que el sistema finalice la simulación cuando la fundición y los risers son 100% sólidas.

Se verá una imagen gráfica del relleno de fundición mientras se ejecuta la simulación, como en la siguiente imagen (Ver Figura 28).

**Figura 28**

*Ejecución de la simulación, llenado del molde de metal al 93.49%*

Mold Filling 93.49 % Full Time from start of fill: 5.85 Sec.  
Min. Casting Temperature: 2549.52 F Max. Casting Temperature: 2950.00 F



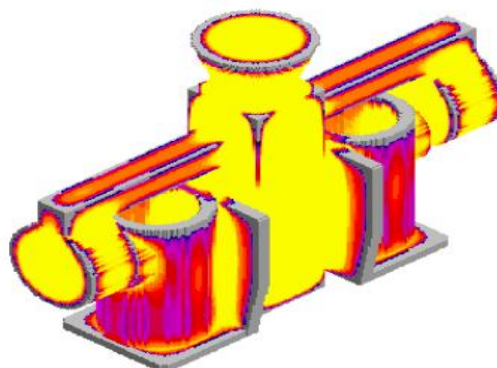
Fuente: Manual SolidCast

Una vez que se completa el llenado, la pantalla cambiará a una pantalla de resumen, mostrando las temperaturas relativas en el modelo y otra información. Si ha desmarcado la casilla en Parámetros del sistema que controla la visualización gráfica durante la simulación, verá una pantalla de texto que enumera un resumen del progreso de la simulación. Aquí se muestra una pantalla de simulación de muestra (Ver Figura 29).

**Figura 29**

*Ejecución de la simulación, porcentaje de sólido al 3.19%.*

Time: 0.896 Min. Max Cast Temp: 2876.498F Min Cast Temp: 2082.373F  
Time Step: 440 Max Mold Temp: 2792.666F Min Mold Temp: 866.853F  
Percent Solid: 3.19 % P.M. Casting Cycle 1  
Calculating volumetric feeding

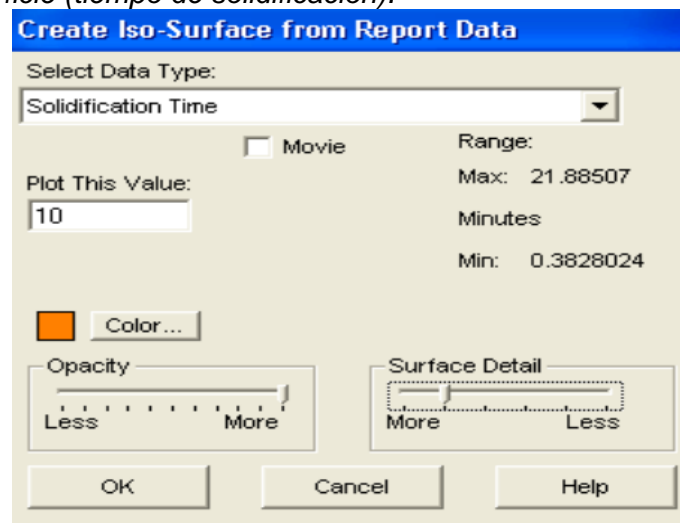


Fuente: Manual SolidCast

**2.1.5.8 Análisis de resultados utilizando iso-superficies.** Una Iso-Surface es una superficie tridimensional dentro del modelo de fundición que muestra dónde ciertos datos de salida tienen un valor particular. Esto significa que está trazando un valor del tipo seleccionado de datos de salida. Como ejemplo, aquí seleccionaremos Tiempo de solidificación, la ventana aparecerá de la siguiente manera (Ver Figura 30).

**Figura 30**

*Pantalla iso-superficie (tiempo de solidificación).*

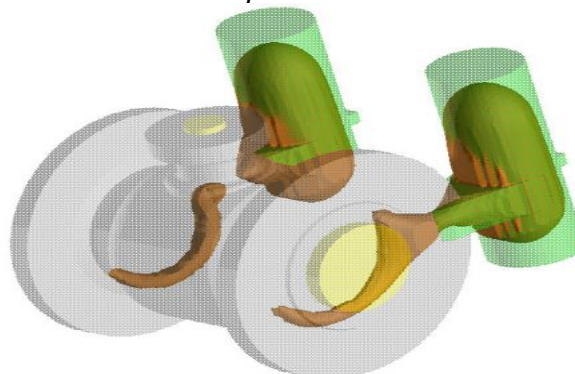


Fuente: Manual SolidCast

Aquí, el sistema indica que el tiempo mínimo de solidificación en la fundición es 0.383 minutos (es decir, el primer punto de la fundición terminó de solidificar a 0.383 minutos) y el último punto solidificó a los 21,89 minutos: Hay un campo donde podemos ingresar un valor para trazar. Para este ejemplo, se ingresó un valor de 10 minutos. En este punto aparecerá lo siguiente (Ver Figura 31).

**Figura 31**

*Imagen iso-superficie, solidificación de la pieza a 10 minutos.*



Fuente: Manual Solidcast

Las formas dentro de la fundición representan las ubicaciones del metal que aún no se había solidificado por completo a los 10 minutos (color marrón). Todo el metal fuera de estas formas se ha solidificado antes de los 10 minutos.

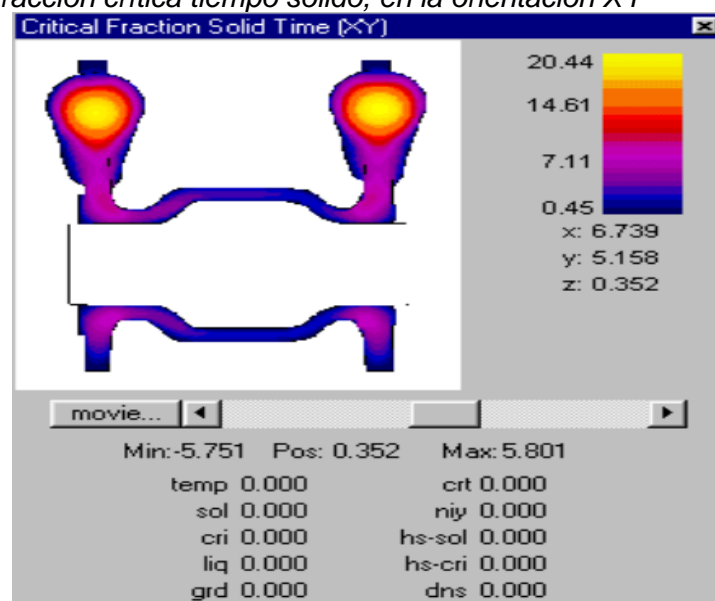
Al cambiar y volver a trazar iso-surfaces en varios valores, es posible tener una buena idea de cómo progresó la solidificación dentro de esta fundición.

**2.1.5.9 Análisis de resultados utilizando plano de corte.** El trazado del plano de corte implica mostrar los resultados de la simulación en un plano 2D cortado a través de la fundición. Puede seleccionar un plano de corte en los planos ortogonales XY, XZ o YZ. Además, al igual que con iso-surfaces, puede seleccionar cualquiera de los diversos tipos de datos de salida para analizar.

El sistema le muestra los valores mínimo y máximo de los datos seleccionados. En las ventanas pequeñas, puede ingresar rangos de parcela para crear la parcela del plano de corte. Estos rangos de trazado deben estar dentro de los valores mínimo y máximo como se muestra. El siguiente ejemplo muestra un gráfico de plano de corte de tiempo sólido de fracción crítica dentro de la fundición y el risers, en la orientación XY (Ver Figura 32).

**Figura 32**

*Plano de corte, fracción crítica tiempo sólido, en la orientación XY*



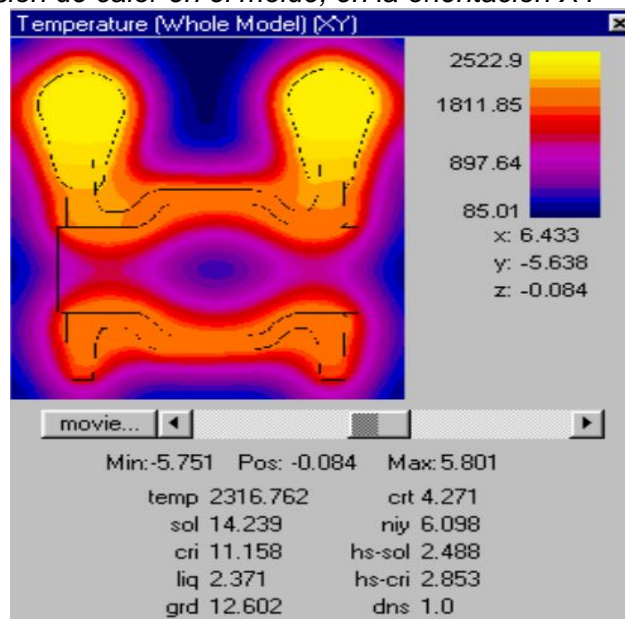
Fuente: Manual Solidcast

Puede mover el plano de corte dentro del modelo, moviendo la barra deslizante o haciendo clic en las flechas izquierda o derecha. También puede hacer clic en un punto de esta imagen y mostrar todos los datos disponibles sobre ese punto debajo de la imagen.

Otro ejemplo de diagrama de plano de corte muestra la distribución de temperatura tanto dentro del material fundido como del material del molde. Aquí se puede ver claramente la difusión de calor en el molde de arena (Ver Figura 33).

### Figura 33

*Plano de corte, difusión de calor en el molde, en la orientación XY*



Fuente: Manual Solidcast

### 2.1.6 Aceros bajo la norma ASTM A217

Esta norma cubre un grado de acero inoxidable martensítico y nueve grados de acero de aleación ferrítico, para partes sometidas a presión convenientes para altas temperaturas de servicio.

**2.1.6.1 Tratamiento térmico.** Todas las piezas fundidas recibirán un tratamiento térmico adecuado a su diseño y composición química.

Las piezas fundidas se suministrarán en condiciones normalizadas y templadas; Los grados WC1, WC4, WC5, WC6 y CA15 se templarán a 1100 °F [595 °C] mínimo; Los grados WC9, C5, C12 y WC11 se templarán a 1250 °F [675 °C] mínimo; El grado C12A se normalizará a 1900-1975 °F [1040-1080 °C] y se templará a 1350-1470 °F [730-800 °C].

El tratamiento térmico se realizará después de que se haya dejado que las piezas fundidas se enfríen por debajo del rango de transformación.

**2.1.6.2 Composición química.** El acero deberá cumplir con los requisitos en cuanto a composición química prescritos en la siguiente Figura 34.

**Figura 34**

*Composición química ASTM A217*

	Composition, %									
	Carbon Molybdenum	Nickel Chromium Molybdenum	Nickel Chromium Molybdenum	Chromium Molybdenum	Chromium Molybdenum	Chromium Molybdenum	Chromium Molybdenum	Chromium Molybdenum	Chromium Molybdenum Vanadium	Chromium
Grade Identification Symbol	WC1	WC4	WC5	WC6	WC9	WC11	C5	C12	C12A	CA15
UNS Number	J12524	J12082	J22000	J12072	J21890	J11872	J42045	J82090	J84090	J91150
Carbon	0.25	0.05–0.20	0.05–0.20	0.05–0.20	0.05–0.18	0.15–0.21	0.20	0.20	0.08–0.12	0.15
Manganese	0.50–0.80	0.50–0.80	0.40–0.70	0.50–0.80	0.40–0.70	0.50–0.80	0.40–0.70	0.35–0.65	0.30–0.60	1.00
Phosphorus	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.020	0.04	0.04	0.030	0.040
Sulfur	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.015	0.045	0.045	0.010	0.040
Silicon	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.30–0.60	0.75	1.00	0.20–0.50	1.50
Nickel	...	0.70–1.10	0.60–1.00	...	...	...	...	...	0.40	1.00
Chromium	...	0.50–0.80	0.50–0.90	1.00–1.50	2.00–2.75	1.00–1.50	4.00–6.50	8.00–10.00	8.0–9.5	11.5–14.0
Molybdenum	0.45–0.65	0.45–0.65	0.90–1.20	0.45–0.65	0.90–1.20	0.45–0.65	0.45–0.65	0.90–1.20	0.85–1.05	0.50
Columbium	...	...	...	...	...	...	...	0.03	0.060–0.10	...
Nitrogen	...	...	...	...	...	...	...	...	0.030–0.070	...
Vanadium	...	...	...	...	...	...	...	0.06	0.18–0.25	...
Specified Residual Elements										
Aluminum	...	...	...	...	...	0.01	...	...	0.02	...
Copper	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.35	0.50	0.50	...	...
Nickel	0.50	...	...	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	...	...
Chromium	0.35	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Titanium	...	...	...	...	...	...	...	...	0.01	...
Tungsten	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	...	0.10	0.10	...	...
Vanadium	...	...	...	...	...	0.03	...	...	...	...
Zirconium	...	...	...	...	...	...	...	...	0.01	...
Total content of these residual elements	1.00	0.60	0.60	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	...	...

Fuente: Norma ASTM A217/A217M - 10

**2.1.6.3 Requisitos de tracción.** El acero utilizado para las piezas fundidas deberá cumplir con los requisitos en cuanto a propiedades de tracción prescritos en la siguiente Figura 35.



**Figura 35***Requisitos de tracción ASTM A217*

Grade	Tensile Strength, ksi [MPa]	Yield Strength, <sup>A</sup> min, ksi [MPa]	Elongation in 2 in. [50 mm] min, % <sup>B</sup>	Reduction of Area, min, %
WC1	65 [450] to 90 [620]	35 [240]	24	35
WC4, WC5, WC6, WC9	70 [485] to 95 [655]	40 [275]	20	35
WC11	80 [550] to 105 [725]	50 [345]	18	45
C5, C12	90 [620] to 115 [795]	60 [415]	18	35
C12A	85 [585] to 110 [760]	60 [415]	18	45
CA15	90 [620] to 115 [795]	65 [450]	18	30

<sup>A</sup> Determine by either 0.2 % offset method or 0.5 % extension-under-load method.

<sup>B</sup> When ICI test bars are used in tensile testing as provided for in Specification **A703/A703M**, the gage length to reduced section diameter ratio shall be 4 to 1.

Fuente: Norma ASTM A217/A217M - 10

## 2.2 Marco conceptual

### 2.2.1 Acero

Fundamentalmente todos los aceros son principalmente, o más apropiadamente, aleaciones de hierro y carbono. Los aceros carbono son aquellos que generalmente tienen aparte del carbono cantidades o porcentajes pequeños de Mn, Si, S, P. Un ejemplo es el acero 1045 nominal, que tiene un 0.45% de carbono, 0.75% de manganeso, 0.40% de fósforo, 0.50% de azufre, y 0.22% de silicio.

### 2.2.2 Acero Aleado

Los aceros aleados son aquellos que contienen cantidades o porcentajes específicos de otros elementos en una composición química los elementos más comúnmente aleados con estos aceros son el níquel, cromo, molibdeno, vanadio y tungsteno. El Mn se encuentra también en esta categoría si se especifica dentro de un porcentaje mayor al 1%. Uno o más de estos elementos de aleación pueden ser requeridos para proporcionar en los aceros características especiales o propiedades para aplicaciones de Ingeniería.

### **2.2.3 Ferrita**

Aunque la ferrita es en realidad una solución sólida de carbono en hierro alfa, su solubilidad a la temperatura ambiente es tan pequeña que no llega a disolver ni un 0.008% de C. Es por esto que prácticamente se considera la ferrita como hierro alfa puro. La ferrita es el más blando y dúctil constituyente de los aceros. Cristaliza en una estructura BCC. Tiene una dureza de 95 Vickers, y una resistencia a la rotura de 28 Kg/mm<sup>2</sup>, llegando a un alargamiento del 35 al 40%. Además de todas estas características, presenta propiedades magnéticas. En los aceros aleados, la ferrita suele contener Ni, Mn, Cu, Si, Al en disolución sólida sustitucional. Al microscopio aparece como granos monofásicos, con límites de grano más irregulares que la austenita. El motivo de esto es que la ferrita se ha formado en una transformación en estado sólido, mientras que la austenita, procede de la solidificación.

### **2.2.4 Perlita**

Es un constituyente compuesto por el 86.5% de ferrita y el 13.5% de cementita, es decir, hay 6.4 partes de ferrita y 1 de cementita. La perlita tiene una dureza de aproximadamente 200 Vickers, con una resistencia a la rotura de 80 Kg/mm<sup>2</sup> y un alargamiento del 15%. Cada grano de perlita está formado por láminas o placas alternadas de cementita y ferrita. Esta estructura laminar se observa en la perlita formada por enfriamiento muy lento. Si el enfriamiento es muy brusco, la estructura es más borrosa y se denomina perlita sorbítica. Si la perlita laminarse caliente durante algún tiempo a una temperatura inferior a la crítica (723 °C), la cementita adopta la forma de glóbulos incrustados en la masa de ferrita, recibiendo entonces la denominación de perlita globular.

### **2.2.5 Cementita**

Es carburo de hierro y por tanto su composición es de 6.67% de C y 93.33% de Fe en peso. Es el constituyente más duro y frágil de los aceros, alcanzando una dureza de 960 Vickers. Cristaliza formando un paralelepípedo ortorrómbico de gran tamaño. Es magnética hasta los 210°C, temperatura a partir de la cual pierde sus propiedades magnéticas.

### **2.2.6 Desfogues o respiraderos**

Los desfogues o respiraderos son canales diseñados para permitir la salida de gases durante el proceso de llenado del molde con metal fundido. Estos son esenciales para prevenir defectos como porosidad en las piezas fundidas, asegurando una colada más uniforme y de mayor calidad.

### **2.2.7 Rechupe**

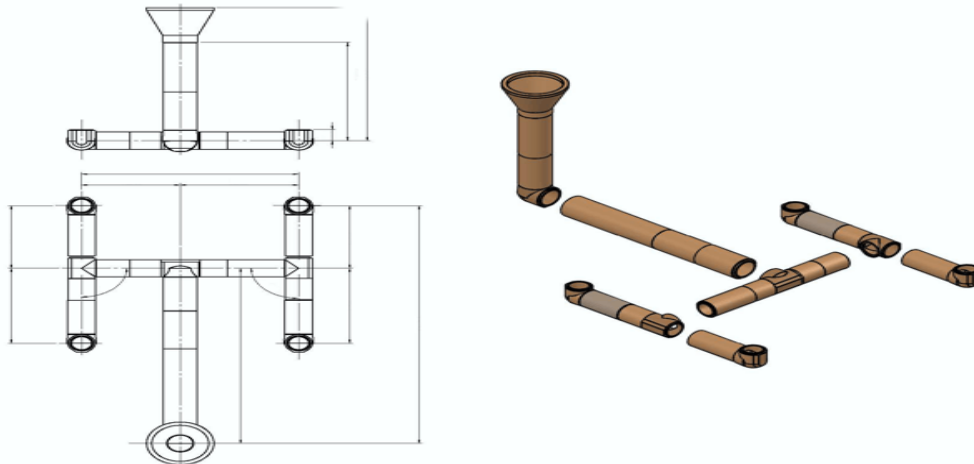
El rechupe es una discontinuidad del material producto de su contracción natural. La forma de evitar este defecto es simple, solo debemos alimentar con metal líquido las zonas que van quedando discontinuas durante la solidificación.

### **2.2.8 Canalizaciones y refractarios especiales**

Sistema de canalizaciones refractarias de pared delgada que permite implementar cualquier sistema de canalización gracias a la gran variedad de elementos que permiten materializar el diseño óptimo, con dimensiones de 60-80-100 mm de diámetro lo que permite atender todo tipo de tamaño de pieza (Ver Figura 36).

**Figura 36**

*Refractarios especiales (cerámicos), para el sistema de colada.*



Fuente: <https://www.dipromet.cl>

### **2.2.9 Arena Cromita**

Su composición es óxido de cromo ( $\text{FeO}:\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), es aplicable a todos los tipos de aceros y muy apropiada para las piezas de acero al cromo, cromo-níquel y acero al manganeso. La dilatación térmica es mucho más baja que la arena sílice con lo que se

reducen también los problemas derivados de la expansión de la arena. El contenido típico de sus óxidos mayoritarios es Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : 46%, FeO: 27%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 15% y MgO: 10%.

### **2.2.10 Eficiencia de colada**

La eficiencia de colada es la relación entre el peso neto de la pieza y el peso total de colada.

$$E(\%) = \frac{W_{PESO\ DE\ LA\ PIEZA}}{W_{PESO\ DEL\ METAL\ LIQUIDO\ REQUERIDO}} \times 100 \quad (19)$$

E (%): Eficiencia de colada.

Por lo general la eficiencia de colada para piezas de bajo carbono, están en el rango de [60 - 70%].

## Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

### 3.1 Diseño de colada en SolidCast (pieza sola)

#### 3.1.1 Selección de la aleación

La aleación ASTM A217-WC6, es catalogada dentro de los aceros de baja aleación resistentes al Creep, cuyas propiedades se deben a un fortalecimiento de la matriz ferrítica a partir del cromo y el molibdeno; así como a la formación de carburos específicos en los bordes de grano y en la matriz para el anclaje de las dislocaciones del material (ver Figura 37).

**Figura 37**

*Composición química de acuerdo al requerimiento de SIDOR*

 Siderurgia del Grupo Almelo-Manabía	INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO <b>ESPECIFICACIÓN TÉCNICA</b>	NUMERO	FECHA CREACION	FECHA ULTIMA REVISION
		RPE-APE-SD-MSP035	22-10-2009	04-02-2011
		PAGINA	36	

REQUERIMIENTOS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA.						
❖ La composición química de la aleación de acuerdo con la norma ASTM A217 para el grado WC6 y los requerimientos de SIDOR debe ser ajustado de conformidad con la tabla I						
Tabla I. Composición química requerida para el suministro de los cuerpos centrales de los carros de pellas						
C	Mn	Si	Mo	Cr	P	S
0,05% - 0,18%	0,50% -0,80%	0,60%	0,45% - 0,65%	1,00% - 1,50%	0,01%	0,03%

Fuente: Especificación técnica RPE-APE-SD-MSP035 – SIDOR

Temperatura de inicio de llenado del molde 1580°C

#### 3.1.2 Selección del material del molde

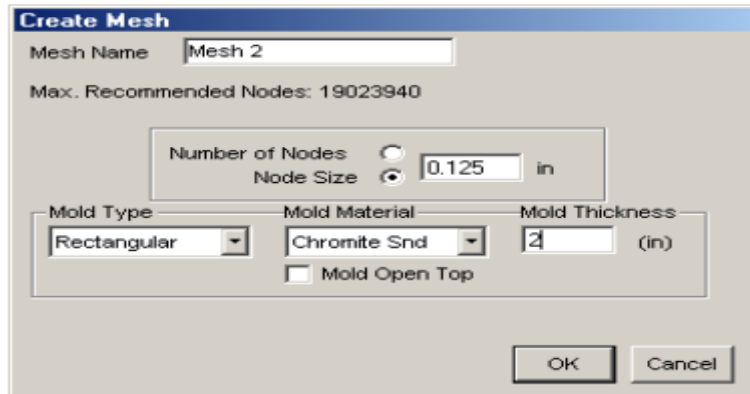
Para el proceso inicial del diseño colada en SolidCast, vamos a considerar como arena de contacto, 100% arena cromita. Por 2 motivos:

- 1°, por ser una pieza gran tonelaje, aproximadamente 5.1 tn (evitar la metalización).
- 2°, que, durante el proceso de pruebas en las simulaciones, la arena cromita, es la que mejores resultados a presentado (Eliminación de puntos calientes), en comparación al uso de arena sílice nueva como contacto.

Por consiguiente, se va generar una malla con tipo de molde rectangular y arena cromita (Ver Figura 38).

**Figura 38**

*Pantalla generar malla, material del molde arena cromita.*



Fuente: Elaboración propia

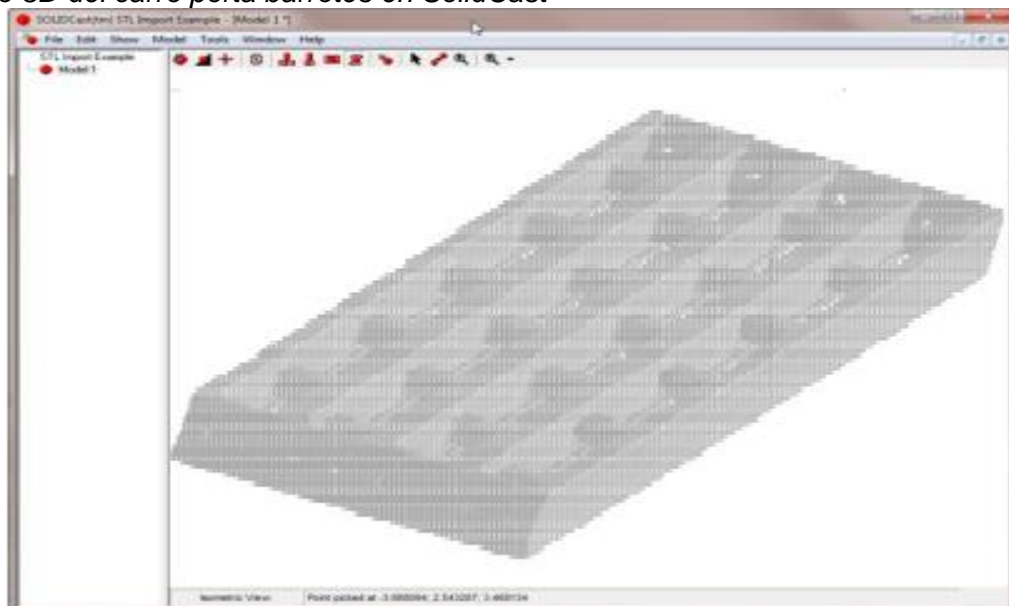
### **3.1.3 Importando sólido a SolidCast.**

Muy importante, previamente evaluar y considerar la posición correcta para la simulación del carro porta barros (eje z /eje vertical).

En la siguiente Figura 39, se observa el sólido del carro porta barros, donde los rieles están en la posición vertical.

**Figura 39**

*Sólido 3D del carro porta barros en SolidCast*



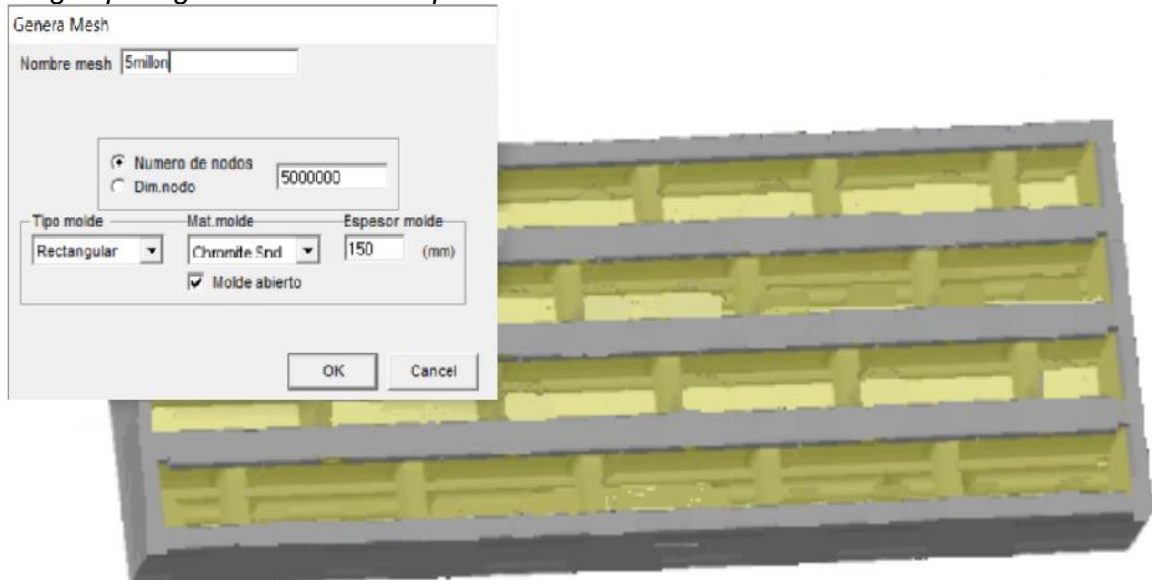
Fuente: Elaboración propia

### 3.1.4 Generando malla del modelo y molde

Para el informe se considera un enmallado de 5.000.000 (5 millones) de elementos para el carro porta barrotos (ver figura 40) y un espesor de arena de 150 mm rectangular.

**Figura 40**

*Imagen para generar malla de la pieza sola.*

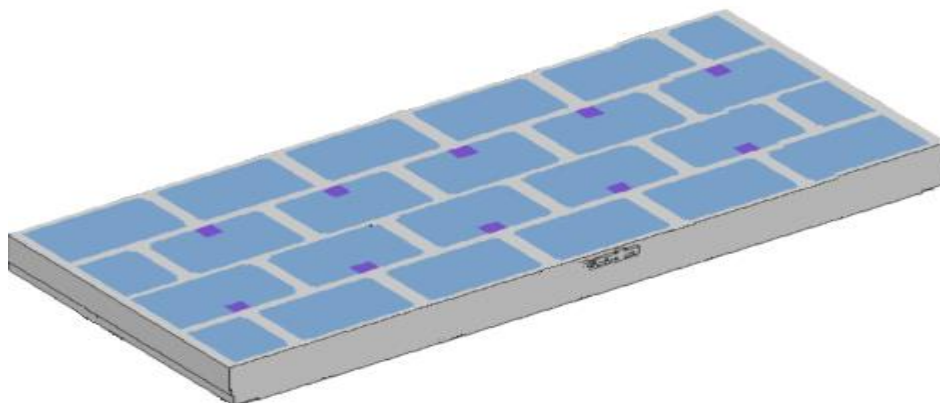


Fuente: Elaboración propia

Iniciamos con el proceso del enmallado del modelo (carro porta barrotos) sin alimentadores (Ver Figura 41).

**Figura 41**

*Generando malla del modelo, pieza sola (carro porta barrotos).*

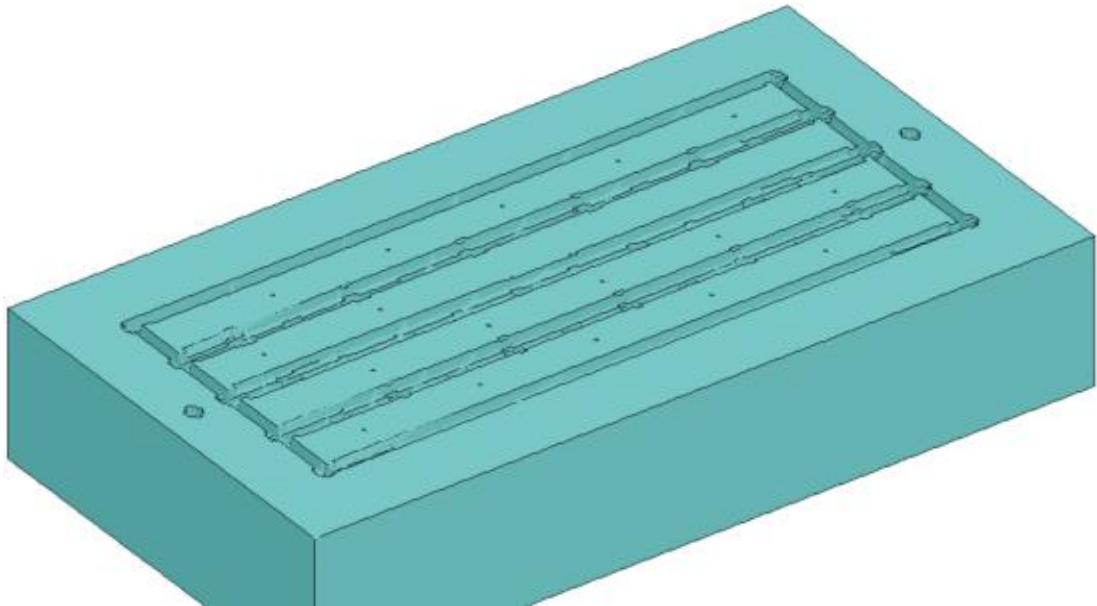


Fuente: Elaboración propia

Continuamos con el proceso del enmallado del molde (tipo rectangular), Ver Figura 42.

## Figura 42

Generando malla del molde, pieza sola (carro porta barrotes).



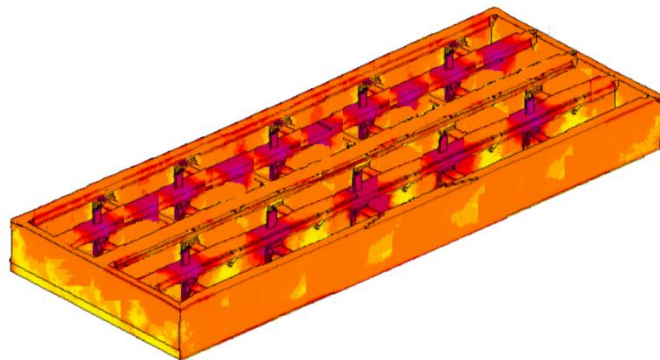
Fuente: Elaboración propia

### 3.1.5 Ejecutando la simulación (pieza sola)

En este proceso vamos a observar el llenado del molde con metal líquido, y la posteriormente de solidificación de la pieza, la etapa culmina cuando el metal ha solidificado al 100% (Ver Figura 43).

## Figura 43

Simulación de la pieza sola (carro porta barrotes).



Fuente: Elaboración propia

Hasta este proceso se obtiene el peso de la pieza que es 5100 kg.

### 3.1.6 Análisis de resultado utilizando plano de corte

Para un mejor análisis comprensivo, vamos a graficar el carro porta barrotes en una vista de planta (el carro porta barrotes está conformado por 5 rieles equidistantes, que van



unidos por brazos o templadores), ver Figura 44.

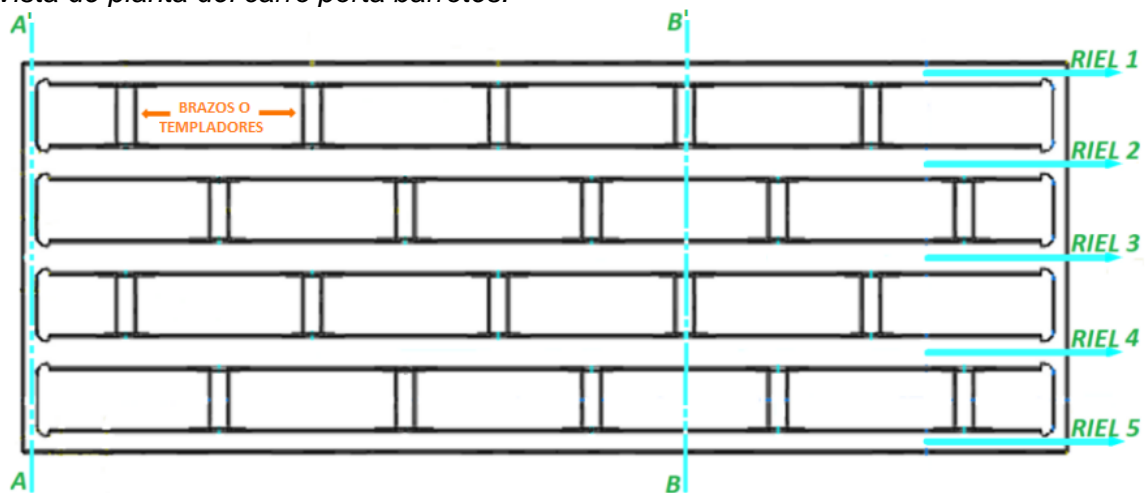
Además, podemos observar que si giramos 180°, la pieza es simétrica, por lo tanto, podemos deducir que el riel 1 = riel 5, y riel 2 = riel 4.

Dicho ello, vamos a señalar 5 zonas críticas, que será tema de análisis en el desarrollo del diseño de colada, las zonas son las siguientes:

- Zona 1: Riel 1 / Riel 5
- Zona 2: Riel 2 / Riel 4
- Zona 3: Riel 3
- Zona 4: Plano de corte AA'
- Zona 5: Plano de corte BB'

**Figura 44**

*Vista de planta del carro porta barrotes.*



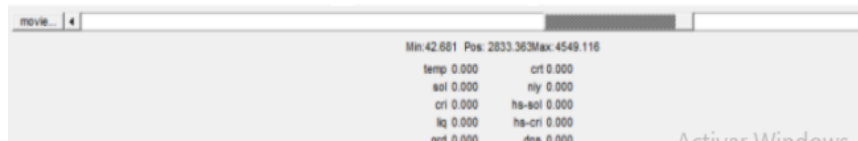
Fuente: Elaboración propia

Analizando en el plano de corte BB'.

El sistema nos muestra los valores mínimo y máximo del tiempo de la solidificación hasta el final del proceso (100% sólido). Tomamos tiempos próximos a la solidificación de la pieza al 100%, y se representa en la siguiente Figura 45.

**Figura 45**

*Vista en el plano de corte BB'.*



Fuente: Elaboración propia

De la Figura 45, las zonas claras (amarillo, lila, rosado, rojo), son considerados como zonas o puntos caliente que el metal aún se encuentra líquido y como consecuencia la pieza presentará rechupe interno en dichas zonas. Por lo tanto, la pieza no presenta una solidificación progresiva ni direccional.

### **3.1.7 Cálculo de riser en SolidCast**

#### **Determinar número de zonas a alimentar**

Según el desarrollo en SolidCast tenemos 3 zonas a críticas a alimentar:

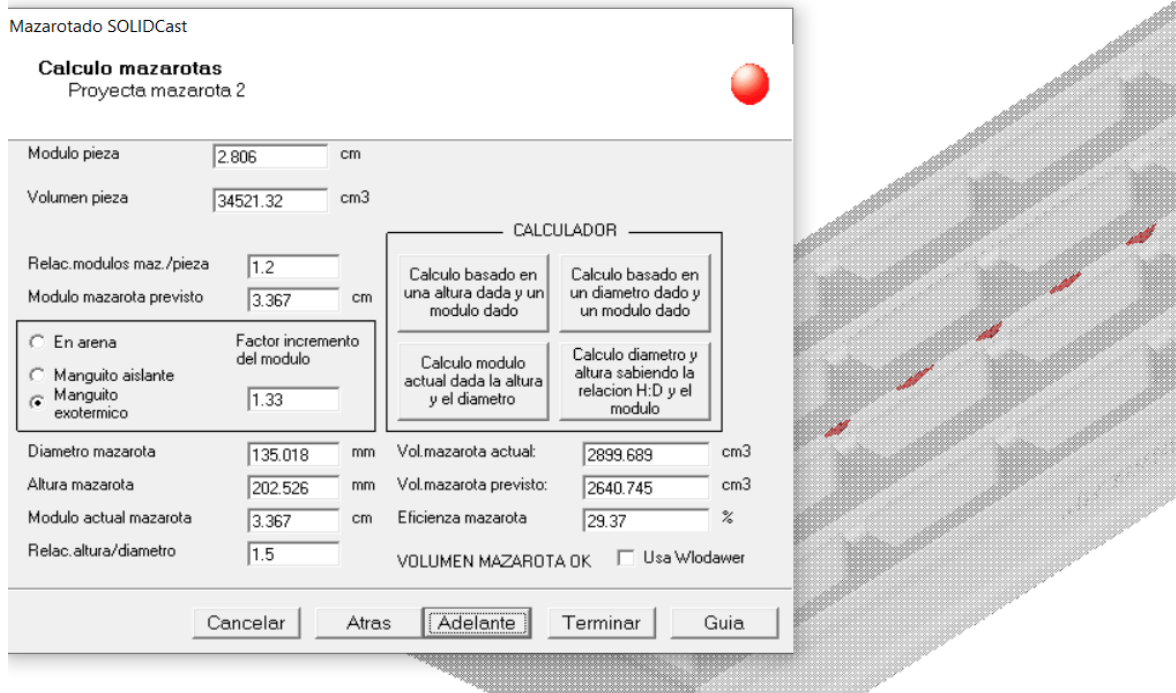
- Zona 1
- Zona 2
- Zona 3

#### **Cálculo del tamaño de riser en SolidCast**

Analizamos la zona 3 (riel central), de acuerdo al desarrollo en SolidCast, para satisfacer la alimentación en dicha zona, según el programa necesitamos considerar como mínimo un alimentador de diámetro 140 mm (se considera la relación estándar en el mercado de diámetro y altura = 1:1.5 respectivamente), ver Figura 46.

**Figura 46**

*Imagen cálculo de mazarota en SolidCast, zona 3.*



Fuente: Elaboración propia

Del mismo modo se trabaja con las zonas 1 y 2.

### **3.2 Cálculos teóricos.**

#### **3.2.1 Método teórico del cálculo de número de alimentadores**

**Zona 1:** Vamos a considerar como una placa con las siguientes dimensiones. Largo 4006 mm (157.7"), ancho 450 mm (17.7"), y espesor 70 mm (2.76"), adicionalmente usaremos chills, para tener una similitud más próximo al estudio (Ver Figura 47).

**Figura 47**

*Imagen carro porta barrotas, zona 1 delineado de rojo.*



Fuente: Elaboración propia

Por teoría:

$$Nro. mazarota = \frac{Largo\ de\ la\ placa}{Zona\ de\ incidencia} \quad (20)$$

Aplicando zona de incidencia = 2 (4.5 espesor" +2") (Ver Figura 16)

$$No. mazarota = \frac{157.7}{28.84} = 5.47$$

Redondeando, según teoría debemos utilizar 6 mazarotas en dicha zona.

A modo comparativo, ahora aplicando criterio según forma de la pieza (Figura 44), se tiene focos calientes en cada brazo que conecta con el riel adyacente, esto nos da un valor de 5 alimentadores, sumado los 2 extremos que también presenta foco caliente en menor grado, en total debemos utilizar 7 alimentadores en dicha zona.

Comparando por ambos métodos, vemos que coinciden el número de alimentadores son próximos, más no es una regla ya que en otros tipos de piezas los valores serán muy diferentes y se deberá usar el mejor criterio a evaluar en dicho evento.

### **3.2.2 Método teórico del cálculo del sistema de llenado**

#### **Cálculo del bebedero**

Para el cálculo del diámetro del bebedero, por ser una pieza larga de aproximadamente 4000 mm, vamos a considerar el uso de 2 bebederos para prevenir la disminución de la temperatura del líquido durante su trayecto en el molde y evitar juntas frías al final.

Aplicamos el concepto de tiempo de llenado, ecuación (16)

$$T = A * \delta^m * W^n \quad (16)$$

Datos: A (1.5), m (0.21), n (0.34),  $\delta$ (40), W(3695.5)

Reemplazando valores

$$T = 1.5 * 40^{0.21} * 3695.5^{0.34}$$

$$T = 53.15 \text{ seg}$$

Aplicamos el concepto de flujo

$$flujo = \frac{Peso\ (kg)}{Tiempo\ (seg)} \quad (21)$$

Reemplazando valores:

$$flujo = \frac{3695.5 \text{ kg}}{53.15 \text{ seg}} = 69.53 \text{ kg/seg}$$

Finalmente utilizamos el método comparativo con la tabla 1 (Elección de diámetros de bebedero y canal de colada), por lo tanto, según la tabla 1 corresponde a un bebedero de diámetro 80 mm.

### **Cálculo del canal de colada**

Para el cálculo del diámetro de canal de colada, usaremos un sistema de baja presión (sistema no presurizado), ya que requerimos un flujo calmado para evitar turbulencia, arrastre de arena, gas atrapado, etc. Aplicamos la ecuación 18, damos valores A:B:C como 1:1:4 respectivamente.

$$\frac{A_{be}}{1} = \frac{A_{cc}}{1} = \frac{A_{ca}}{4} \quad (18)$$

Nuestro sistema consta, por cada bebedero, 2 canales para una mejor distribución del flujo. Nos vamos a la tabla 1 (Elección de diámetros de bebedero y canal de colada), para un diámetro 80mm del bebedero, corresponde un área del bebedero de 5030 mm<sup>2</sup>.

Aplicando la siguiente relación, calcularemos el área del canal de colada.

$$A_{cc} = \frac{5030 \cdot 1}{2} = 2515 \text{ mm}^2 \quad (22)$$

Finalmente utilizamos el método comparativo con la Tabla 1 (Elección de diámetros de bebedero y canal de colada), por lo tanto, según la Tabla 1 corresponde a un canal de colada de diámetro 60 mm.

### **Cálculo del canal de ataque**

Para el cálculo de diámetro del canal de ataque, analizamos la forma de pieza, el carro porta barrotes presenta 5 rieles y el canal de colada, se situará por el fondo, perpendicular a los rieles y el canal de ataque por el fondo a cada riel, por ello se va considerar 5 canal de ataques por cada canal de colada.

$$A_{ca} = \frac{2830 \cdot 4}{5} = 2264 \text{ mm}^2 \quad (23)$$

Finalmente utilizamos el método comparativo con la Tabla 2 (Elección de la boquilla del canal de ataque), por lo tanto, según la Tabla 2 corresponde a un canal de ataque CA

### 3.3 Primer diseño de colada en SolidCast (pieza con sistema de alimentación)

Para este primer diseño de colada, aplicaremos el uso de alimentadores, placas enfriadoras y desfogues tipos chavetas, en zonas estratégicos que se va a requerir para el primer diseño de colada.

Los alimentadores son:

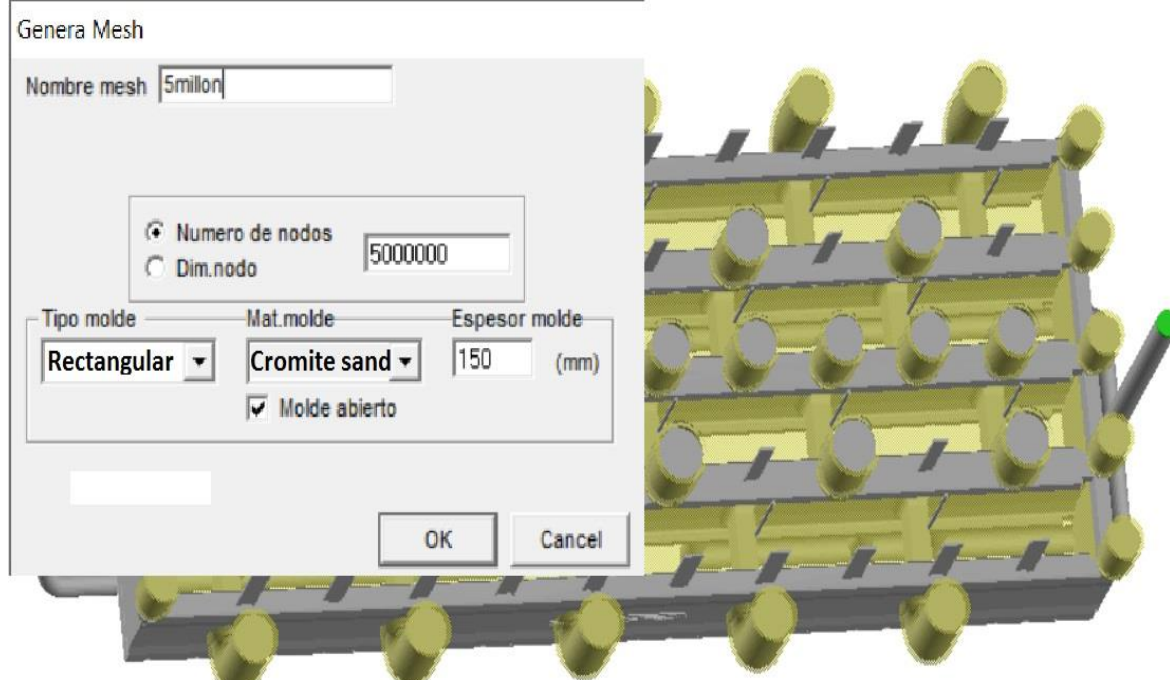
- Zona 1: Alimentador curvo de Ø 160 mm
- Zona 2: Alimentador de Ø 180 mm
- Zona 3: Alimentador de Ø 160 mm
- Zona 4: Alimentador de Ø 150 mm

#### 3.3.1 Generando malla del primer diseño de colada

Para esta pieza vamos a considerar un generado de malla de 5.000.000 (5 millones) de elementos y un molde en espesor de arena de 150 mm rectangular (Ver Figura 48).

**Figura 48**

*Imagen para generar malla de la pieza con sistema de alimentación.*

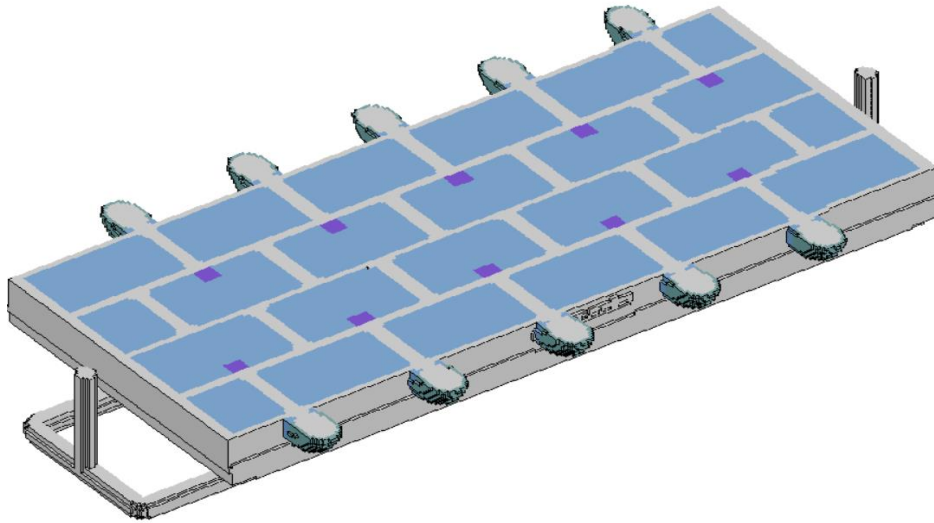


Fuente: Elaboración propia

Posteriormente vamos a continuar con el proceso del generado de malla del modelo (carro porta barrotos) con su sistema de alimentación (Ver Figura 49).

### Figura 49

*Generando malla del modelo, pieza con sistema de alimentación.*

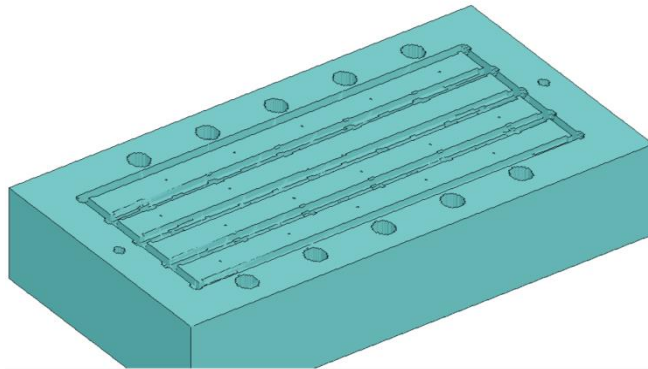


Fuente: Elaboración propia

Continuamos con el proceso del generado de malla del molde (tipo molde rectangular), ver Figura 50.

### Figura 50

*Generando malla del molde, pieza con sistema de alimentación.*



Fuente: Elaboración propia

#### ***3.3.2 Ejecutando la simulación (pieza con sistema de alimentación)***

En este proceso vamos a observar el llenado del molde de metal líquido (Ver Figura 51 y Figura 52), y posteriormente la etapa de solidificación. La etapa culmina cuando el metal ha solidificado al 100%.

**Figura 51**

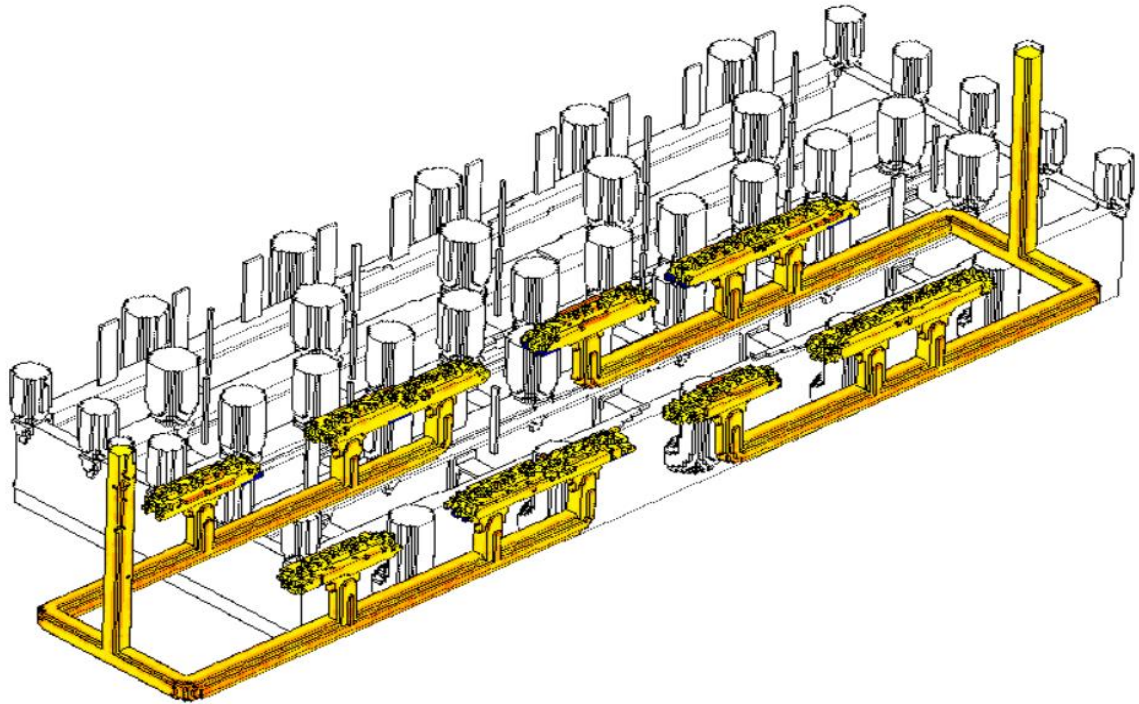
*Llenado del molde de metal líquido al 12.98 %.*

**Mold Filling 12.95% Full**

**Min. Casting Temperature: 1505.61 C**

**Time from start of fill: 10.36 Sec.**

**Max. Casting Temperature: 1610.00 C**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 52**

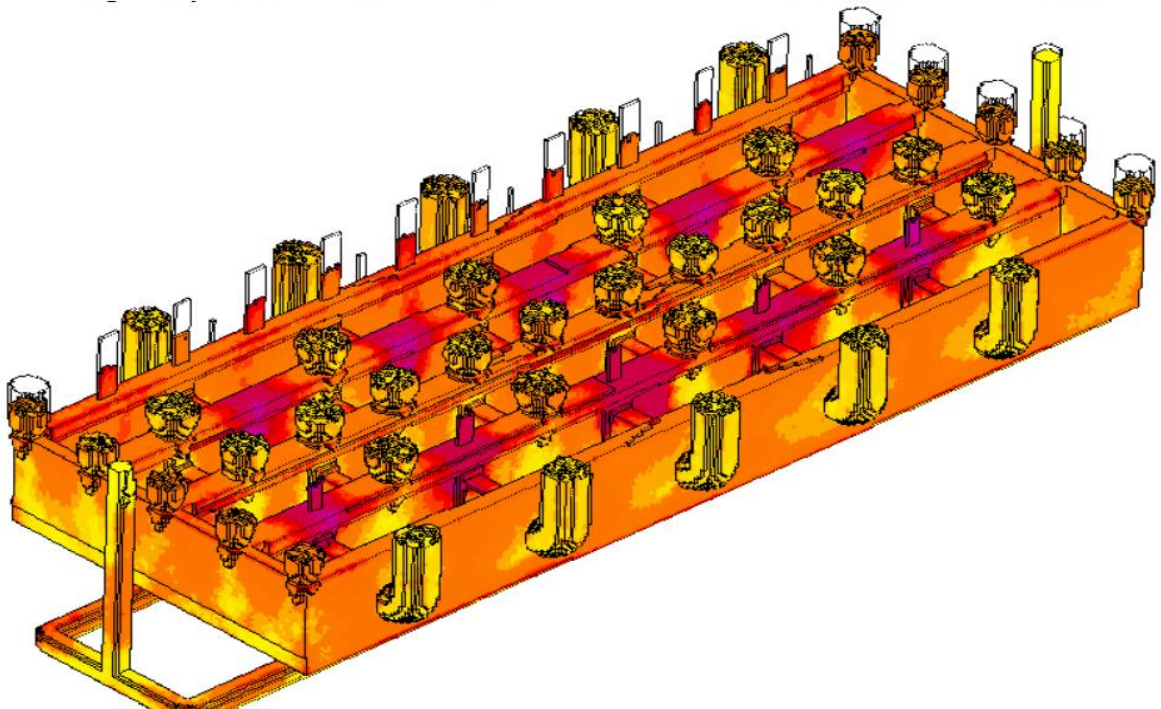
*Llenado del molde de metal líquido al 90.63 %.*

**Mold Filling 90.63% Full**

**Min. Casting Temperature: 1441.66 C**

**Time from start of fill: 41.43 Sec.**

**Max. Casting Temperature: 1610.00 C**



Fuente: Elaboración propia

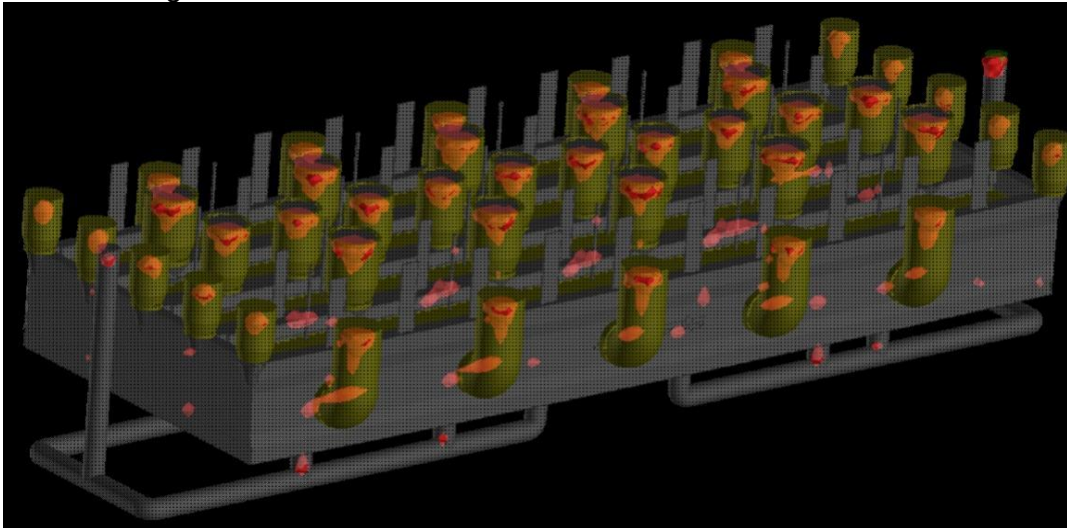


### 3.3.3 Análisis de densidad del material utilizando iso superficie al 0.995

En la siguiente Figura 53 vista isométrica, vemos una representación en iso superficie, donde podemos observar, zonas aún líquidas (color rosado), con faltante de solidificación la pieza un 0.5% (Ver Figura 53).

**Figura 53**

*Representación gráfica del sólido al 99.5 % de solidificación total.*

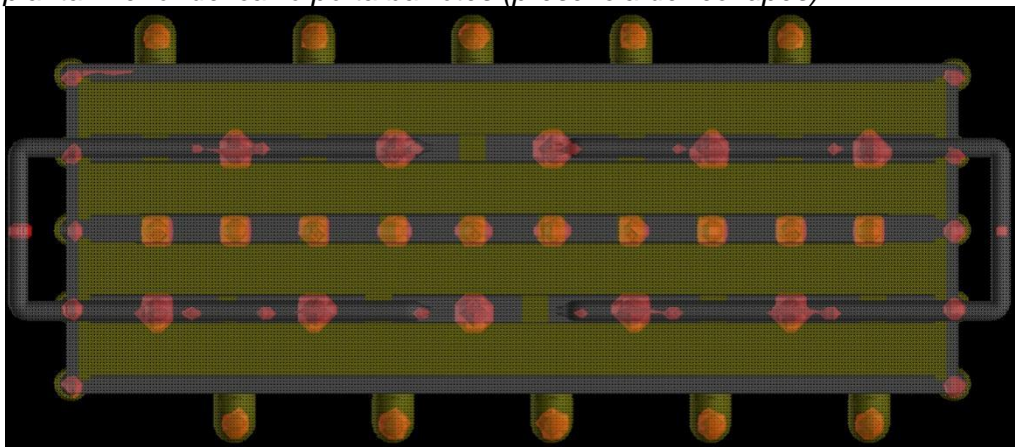


Fuente: Elaboración propia

En la siguiente Figura 54 vista de fondo, podemos observar que en la parte inferior del sólido se presentan rechupes en la zona 1 (esquina superior izquierda) y zona 2.

**Figura 54**

*Vista planta inferior del carro porta barrotos (presencia de rechupes).*

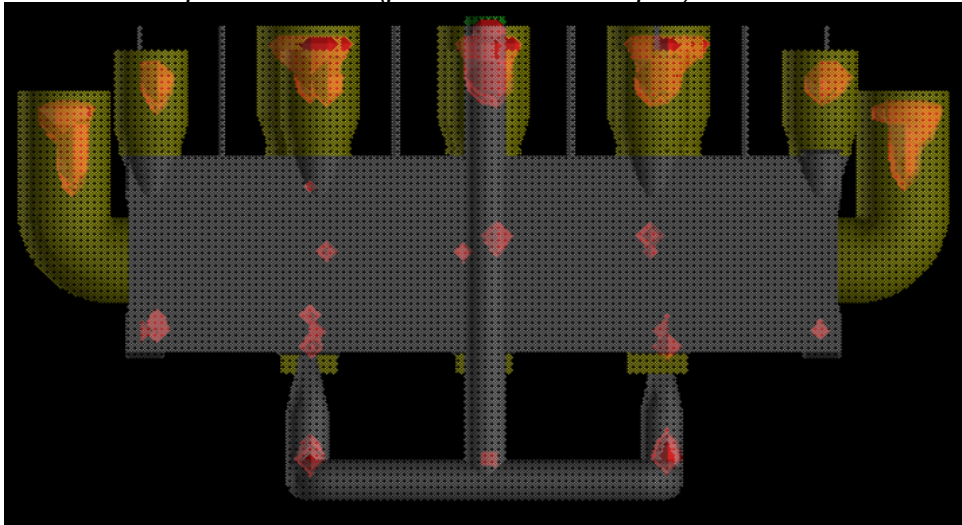


Fuente: Elaboración propia

En la siguiente Figura 55 vista lateral (zona 4), analizando podemos observar rechupes en la parte inferior y medio de la pieza.

## Figura 55

*Vista lateral del carro porta barrotes (presencia de rechupes).*

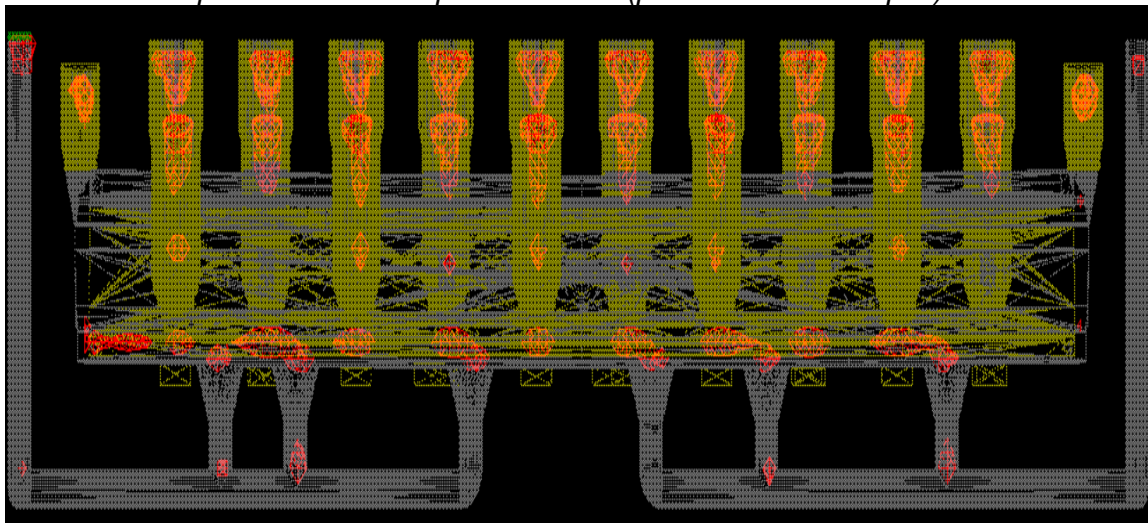


Fuente: Elaboración propia

En la siguiente Figura 56 vista frontal esquelética, podemos observar rechupes en la parte inferior, medio y superior de la pieza.

## Figura 56

*Vista frontal esquelética del carro porta barrotes (presencia de rechupes).*



Fuente: Elaboración propia

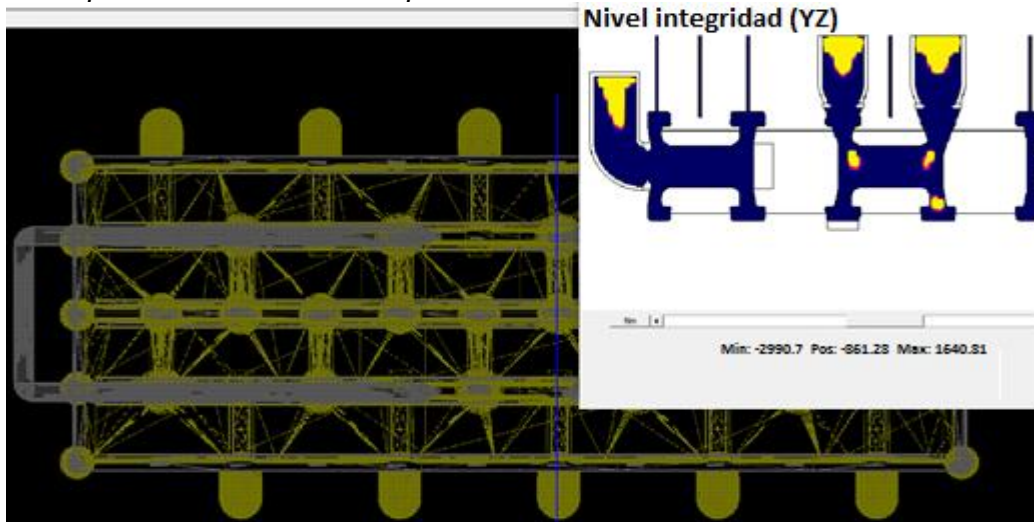
En la siguiente Figura 57 vista de plano de corte BB', podemos observar:

- **Zona 1.** No se observa rechupe, (se coloca desfogue tipo chaveta).
- **Zona 2.** El riel que conecta al riel central (brazo o templador), presenta rechupe. El otro riel, se colocó enfriador en el centro, logrando direccionar la solidificación.
- **Zona 3.** El riel central, presenta rechupe en la parte central, si observamos se colocó enfriador en la parte inferior ayudando a direccionar la solidificación.

Los desfogues tipo chavetas en la parte superior (actuando también como enfriadores, que sirven como punto de partida para direccionar la solidificación), logrando así eliminar los rechupes en la parte superior donde van las chavetas.

### Figura 57

Vista en el plano de corte BB' de la pieza con sistema de alimentación.



Fuente: Elaboración propia

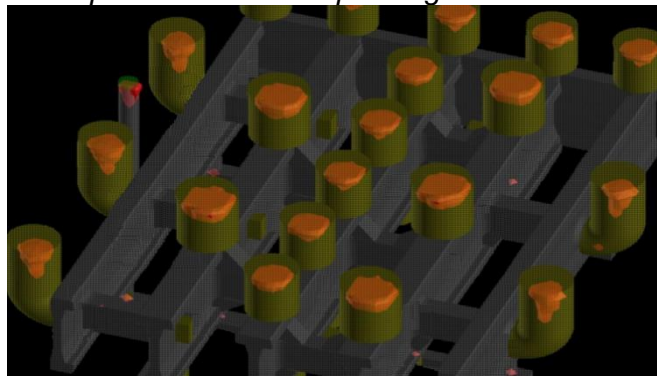
### 3.4 Segundo diseño de colada en SolidCast (pieza con sistema de alimentación)

Para de este segundo diseño de colada, se aplicó adicional al anterior diseño de colada, el uso de padding en las uniones de los brazos con los rieles donde van los alimentadores, con la finalidad que la solidificación sea progresiva y direccional hacia los alimentadores.

Nota: Para ver con más detalle y rápido, se simuló solo la mitad de la pieza ya que es simétrica. En la siguiente Figura 58 se utilizó padding entre los rieles 2,3 y 4.

### Figura 58

Vista isométrica del carro porta barrotos con padding entre los rieles 2,3y4.

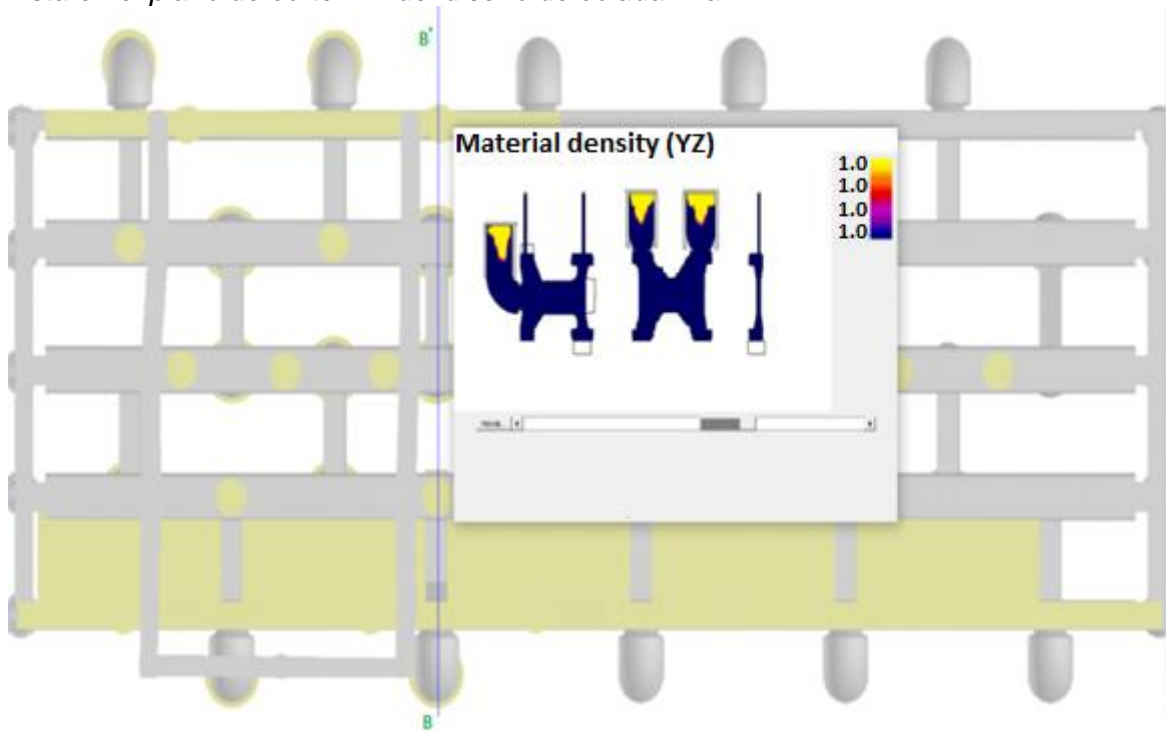


Fuente: Elaboración propia

En la siguiente Figura 59, vista de plano de corte BB', se presenta el diseño de colada final

**Figura 59**

*Vista en el plano de corte BB' del diseño de colada final.*



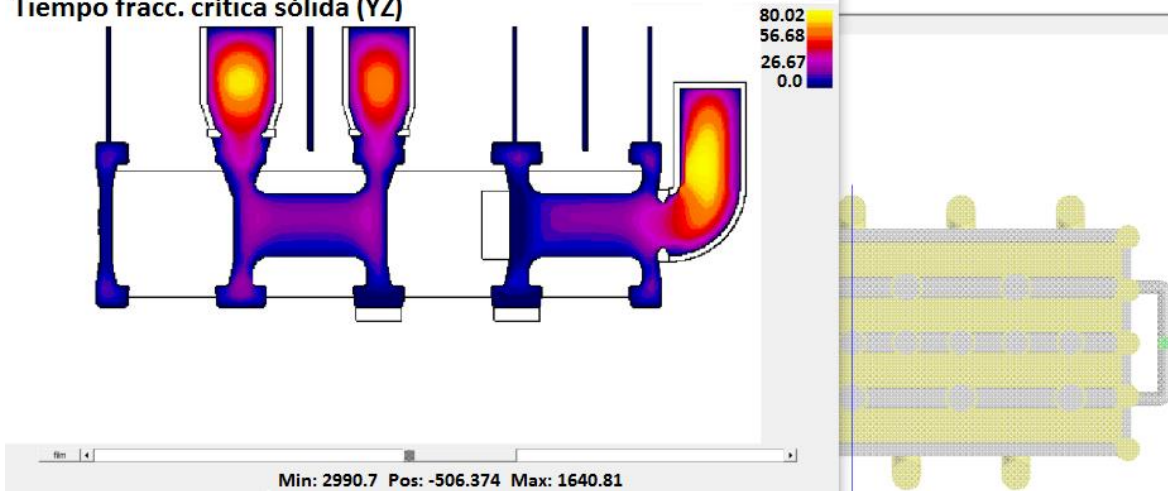
Fuente: Elaboración propia

Una vez finalizado el desarrollo del diseño de colada final, a continuación, analizaremos los resultados utilizando plano de corte. para consolidar que no se presenten defectos posteriormente.

En la siguiente figura 60 de tiempo de fracción crítica sólida, vemos el efecto de enfriamiento de las placas enfriadoras, se puede observar una solidificación progresiva y direccional hacia los alimentadores.

**Figura 60**

*Vista del tiempo de fracción crítica sólida del carro porta barrotes.*  
**Tiempo fracc. crítica sólida (YZ)**



Fuente: Elaboración propia

En la siguiente Figura 61 de plano de corte muestra la distribución de temperatura tanto dentro del material fundido como del material del molde (arena cromita). Aquí se puede analizar la difusión de calor en el molde de arena, donde se observa buena disipación de calor por parte del molde y no va presentar metalización.

**Figura 61**

*Vista del análisis de temperaturas del carro porta barrotes.*  
**Temperatura (todo el modelo) (YZ)**

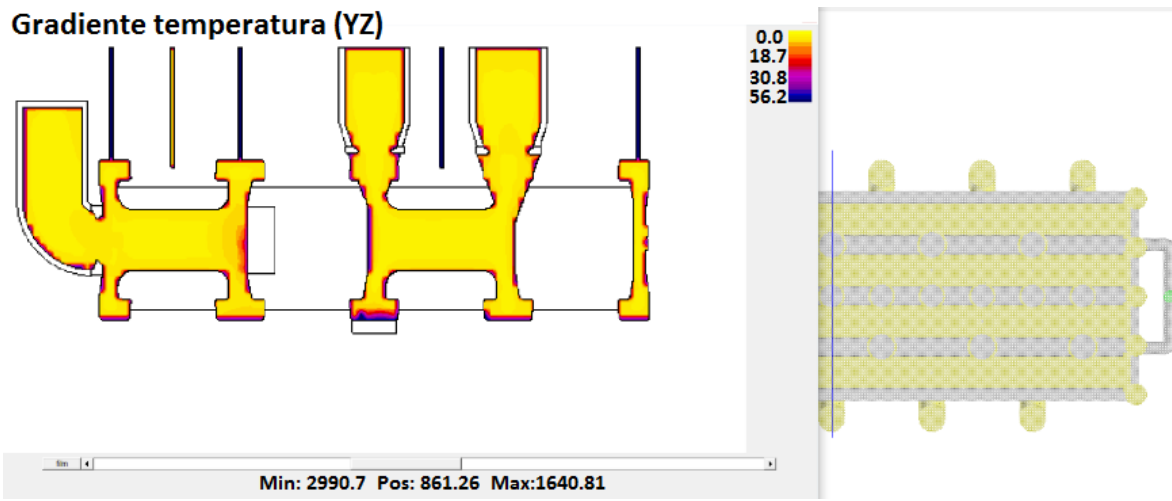


Fuente: Elaboración propia

En la siguiente Figura 62 de plano de corte, vemos la gradiente de temperatura, se evalúa posibles fisuras en caliente. Se observa gradiente casi constante, porque lleva arena de contacto cromita, lo que hace constante el enfriamiento.

**Figura 62**

*Vista del gradiente de temperatura del carro porta barrotes.*



Fuente: Elaboración propia

## Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

En base a lo desarrollado en el capítulo anterior, se obtiene los siguientes resultados.

### 4.1 Diseño de colada final

El diseño de colada final se visualiza a detalle en las Figuras 63, 64 y 65.

Los principales materiales a usar en el diseño de colada, se detalla en la Tabla 3.

**Tabla 3**

*Materiales de uso para el diseño de colada final.*

Item	Descripción	Cantidad
1	Manguito Curvo con tapa ULC Ø 160 H 360 mm	10
2	Manguito UL Ø180 H270 mm	10
3	Manguito UL Ø160 H270 mm	10
4	Manguito UL Ø150 H225 mm	10
5	Bebedero Ø80 mm	2
6	Canal de colada Ø60 mm	4
7	Canal de ataque CA 60/15 mm	20
8	Chills tipo A (80x60x150) mm	10
9	Chills tipo B (120x120x50) mm	20
10	Chills tipo C (100x100x70) mm	10
11	Padding tipo 1 (debajo de los alimentadores de los rieles 2,3y4)	20
12	Padding tipo 2 (en los alimentadores curvos)	10
13	Desfogues tipo chavetas 60x10 mm	30

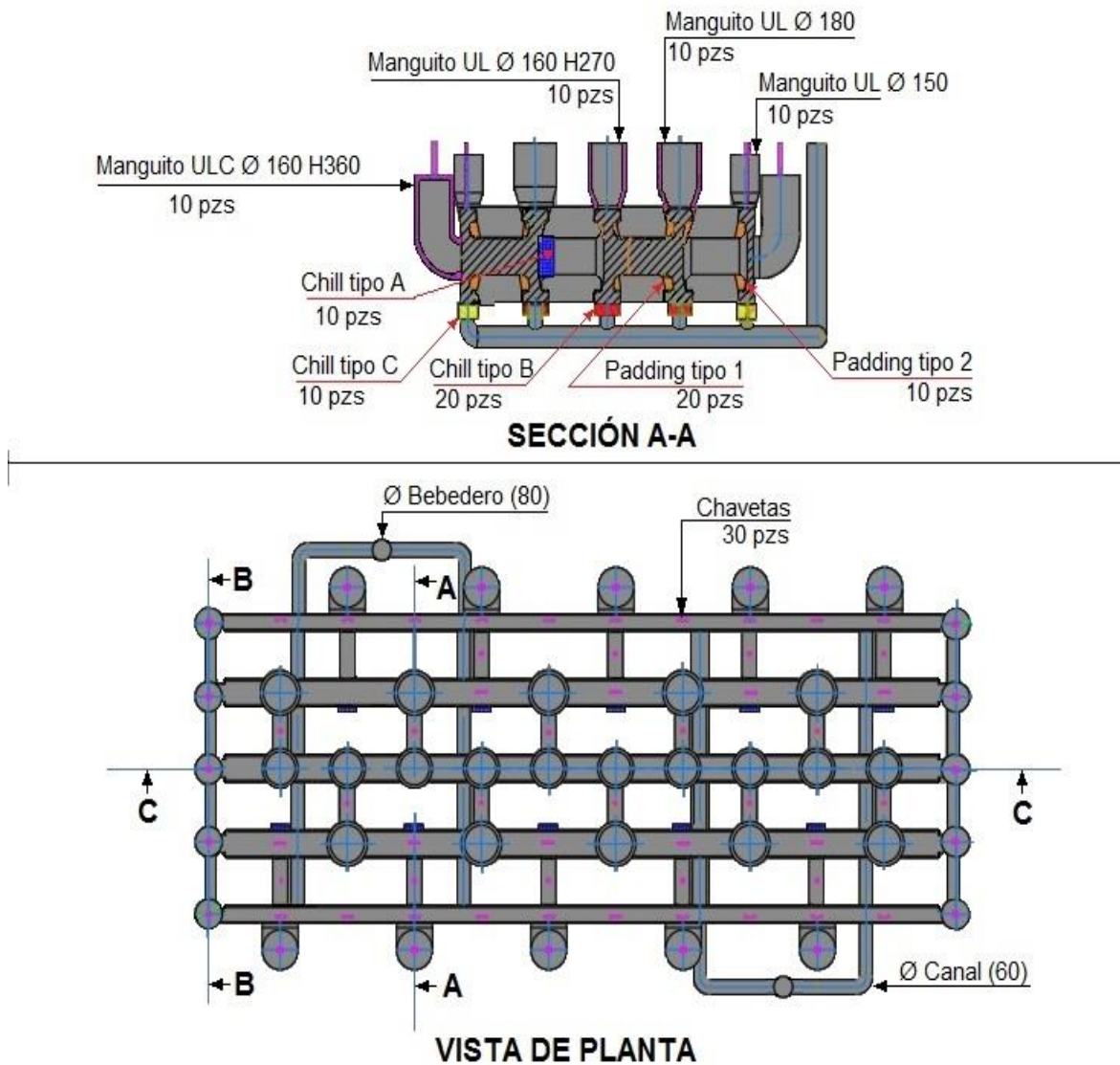
Fuente: Elaboración propia

A continuación, en las siguientes Figuras 63, 64 y 65, presentamos el plano técnico del diseño de colada final para la fabricación de los carros porta barrotes.

Analizando la Figura 63, se ve a detalle la ubicación exacta, donde colocar los alimentadores, las placas enfriadoras (colores rojo amarillo y azul), los padding (color naranja), los desfogues tipo chavetas (color rosado) y el sistema de llenado que lo conforma el bebedero, canal de colada y canal de ataque.

**Figura 63**

*Diseño de colada final, sección de corte A-A y vista de planta.*



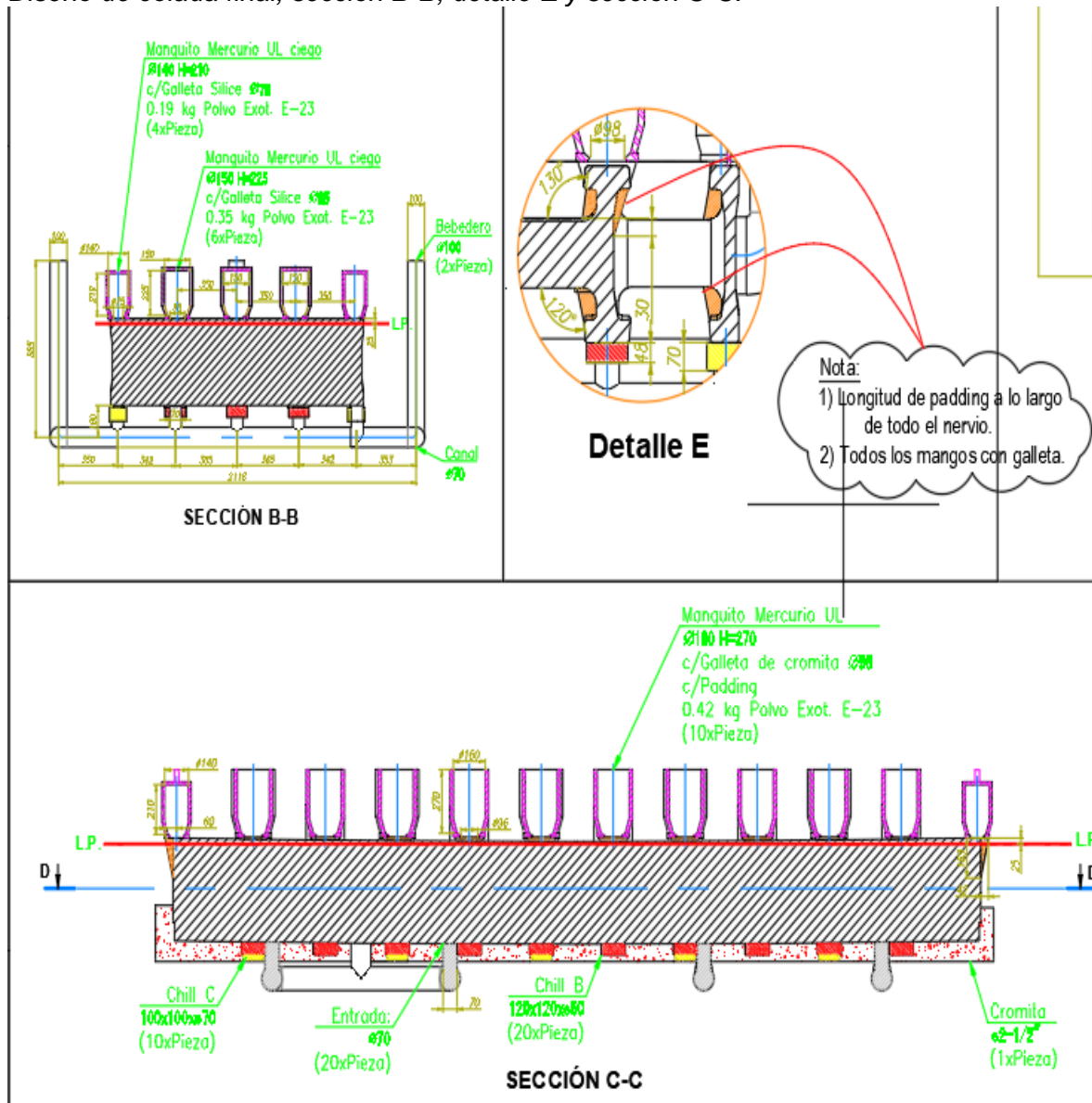
Fuente: Fundición Callao SA

En la Figura 64, podemos resaltar en detalle las dimensiones y ubicación de los padding, así como las placas enfriadoras que se ubican en el fondo del molde.



**Figura 64**

Diseño de colada final, sección B-B, detalle E y sección C-C.

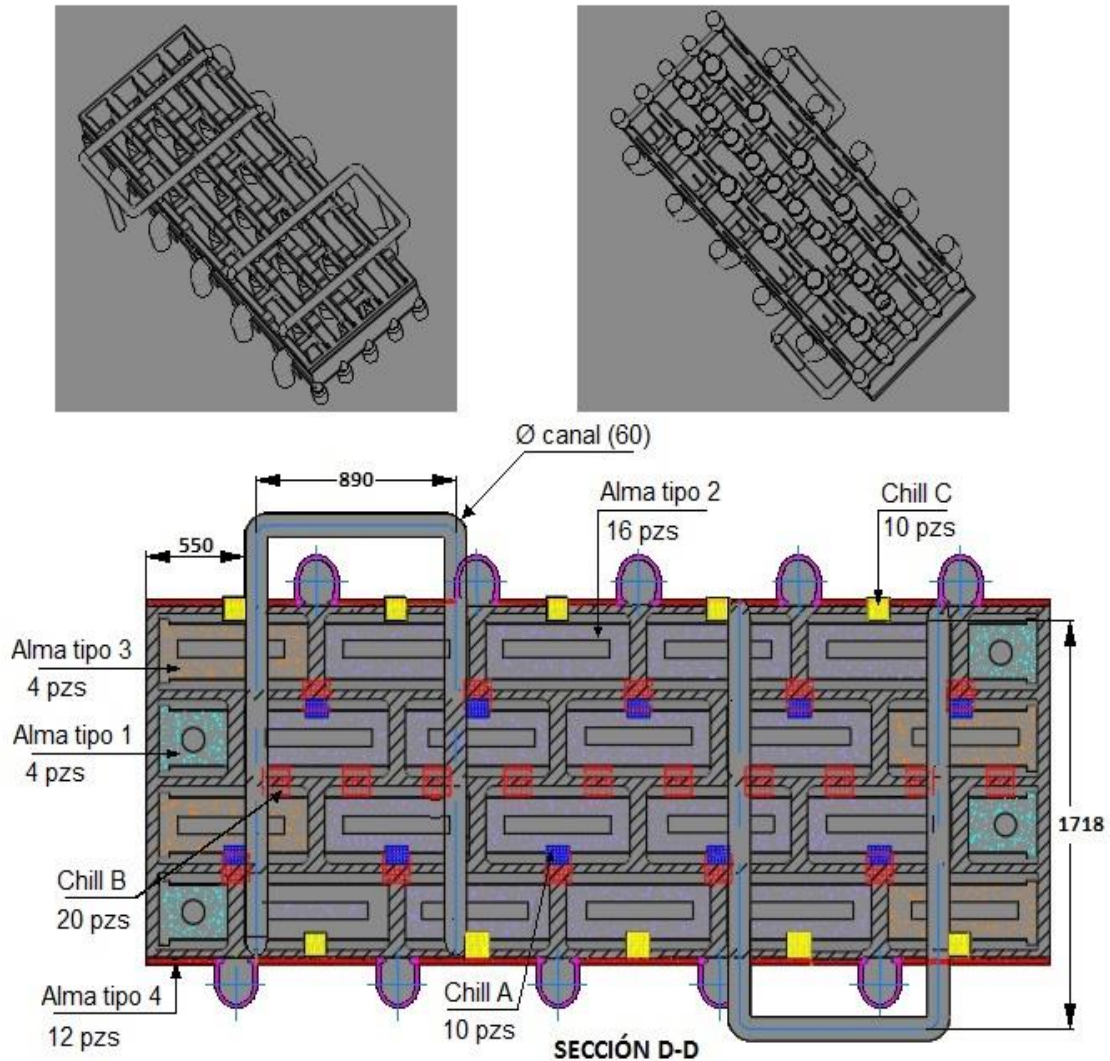


Fuente: Fundición Callao SA

En la siguiente Figura 65, podemos visualizar el fondo (sección D-D), donde se observa la distribución de las placas enfriadoras en el fondo, así como el canal de colada y canal de ataque.

**Figura 65**

*Diseño de colada final, vista isométrica de fondo y planta, sección D-D.*



Fuente: Fundición Callao SA

#### 4.2 Eficiencia de colada

Aplicando la ecuación 19

$$E(\%) = \frac{W_{\text{PESO DE LA PIEZA}}}{W_{\text{PESO METAL LÍQUIDO REQUERIDO}}} * 100\% \dots \dots \dots (19)$$

Datos:  $W_{\text{PESO DE LA PIEZA}}$  (5100 kg),  $W_{\text{PESO METAL LÍQUIDO REQUERIDO}}$  (7391 kg)

Reemplazando datos en la ecuación 19:

$$E(\%) = \frac{5100}{7391} * 100\% = 69\%$$

#### 4.3 Ensayos realizados a los carros porta barrotos fabricados en FUNCAL

Los ensayos se realizan para corroborar la sanidad de la pieza (validación final del

diseño de colada mediante reportes).

#### 4.3.1 Reporte de composición química

Los valores a obtener deberán estar dentro del rango de composición química requerido por SIDOR (norma ASTM A217 WC-6), debe estar determinada de conformidad con lo establecido en la norma ASTM A751

**Figura 66**

*Reporte de composición química.*

	<b>FORMATO</b>	<b>REG-SCC-005</b>	
	<b>REPORTE DE COMPOSICIÓN QUÍMICA</b>	VERSION:01	PAG 1 DE 1
		FECHA: 13/07/2019	

<b>Información General</b>	
<b>Cliente</b>	EPSCORP
<b>Descripción</b>	Carro Porta Barrotes
<b>Orden Trabajo</b>	3315002
<b>Equipo</b>	ARL3460 Spectrometer OptiacI Emission
<b>Fecha</b>	14/05/2021

<b>ID. Pieza:</b>	
<b>Horno</b>	HORNO A (6tn)
<b>Norma</b>	ASTM A217 WC6
<b>Cantidad de Muestra</b>	1

#### Composición Química

El análisis final de la cuchara del horno fueron los siguientes:

X	Se aprueba	No se aprueba
---	------------	---------------

Norma	Procedencia	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	P	S	Cu	Al	Mg
ASTM A217	Horno A	0.158	0.736	0.600	0.029	1.377	0.554	0.018	0.012	0.056	0.030	-

Supervisor: D. Contreras	Comentarios: Conforme valores dentro de rango.
-----------------------------	---

Fuente: Fundición Callao SA

Comparando los resultados de la Figura 66 (reporte de composición química), con la Figura 37 (Composición química de acuerdo al requerimiento de SIDOR), se puede observar que efectivamente los resultados del análisis químico se encuentran dentro del rango establecido por SIDOR.

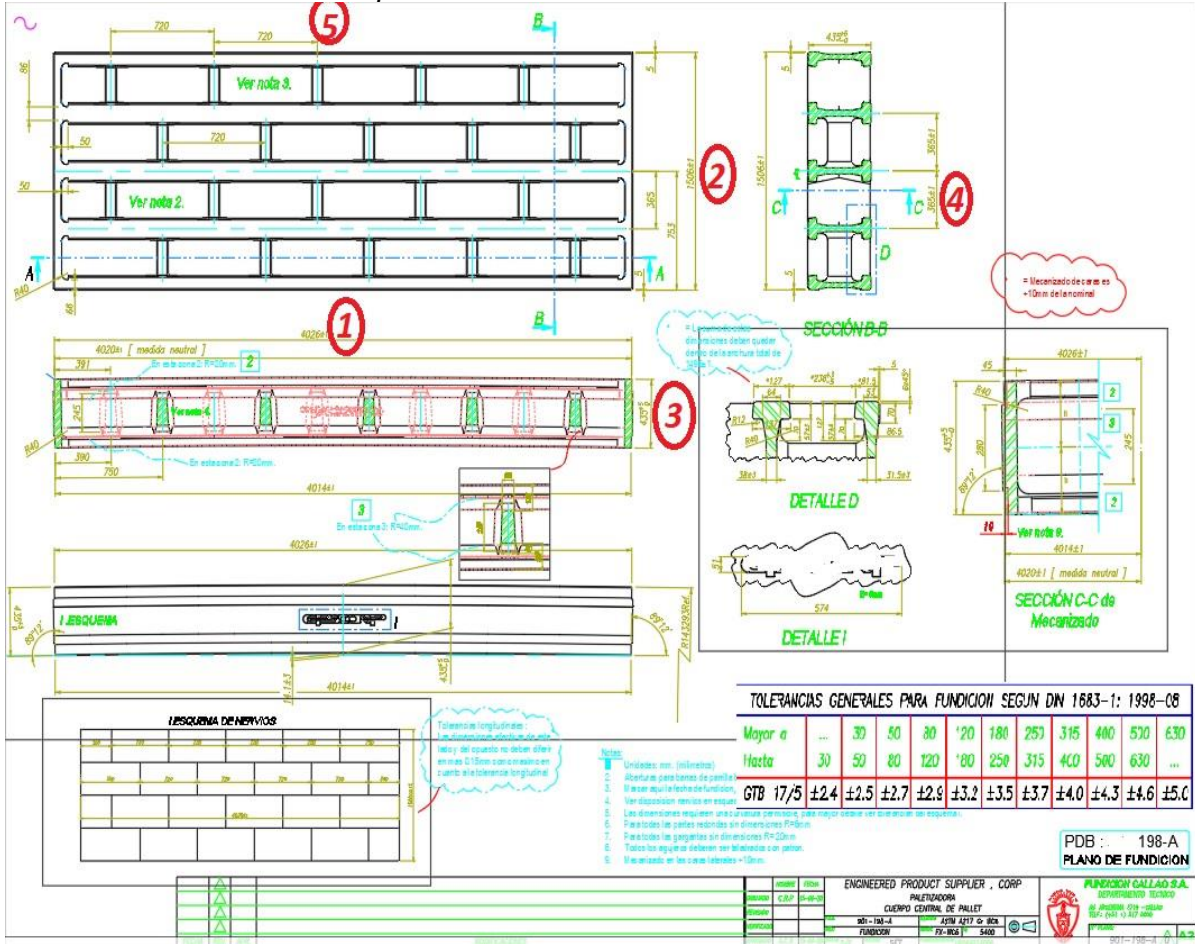
Por lo tanto, la composición química es conforme según norma ASTM A 217-WC6.

### 4.3.2 Reporte de inspección dimensional

El reporte de inspección dimensional, garantiza que la pieza tenga las medidas dentro del rango de tolerancia general para fundición según DIM 1683-1 : 1998-8. (Ver Figura 67).

**Figura 67**

Plano de fundición del carro porta barrotes



Fuente: Fundición Callao SA

Para el control dimensional se requiere del plano de fundición (figura 67) validado por el fabricante y cliente, estableciendo la tolerancia lineal, para este control se estableció las medidas principales, dando como resultados las medidas reales dentro de la tolerancia establecida (Ver Figura 68).

Por lo tanto, el control dimensional es conforme.

**Figura 68**

*Reporte de control dimensional*

	<b>FORMATO</b>		REG-SCC-001	<b>PAGINA 1 DE 1</b>
	<b>REPORTE DIMENSIONAL</b>		<b>VERSION : 01</b>	
			<b>FECHA : 23/03/2021</b>	

<b>Cliente:</b>	EPSCORP	<b>Cantidad:</b>	1	<b>Norma:</b>	ASTM A217-WC6
<b>Descripción:</b>	Carro porta Barrotes		<b>N° Plano:</b>	S/P	

X	Se aprueba
---	------------

<input type="checkbox"/>	No se aprueba
--------------------------	---------------

ITEM	DIM. PLANO (mm)	TOLERANCIA (mm)	SERIE 1 (mm)	SERIE 2 (mm)	SERIE 3 (mm)	SERIE 4 (mm)	SERIE 5 (mm)	ACEPTABLE	
								SI	NO
1	4026	±5	4030	-	-	-	-	√	
2	1506	±5	1509	-	-	-	-	√	
3	435	±4.3	434	-	-	-	-	√	
4	365	±4	369	-	-	-	-	√	
5	720	±5	722	-	-	-	-	√	
Inspeccionado por: A. Davila				Comentarios: Las medidas dentro de rango, se acepta pieza					

Fuente: Elaboración propia

### 4.3.3 Reporte de dureza

Figura 69

Reporte de dureza

	<b>FORMATO</b>		<b>REG-SCC-009</b>	
	<b>REPORTE INSPECCION DE DUREZA</b>		<b>VERSION : 01</b>	
			<b>FECHA: 23/03/2019</b>	
		<b>PÁGINA 1 DE 1</b>		

<b>Número Reporte</b>	45-2019	<b>Fecha:</b>	15/07/2021	<b>Orden Trabajo:</b>	315002
<b>Cliente</b>	EPSCORP	<b>Cantidad:</b>	1	<b>Norma:</b>	FA 217-WC6
<b>Descripción:</b>	Carro Porta Barrotes	<b>Método:</b>	ASTM E 10-89 A	<b>N. Inspector</b>	A. Basurto
<b>Equipo:</b>	EQUOTIP Nro. 01	<b>Escala de Dureza</b>	HB	<b>Rango:</b>	180 – 210

X	Se aprueba
---	------------

	No se aprueba
--	---------------

Item	Lecturas			AVG	Item	Lecturas			AVG
	1	2	3			1	2	3	
1	175	195	183	184	14	192	188	185	188
2	194	183	194	190	15	177	182	187	182
3	197	173	185	185					
4	188	189	190	189					
5	185	181	178	181					
6	197	191	183	190					
7	180	184	192	185					
8	187	182	194	188					
9	179	194	194	189					
10	196	185	181	187					
11	189	179	180	183					
12	179	186	190	185					
13	184	177	189	183					

Comentarios:  
Conforme valores dentro de rango.

Fuente: Fundición Callao SA

Analizando los resultados de dureza superficial por el método de rebote (método ASTM E10-89A), tanto de la cara superior e inferior. Todos los valores promedios reportados se encuentran en el rango exigido por SIDOR, de 180-210 HB (Ver Figura 69).

Es importante resaltar que la reproducibilidad de los resultados de dureza, hacen más confiables este resultado que un solo valor del ensayo de Tracción. Por Norma, para

la certificación de un material se deben realizar los ensayos por triplicado, lo que permite desarrollar el método de ensayo del material y reportar el valor promedio.

Por lo tanto, el ensayo de dureza es conforme.

#### 4.3.4 Reporte de ensayo de tracción

**Figura 70**

Reporte de ensayo de tracción

<b>ENSAYO DE TRACCIÓN</b>			
<b>INFORME DE LABORATORIO</b>			
		MAT-Lab-4.04 Rev.6	
		Número Total de Páginas: 3	
<b>REALIZADO POR</b>	: Laboratorio de Materiales - Analista 04.		
<b>MUESTRA</b>	: Probetas de acero.		
<b>FECHA DE EJECUCIÓN</b>	: 2020.09.24.		
<b>RESULTADOS:</b>			
MUESTRA		Azul	Rojo
SECCIÓN TRANSVERSAL	DIÁMETRO (mm)	12.48	12.52
	ÁREA (mm <sup>2</sup> )	122.3	123.1
CARGAS (kN)	FLUENCIA	44.9	49.6
	MÁXIMA	79.1	73.3
ESFUERZOS (MPa)	FLUENCIA	367	403
	MÁXIMA	647	595
LONGITUD ENTRE MARCAS (mm)		50.0	50.0
LONGITUD FINAL ENTRE MARCAS (mm)		61.4	61.6
ALARGAMIENTO (%)		22.8	23.2
<b>Incertidumbres (factor de cobertura K=2, para un nivel de confianza de 95%)</b>			
• Esfuerzo máximo (MPa)		± 5.8	± 5.3
• Esfuerzo de fluencia (MPa)		± 4.2	± 4.7
• Alargamiento (%)		± 1.2	± 1.1

Fuente: Fundición Callao SA.

Métodos de Ensayo ASTM A370 – 19 e1 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, ASTM E8/E8M – 16a Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials

Comparando los resultados de la figura 70 (reporte de ensayo de tracción), con la figura 35 (requisitos de tracción ASTM A217-WC6), se puede observar que el esfuerzo máximo 647 MPa, está dentro de rango de la norma ASTM A217-WC6 [655-485 MPa], el esfuerzo de fluencia 365 MPa, está por encima del rango de la norma ASTM A217-WC6 que es 275 MPa y el alargamiento 22.8%, está ligeramente superior a la norma ASTM A217-WC6 que es de 20%.





### 4.3.5 Reporte de ensayo metalográfico

**Figura 72**

*Reporte de ensayo metalográfico*

	FORMATO	REG-SCC-011	
	REPORTE METALOGRAFICO	VERSIÓN: 01	PAGINA 1 DE 1
		FECHA: 23/03/2018	

OT	315002
EQUIPO	MICROSCOPIO METALURGICO
STANDAR APLICACION	ASTM E3
MUESTRA DE PRUEBA	MUESTRA DEL CARRO PORTA BARROTE CON TRATAMIENTO TERMICO
MATERIAL	ASTM A217 WC-6
TEMPERATURA DEL AMBIENTE	20 °C
REALIZADO POR	E. YAULY
FECHA	28/08/2021



Figura 1: Muestra probeta de los carros porta barrote con tratamiento térmico

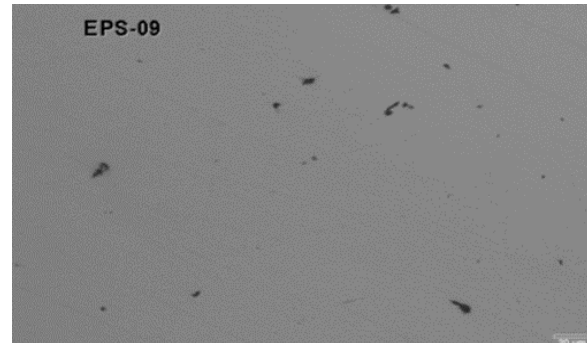


Figura 2: Microestructura de la muestra sin ataque, se observa escasa presencia de inclusiones.

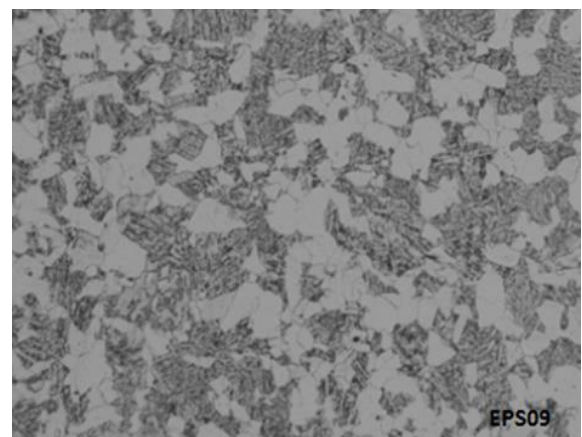
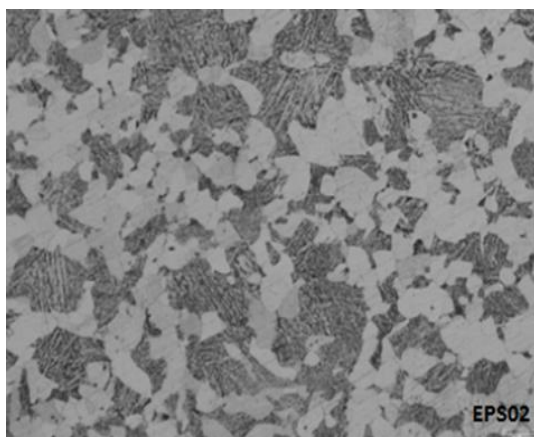


Figura 3: Microestructura de la muestra con ataque nital al 5%, aumento 100X, se observa una matriz ferrítica con presencia de perlita propia de la aleación.

Fuente: Fundición Callao SA

Método de ensayo ASTM E 3- 11, en la figura 72 (reporte metalográfico), se observa la microestructura presente para los carros porta barros; evidenciándose que poseen una estructura, compuesta de ferrita y perlita distribuida de manera homogénea, donde las colonias perlíticas presentan una estructura no laminar, además de carburos precipitados, los cuales se asocian a su método de fabricación (por fundición) y a los contenidos de elementos formadores de carburos, con un nivel bajo de presencia de inclusiones, sin evidencia de rechupe.

Por lo tanto, la metalografía es conforme.

### 4.3.6 Reporte de líquidos penetrantes.

**Figura 73**

#### Reporte de líquidos penetrantes

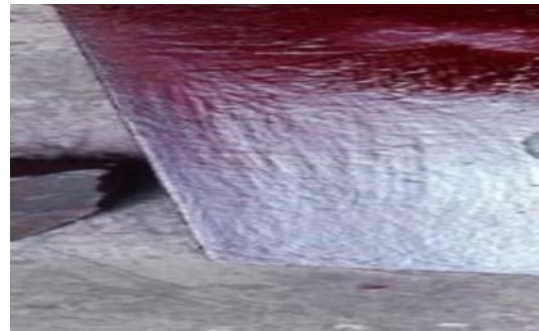
	FORMATO	REG-SCC-011	
	REPORTE LÍQUIDO PENETRANTE	VERSIÓN: 01	PAGINA 1 DE 1
		FECHA: 23/03/2018	

OT	315002
MARCA DEL PRODUCTO:	CANTESCO - AMBROSOL - CRC
STANDAR DE INSPECCION:	ASTM E-165
MUESTRA DE PRUEBA:	CARRO PORTA BARROTES
CRITERIO DE ACEPTACION:	ASTM A-903 / A LEVEL III
TIPO DE PENETRANTE	TIPO 2
ILUMINACION:	NATURAL
METODO:	CARRO PORTA BARROTES
AREA INSPECCIONADA:	20%
TIEMPO DE PENETRANTE:	5 MIN.
TIEMPO DE REVELADO:	10 MIN.
TEMPERATURA DEL AMBIENTE	20 °C
REALIZADO POR	E. SOTO
FECHA	28/08/2021

SE ACEPTA
  NO SE ACEPTA



**Figura 1:** Pieza carro porta barrote, inicia con la limpieza de las zonas a aplicar líquido penetrante.



**Figura 2:** Pieza aplicada con líquido penetrante por 5 min.



**Figura 3:** Limpieza de la superficie del líquido penetrante



**Figura 4:** Pieza aplicada revelador por 10 min. No se observa discontinuidades

Comentarios:  
Pieza no presenta discontinuidad

Fuente: Elaboración propio.

Los líquidos penetrantes, fueron aplicados en zonas de alimentadores, zona de ataques (canal de ataques), zonas de contacto con placas enfriadoras, zona donde se ubicaron los padding (ya desbastado), zona de desfogues y zonas de cambio de sección general.

Analizando la Figura 74, el ensayo se realizó vía seca, según norma ASTM E-165, después de 10 minutos aplicado el revelador, no se observa presencia del líquido penetrantes (afloro), entonces podemos concluir que la pieza no presenta discontinuidades.

Por lo tanto, el ensayo por líquido penetrante se acepta, sin observaciones.

#### **4.3.7 Reportes adicionales.**

Los siguientes reportes ayudan a tener un mayor control sobre la fabricación de los carros porta barrotes por fundición:

- Reporte de partículas magnéticas (Bajo la norma ASTM E1444)
- Reporte de ultrasonido (Bajo la norma DIN EN 12680-1)
- Reporte de inspección visual (Bajo la norma ASTM A802)

#### **4.4 Justificación económica.**

Cuando se presenta este tipo de proyecto de gran envergadura y las fundiciones no cuentan con software para la simulación de la solidificación, en este caso particular, se debe realizar la fabricación de una primera pieza de sacrificio (análisis END y ED), para evaluar sanidad íntegra de la pieza. Y bajo este caso la eficiencia promedia está alrededor del 65%.

Para una fundición que cuenta con software para la simulación de la solidificación, el software garantiza la sanidad de la pieza, por ello no se realiza una primera pieza para sacrificio. Y además que la eficiencia se logra mejorar unos puntos que representa el 69%.

**Tabla 4**

*Costo de producción (\$/kg), para un acero ASTM A217-WC6.*

Detalle	(\$/kg)
Precio unitario fusión	0.70
Personal	0.30
Energía / gas	0.25
Gasto producción	0.36
Overhead	0.45
Costo producción	2.06

Fuente: Elaboración propia

**Considerando pieza de sacrificio:** El peso de fundición del carro porta barrotes de 5100 kg. Y su costo de producción es de 2.06\$/kg (ver tabla 4).

Aplicamos:

$$\text{Costo fabricación carro porta barrote} = 5100\text{kg} \times 2.06\$/\text{kg} = \$10506 \dots \dots \dots (24)$$

**Considerando la mejora en la eficiencia:** Teniendo una eficiencia de colada de aproximadamente del 65% (método de diseño de colada por cálculo teórico), se puede observar que la eficiencia aumenta a 69% (aplicando diseño de colada por software de simulación), logrando obtener un ahorro significativo del 4% en la eficiencia del material, lo que en tonelaje representa 0.455 tn de ahorro de acero fundido por cada pieza producido.

El pedido frecuente es de 100 piezas por orden de trabajo.

$$\text{Ahorro por 100 piezas} = 455 \times 0.70 \times 100 = \$31850 \dots \dots \dots (25)$$

$$\text{Ahorro total (100 piezas)} = \$31850 + \$10506 = \$42356 \dots \dots \dots (26)$$

Por lo tanto, se justifica el uso de software en fundiciones, por mejorar la eficiencia, evitar pieza de sacrificio y contribuir a una gestión más eficiente de los recursos económicos de la empresa.

#### **4.5 Garantía del carro porta barrotes y tiempo de vida útil.**

El carro porta barrotes, debe tener un servicio mínimo de operación de 17000 horas o dos (2) años de garantía. Los dos (2) años se cuentan a partir del momento en que el cuerpo central comience a operar en la línea. El carro porta barrotes, deben tener un tiempo de vida útil de 10 años (87,600 horas).

El carro porta barrote es reversible, cuando llega a la deflexión máxima, se invierte

(vira), Esto produce un acortamiento del cuerpo de 10 milímetros por cada deflexión de 21 mm por lo que después de tres viradas del carro porta barrotes, este es 30 milímetros más pequeño y se somete a un proceso de recuperación para restaurar la longitud de las vigas con aporte de soldadura, hasta un máximo de 50 milímetros por lado. SIDOR recomienda descartar el cuerpo central después de 3 recuperaciones durante los 10 años de funcionamiento del carro porta barrotes.

#### Figura 74

##### Reporte de seguimiento de garantía de los carros porta barrotes

	<b>FORMATO</b>		<b>REG-PCP-001</b>	
	<b>SEGUIMIENTO DE GARANTIA</b>		<b>VERSION : 01</b>	<b>PAGINA 1 DE 1</b>
			<b>FECHA : 23/03/2021</b>	

<b>Cliente :</b>	<b>EPSCORP</b>	<b>Cantidad:</b>	15
<b>Descripción :</b>	<b>Carro porta Barrotes</b>	<b>N° Plano :</b>	S/P

ITEM	Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Observaciones
1	2021	-	-	-	-	-	-	-	-	-	√	√	√	Fecha inicio producción 16/10/21
2	2022	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	-
3	2023	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	-	-	Fecha término garantía 15/10/23
PCP: W. Rosas							Comentarios:							

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, SIDOR en coordinación con Fundación Callao SA, realizaron el seguimiento en conjunto del desempeño de los carros porta barrotes, superando exitosamente los 2 años de garantía (Ver Figura 74).

## Conclusiones

Podemos concluir que el desarrollo del diseño de colada por software SolidCast, para la fabricación de carros porta barrotes por fundición, es el adecuado, ya que se obtiene una eficiencia de colada del 69% y buena calidad del producto terminado.

Eficiencia por fundición convencional = 65%

Eficiencia por fundición SolidCast = 69%

El diseño de colada para la fabricación de los carros porta barrotes por fundición, es compleja, que ameritó mucho criterio, análisis y experiencia, durante su desarrollo del diseño de colada se identificaron varios puntos críticos, que fueron resueltos durante el desarrollo del diseño de colada, como el uso de arena cromita (arena de contacto), uso de placas enfriadoras, uso de padding y desfogues tipos chavetas, alimentadores curvos. Que todos ellos conllevaron a que la solidificación sea progresiva, implicando solidificación direccional en la pieza y por ende obtener piezas de alta textura según la configuración geométrica y volumétrica de la pieza, implicando alta calidad, respecto a una pieza obtenida por solidificación convencional.

El uso de software (SolidCast), se justifica económicamente, ya que se obtiene un ahorro de \$42356 para la fabricación de 100 carros porta barrotes. Por lo tanto, concluimos que el software, es de vital importancia para desarrollar un buen diseño de colada, ahorrar tiempo y también contribuye a una gestión más eficiente de los recursos económicos de la empresa.

Costo por fundición convencional (100 piezas) = \$ 1092956.00

Costo por fundición SolidCast (100 piezas) = \$ 1050600.00

Ahorro total (100 piezas) = \$1092956 + \$1050600 = \$42356

Los carros porta barrotes fueron fabricados en acero aleado bajo la norma ASTM A217-WC6, durante el proceso de fabricación de las piezas fueron validados sus propiedades mecánicas mediante reportes de: control dimensional, composición química, dureza, ensayo de tracción, ensayo metalográfico, líquidos penetrantes, así con ello

garantizar pieza de alta calidad.

Los carros porta barrotes, han cumplido con el servicio mínimo de operación de 17000 horas o dos (2) años de garantía.

El uso de los desfuegos tipos chavetas su principal función es la de permitir la salida de gases durante el proceso de llenado del molde. Mediante este trabajo de investigación, podemos afirmar que cumple una segunda función, que, durante la solidificación, se comporta como un chills, direccionando la solidificación de la pieza.



## Recomendaciones

Para desarrollar futuros diseños de colada para la fabricación de carros porta barrotes, se recomienda utilizar el flowcast y opticast. Ya que en nuestro país es muy limitante tener acceso a estos Software si no es por medio de las grandes empresas.

Para una determinada pieza, existen diferentes diseños de coladas desarrolladas y validadas. Con esto quiero decir que para la fabricación de los carros porta barrotes por fundición, se habrán desarrollado o se desarrollaran nuevos diseños de colada, con los objetivos de: garantizar la sanidad de la pieza, mejorar una buena eficiencia de colada y una menor inversión de los recursos económicos de la empresa.

Para el llenado del molde se utilizó cuchara por el fondo a (1580°C), mayor flujo que verter con una cuchara de labio, si se va trabajar con cuchara de labio, reevaluar la temperatura de colada.

## Referencias bibliográficas

- Alberto Rodolfo Valsesia - Luis Alberto Aguirre (2010), Piezas fundidas diseño y sistemas de alimentación / tecnibook ediciones / Buenos Aires.
- Alejandro Sanchez Garcia (2019) "Innovaciones a un sistema de colada para una aleación de rango corto" tesis - escuela superior de ingeniería química e industrias extractivas. Ciudad de México.
- Andrés Fernando Rodríguez Jasso (2012), "Desarrollo de aleaciones de alta resistencia Al-Cu serie 2XX", tesis para obtener el grado de doctor en ingeniería de materiales, Universidad Autónoma de Nueva León.
- Capello, E. (1980). Tecnología de fundición. Editorial Gustavo Gili, S.A. (Tercera edición). Barcelona.
- Daniel Esteban, Alfonzo Ferrenal (2010) "Diseño de un sistema de sujeción con rotación de 360° para la reparación de carros porta barrotes, para la empresa industrial del Orinoco CA", trabajo de grado para optar el título de ingeniero mecánico, en la universidad de oriente núcleo de anzoátegui.
- Danny Cristhian Espinoza Garcia (2018), "Diseño de colada y proceso de fabricación del bowl y mantle en acero al manganeso ASTM A128 grado E1", tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Metalurgista, Universidad Nacional de Ingeniería.
- Edgar Cerna M. (2018) "Desarrollo e innovación en ingeniería", 3ra edición, Editorial Instituto Antioqueño de Investigación.
- John D. Verhoeven, "Fundamentals of Physical Metallurgy", John Wiley & Sons, Inc., 1987.
- J. Campbell, "Castings", Butterworth-Heinemann Ltd, 1991.
- Manual de SolidCast (2014), Finite Solitions Incorporated, versión 8.3.0  
<https://www.dipromet.cl/soluciones/productos/canalizaciones-y-refractarios-especiales/>.
- Norma ASTM A217/a217M -10, Standard Specification for Steel Castings, Martensitic Stainless and Alloy, for Pressure-Containing Parts, Suitable for High-Temperature

Service.

Norma ASTM E10 – 89A, Standard Test Method for Determining Brinell Hardness of Metallic Materials.

Norma ASTM A370 – 19 e1 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products.

Norma ASTM E8/E8M – 16a Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.

Norma ASTM A 751 – 01, Standard Test Methods, Practices, and Terminology for Chemical Analysis of Steel Products.

Norma E165/E165M-18, Standard Practice for Liquid Penetrant Testing for General Industry.

Norma A 802/A 802M – 95 (Reapproved 2001), Standard Practice for Steel Castings, Surface Acceptance Standards, Visual Examination.

Norma E1444/E1444M-11, Standard Practice for Magnetic Particle Testing.

Norma DIM EN 12680-1: 2003-06, Founding – Ultrasonic Testing – Part 1: Steel Castings for General purposes.

Norma ASTM E3-11, Standard Guide for Preparation of Metallographic specimens.

Norma DIN 1683 - 1 Rough Steel Casting Tolerance Standard - Dandong Foundry.

Omar Garcia Montalvo (2017), "Modelado y simulación de proceso flexible para la recuperación de arena para fundición", para obtener el grado de maestría en ciencia de la Ingeniería Automotriz, Universidad Autónoma de Nueva León.

R. E. Reed-Hill, "Physical Metallurgy Principles", Van Nostrand Company, 1973.

Reyes Sánchez / Eder Durán, (2009), "Especificación técnica RPE-APE-SD-MSP035 requerimientos técnicos mínimos necesarios para el suministro de los cuerpos centrales de los carros porta barrotes de la planta de pellas - SIDOR", Siderúrgica del Orinoco.

Reyes Sánchez / Eder Durán / Neida Ledezma. "Especificación técnica RPE-APE-SD-MSP035\_03", SIDOR, 2015.

Richard W. Heine (January 1, 1967) Principles of Metal Casting Editorial: McGraw-Hill; 2nd edition

Sanz Garcia, Carlos (2017) "Brenchmarking sobre el software para la simulación de los procesos de fundición", universidad de Valladolid - escuela de ingeniería industrial, para optar el título de graduado.

Sidney H. Avner, "Introduction to Physical Metallurgy", McGraw-Hill, 1964.

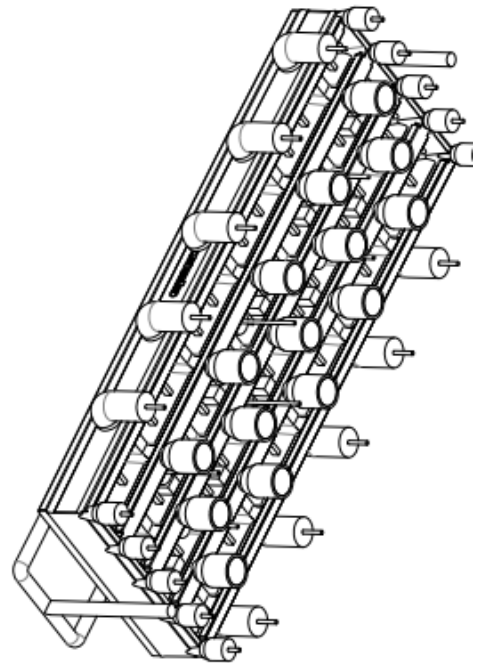
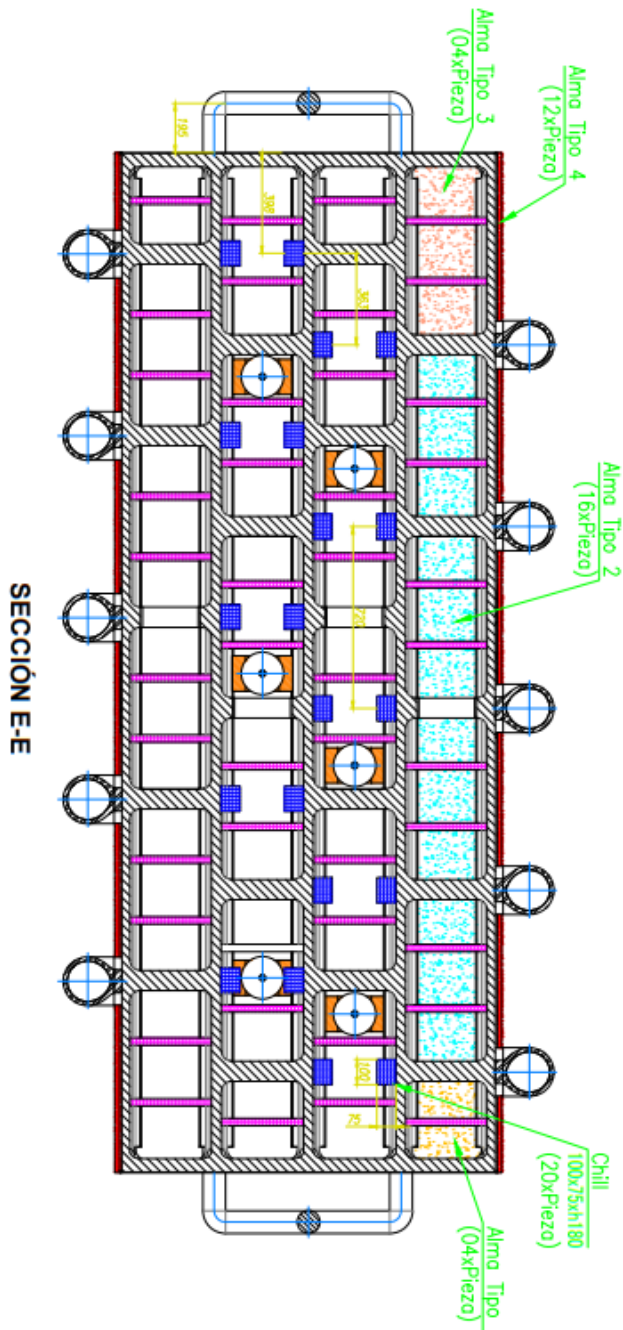
## Anexos

	Pág.
Anexo 1: Diseño de colada alternativo 1 (mango interior y templadores) .....	2
Anexo 2: Modelo emplacado del carro porta barrotes .....	3
Anexo 3: Armado de cerámico, chills y mangos curvos en el modelo fondo. ....	3
Anexo 4: Armado de manguitos en el modelo tapa.....	4
Anexo 5: Llenado del molde con arena auto fraguado .....	4
Anexo 6: Pintado molde fondo con pintura a base zirconio .....	5
Anexo 7: Pintado de las almas con pintura a base zirconio.....	5
Anexo 8: Pintado molde tapa con pintura a base zirconio .....	6
Anexo 9: Rotura de alimentadores y canales .....	6
Anexo 10: Reporte de tratamiento térmico.....	7
Anexo 11: Mecanizado del carro porta barrotes.....	7
Anexo 12: Carros porta barrotes (productos terminados).....	8

Anexo 1: Diseño de colada alternativo 1 (mango interior y templadores)



FORMATO	REG-ING-003	
HOJA TÉCNICA	VERSIÓN : 04	PAGINA 4 C
	FECHA: 15/08/2019	



**Anexo 2: Modelo emplacado del carro porta barrotos**



**Anexo 3: Armado de cerámico, chills y mangos curvos en el modelo fondo.**



**Anexo 4: Armado de manguitos en el modelo tapa.**

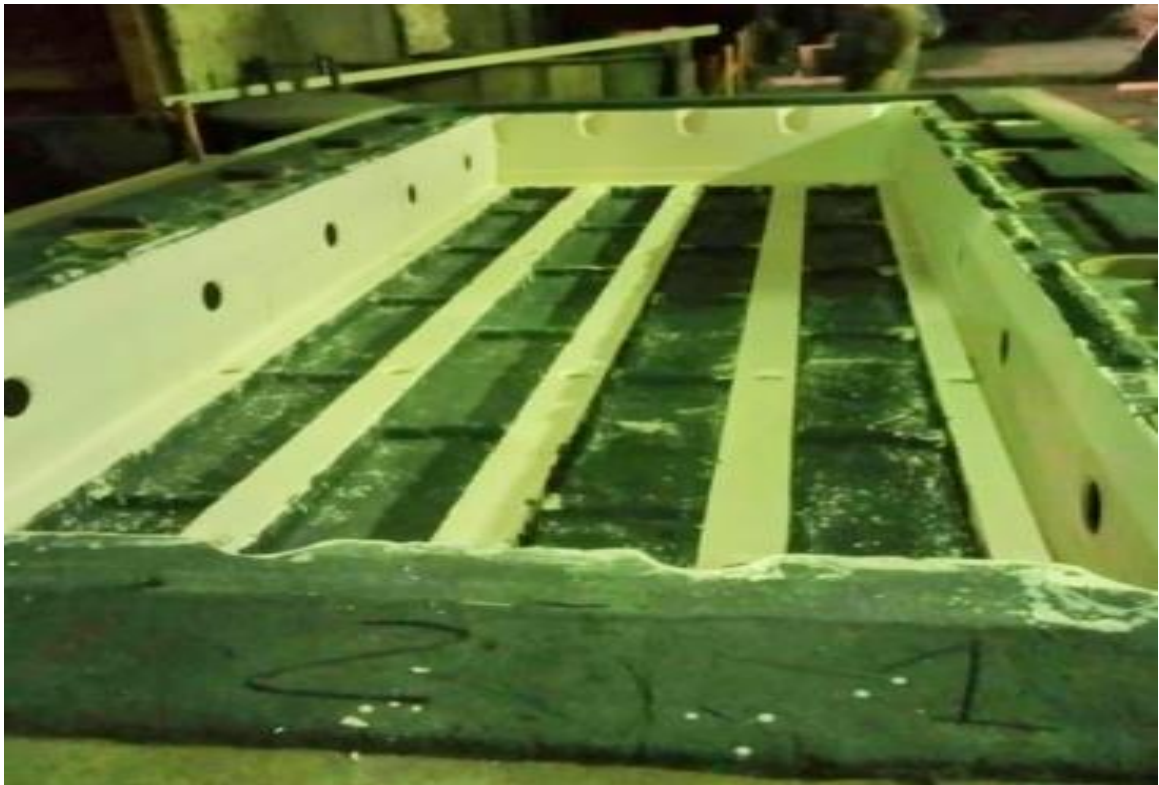


**Anexo 5: llenado del molde con arena auto fraguado**





**Anexo 6: Pintado molde fondo con pintura a base zirconio**



**Anexo 7: Pintado de las almas con pintura a base zirconio**



**Anexo 8: Pintado molde tapa con pintura a base zirconio**



**Anexo 9: Rotura de alimentadores y canales**



## Anexo 10: Reporte de tratamiento térmico.

FORMATO		REG-SPR-010		
<b>REPORTE DE TRATAMIENTO TERMICO</b>		VERSION : 01	PAGINA 1 DE 1	
		FECHA : 13/07/2018		
<b>INFROMACION GENERAL:</b>				
CLIENTE: EPSCORP		DESCRIPCION: CARRO PORTA BARROTE		
OT: 315002		NORMA: FA 217 -WC6		
FECHA DE INICIO: 15/05/2021		FECHA DE FIN: 17/05/2021		
<b>DETALLE DE PIEZA(S) TRATADA(S)</b>				
OT	DESCRIPCION	CANTIDAD	HORNO	NUMERO DE PROGRAMA
315002	CARRO PORTA BARROTE	2	CIRCULAR	22
SUPERVISOR: D. CHAVEZ			COMENTARIO: CONFORME SEGUN PROGRAMA.	

## Anexo 11: Mecanizado del carro porta barrotes



**Anexo 12: Carros porta barrotes (productos terminados)**

