

**EFFECTO DE LOS FACTORES DE DISEÑO EN EL CÁLCULO DE SISTEMAS DE
LLENADO Y ALIMENTACIÓN SOBRE LA CALIDAD DE DOS
COMPONENTES FUNDIDOS EN ARENA.**

SARA MONTOYA ALZATE

Ingeniería Mecánica

**Elizabeth Hoyos Pulgarín
PhD Ingeniera Mecánica**



**UNIVERSIDAD EIA
INGENIERIA MECÁNICA
ENVIGADO
AÑO 2018**

AGRADECIMIENTOS

Medellín, noviembre 6 de 2018

Señores

UNIVERSIDAD NACIONAL

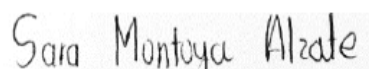
Ingeniería Mecánica

Medellín

Quiero agradecer de manera especial la valiosa colaboración que la Universidad y en especial el señor **OSWALDO SEPÚLVEDA** tuvo conmigo en todo el proceso de la realización del trabajo de tesis EFECTO DE LOS FACTORES DE DISEÑO EN EL CÁLCULO DE SISTEMAS DE LLENADO Y ALIMENTACIÓN SOBRE LA CALIDAD DE DOS COMPONENTES FUNDIDOS EN ARENA; su disposición permanente por encima de las circunstancias, su apoyo y acompañamiento hicieron posible que se me facilitara el desarrollo de este trabajo tan importante para la culminación de mi carrera profesional.

Con sincero agradecimiento

Cordial Saludo,



SARA MONTOYA ALZATE

Estudiante EIA

Ingeniería Mecánica

CONTENIDO

1. PRELIMINARES	10
1.1 Planteamiento del problema	10
1.2 Objetivos del proyecto	11
Objetivo General.....	11
Objetivos Específicos	11
1.3 Marco de referencia.....	11
Antecedentes.....	11
Marco teórico.....	12
2. METODOLOGÍA	42
3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	43
3.1 Cálculos de los sistemas de alimentación y llenado	43
Análisis del primer componente: Catapiz.	43
i. Método 1 – “SISCALCO” (Jorge Osorio Z., 1989).	53
ii. Método 2 – “Manufacturing Technology”	56
Análisis del segundo componente: polea.	58
i. Método 1 – “SISCALCO” (Jorge Osorio Z., 1989).	63
ii. Método 2 – “Non-Ferrous Foundryman’s”.....	65
i. Método 1 – “SISCALCO”.....	67
4. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES	95
5. TRABAJOS FUTUROS	97
REFERENCIAS	98

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Porcentajes de contracción volumétrica	16
Tabla 2. Dimensiones de mazarotas cilíndricas en carga con $H=1.5D$	26
Tabla 3. Dimensiones de mazarotas cilíndricas en talón con $H=1.5D$	27
Tabla 4. Análisis de cada sección del catapiz	44
Tabla 5. Módulos de enfriamiento del catapiz.....	48
Tabla 6. Orden de solidificación de las secciones del catapiz.	49
Tabla 7. Resumen de las dimensiones de las mazarotas para el catapiz.	53
Tabla 8. Resumen dimensiones del sistema de llenado del catapiz.	57
Tabla 9. Análisis de cada sección de la polea.....	58
Tabla 10. Módulos de enfriamiento de la polea.	61
Tabla 11. Orden de solidificación de las secciones de la polea.....	62
Tabla 12. Resumen de las dimensiones de las mazarotas para la polea.	67
Tabla 13. Resumen dimensiones del sistema de llenado de la polea.	70
Tabla 14. Orden de solidificación del catapiz.....	74

pág.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Descripción de los pasos de producción para la fundición en arena.	13
Figura 2. Esquema de una fundición característica.	14
Figura 3. Esquema de un molde de arena mostrando diferentes características.	14
Figura 4. Clasificación de las formas de grano. Tomada de Foseco Ferrous Foundryman's Handbook (John Brown, 2007).	15
Figura 5. Cavidad interna de una chaqueta de agua.	18
Figura 6. Molde en arena.	19
Figura 7. Descomposición de una pieza.	21
Figura 8. Módulo geométrico y coeficiente de forma.	22
Figura 9. Ejemplo de una unión.	23
Figura 10. Coeficientes correctores de formas para uniones.	23
Figura 11. Influencia del matacho.	24
Figura 12. Coeficientes correctivos de forma W por matachos.	25
Figura 13. Mazarota en carga.	26
Figura 14. Mazarota en talón.	26
Figura 15. Distancia de alimentación para cupro-aluminio.	31
Figura 16. Relación de colada, "escalonamiento".	32
Figura 17. Tiempo de llenado de la pieza.	32
Figura 18. Coeficiente de caudal.	33
Figura 19. Sistema de llenado sencillo.	34
Figura 20. Dimensiones del cuello.	37
Figura 21. Sistema de llenado.	38
Figura 22. Discontinuidades del proceso.	40
Figura 23. Discontinuidades del proceso.	41
Figura 24. Catapiz en estado bruto.	43
Figura 25. Polea en estado bruto.	43
Figura 26. Catapiz descompuesto.	44
Figura 27. Sección A del catapiz.	45
Figura 28. Sección B del catapiz.	46
Figura 29. Sección C del catapiz.	47
Figura 30. Sección D del catapiz.	48
Figura 31. Comparación del radio de acción.	50
Figura 32. Radio de acción del catapiz, Formas.	51
Figura 33. Radio de acción del catapiz, CAD.	51
Figura 34. Dimensiones y descomposición de la polea en elementos simples.	58
Figura 35. Sección A de la polea.	59
Figura 36. Sección B de la polea.	60
Figura 37. Sección C de la polea.	61
Figura 38. Sección D de la polea.	62
Figura 39. Radio de acción de la polea, CAD.	64
Figura 40. Método 1 – Formas, catapiz.	71
Figura 41. Método 1 – CAD, catapiz.	71
Figura 42. Método 2 – Formas, catapiz.	71

Figura 43. Método 2 – CAD, catapiz	71
Figura 44. Temperatura y tiempo de solidificación del método 1 – Formas, catapiz	72
Figura 45. Temperatura y tiempo de solidificación del método 1 – CAD, catapiz	72
Figura 46. Temperatura y tiempo de solidificación del método 2 – Formas, catapiz	73
Figura 47. Temperatura y tiempo de solidificación del método 2 – CAD, catapiz	73
Figura 48. Densidad del material, método 1 – Formas, catapiz.....	74
Figura 49. Densidad del material, método 1 – CAD, catapiz.....	74
Figura 50. Densidad del material, método 2 – Formas, catapiz.....	75
Figura 51. Densidad del material, método 2 – CAD, catapiz.....	75
Figura 52. Hot Spot, método 1 – Formas, catapiz	76
Figura 53. Hot Spot, método 1 – CAD, catapiz	76
Figura 54. Hot Spot, método 2 – Formas, catapiz	77
Figura 55. Hot Spot, método 2 – CAD, catapiz	77
Figura 56. Modelo del componente y de los sistemas, método 1 – Formas, catapiz	78
Figura 57. Modelo del componente y de los sistemas, método 1 – CAD, catapiz	78
Figura 58. Modelo del componente y de los sistemas, método 2 – Formas, catapiz	78
Figura 59. Modelo del componente y de los sistemas, método 2 – CAD, catapiz	78
Figura 60. Moldes en arena del catapiz	79
Figura 61. Método 1 - Formas, resultado vista superior, escala 1:5, catapiz.....	79
Figura 62. Método 1 - Formas, resultado vista frontal, escala 1:2.5, catapiz	79
Figura 63. Método 1 - Formas, resultado vista superior, escala 1:2, catapiz.....	80
Figura 64. Método 1 - Formas, resultado vista superior, escala 1:1.7, catapiz.....	80
Figura 65. Método 1 - Formas, resultado vista frontal, escala 1:1.4, catapiz	80
Figura 66. Método 1 - Formas, resultado vista frontal, escala 1:1, catapiz	80
Figura 67. Método 1 - CAD, resultado vista frontal, escala 1:3.3, catapiz	81
Figura 68. Método 1 - CAD, resultado vista frontal, escala 1:3.3, catapiz	81
Figura 69. Método 1 - CAD, resultado vista superior, escala 1:2, catapiz.....	82
Figura 70. Método 2 - Formas, resultado vista frontal, escala 1:0.19, catapiz	83
Figura 71. Método 2 - Formas, resultado vista superior, escala 1:0.07, catapiz.....	83
Figura 72. Método 2 - CAD, resultado vista frontal, escala 1:3.3, catapiz	83
Figura 73. Método 2 - CAD, resultado vista superior, escala 1:5, catapiz.....	83
Figura 74. Método 2 - CAD, resultado vista superior, escala 1:1.8, catapiz.....	84
Figura 75. Método 2 - CAD, resultado vista superior, escala 1:1.6, catapiz.....	84
Figura 76. Método 1 – Formas, END, tintas penetrantes, escala 1:0.025, catapiz	85
Figura 77. Método 1 – Formas, END, tintas penetrantes, escala 1:0.0125, catapiz	85
Figura 78. Método 1 – CAD, END, tintas penetrantes, escala 1:0.015, catapiz	86
Figura 79. Método 1 – CAD, END, tintas penetrantes, escala 1:0.008, catapiz	86
Figura 80. Método 2 – CAD, END, tintas penetrantes, escala 1:0.014, catapiz	86
Figura 81. Método 2 – CAD, END, tintas penetrantes, escala 1:0.0125, catapiz	86
Figura 82. Método 1, polea	87
Figura 83. Método 2, polea	87
Figura 84. Temperatura y tiempo de solidificación del método 1, polea	88
Figura 85. Temperatura y tiempo de solidificación del método 2, polea	88
Figura 86. Densidad de la materia, método 1, polea	89

Figura 87. Densidad de la materia, método 2, polea	89
Figura 88. Hot Spot, método 1, polea	90
Figura 89. Hot Spot, método 2, polea	90
Figura 90 . Modelo del componente y sus sistemas, método 1, polea.....	90
Figura 91. Modelo del componente y sus sistemas, método 2, polea.....	90
Figura 92. Moldes en arena de la polea	91
Figura 93. Método 1, resultado vista frontal, polea	91
Figura 94. Método 1, resultado vista superior, polea	91
Figura 95. Método 1, resultado vista inferior, polea.	92
Figura 96. Método 2, resultado vista frontal, escala 1:0.063, polea	93
Figura 97. Método 2, resultado vista superior, escala 1:0.073, polea	93
Figura 98. Método 2, resultado vista frontal, escala 1:0.17, polea	93
Figura 99. Método 2, END, tintas penetrantes, vista frontal, escala 1:0.01, polea	94
Figura 100. Método 2, END, tintas penetrantes, vista inferior, escala 1;0.011, polea	94
Figura 101. Método 2, END, tintas penetrantes, vista superior, escala 1:0.0125, polea.....	94

pág.

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Valores del diámetro respecto al módulo para mazarota de carga.	28
Gráfica 2. Valores de la altura respecto al módulo para mazarota de carga.....	28
Gráfica 3. Valores del volumen respecto al módulo para mazarota de carga	29
Gráfica 4. Valores del diámetro respecto al módulo para mazarota de talón.....	29
Gráfica 5. Valores de la altura respecto al módulo para mazarota de talón	30
Gráfica 6. Valores del volumen respecto al módulo para mazarota de talón	30

pág.

INTRODUCCIÓN

La fundición en arena es un proceso de manufactura muy antiguo, el cual ha ido evolucionando gracias a su implementación en procesos industriales. El amplio rango de formas que permite realizar, los diferentes materiales que se pueden fundir y los bajos costos de la materia prima, son algunos beneficios, pero el poco control que se tiene sobre ciertas variables, es una de sus mayores desventajas, ya que puede llegar a generar discontinuidades indeseadas, las cuales son causadas por un incorrecto diseño de los sistemas de llenado o alimentación, un mal vaciado del metal, propiedades del molde, entre otras. Es por esto que se han desarrollado metodologías y simulaciones con el fin de predecir ciertas variables de salida que afectan el resultado final, como gradientes de temperatura o tiempo de solidificación. Dentro de las metodologías de cálculo se emplean factores de forma, los cuales tienen un gran impacto en el cálculo del orden de solidificación del componente a fundir, siendo estos fundamentales para diseñar los sistemas de llenado y alimentación.

En este trabajo de grado se evaluó el efecto de los factores de diseño en el cálculo de sistemas de llenado y alimentación sobre la calidad de dos componentes fundidos en arena, por medio de dos metodologías que adicionalmente emplearon dos formas de mediación del objeto, una a partir de un CAD y otra a partir de una simplificación teórica, denominada Formas.

En el documento se hace una breve introducción de los principales elementos de un proceso de fundición en arena, y de los métodos empleados para realizar los cálculos. Como se mencionó anteriormente, se evaluarán dos componentes, el primero es una pieza ornamental, con apariencia de un catapiz, y el segundo es una pieza con una condición de carga, denominada polea, la cual corresponde a un desarrollo previo de una de las metodologías que se empleara a continuación.

Los cálculos obtenidos nos indican que, respecto al orden de solidificación los métodos pueden llegar a mostrar los mismos resultados, pero el efecto de trabajar con Formas o con CAD, fuentes de medición del objeto, pueden llegar a alterar los resultados del orden, el cual es un insumo fundamental para definir la ubicación de los canales de ataque del sistema de llenado, como las uniones del sistema de alimentación.

Adicional al desarrollo de estas metodologías se realizó, una valoración experimental de los componentes fundidos y simulaciones empleando el software *SolidCast*®, con el fin de verificar los cálculos hallados. A partir de esto se encontró, consistencia entre las últimas regiones en solidificar y las que, de acuerdo a la simulación, tenían una mayor temperatura.

1. PRELIMINARES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Desde la revolución industrial las máquinas han desempeñado un papel importante en el desarrollo de los países. La mayoría de máquinas o componentes, como bloques de motores, cigüeñales, equipos agrícolas, tubos, turbinas hidráulicas, entre otros, son fabricados por fundición, uno de los procesos de fabricación más antiguos en la historia, aún vigente, debido a su amplia aplicación (Titov, 1981).

El proceso consiste en depositar metal fundido en una cavidad diseñada para este fin. Al solidificarse, el metal toma la geometría del molde. Con el fin de obtener piezas de diferentes aleaciones, tamaño, forma o precisión dimensional se desarrollaron moldes que brindan diferentes características. Los moldes en arena, cáscara cerámica o materiales con propiedades similares, se clasifican como moldes perecederos y son destruidos al finalizar el proceso. Por otro lado, los moldes metálicos o permanentes no se desechan al obtener la pieza, y pueden ser reutilizados en procesos que requieren un gran volumen de producción (Kalpakjian, Schmid, & Sánchez García, 2002).

Aunque el desarrollo en este tema es muy avanzado, la fundición en arena es uno de los métodos más antiguos y usados en la industria. Sus beneficios se ven reflejados en el bajo costo de la materia prima y el amplio rango de formas, tamaños y materiales que permite fundir gracias a su alto punto de fusión. Sus principales desventajas son el acabado superficial de la pieza y las tolerancias dimensionales (Saikaew & Wiengwiset, 2012). Generalmente la falta de control sobre ciertas variables durante el proceso de fabricación genera discontinuidades, como proyecciones metálicas, fundición incompleta, dimensiones incorrectas, inclusiones o porosidad. Un número importante de discontinuidades son consecuencia de un mal diseño en los sistemas de llenado y alimentación, proceso de enfriamiento, vaciado del metal, propiedades del molde, entre otros (Parappagoudar, Pratihari, & Datta, 2007). Adicionalmente, se ha observado que la calidad de los procesos de fundición en arena está ligada a propiedades como permeabilidad, dureza y humedad del molde, los cuales dependen de parámetros de entrada como la finura de grano de arena y el porcentaje de agua de la mezcla (Chang & Hocheng, 2001).

Con el fin de reducir la incertidumbre en estos procesos, se han desarrollado análisis y metodologías de cálculos que permiten predecir y simular variables de salida que juegan un papel importante en el resultado final. Estudios como los de Sachin L. Nimbalkar (2016), Manjunath Patel G C, Arun Kumar Shettigar(2018) y Hyuk-Jae Kwon (2018), han planteado ecuaciones donde a partir de la geometría de la pieza se determina el orden de solidificación y esta información determina el diseño de los sistemas de llenado y alimentación. Complementario a estas, se han desarrollado programas que simulan parámetros como flujo del material, gradiente de

temperatura, tiempo de solidificación, velocidad de enfriamiento y transferencia de calor (Choudhar, Narkhede, & Mahajan, 2013)(Ajibola Ayoola, 2012).

Como parte de las metodologías de cálculo se emplean factores de forma que permiten simplificar y comparar geometrías muy diferentes pero que se asemejan a una misma forma básica. Estos factores tienen un gran impacto en el cálculo del orden de solidificación de la pieza, el cual tiene repercusiones en el diseño de los sistemas de llenado y alimentación. Es por esto que, en este trabajo de grado se evaluó el efecto de los factores de diseño en el cálculo de sistemas de llenado y alimentación sobre la calidad de dos componentes fundidos en arena.

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

Objetivo General

Evaluar el efecto de los factores de diseño en el cálculo de sistemas de llenado y alimentación sobre la calidad de dos componentes fundidos en arena, con el fin de disminuir los niveles de ensayo y error ligados a los procesos de fundición.

Objetivos Específicos

- Establecer los factores de diseño que afectan el cálculo de los sistemas de llenado y alimentación.
- Obtener los componentes fundidos, empleando resultados de las metodologías de cálculos de sistemas de llenado y alimentación, para su posterior evaluación.
- Evaluar la calidad de los elementos fundidos empleando criterios de aceptación previamente establecidos.

1.3 MARCO DE REFERENCIA

Antecedentes

La fundición implica el análisis de un material durante dos cambios de fase, inicialmente de sólido a líquido, al calentar el metal por encima de su punto de fusión, y finalmente de líquido a sólido, durante la solidificación. Mientras que la fase sólida permite un mayor control sobre la estructura cristalina del material, el control durante la fase líquida es complejo. Esto se debe a vibraciones en los átomos del metal a causa del incremento en la temperatura, estos movimientos desordenados, dificultan el uso de métodos matemáticos que describan con exactitud el comportamiento, pero se han desarrollado ecuaciones que permiten realizar aproximaciones del material en estado líquido. Estas aproximaciones se incluyen en el artículo "*Semi-continuous casting of magnesium alloy AZ91 using a filtered melt delivery system*", donde se estudió el comportamiento de una aleación al ser

vaciada a cuatro velocidades diferentes y variando el coeficiente de transferencia de calor. Esta se realizó por medio de una simulación numérica 3D CFD, de la cual se concluyó que, un buen monitoreo de los parámetros de entrada de este modelo, como la velocidad de vertido y el coeficiente de transferencia de calor y permite conocer el comportamiento del proceso al conocer los valores de temperatura y velocidad de enfriamiento, los cuales son variables de salida de la simulación. Es por esto que, el planteamiento y monitoreo de simulaciones numéricas, disminuyen la incertidumbre de los procesos (Hasan & Begum, 2015; Mehta, Gohil, & Doshi, 2018).

La identificación de parámetros para simulaciones busca aumentar el control sobre los procesos de fundición, adicionalmente, el diseño de sistemas permite monitorear ciertas variables que reducen los riesgos presentes durante la fundición. Este hecho se evidenció en el informe *“Casting Design and Simulation of Cover Plate using AutoCAST-X Software for Defect Minimization with Experimental Validation”*, el cual, a partir de las fallas de un componente previamente fundido, se buscó modelar y simular el mismo proceso, pero con algunas modificaciones en ciertos parámetros. Al validar experimentalmente, se encontró que un aumento en la calidad del proceso, disminución en discontinuidades como rechupes o poros, es consecuencia de un buen diseño de los sistemas de llenado y alimentación, como la manipulación del orden en que las piezas, de acuerdo a su geometría, se solidifican (Choudhari, Narkhede, & Mahajan, 2014).

De los sistemas mencionados anteriormente, el de llenado busca que el material llene la cavidad del molde de la forma más eficiente posible, identificando, y en algunos casos alterando, el orden de solidificación de la pieza. Mientras que la finalidad del sistema de alimentación, es disminuir el impacto del porcentaje de contracción sobre la geometría de la pieza. Dada la importancia de estos sistemas, se ha evidenciado que un buen control y diseño de los sistemas disminuye la manifestación de discontinuidades, según el artículo *“A Literature Survey Of Methods To Study And Analyze The Gating System Design For Its Effect On Casting Quality”*. Su objetivo fue analizar y predecir el comportamiento del flujo, puntualmente en los sistemas, con el fin de minimizar los defectos y aumentar el rendimiento sin afectar la calidad del componente por medio de alguna de las diferentes técnicas, como simulación numérica (Ingle & Narkhede, 2018). La importancia de estos sistemas, también se ve reflejada en otros documentos como *“A Study Of The Gating System Of Castings Produced By The Full-Mold Process”*, ya que se concluye que ciertas combinaciones con respecto a la ubicación de los alimentadores y los canales, reflejan mejores resultados que otras combinaciones (Uday Apte & Professor, 1978).

Marco teórico

El marco teórico de este trabajo se estructurará a partir de tres bloques, el primero estará compuesto por una descripción de los elementos fundamentales del proceso

de fundición en arena; continúa con el planteamiento de ecuaciones que regulan fenómenos específicos del proceso, y por último se enunciarán las discontinuidades que pueden presentarse y afectar la calidad de los componentes.

1.3.1. Fundición en arena

La fundición en arena es el principal exponente de los procesos que emplean moldes perecederos. Este proceso es el más usado en metales como acero, níquel y titanio. Su versatilidad permite la fundición de partes con un amplio rango de tamaños y volumen de producción. La mayoría de los procesos de fundición cuentan con los pasos descritos en la Figura 1, comenzando por la obtención del molde, vaciado del metal fundido, solidificación de la pieza y por último la limpieza y acabado del componente, para luego realizar una correcta inspección. A diferencia de otras fundiciones, este proceso hace uso de una mezcla a base de arena para realizar el molde, donde al retirar la pieza este es destruido (Groover, 2010).

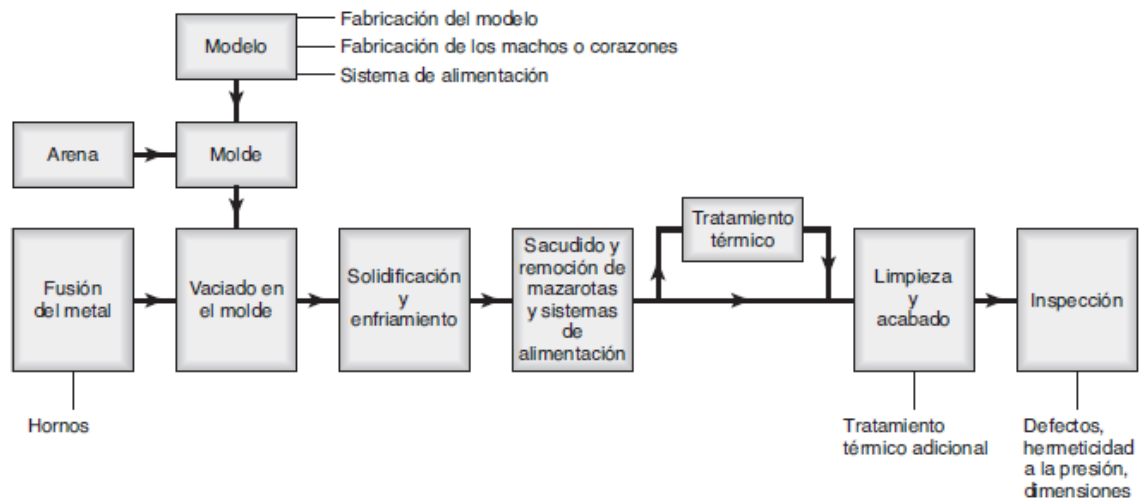


Figura 1. Descripción de los pasos de producción para la fundición en arena. Tomada de *Manufactura, Ingeniería y Tecnología* (Kalpakjian et al., 2002).

En este tipo de procesos el sistema de vaciado más común es por gravedad, el cual consiste en verter metal fundido por el embudo ubicado en la parte superior del molde, conectado a un canal cónico llamado bebedero, que conduce el material hacia la cavidad del molde o a el sistema de alimentación. Como su nombre lo indica, el sistema de alimentación busca alimentar la pieza cuando esta comience a contraerse, empleando mazarotas, mostradas en la Figura 2, las cuales corresponden a sectores del molde diseñados para ser los últimos elementos en solidificar, de esta manera actúan como reservas y desplazan la contracción a zonas no críticas. En esta misma figura, se observan los elementos básicos de un sistema de alimentación y llenado de una fundición en arena. Adicionalmente, muestra en la fundición una línea de partición, esta indica que fue realizada por medio de un modelo partido (pieza armable compuesta por dos partes), lo cual sugiere el uso de un molde superior e inferior. Con el fin de facilitar el proceso, esta línea observada

debe coincidir con la línea de partición que se genera al unir los moldes. Como muestra la Figura 3, ambos moldes, superior e inferior, están contenidos en una caja, la cual brinda mayor seguridad al proceso (Kalpakjian, 2010).

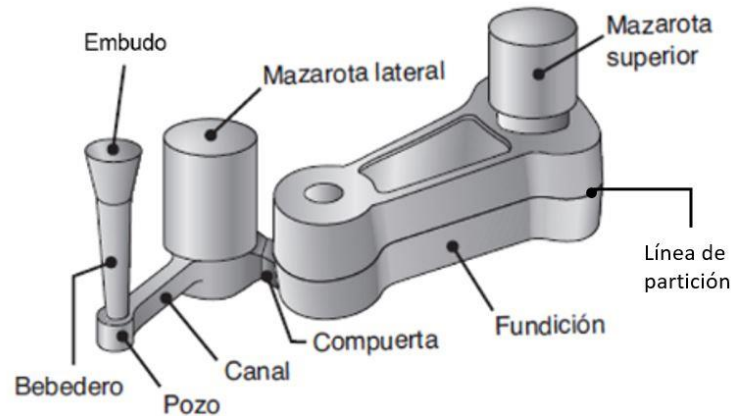


Figura 2. Esquema de una fundición característica.
Adaptada de *Manufactura, Ingeniería y Tecnología* (Kalpakjian et al., 2002).

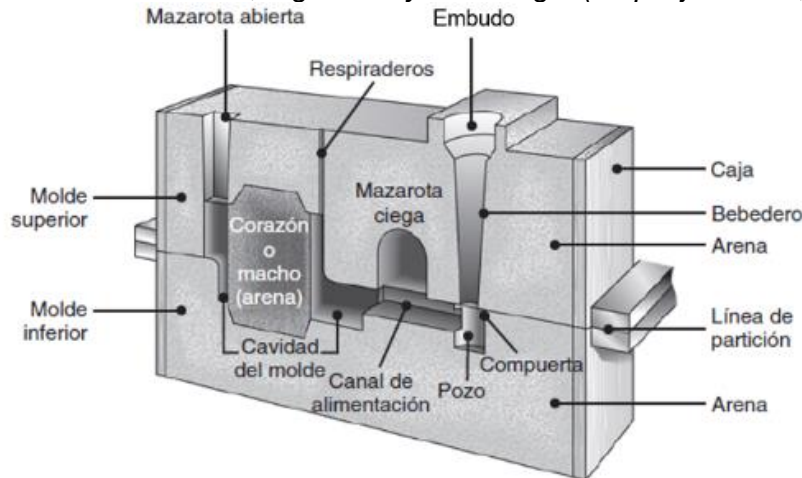


Figura 3. Esquema de un molde de arena mostrando diferentes características.
Adaptada de *Manufactura, Ingeniería y Tecnología* (Kalpakjian et al., 2002).

A. Moldes

Los moldes son clasificados tanto por el tipo de material: molde de arena verde, polímero o metal, como por el método de fabricación. Los moldes metálicos se consideran permanentes ya que, como se mencionó anteriormente, un solo molde puede ser empleado para realizar un gran número de piezas; por el contrario, los moldes de materiales refractarios solo pueden ser utilizados una sola vez. Los moldes arena verde son los más utilizados en la actualidad, este es básicamente una mezcla de arena, arcilla, agua y algunos aditivos orgánicos (A. Ghosh, 2001).

La mayoría de los moldes en arena son a base de arena sílice ya que es un material muy económico y con una alta disponibilidad. Una característica importante de estos moldes es el tamaño de los granos, ya que afecta la calidad de la pieza fundida.

Mientras que los granos gruesos permiten la penetración que los gases del metal a costa de un mal acabado superficial, los granos de tamaño fino dan un mejor acabado superficial pero su baja permeabilidad de los gases también puede ocasionar defectos en la pieza. Otro factor importante a la hora de realizar la mezcla de arena es la forma del grano, la cual está definida por la redondez o forma esférica del grano, como se observa en la Figura 4. La combinación de granos redondos con media a alta esfericidad, disminuye el uso de aditivos, pero el uso de este aumenta cuando la forma de los granos es más angular y con menor esfericidad (John Brown, 2007).

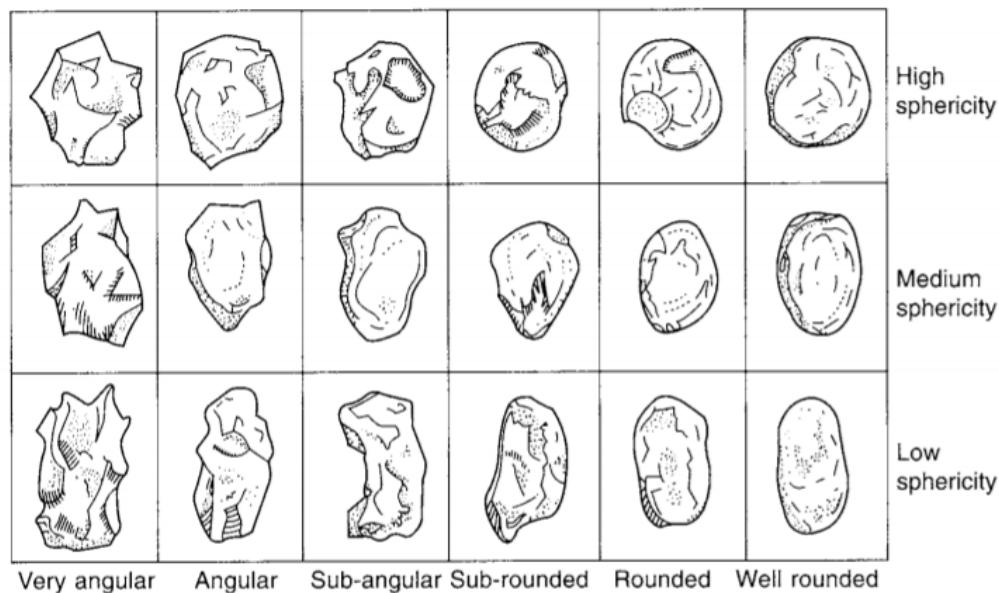


Figura 4. Clasificación de las formas de grano. Tomada de Foseco Ferrous Foundryman's Handbook (John Brown, 2007).

i. Indicadores de calidad de la arena

En la elaboración de los moldes se controla la calidad del proceso por medio de características de la mezcla. Los indicadores más influyentes según Rao (1996) son:

- **Cohesividad:** capacidad de los granos de arena de permanecer unidos unos con otros. Esta propiedad se ve reflejada en la resistencia mecánica del molde como, resistencia a la compresión y cizalla.
- **Permeabilidad:** capacidad del molde para permitir el paso de gases y aire caliente del proceso a través de los espacios vacíos de la arena.
- **Refractario:** capacidad de mantener sus propiedades a altas temperaturas.
- **Moldeabilidad:** capacidad de adquirir una forma deseada, en este caso la forma del modelo.

- Plasticidad: capacidad del molde de mantener la forma de la cavidad sin sufrir deformación alguna.
- Dureza: capacidad para resistir a cualquier deformación indeseada después del proceso de moldeo.
- Colapsabilidad: capacidad del molde de colapsar después del proceso de solidificación o durante el proceso de enfriamiento.
- Durabilidad: capacidad de la mezcla de ser reutilizada en procesos posteriores.

B. Modelos

Los modelos son versiones de la pieza fundida que se desea realizar, son similares al producto final en forma y tamaño, pero no son exactamente iguales a causa de diversos factores que ocurren durante el proceso, y, en consecuencia, alteran las dimensiones de la pieza final. Uno de los factores es el fenómeno de contracción volumétrica durante la solidificación, este se debe tener en cuenta al diseñar el modelo, ya que, durante este proceso las dimensiones de la pieza fundida se reducen. Para compensar esta reducción, el tamaño del modelo debe ser mayor al de la pieza final a una escala del valor del porcentaje de contracción volumétrica. Este valor de contracción es característico de cada metal, como se presenta en la Tabla 1. Otra consideración a la hora de diseñar un modelo es el acabado superficial de las piezas, el cual es garantizado mediante un maquinado posterior, esto implica una adición de material en la superficie de la pieza, con el fin de ser removido al finalizar el proceso. El último factor surge del proceso de moldeo, ya que la extracción del modelo es la actividad más crítica. Es por esto que se busca que las caras verticales tengan cierto grado de inclinación, con el fin de brindarle cierta conicidad a la pieza y así facilitar su extracción. Es importante resaltar que el material usualmente empleado en la fabricación de modelos, para un bajo número de unidades a producir, es la madera tipo cedro por la facilidad con la que se le puede dar forma. Sin embargo, cuando el volumen de unidades a fabricar es alto, el uso de moldes en madera es limitado por la erosión que provoca la arena y en consecuencia se prefiere realizar el modelo en aluminio. Para el uso que se le dará en este trabajo, se ha optado por realizar los modelos en madera y mediante piezas impresas en 3D en ABS (Rao, 1996).

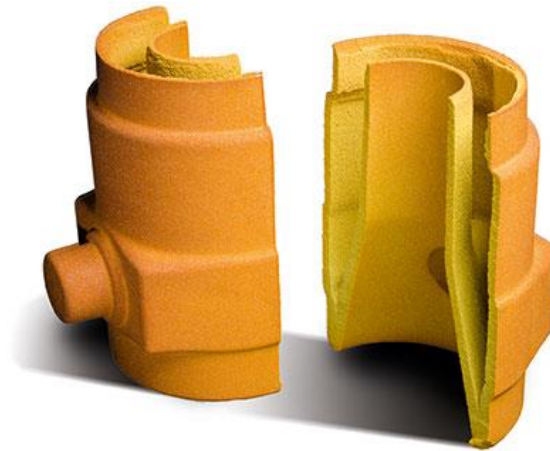
*Tabla 1. Porcentajes de contracción volumétrica
Tomada de Foseco (Brown, 1999).*

Aleación	Contracción Volumétrica (%)
Carbon steel	6
Alloyed steel	9
High alloy steel	10

Aleación	Contracción Volumétrica (%)
Malleable iron	5
Al	8
Al-Si9Mg	3.4
Cu (pure)	4
Brass	6.5
Bronze	7.5
Al bronze	4
Sn bronze	4.5

C. Matachos

Una ventaja de la fundición es la facilidad con la que incorpora cavidades internas de gran complejidad, ver Figura 5. Con el fin de producir estas superficies internas, es necesario hacer uso de matachos. Los más económicos y de menor resistencia son los realizados de la misma arena verde del molde, generalmente son segmentos cortos o anchos. Al ser del mismo material, se realizan a medida que se va fabricando el molde, es por esto que se dice que están integrados. Si por el contrario se necesitan realizar cavidades largas y estrechas, o de una geometría compleja, se hace uso de matachos cocinados, los cuales poseen mayor resistencia. La producción de estos es separada a la del molde, por lo tanto, los matachos se insertan en unas cavidades previamente realizadas al molde. Para que funcionen correctamente deben cumplir con las siguientes características: independientemente del tipo de matacho, tener suficiente resistencia para soportar los esfuerzos producidos y mantenerse en su lugar. Tener una superficie lisa. Generar la mínima cantidad de gases al verter el metal fundido, pero poseer buena permeabilidad para permitir el escape de estos. Buena refractibilidad, mantener sus propiedades a altas temperaturas. Y por último colapsabilidad, ya que, en primer lugar, la solidificación de la pieza generará presión sobre el matacho por la contracción que ocurre al pasar del estado líquido al sólido, a la cual el matacho no debe oponerse, y en segundo lugar debe ser removida con facilidad al finalizar el proceso (Black, Kohser, & DeGarmo, 2008).



*Figura 5. Cavity interna de una chaqueta de agua.
Tomada de Biezanek noyautage (Biezanek noyautage, 2018).*

D. Sistemas

Como se ha mencionado, durante el proceso de fundición el control sobre el material en estado líquido es complejo, es por esto que el estudio y desarrollo de sistemas como el de alimentación y llenado han mejorado la calidad de las fundiciones (Manufacturing Network, 2018). El tiempo de solidificación y la geometría de la pieza son variables importantes en estos procesos las cuales se definirán a continuación.

i. Sistema de alimentación

El sistema de llenado busca regular el flujo y la turbulencia del material con el fin de evitar la erosión del molde y otras posibles consecuencias que podrían generar defectos en la pieza. Está compuesto básicamente por un bebedero, primer canal por el cual fluye el material y que, gracias a su posición vertical el fluido gana energía potencial, lo cual se ve reflejado en la velocidad con la que el material fluye a través de los canales, segundo elemento que compone este sistema, los cuales direccionan el material hasta los ataques, último elemento de estos sistemas. El diseño de estos canales de ataque, normalmente horizontales, ayuda a optimizar el tiempo de llenado, buscando que la cavity este completamente llena antes que el material comience a solidificarse (RAO, 2009).

ii. Sistema de llenado

El sistema de alimentación busca principalmente compensar el fenómeno de contracción que sufre el material al pasar de estado líquido a sólido, mediante el diseño de un componente, usualmente de geometría cilíndrica, llamado mazarota, la cual se ubica cerca de la última zona en solidificarse (RAO, 2009).

iii. Tiempo de solidificación

La solución de Chvorinov, es la ecuación que mejor describe el tiempo de solidificación de una pieza, y con mayor aplicación en los moldes de área, ver Figura 6, esta indica que el tiempo total de solidificación es proporcional a la relación volumen sobre área elevado al cuadrado y multiplicado por una constante K (Jorge Osorio Z., 1989).

$$t_s = K \left(\frac{V}{A} \right)^2$$

Donde:

t_s : tiempo de solidificación

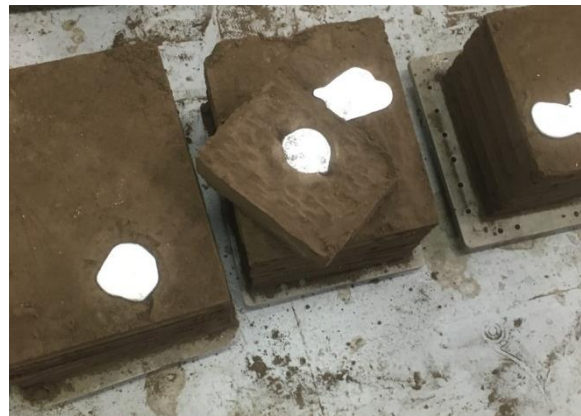
K : constante de Chvorinov

V : volumen de la pieza

A : área superficial de la pieza



a) Tapa de un molde en arena



b) Molde en arena

Figura 6. Molde en arena

iv. Módulos geométricos y coeficientes de forma

De la ecuación se puede concluir que la velocidad de enfriamiento es función de la constante K, que depende de propiedades térmicas del material y del molde, y de la forma y dimensión de la pieza. Suponiendo que las características térmicas del molde y la aleación son constantes, el tiempo de solidificación depende exclusivamente del efecto dimensional de la pieza, “módulo geométrico”, el cual puede describirse como la relación entre el volumen y la superficie por la cual la pieza evacúa calor. El problema de esta ecuación es que solo es aplicable para secciones de la pieza de forma plana; con el fin de incluir las secciones de flujo divergente, la ecuación anterior es multiplicada por un coeficiente W, llamado “coeficiente de forma” (Jorge Osorio Z., 1989). De lo anterior se puede concluir que las ecuaciones del módulo geométrico y del módulo de enfriamiento son:

$$M_g = \frac{V}{A} \quad M_e = M_g * W$$

Donde:

M_g : módulo geométrico

V : volumen

A : superficie por la cual la pieza evacua calor

M_e : módulo de enfriamiento

W : coeficiente de forma

1.3.2. Cálculos asociados a los fenómenos del proceso

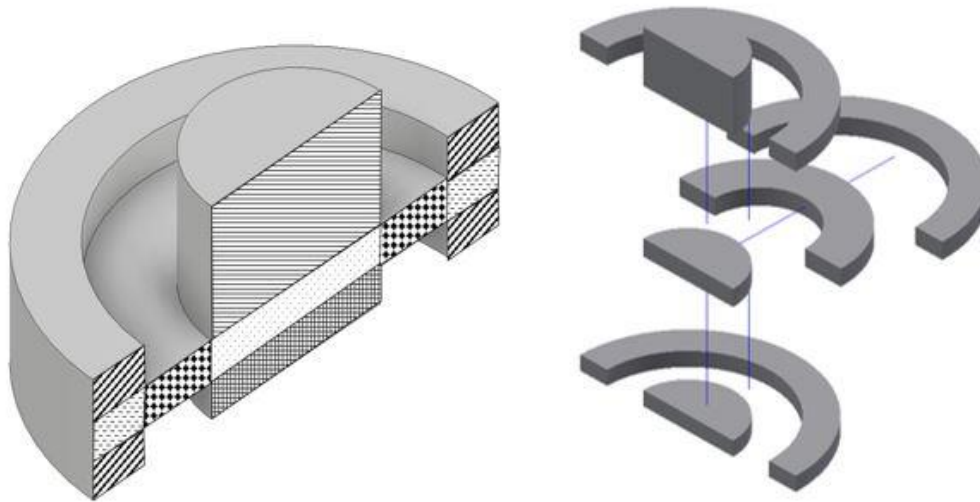
Conociendo la importancia de los sistemas descritos anteriormente, a continuación, se presentan dos métodos o pasos estructurados y ordenados que permiten obtener tanto las dimensiones del sistema de llenado, área del bebedero y canales, así como las dimensiones del sistema de alimentación, diámetro y altura de la mazarota, además de las dimensiones de la unión de esta con la pieza. Los pasos del primer método provienen en una tesis realizada en la Universidad de Antioquia, la cual recibe el nombre de “SISCALCO, Sistema simplificado de cálculo de alimentadores y de canales de coladas para piezas vaciadas en arena” (Jorge Osorio Z., 1989). Los pasos del segundo método provienen de dos libros: “Non-Ferrous Foundryman’s” y “Manufacturing Technology” (Brown, 1999; P. N. Rao, 2009).

La estructura de este numeral es la siguiente, primero se presentan de los pasos del “SISCALCO”, primer método, y luego los de “Non-Ferrous Foundryman’s” y “Manufacturing Technology”, segundo método. En cada método se describirán los pasos para el cálculo del sistema de alimentación y por último los cálculos del sistema de llenado.

Primer método – SISCALCO

A) Pasos para el cálculo del sistema de alimentación

El primer paso es descomponer la pieza en elementos simples, ver Figura 7. Luego hallar el área de la unión y el área de transferencia de calor de cada sección, se verifica si área de transferencia de calor es menor que la de la unión, en este caso el módulo de la sección se determina como el resultado de una unión, ver Figura 10.



a) Pieza descompuesta en elementos simples

b) Pieza explosionada

Figura 7. Descomposición de una pieza

1. Determinación del módulo geométrico y de enfriamiento

Una vez descompuesta la pieza en elementos simples, y verificar que no son resultado de una unión, se procede a hallar el módulo geométrico de cada una empleado la relación de V/A , como se indica en el marco teórico o la información de la Figura 8. Posteriormente se multiplica el módulo por su respectivo coeficiente de forma con el fin de hallar el módulo de enfriamiento (ver Figura 8).

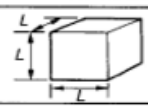
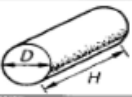

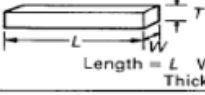


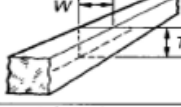
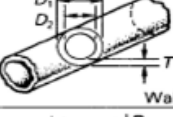
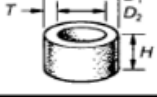

Shape	Dimensions	Modulus	W
(a) Cube	 Side = L	$\frac{L}{6}$	0,75
(b) Cylinder	 Diameter = D Height = H Note: if H = D the modulus is $\frac{D}{6}$	$\frac{DH}{2D + 4H}$	0,75
(c) Disc	 Diameter = D Thickness = T	$\frac{DT}{2D + 4T}$	-
(d) Bar or plate	 Length = L Width = W Thickness = T	$\frac{TWL}{2(TW + WL + LT)}$	0,80
(e) Endless cylinder (ends terminated by another part of casting)	 Diameter = D Note: Because radial heat flow is faster than that from a flat surface, calculated moduli for endless cylinders may be reduced by multiplying by 0.85	$\frac{D}{4}$	0,80
(f) Endless plate (terminated on all sides by another part of casting)	 Thickness = T	$\frac{T}{2}$	0,95
(g) Endless bar (ends terminated by another part of casting)	 Thickness = T Width = W	$\frac{TW}{2(W + T)}$	0,85
(h) Endless hollow cylinder	 OD = D ₁ Dia. core = D ₂ Wall thickness = T	$\frac{D_1 - D_2}{4} = \frac{T}{2}$	-
(i) Annulus	 OD = D ₁ Dia. core = D ₂	$\frac{(D_1 - D_2)}{2(D_1 - D_2) + H}$ $= \frac{TH}{2(T + H)}$	-
(j) Sphere	 Diameter = D	$\frac{D}{6}$	0,72

Figura 8. Módulo geométrico y coeficiente de forma.

Adaptado de Foseco y SISCALCO (Brown, 1999; Jorge Osorio Z., 1989)

2. Determinación de los módulos resultantes de las uniones

Una vez identificada la sección que se comporta como una unión, y conociendo el valor del módulo de enfriamiento de las secciones a tope con este elemento, ver Figura 9, se halla la siguiente relación:

$$\frac{M_{e2}}{M_{e1}}$$

Donde:

M_{e1} y M_{e2} : módulos de enfriamiento

Por medio de la Figura 10 se cruza el valor de la relación hallada y el tipo de unión, en L, T o cruz, y de esta forma hallar el valor del coeficiente corrector por uniones, w , el cual es multiplicado por el mayor valor entre M_{e1} y M_{e2} para así hallar el módulo de enfriamiento de esta sección, es decir:

$$M_{eu} = M_{e1 o 2} * w$$

Donde

M_{eu} : módulo de enfriamiento de la unión

$M_{e1 o 2}$: mayor módulo de enfriamiento ente 1 y 2

w : coeficiente de corrección

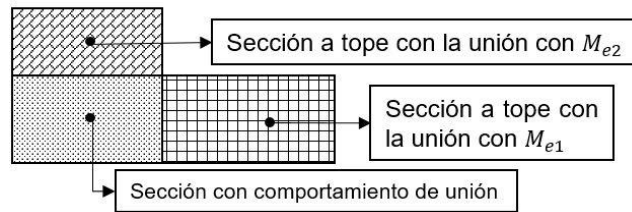


Figura 9. Ejemplo de una unión.

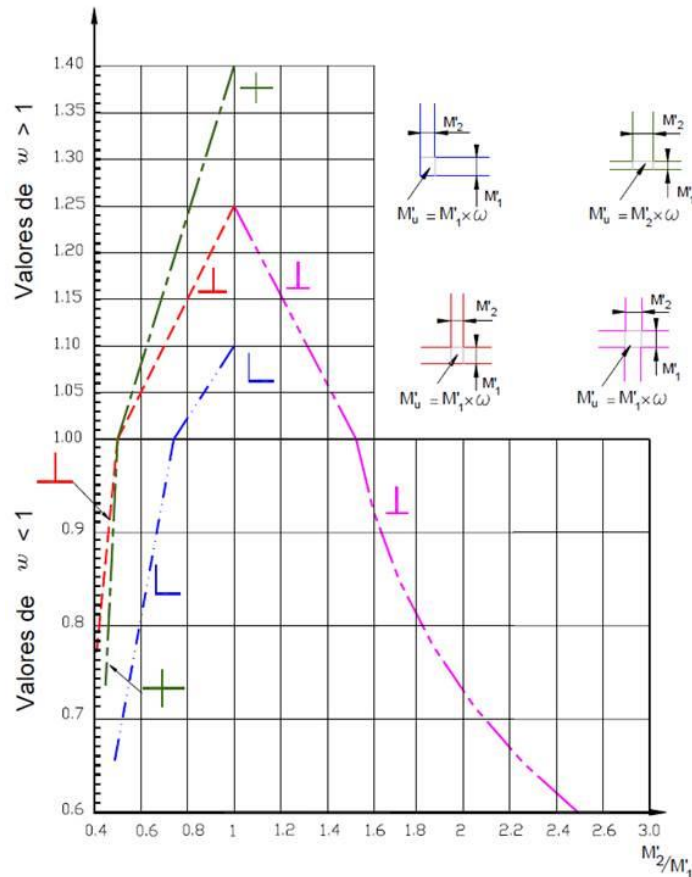


Figura 10. Coeficientes correctores de formas para uniones.
Tomada del SISCALCO (Jorge Osorio Z., 1989).

3. Influencia del matacho

Con el fin de hallar el módulo de enfriamiento del matacho, primero es necesario identificar el módulo de enfriamiento que rodea la sección vacía, ver Figura 11 y este multiplicarlo por un coeficiente correctiva por matacho, luego se hace la siguiente relación:

$$\frac{d}{M_e}$$

Donde:

d : *diámetro del matacho*

M_e : *módulo de enfriamiento*

A partir de la Figura 12 se cruza el valor de la relación hallado con la curva según el tipo de forma del matacho, esférica, cilíndrica o plana. Por último, con el fin de conocer la influencia del matacho, se realiza la siguiente operación.

$$M_{em} = M_e * W$$

Donde:

M_{em} : *módulo de enfriamiento del matacho*

M_e : *módulo de enfriamiento*

W : *coeficiente correctivo po matacho*

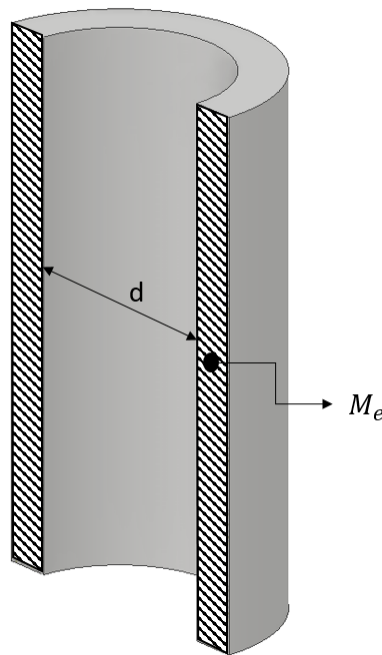


Figura 11. Influencia del matacho

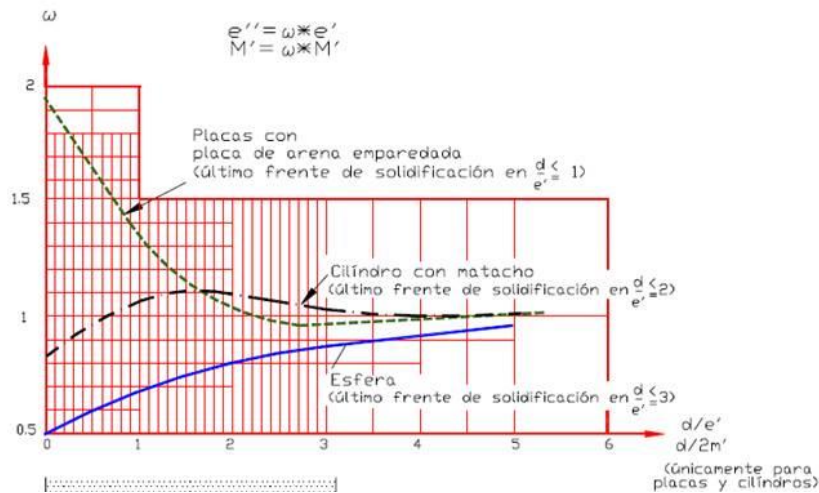


Figura 12. Coeficientes correctivos de forma W por matachos. Tomada del SISCALCO (Jorge Osorio Z., 1989).

4. Aplicación de las tres reglas del mazarotado

Antes de determinar el módulo de la mazarota, es necesario ordenar los módulos de las secciones halladas de acuerdo al orden de solidificación, es decir, del menor módulo al mayor. Esto se hace con el fin de identificar el mayor módulo, o última sección en solidificar, el cual será empleado para determinar, a partir de la regla del módulo de enfriamiento, del radio de acción y de las contracciones, si el módulo de la mazarota es el correcto, y el de menor módulo nos permitirá realizar los cálculos del sistema de llenado que será explicado más adelante.

Regla del módulo de enfriamiento

Las dimensiones de cada mazarota, normalmente de forma cilíndrica y cumpliendo la siguiente relación $\frac{H}{D} = 1.5$, están ligadas al módulo de enfriamiento como se observa en la ecuación.

$$M_m = 1.2 * M_p$$

Donde:

M_m : módulo de la mazarota

M_p : módulo de la última sección en solidificar, la cual debe ser alimentada por la mazarota.

Empleando el módulo de la mazarota y la Tabla 2, se hallan las dimensiones de la mazarota de carga y con la Tabla 3 de la mazarota de talón. En la mayoría de las ocasiones el valor del módulo de la mazarota no se encuentra de forma exacta en las Tabla 2 o Tabla 3, es por esto que se emplearon los datos mostrados para generar ecuaciones que describieran mejor el comportamiento de cada uno de los datos, diámetro, altura y volumen de la mazarota, como se observa en las Gráfica

1 aGráfica 3 para mazarotas de carga y en las Gráfica 4 aGráfica 6 para mazarotas de talón.

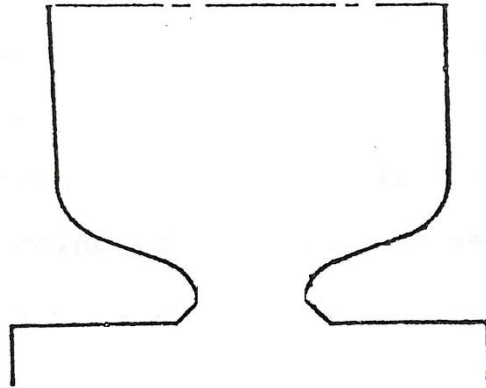


Figura 13. Mazarota en carga

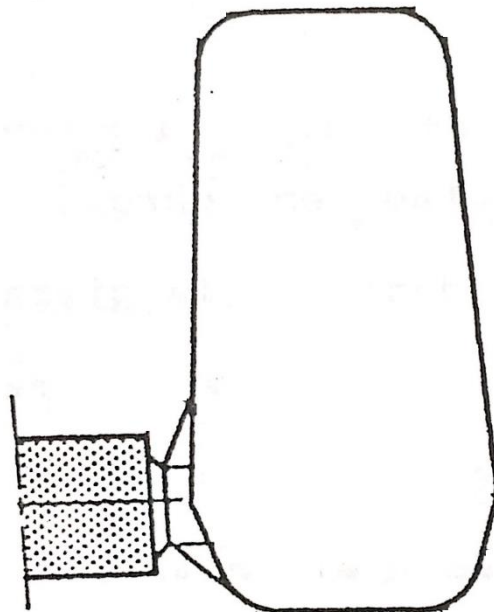


Figura 14. Mazarota en talón

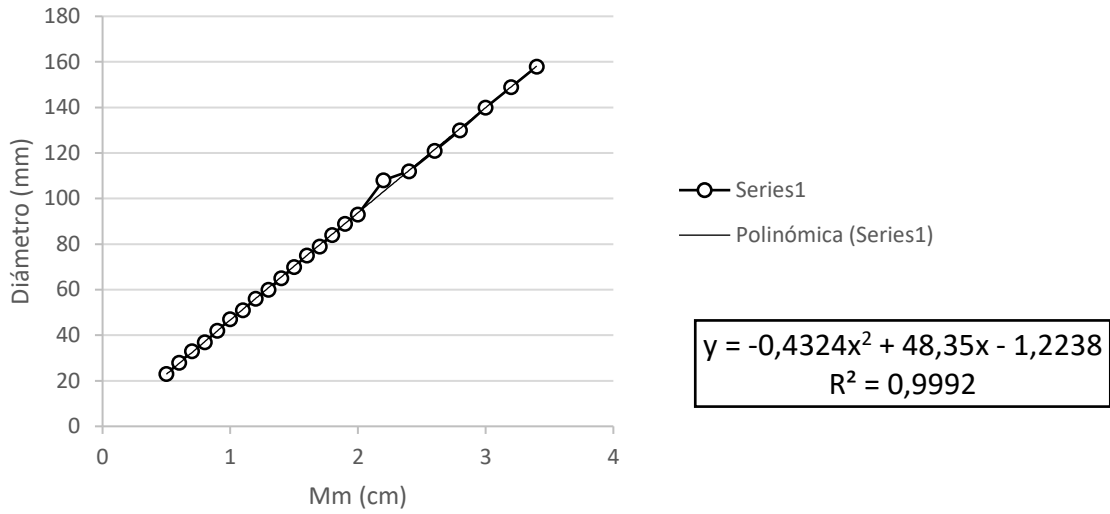
Tabla 2. Dimensiones de mazarotas cilíndricas en carga con $H=1.5D$
Tomada del SISCALCO (Jorge Osorio Z., 1989).

M_m (cm)	D (mm)	H (mm)	V_m (cm ³)	$V_{\text{ecuación}}$ (cm ³)
0,5	23	35	15	14,5
0,6	28	42	26	25,9
0,7	33	49	42	41,9
0,8	37	56	62	60,2
0,9	42	63	89	87,3
1	47	70	122	121,4
1,1	51	77	162	157,3
1,2	56	84	211	206,9

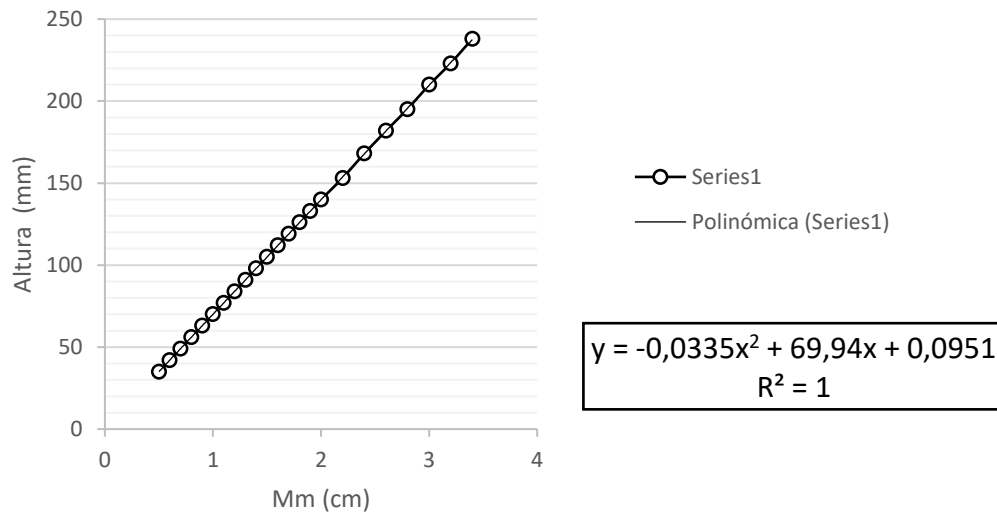
M_m(cm)	D (mm)	H (mm)	V_m (cm³)	V_{ecuación} (cm³)
1,3	60	91	268	257,3
1,4	65	98	335	325,2
1,5	70	105	412	404,1
1,6	75	112	500	494,8
1,7	79	119	599	583,3
1,8	84	126	712	698,3
1,9	89	133	837	827,4
2	93	140	976	951,0
2,2	108	153	1300	1401,6
2,4	112	168	1700	1655,1
2,6	121	182	2150	2092,8
2,8	130	195	2680	2588,3
3	140	210	3300	3232,7
3,2	149	223	4000	3888,4
3,4	158	238	4800	4666,4

*Tabla 3. Dimensiones de mazarotas cilíndricas en talón con $H=1.5D$
Tomada del SISCALCO (Jorge Osorio Z., 1989).*

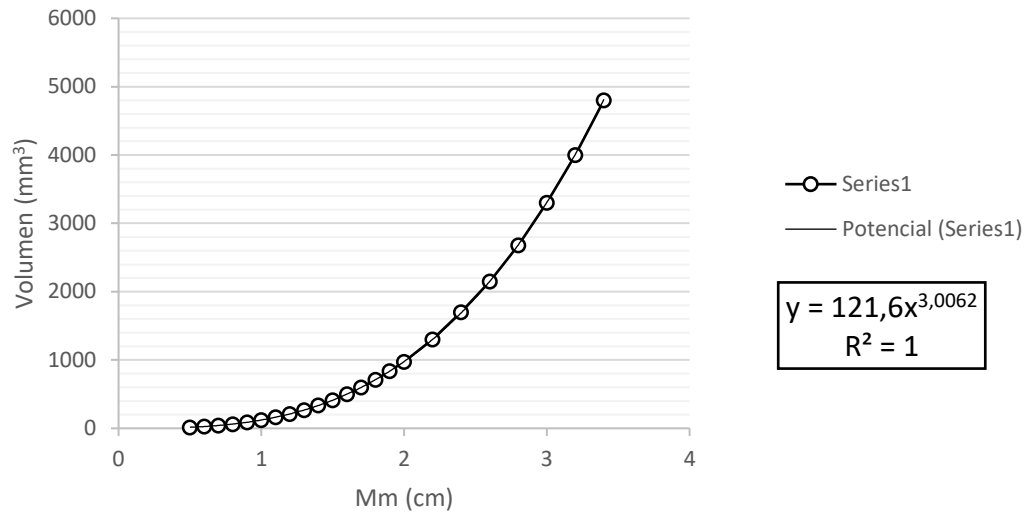
M_m(cm)	D (mm)	H (mm)	V_m (cm³)	V_{ecuación} (cm³)
0,5	24	48	19	21,7
0,6	29	58	32	38,3
0,7	34	68	49	61,7
0,8	38	76	73	86,2
0,9	43	86	105	124,9
1	48	96	143	173,7
1,1	53	106	190	233,9
1,2	53	116	250	255,9
1,3	58	126	315	332,9
1,4	67	134	395	472,4
1,5	72	144	485	586,3
1,6	77	154	589	717,1
1,7	81	162	700	834,8
1,8	86	172	840	999,1
1,9	91	182	980	1183,7
2	96	192	1200	1389,7
2,2	106	212	1500	1870,8
2,4	115	230	2000	2389,0
2,6	125	250	2700	3068,0
2,8	134	268	3200	3779,5
3	144	288	3900	4690,4
3,2	153	306	4700	5625,9
3,4	163	326	5700	6802,7



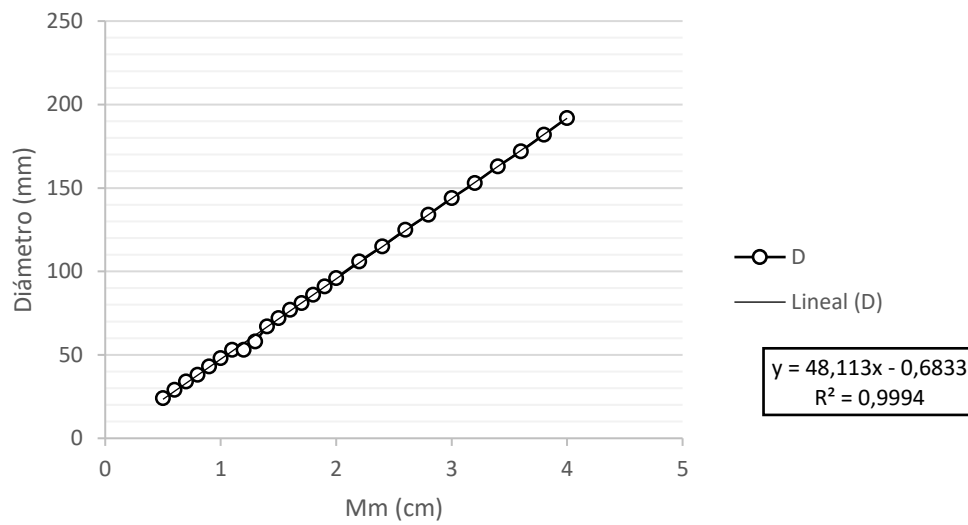
Gráfica 1. Valores del diámetro respecto al módulo para mazarota de carga.



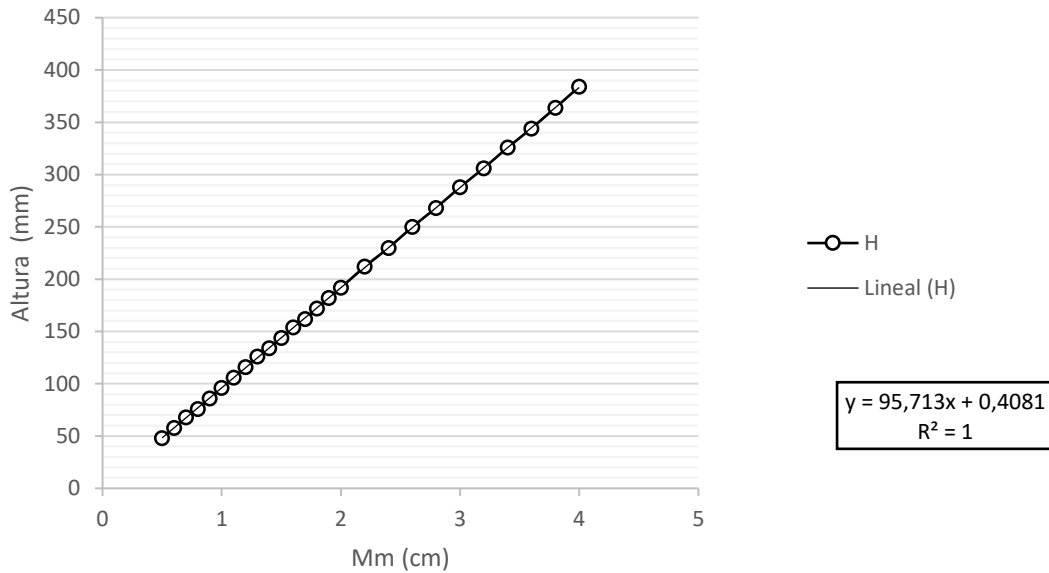
Gráfica 2. Valores de la altura respecto al módulo para mazarota de carga



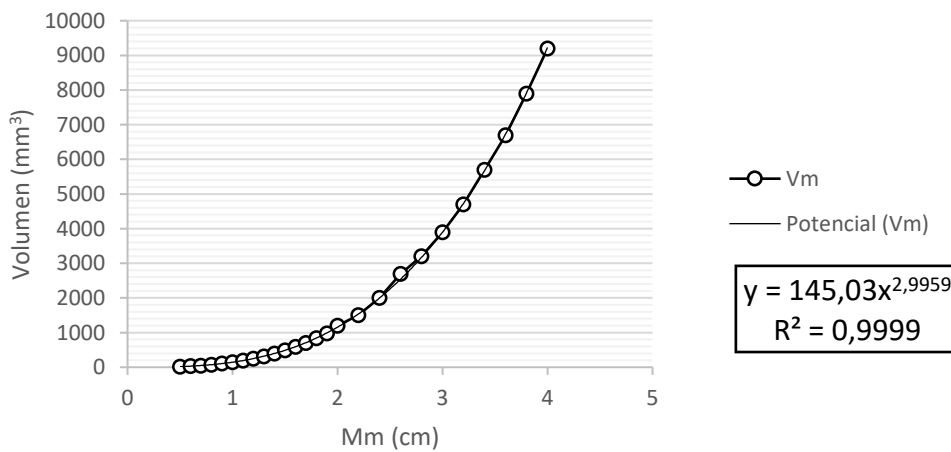
Gráfica 3. Valores del volumen respecto al módulo para mazarota de carga



Gráfica 4. Valores del diámetro respecto al módulo para mazarota de talón



Gráfica 5. Valores de la altura respecto al módulo para mazarota de talón



Gráfica 6. Valores del volumen respecto al módulo para mazarota de talón

Regla del radio de acción

Cada elemento de la pieza debe ser alimentado por una mazarota, pero dicha mazarota solo es capaz de barrer cierta distancia, la cual depende del tipo de aleación y del menor módulo del componente, el de la primera sección en el orden de solidificación. Esta distancia puede obtenerse de la Figura 15 y se halla con el fin de determinar si la ubicación de la mazarota es la adecuada para llegar a todas las secciones del componente.

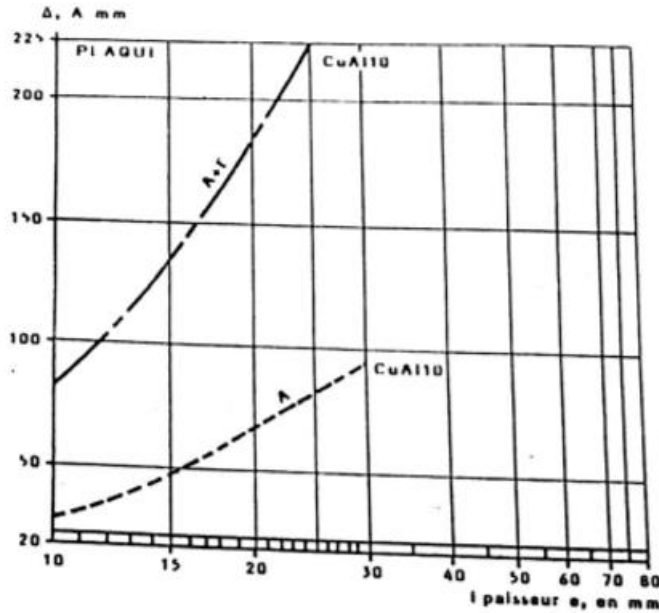


Figura 15. Distancia de alimentación para cupro-aluminio.
Tomada del SISCALCO (Jorge Osorio Z., 1989).

Regla de las contracciones

Mediante esta regla se verifica que el volumen de una o más mazarotas sea mayor al volumen de la contracción global volumétrica de la pieza, es decir:

$$V_g = K' * R * V_p$$

Donde:

V_g : volumen de contracción global

K' : redimineto de la mazarota donde

$K' = 6$, para mazarotas ordinarias

R : variación volumetrica global

$R = 8$, para aleaciones de aluminio

V_p : volumen de la pieza

B) Pasos para el cálculo del sistema de llenado

Con el fin de hallar las dimensiones del sistema de llenado se debe conocer el valor de los siguientes datos:

- Volumen a llenar: se refiere al volumen de la pieza.
- Módulo de referencia: es el menor módulo de enfriamiento hallado.
- Escalonamiento: es la relación de colada que permite realizar el cálculo rápido de las secciones principales del sistema a partir del momento que se determina una de ellas. Esta relación se determina a partir de la Figura 16 y su orden es $S_d : S_c : S_a$.

Donde:

S_d : área del bebedero

S_c : área del canal

S_a : área del ataque

Alliages	Section canal	Echelonement recommandé	Indications	Chemineé (*) d'équilibre hauteur H' section S.
non oxydables	uniforme	1 - 1 - 1	2 à 3 attaques	$H' \geq \frac{H}{B}$ $S_a \geq S_c$ ou S_c , à l'amont de la cheminée
		1 - 2 - 1	4 attaques ou plus	
oxydables	dégressive	1 - 1 - 1	économie masse retours	(*) dispositif recommandé pour les moules dont $H_i \geq 3$ dm
		$1 \cdot \sqrt{H_i} \cdot \sqrt{H_i} (^{\circ})$	empreintes fragiles	
oxydables	dégressive	$1 \cdot \sqrt{H_i} \cdot \sqrt{H_i} (^{\circ}) \times 1.2$		

Figura 16. Relación de colada, "escalonamiento".
Tomada del SISCALCO (Jorge Osorio Z., 1989).

- Tiempo de llenado: Mediante la Figura 17, y conociendo el módulo de referencia, el material a utilizar y la temperatura de entrada de este material, se puede llegar a conocer el tiempo que se tarda en llenar la cavidad.

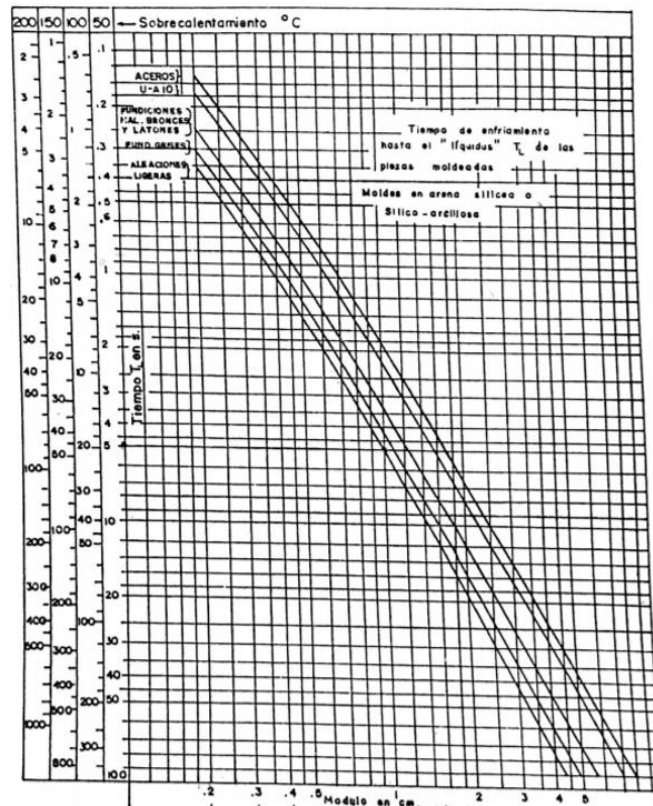
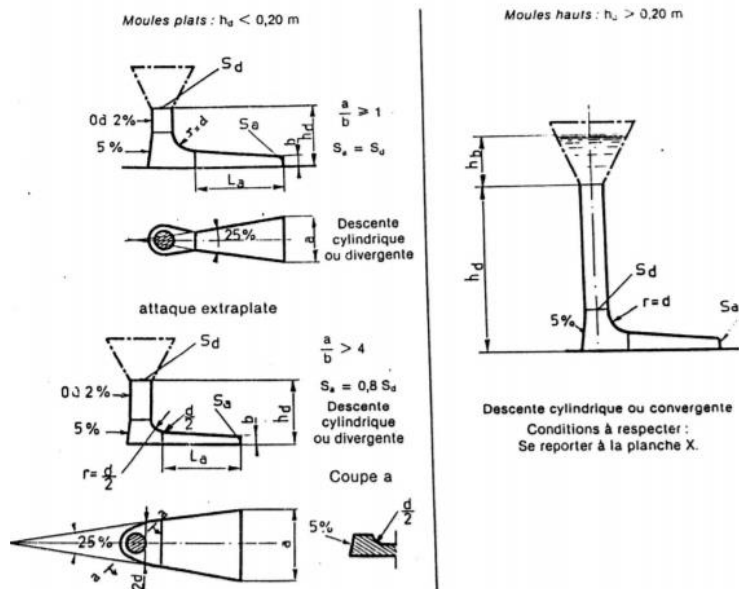


Figura 17. Tiempo de llenado de la pieza.
Tomada del SISCALCO (Jorge Osorio Z., 1989).

- Coeficiente de caudal, B: ese coeficiente incluye las pérdidas por fricción y se determina por medio de la Figura 18.



Coefficient B			
S_d	S_a	Pour h_d et L_a ≠ 0,1 m	Pour $h_d = 0,5$ m $L_a = 0,1$ m
1	1	1,4 (+ 0,15)	1,6 (+ 0,15)
1	0,8	1,6 (+ 0,15)	1,8 (+ 0,15)

Figura 18. Coeficiente de caudal.
Tomada del SISCALCO (Jorge Osorio Z., 1989).

1. Cálculo de la sección del sistema

La Figura 19, muestra las tres áreas de interés en un sistema de llenado, las cuales son S_d , sección del bebedero o descenso, S_c , sección del canal, y S_a , sección del ataque.

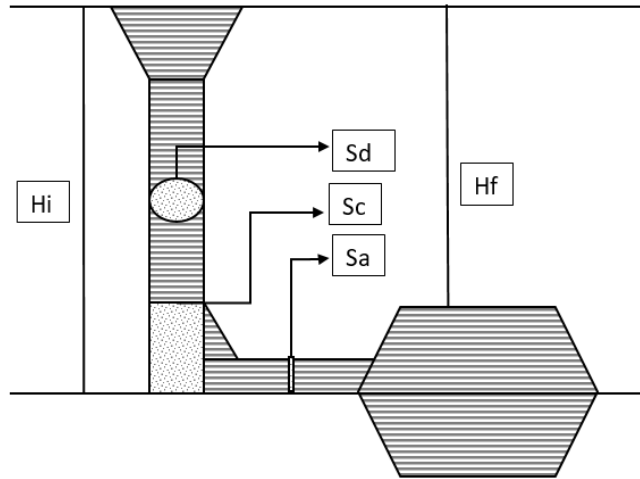


Figura 19. Sistema de llenado sencillo.

- Descenso de colada

Por medio de las siguientes ecuaciones se puede determinar el área del bebedero, con el fin de hallar el diámetro a partir de la fórmula $S_d = \pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2$ (recordar que la geometría de esta sección es cilíndrica), pero primero es importante determinar si el llenado se realizará en caída, donde el canal de ataque se encuentra ubicado en la parte superior del componente, en fuente, el canal de ataque está en la parte inferior, o para componentes divididos entre dos cajas. A continuación, se describen las ecuaciones de componente dividido y de llenado en caída ya que serán los empleados en los cálculos.

Ecuación para componente dividido entre las dos cajas:

$$S_d = \frac{V_t}{t_v} * \frac{2B}{\sqrt{H_i} + \sqrt{H_f}} * \frac{1}{\sqrt{2g}}$$

Donde:

S_d : área de la sección del bebedero o descenso

V_t : volumen de la tapa

t_v : tiempo de llenado o vaciado

B : coeficiente de pérdidas de caudal

H_i : altura inicial, por lo general es la altura de la tapa

H_f : altura final, altura desde la tapa hasta el inicio de la pieza

g : gravedad

Ecuación para componente "llenado en caída":

$$S_d = \frac{V_b * B}{t_v * \sqrt{H} * \sqrt{2g}}$$

Donde:

S_d : área de la sección del bebedero o descenso

V_b : volumen de la base

t_v : tiempo de llenado o vaciado

B : coeficiente de perdidas de caudal

g : gravedad

H : altura metalostática

La altura metalostática se halla empleando:

$$H = \frac{\sqrt{H_i} + \sqrt{H_f}}{2}$$

Donde:

H_i : altura inicial, por lo general es la altura de la tapa

H_f : altura final, altura desde la tapa hasta el inicio de la pieza

- Dimensiones de los canales y ataques

Gracias a la relación de colada y al valor del área del bebedero, el área del canal y de los ataques es, respectivamente:

$$S_c = \left(\frac{S_c}{S_d}\right)_{\text{Valor escalonamiento}} * S_d \quad \text{y} \quad S_a = \left(\frac{S_a}{S_d}\right)_{\text{Valor escalonamiento}} * S_d.$$

Donde:

S_c : área de la sección del canal

S_a : área de la sección del ataque

Segundo método

A) Pasos para el cálculo del sistema de alimentación

Al igual que en el primer método, se debe descomponer la pieza en elementos simples como se observa en la Figura 7. De igual forma, identificar en cuales secciones el área de transferencia de calor es menor que el área de la unión, con el fin de hallar el módulo de estas como resultado de una unión.

1. Determinación del módulo geométrico y de enfriamiento

Este procedimiento es el mismo al del método anterior, el cual consiste en hallar el módulo geométrico por medio de las ecuaciones descritas en la Figura 8, y luego multiplicar este módulo por el coeficiente de forma indicado en esta misma figura, con el fin de hallar el módulo de enfriamiento.

2. Determinación de los módulos resultantes de las uniones

Los pasos para hallar el módulo de las uniones es el mismo al realizado en el método anterior, "SISCALCO", en el numeral también llamado, Determinación de los módulos resultantes de las uniones.

3. Módulo de la mazarota

Al igual que en el primer método, el módulo de la mazarota se halla multiplicando 1.2 veces el mayor módulo de la pieza.

4. Dimensiones de la mazarota

A diferencia del método 1, las dimensiones de la mazarota se halla a partir de la siguiente ecuación, la cual es una expansión de la ecuación descrita en el marco teórico, $M = \frac{V}{A}$, al remplazar por el volumen y el área de un cilindro.

$$M_m = \frac{D * H}{2 * D + 4 * H}$$

Donde:

D: diámetro de la mazarota

H: altura de la mazarota

Con el fin de aumentar la eficiencia se recomienda que, $H = 1.5 * D$, por lo tanto, reemplazando en la ecuación anterior, se podría obtener el valor del diámetro y por lo tanto el de la altura.

5. Comprobación de dimensiones

Por medio de la siguiente desigualdad se corroborará que el volumen de la mazarota es el adecuado para el proceso. Si la ecuación no se cumple, se recomienda aumentar el diámetro de la mazarota. Estas dimensiones se deben corroborar hasta que la desigualdad se cumpla.

$$W_m \geq W_p * \frac{S}{C}$$

Donde:

W_m: peso de la mazarota

W_p: peso de la pieza

C: valor entre (10 – 14%)

S: porcentaje de contracción, para el aluminio 8%

$$W_p = V_p * \rho_p \quad \gamma \quad W_m = V_m * \rho_m$$

Donde:

W_m: peso de la mazarota

W_p: peso de la pieza

V_m: volumen de la mazarota

V_p: volumen de la pieza

ρ : densidad del material

Reemplazando se obtiene:

$$V_m \geq V_p * \frac{S}{C}$$

6. Dimensiones del cuello

La siguiente relación permite hallar el módulo del cuello de la mazarota, y por medio de la Figura 20 se obtienen sus dimensiones.

$$M_p : M_c : M_m = 1 : 1.1 : 1.2$$

Donde:

M_p = modulo de la pieza

M_c = modulo del cuello

M_m = modulo de la mazarota

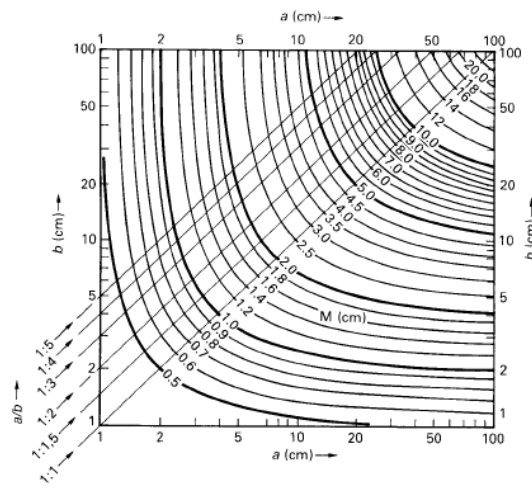


Figura 20. Dimensiones del cuello.
Tomada de Foseco (Brown, 1999).

A) Pasos para el cálculo del sistema de llenado

Para diseñar el sistema de llenado se debe encontrar el área del bebedero, del canal y del ataque, indicados en la Figura 21 como a_C , a_R y a_G , respectivamente.

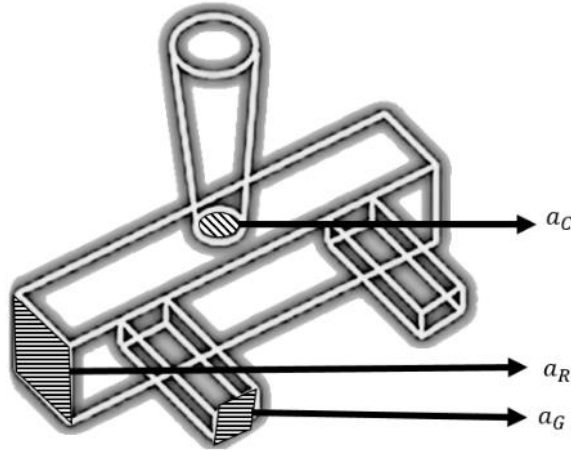


Figura 21. Sistema de llenado
Adaptado de Manufacturing Technology (P. N. Rao, 2009).

1. Tiempo de llenado

Como cada material posee diferentes propiedades, las ecuaciones del tiempo de llenado son diferentes para cada uno. A continuación, se presenta la fórmula para calcular el tiempo de llenado para aleaciones de aluminio (RAO, 2009), el cual es el material a usar en este proyecto.

$$t = k * \sqrt{W_t} \quad \text{y} \quad W_t = \frac{V_{total} * \rho_s}{Y}$$

Donde:

t: tiempo de llenado

k = 8; para aleaciones de aluminio

W_t: masa del vertedero

V_{total}: es la suma del volumen de la pieza más el de la mazarota

ρ_s: densidad del aluminio en estado sólido

Y: eficiencia del proceso

2. Dimensión del bebedero

El diámetro del bebedero se obtiene de la formula $A = \pi * \frac{D^2}{4}$, y el área se halla a partir de la siguiente ecuación.

$$A_c = \frac{W_t}{C * \rho_L * t * \sqrt{2 * g * H}}$$

Donde:

A_c = área del bebedero

C = factor de eficiencia; normalmente de 0.8

ρ_L = densidad del aluminio en estado líquido

t = tiempo de llenado

g = gravedad

H = altura del caja superior

3. Dimensión del canal y los ataque

Como se mencionó anteriormente el material seleccionado es el aluminio, por lo tanto, la relación recomendada es.

Para sistemas presurizados:

$$A_C:A_R:A_G = 1:2:1$$

Para sistemas despresurizados:

$$A_C:A_R:A_G = 1:3:3$$

Donde:

A_C = área inferior del beedero

A_R = área del canal

A_G = área de ataque

1.3.3. Control de calidad

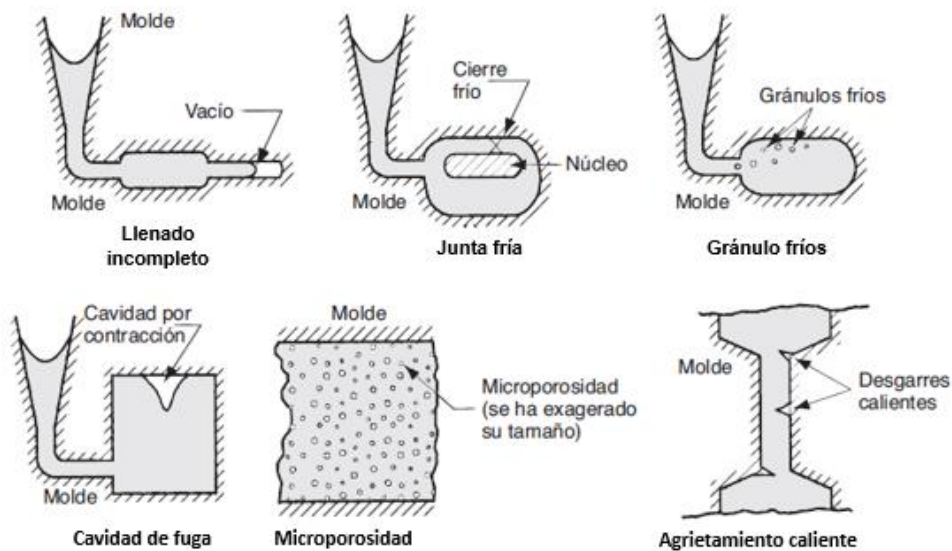
Con el fin de determinar si una pieza cumple con el estándar, primero se realiza una inspección visual para detallar las características de las discontinuidades observadas y establecer sus posibles causas. De acuerdo con la aplicación, algunas discontinuidades generan variaciones en la pieza que no afectan su funcionamiento, pero cuando este se ve comprometido estas discontinuidades reciben el nombre de defectos y la pieza es rechazada.

A) Clasificación de las discontinuidades

Las discontinuidades más comunes en todos los procesos de fundición según Groover (2010) y la AFS (2008) son:

- Llenado incompleto: cuando la pieza se solidifica antes de llenar toda la cavidad del molde. Esto puede ser causado por un mal diseño en los canales del sistema de alimentación y llenado, realizando estos tan delgados que se comienzan a solidificar, impidiendo que el material continúe su trayectoria. Otra causa es la temperatura a la cual se vierte el metal, cuando esta es muy baja el material comienza su proceso de solidificación antes de lo esperado y, adicionalmente, gana viscosidad, es decir, pierde la capacidad de fluir.
- Junta fría: es una costura, que se observa en la pieza, donde dos flujos de material se han unido, pero no se han fundido. Esto ocurre cuando en los flujos de material, aun cuando la cavidad se está llenado, el proceso de solidificación tiene un progreso significativo. Las causas más comunes son, un mal diseño del sistema de llenado, poco espesor de los canales, temperatura del metal al momento de ser vertido, entre otras.
- Gránulos fríos: este ocurre al realizar un mal vertido del metal causando la formación de pequeños sólidos, los cuales quedan atrapados en el material fundido.

- Cavitación por contracción: esta discontinuidad es comúnmente conocida como rechufe, ocurre cuando el metal se contrae al solidificarse y genera una depresión en la superficie del sólido. Las mazarotas o sistema de alimentación son la solución a este problema.
- Microporosidad: pequeñas cavidades de aire generadas alrededor o en el interior de la pieza, como consecuencia de pequeñas explosiones por la alta temperatura del gas.
- Desgarramiento caliente: cuando el molde no permite que la pieza, ya solidificada, se contraiga, se generan zonas de falla por donde la fundición se agrieta por poca colapsabilidad del molde.
- Proyecciones metálicas: este tipo de discontinuidades se presentan cuando en el molde se generan superficies discontinuas o grietas que permiten la entrada de material, por lo tanto, se crean proyecciones de material en la superficie del componente.
- Dimensiones incorrectas.



*Figura 22. Discontinuidades del proceso.
Adaptada de Fundamentos de Manufactura Moderna (Groover, 2007)*

De acuerdo a Groover (2010) y a la AFS (2008), cada tipo de proceso tiene sus respectivas discontinuidades, las asociadas a la fundición en arena son:

- Sopladura y agujeros de pasador: la baja permeabilidad del molde ocasiona que los gases generados durante el proceso no puedan escapar del molde, en consecuencia, este gas forma una cavidad, en la mayoría de los casos, en la superficie de la pieza. Esta cavidad de gas también se manifiesta cuando la humedad del molde es muy alta, ya que la temperatura con la que se vierte el

metal hace que el agua se evapore y satura el molde de aire caliente. La diferencia entre sopladura y agujeros de pasador es el tamaño de la cavidad como se observa en la Figura 23.

- Lavado de arena: un mal vertido es una de las causas de la erosión de un molde de arena, esta se manifiesta como una irregularidad en la superficie de la pieza.
- Incrustaciones o inclusiones: son rugosidades en la superficie de la pieza debido al desprendimiento de arena durante la solidificación de la pieza.
- Penetración: cuando la velocidad a la que fluye el metal es muy alta, este destruye la parte del molde impactada. La superficie defectuosa contiene una mezcla del metal y arena.
- Desplazamiento del molde: hace referencia a una mala alineación del molde, generando un movimiento lateral entre el molde superior y el molde inferior.
- Agrietamiento del molde: cuando la resistencia del molde es baja, se genera una grieta, la cual es un nuevo camino para el metal fundido.

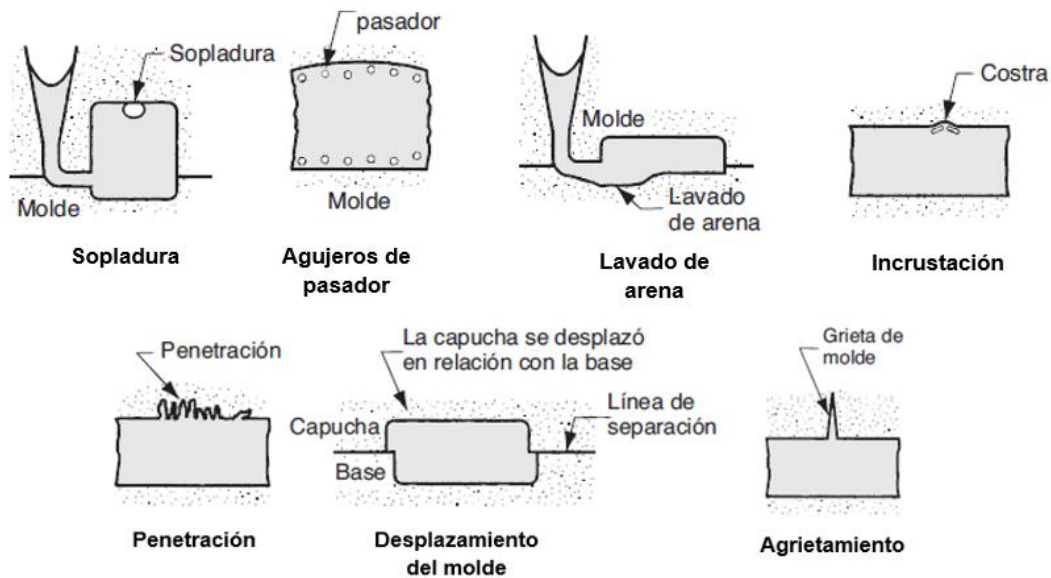


Figura 23. Discontinuidades del proceso
Adaptada de Fundamentos de Manufactura Moderna (Groover, 2007)

2. METODOLOGÍA

Objetivo específico 1: Establecer los factores de diseño que afectan el cálculo de los sistemas de llenado y alimentación.

1. Revisión bibliográfica en libros como *Directional Solidification for Steel Castings*, *ASM HandBook*, *Manufacturing Engineering and Technology*, *Feeding & Riser Guidelines*, y artículos de investigación, que hablen de conceptos teóricos, cálculos matemáticos, métodos de diseño y nuevos avances sobre sistemas de llenado y alimentación.
2. Hallar las dimensiones, mediante los métodos descritos en el numeral “Cálculos asociados a los fenómenos del proceso”, de mazarotas y áreas (bebedero, canales, ataques, unión mazarota-pieza) de los sistemas de llenado y alimentación de los componentes seleccionados.

Objetivo específico 2: Obtener los componentes fundidos, empleando resultados de las metodologías de cálculos de sistemas de llenado y alimentación, para su posterior evaluación.

1. Fabricar los modelos permanentes, ya sean mediante impresión 3D o en madera, de los componentes a fundir en arena, recordando los factores de diseño descritos en el numeral B al realizar la geometría de estos.
2. Realizar, en el laboratorio de fundición de la Universidad Nacional, los moldes percederos en arena, compactando alrededor del modelo y empleado los cálculos obtenidos del sistema de alimentación y llenado.
3. Fundir el aluminio que se va a emplear, por medio de un horno de crisol. Vaciarlo en el molde a través del embudo, con el fin de obtener los componentes a evaluar.

Objetivo específico 3: Evaluar la calidad de los elementos fundidos empleando criterios de aceptación previamente establecidos.

1. Revisar los estándares de Groover y la AFS (American Foundry Society) sobre la clasificación de las discontinuidades obtenidas en los procesos de fundición.
2. Establecer los criterios de aceptación de acuerdo a la aplicación o funcionalidad final que tendrá cada componente.
3. Identificar los END más favorables para la práctica, como tintas penetrantes, aplicarlos en los componentes obtenidos y valorar la calidad de estos.
4. Evaluar los resultados obtenidos de la inspección realizada

3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 Cálculos de los sistemas de alimentación y llenado

En este numeral se diseñarán los sistemas de dos componentes, iniciando con los del catapiz de la Figura 24, y luego los de la polea de la Figura 25. La geometría de este último componente se tomó del “SISCALCO” (Jorge Osorio Z., 1989), buscando verificar los resultados del método y los cálculos presentados.

Se presentan para cada componente los cálculos previamente presentados: módulos, específicamente el resumen de los módulos y el orden de solidificación de las secciones, dimensiones de los elementos que componen el sistema de alimentación, diámetro y altura de la mazarota, los componentes del sistema de llenado, diámetro o longitud del bebedero, canal y ataque, tanto por el “SISCALCO” como primer método, como por el “Non-Ferrous Foundryman’s” y “Manufacturing Technology” como segundo método.

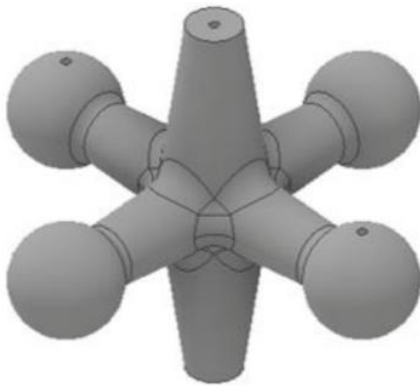


Figura 24. Catapiz en estado bruto.

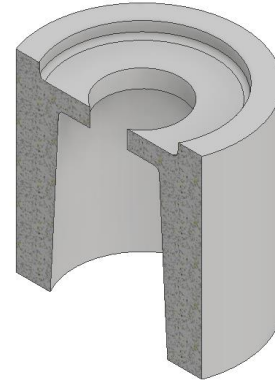


Figura 25. Polea en estado bruto.

Análisis del primer componente: Catapiz.

El siguiente numeral se compone de: cálculo de los módulos, cálculos del sistema de alimentación, y por último el de llenado.

Es importante aclarar que tanto para el sistema de llenado como para el de alimentación, se realizarán los cálculos por el método 1 y por el método 2, pero para el cálculo de los módulos solo se empleará un método ya que en el numeral Cálculos asociados a los fenómenos del proceso, el primer método, “SISCALCO” y el segundo método, “Non-Ferrous Foundryman’s” y “Manufacturing Technology”, emplean los mismos pasos.

1. Descomposición del catapiz en secciones

La pieza de la Figura 24 se descompuso en elementos simples como se observa en la siguiente figura. La sección A corresponde a un elemento esférico, B y C a elementos semejantes a cilindros y la sección D a un cubo.

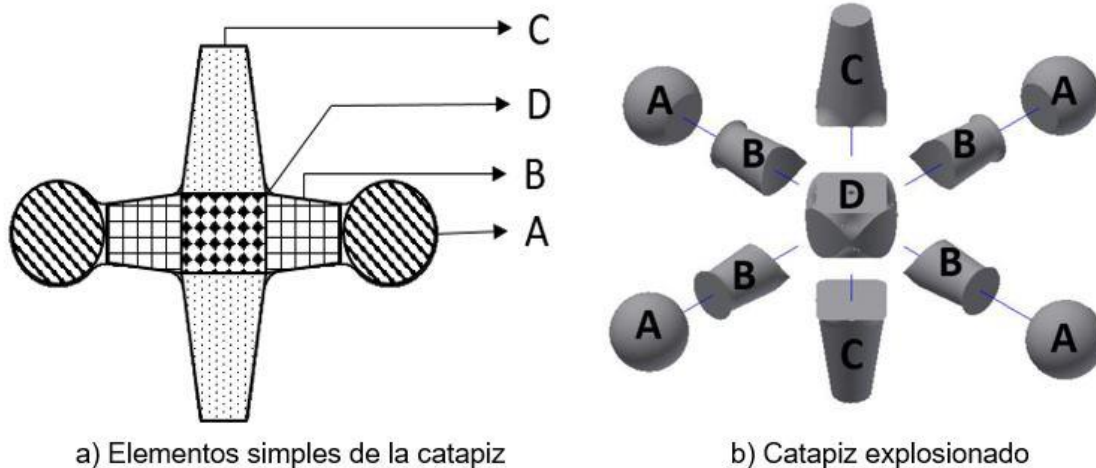


Figura 26. Catapiz descompuesto.

El siguiente paso es hallar el módulo de enfriamiento de cada sección, pero primero se debe conocer las secciones que son resultado de una unión. En la columna “Imagen de la sección”, de la Tabla 4, se observa una región de color rojo, correspondiente al área de la unión, mientras que la región gris corresponde al área de transferencia de calor. Por medio de software se halló el valor de estas áreas, las cuales fueron comparadas, como se indica en el marco teórico.

Tabla 4. Análisis de cada sección del catapiz

Sección	Elemento simple	Imagen se la sección	Área de la unión mm ²	Área de transferencia de calor mm ²	¿Es resultado de una unión?
A	Esfera		390,64	3.042,48	No
B	Cilindro		838,22	1.908,31	No
C	Cilindro		859,58	3.760,56	No
D	Cubro		3.508,49	1.191,50	Si

De la Tabla 4, se puede concluir que solo la sección D es resultado de una unión, lo que implica que su módulo no es un módulo geométrico sino que, como su nombre lo indica, es un módulo resultante de una unión. Una vez identificada la condición de cada sección, se procede a hallar el módulo de enfriamiento de cada una de ellas.

2. Determinación del módulo geométrico y de enfriamiento

Los cálculos del módulo geométrico de las secciones, se realizaron tanto por las ecuaciones de la Figura 8, las cuales se identificarán con el nombre de Formas, como por la fórmula descrita en el marco teórico, la cual establece que $M = \frac{V}{A_s}$, siendo V el volumen de la pieza y A_s el área por donde la sección trasfiere calor. Este último método recibe el nombre de CAD, ya que, estos valores se obtuvieron por medio de software. A continuación, se describirá como se hallaron los valores de los módulos geométricos de cada elemento, exceptuando el de la sección D.

- Sección A

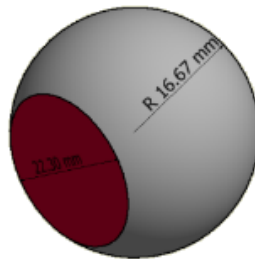


Figura 27. Sección A del catapiz.

Por Forma:

De acuerdo a la Figura 8, la ecuación del módulo para una esfera que toda su superficie trasfiere calor es $M = \frac{D}{6}$, pero como hay un 5% de la pieza que no trasfiere calor, el módulo de la sección A está descrito por la siguiente ecuación:

$$(M_g)_A = \frac{D}{5,7}$$

Donde:

D : diámetro = 33,34 mm

Por lo tanto,

Por CAD:

Para hallar el módulo geométrico se necesita conocer dos valores de la sección A con el fin de reemplazarlos en la siguiente fórmula.

$$(M_g)_A = \frac{V}{A_s}$$

Donde:

V : volumen = 18.515,56 mm³

A_s : área de transferencia de calor = 3.042,48 mm²

Por lo tanto,

$$(M_g)_A = \frac{33,34 \text{ mm}}{5,7} = 5,85 \text{ mm}$$

$$(M_g)_A = \frac{18.515,56 \text{ mm}^3}{3.042,48 \text{ mm}^2} = 6,09 \text{ mm}$$

- Sección B

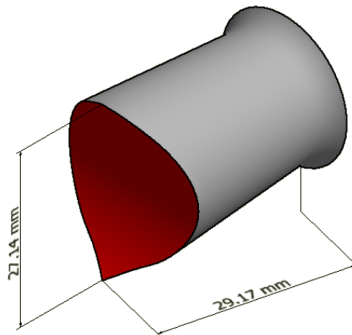


Figura 28. Sección B del catapuz.

Por Forma:

La ecuación para un cilindro, de acuerdo a la Figura 8, es $M = \frac{DH}{2D+4H}$, pero los dos extremos son uniones, por lo tanto la ecuación sería:

$$(M_g)_B = \frac{DH}{4H}$$

Donde:

D : diámetro = 24,72 mm

H : altura = 29,17 mm

Por lo tanto,

$$(M_g)_B = 6,18 \text{ mm}$$

- Sección C

Por CAD:

Para hallar el módulo geométrico se necesita conocer dos valores de la sección B con el fin de reemplazarlos en la siguiente fórmula.

$$(M_g)_B = \frac{V}{A_s}$$

Donde:

$V = 9.232,65 \text{ mm}^3$

$A_s = 1.908,31 \text{ mm}^2$

Por lo tanto,

$$(M_g)_B = 4,48 \text{ mm}$$

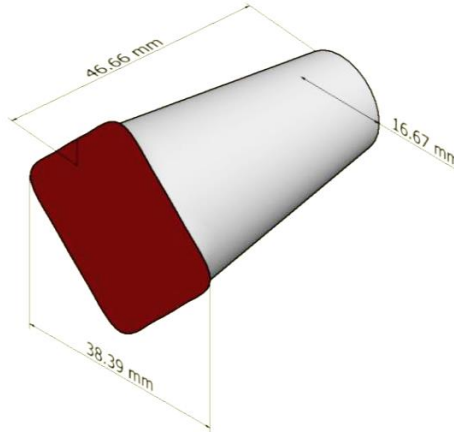


Figura 29. Sección C del catapiz.

Por Forma:

Al igual que en la sección anterior, el módulo geométrico está dado por la siguiente ecuación:

$$(M_g)_C = \frac{DH}{4H}$$

Donde:

$$D = 27,53 \text{ mm}$$

$$H = 46,66 \text{ mm}$$

Por lo tanto,

$$(M_g)_C = 6,88 \text{ mm}$$

Por CAD:

Para hallar el módulo geométrico de la sección C, la fórmula es:

$$(M_g)_B = \frac{V}{A_s}$$

Donde:

$$V = 20.629.33 \text{ mm}^3$$

$$A_s = 3.760,56 \text{ mm}^2$$

Por lo tanto,

$$(M_g)_C = 5,49 \text{ mm}$$

De los cálculos realizados se puede observar como, por cada sección, el módulo hallado por Formas diverge del valor del módulo hallado por CAD. Esto puede ser un factor crítico en el diseño de los sistemas, es decir, como se demostrará a continuación, la ubicación del sistema de llenado por Formas es en la sección A, mientras que por CAD es en la sección B. Por lo tanto, no se seleccionará uno de los dos valores, sino que se continuará realizando los cálculos con ambos.

En la siguiente tabla se observa un resumen de los cálculos realizados, adicionalmente se muestra el módulo de enfriamiento de cada elemento, excluyendo la sección D. Tanto el módulo geométrico hallado por Formas como por CAD es multiplicado por su respectivo coeficiente de forma, ver Figura 8, para hallar el módulo de enfriamiento.

Tabla 5. Módulos de enfriamiento del catapiz.

Sección	Módulo geométrico mm		Coeficiente de forma	Módulo de enfriamiento mm	
	Forma	CAD		Forma	CAD
A	5,85	6,09	0,72	4,21	4,56
B	6,18	4,84	0,75	4,64	3,63
C	6,88	5,49	0,75	5,16	4,11

3. Determinación de los módulos resultantes de las uniones

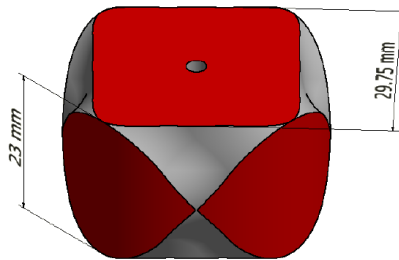


Figura 30. Sección D del catapiz.

Como se evidencio en la Tabla 4, solo la sección D es resultado de una unión, por lo tanto el módulo de enfriamiento de esta sección se halla de la siguiente forma:

Por Forma:

El módulo resultante de la unión (RU) de la sección D se halla por medio de la siguiente ecuación:

$$(M_e)_D = (M_e)_C * W$$

Donde:

$(M_e)_C$: módulo de enfriamiento de C = 5,16 mm

W: coeficiente corrector de forma por union

Para hallar este coeficiente de forma de la Figura 10, es necesario hallar la siguiente relación e identificar el tipo de unión, en este caso es en cruz (+).

$$\frac{(M_e)_C}{(M_e)_B}$$

Por CAD:

Al igual que en el cálculo anterior el módulo es:

$$(M_{RU})_D = (M_e)_C * W$$

Pero para hallar la siguiente relación, $\frac{(M_e)_C}{(M_e)_B}$, se tiene que:

$$(M_e)_B = 3,63$$

$$(M_e)_C = 4,11$$

Por lo tanto,

$$\frac{(M_e)_C}{(M_e)_B} = 1,13$$

Con el valor hallado cruzándolo con la línea de unión en cruz, ver Figura 10, el coeficiente de forma

Donde:
 $(M_e)_B = 4,64$
 $(M_e)_C = 5,16$

para uniones es 1,4. En esta caso el módulo de enfriamiento de la sección D es:

Por lo tanto,
 $\frac{(M_e)_C}{(M_e)_B} = 1,11$

$$(M_e)_D = 7,68 \text{ mm}$$

Al cruzar este valor de 1,11 con la línea de unión en cruz, el coeficiente de forma resultante es: $W = 1,4$. De lo anterior:

$$(M_e)_D = 9,64 \text{ mm}$$

Una vez hallado módulo de enfriamiento de todas las secciones, ver Tabla 6, se puede conocer el orden en el que se solidificara cada sección. De lo anterior se puede concluir que, por Formas la primera sección en solidificarse es la A y la última es la D, mientras que, por CAD, la primera en solidificarse es la sección B y D sigue siendo la última.

Tabla 6. Orden de solidificación de las secciones del catapiz.

Sección	Módulo de enfriamiento mm	
	Formas	CAD
A	4,21	4,56
B	4,64	3,63
C	5,16	4,11
D	9,64	7,68

A. Dimensiones del sistema de alimentación (mazarota)

Antes de hallar por ambos métodos las dimensiones de la mazarota, es importante explicar algunas consideraciones que se tuvieron en cuenta. Como se puede observar en la parte de “Cálculos asociados a los fenómenos del proceso”, el módulo de la mazarota, para ambos métodos, se halla a partir del mayor módulo de enfriamiento de la Tabla 6, con el fin de encontrar las medidas de la mazarota para que alimente correctamente la última sección en solidificarse. Tanto por Formas como por CAD el último elemento en solidificarse es la sección D. Al observar la geometría de esta sección, se puede ver que el acceso de herramientas es complejo, lo que nos lleva a concluir que la mazarota debe ser reubicada en un lugar donde las herramientas de corte o pulido puedan acceder fácilmente para su posterior remoción sin deteriorar la pieza, pero sin que el sistema pierda eficiencia.

En la Figura 24 se observa que las secciones A y C son de fácil acceso, pero si el sistema de alimentación se ubica encima del elemento C, el radio de acción de la mazarota será mejor que ubicarlo en el elemento A, es decir, suponiendo que el radio de acción para este componente es de 180 mm y viendo la Figura 31, la circunferencia tiene una ubicación más central en el caso a) que en el caso b), esto implica una mejor distribución del material. Por lo tanto, se plantea que la ubicación de la mazarota debe ser tal que alimente la sección C.

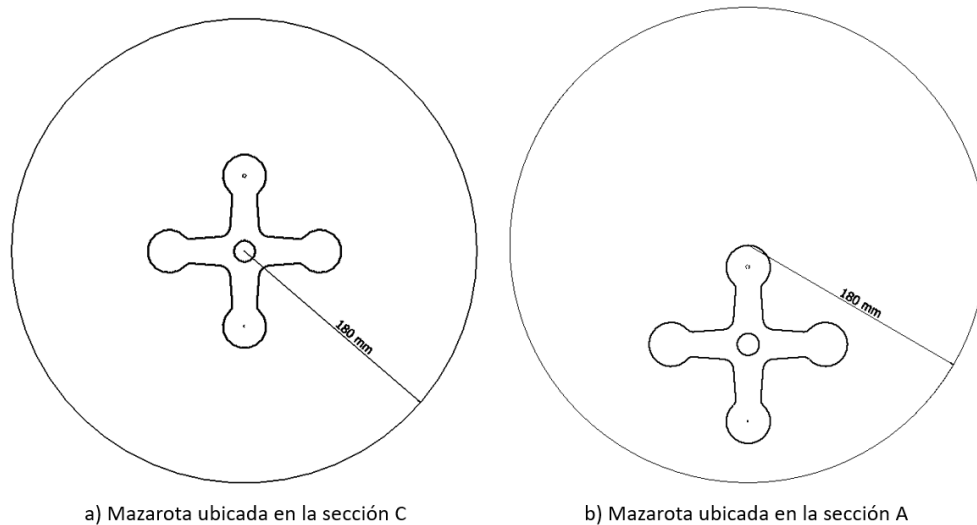


Figura 31. Comparación del radio de acción.

Teniendo claro que, lo único que cambiará en el desarrollo es la ubicación de la mazarota, se procederá a hallar las dimensiones de esta.

i. Método 1 – “SISCALCO”

Por Formas:

De acuerdo a los pasos del SISCALCO, una vez identificado el módulo de la última sección en solidificarse, se aplican las tres reglas del mazarotado.

Regla del módulo de enfriamiento

$$M_m = 1.2 * M_p$$

Donde:

M_p : módulo de la última sección en solidificarse = 0,96 cm

Por lo tanto,

Por CAD:

Regla del módulo de enfriamiento

$$M_m = 1.2 * M_p$$

Donde:

M_p : módulo de la última sección en solidificarse = 0,77 cm

Por lo tanto,

$$M_m = 0,92 \text{ cm}$$

De las ecuaciones de la Gráfica 1, Gráfica 2 y Gráfica 3, se tiene que:

$$M_m = 1,16 \text{ cm}$$

Al conocer el módulo de la mazarota se obtienen los valores del diámetro, altura y volumen, gracias a las ecuaciones de las Gráfica 1 a Gráfica 3, respectivamente.

Por lo tanto,

$$D_m = -0,43 * M_m^2 + 48,35 * M_m - 1,22$$

$$D_m = 54,1 \text{ mm}$$

$$H_m = -0,033 * M_m^2 + 69,94 * M_m - 0,095$$

$$H_m = 81,1 \text{ mm}$$

$$V_m = \pi * \left(\frac{D_m}{2}\right)^2 * H_m$$

$$V_m = 186.500 \text{ mm}^3 = 186,5 \text{ cm}^3$$

Regla del radio de acción

Para hallar el radio de acción, ver Figura 15, es necesario conocer el valor del espesor de placa equivalente, por medio de la siguiente ecuación:

$$e = 2 * M_p = 20 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el radio de acción es aproximadamente 180 mm, lo cual indica que la mazarota tiene la capacidad de alimentar toda la pieza, ver Figura 32.

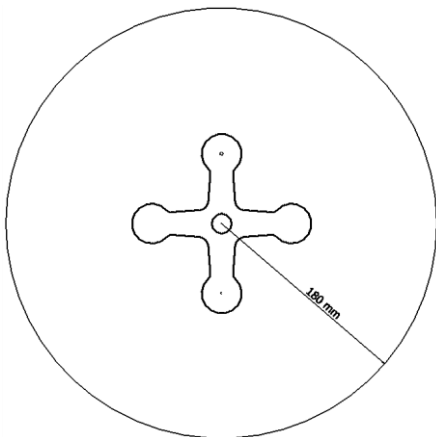


Figura 32. Radio de acción del catapiz, Formas.

Regla de las contracciones

$$D_m = -0,43 * M_m^2 + 48,35 * M_m - 1,22$$

$$D_m = 43 \text{ mm}$$

$$H_m = -0,033 * M_m^2 + 69,94 * M_m - 0,095$$

$$H_m = 64,7 \text{ mm}$$

$$V_m = \pi * \left(\frac{D_m}{2}\right)^2 * H_m$$

$$V_m = 93.900 \text{ mm}^3 = 93,9 \text{ cm}^3$$

Regla del radio de acción

El espesor de placa equivalente es:

$$e = 2 * M_p = 15 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el radio de acción es aproximadamente 130 mm, lo cual indica que la mazarota tiene la capacidad de alimentar toda la pieza, ver Figura 33.

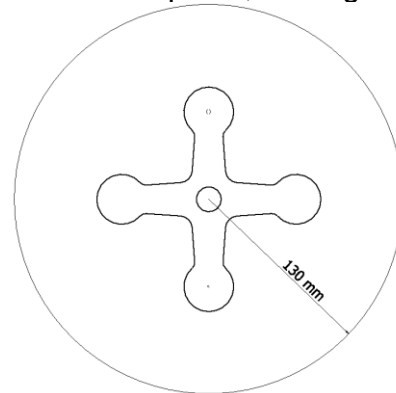


Figura 33. Radio de acción del catapiz, CAD.

Regla de las contracciones

El volumen contracción global es igual al hallado anteriormente, donde:

$$V_g = 73,72 \text{ cm}^3.$$

Al compararlo con el volumen de la mazarota, donde $V_m = 93,9 \text{ cm}^3$, se comprueba que la regla se cumple.

La siguiente ecuación permite hallar el volumen contracción global.

$$V_g = K' * R * V_p$$

Donde:

$$K' = 6$$

$$R = 7\%$$

$$V_p = 175,53 \text{ cm}^3$$

V_g : volumen de contracción global

Por lo tanto,

$$V_g = 73,72 \text{ cm}^3$$

Al compararlo con el volumen de la mazarota, donde $V_m = 186,5 \text{ cm}^3$, se evidencia que la regla se cumple.

ii. Método 2 – “Non-Ferrous Foundryman’s” (Brown, 1999).

Los cálculos del sistema de alimentación, diámetro y altura de la mazarota y dimensiones de la unión, se realizan nuevamente, empleando el método 2. Nuevamente los cálculos se realizarán tanto por Formas como por CAD, al igual que en el primer método.

Por Formas:

Al igual que en el primer método, el módulo de la mazarota por Formas es:

$$M_m = 1.2 * M_p = 11,56 \text{ mm}$$

Asumiendo que la geometría de la mazarota es cilíndrica, reemplazamos $H = 1.5 * D$ en la siguiente ecuación:

$$M_m = \frac{D * H}{2 * D + 4 * H} = \frac{1,5}{8} D$$

Conociendo el módulo de la mazarota, se puede obtener el valor del diámetro, la altura y el volumen.

Por CAD:

El módulo de la mazarota por CAD es:

$$M_m = 1.2 * M_p = 9,22 \text{ mm}$$

A partir de la ecuación simplificada anteriormente tenemos las siguientes mediadas del diámetro, altura y volumen de la mazarota.

$$D_m = 49,15 \text{ mm}$$

$$H_m = 73,73 \text{ mm}$$

$$V_m = 139.900 \text{ mm}^3 = 139,90 \text{ cm}^3$$

Comprobación de dimensiones

$$D_m = \frac{M_m}{0,1875}$$

$$D_m = 61,67 \text{ mm}$$

$$H_m = 1,5D$$

$$H_m = 92,50 \text{ mm}$$

$$V_m = \pi * \frac{D_m}{2} * H_m$$

$$V_m = 276.280 \text{ mm}^3 = 276,28 \text{ cm}^3$$

Comprobación de dimensiones

De la siguiente ecuación,

$$V_m \geq V_p * \frac{S}{C}$$

Tenemos que:

$$V_m = 276,28 \text{ cm}^3$$

$$V_p = 175,53 \text{ cm}^3$$

$$S = 8\%$$

$$C = 12\%$$

Por lo tanto,

$$276,28 \text{ cm}^3 \geq 117,02 \text{ cm}^3$$

Al cumplirse la desigualdad se concluye las dimensiones son adecuadas.

A partir de los cálculos realizados, se obtuvo la Tabla 7, en la cual se encuentran las medidas de las cuatro posibles mazarotas.

Tabla 7. Resumen de las dimensiones de las mazarotas para el catapiz.

	Formas		CAD	
	Diámetro mm	Altura mm	Diámetro mm	Altura mm
Método 1	54,1	81,1	43	64,7
Método 2	61,67	92,5	49,15	73,73

B. Dimensiones del sistema de llenado

i. Método 1 – “SISCALCO” (Jorge Osorio Z., 1989).

Las dimensiones del sistema de llenado para el catapiz, se hallaron por medio de los pasos descritos a continuación. Como se ha venido trabajando en los cálculos

De la desigualdad realizada anteriormente lo único que varía es el volumen de la mazarota:

$$V_m = 139,90 \text{ cm}^3 .$$

Por lo tanto:

$$139,90 \text{ cm}^3 \geq 117,02 \text{ cm}^3$$

En este caso la desigualdad también se cumple, por lo tanto, las dimensiones son correctas.

anteriores, del sistema de alimentación, las dimensiones del bebedero y los canales se realizarán por medio de Formas y CAD.

Por Formas:

Los datos que se deben conocer son

Volumen a llenar:

$$V_p = 175,53 \text{ cm}^3$$

Módulo de referencia:

De la Tabla 6, se puede ver que el menor módulo es,

$$M_{referencia} = 0,42 \text{ cm}$$

Escalonamiento:

De la Figura 16, el escalonamiento para aleaciones oxidables está dado por $1: \sqrt{H_i}: \sqrt{H_i}$, si H_i es 0,1 m se obtiene el siguiente escalonamiento.

$$1: 0,35: 0,35$$

Tiempo de llenado:

Cruzando el módulo de referencia de 0,42 cm con el tipo de la aleación, el tiempo de vaciado es, de acuerdo a la Figura 17.

$$t_v = 3,1 \text{ s}$$

Coefficiente de caudal:

Sabiendo que la altura de la tapa, de 4 in, es menor a 0,2 m y suponiendo que $S_d = 0,7 * S_a$, tenemos que el valor de B para dos ataques es 1,7.

Una vez conocidos los valores, se puede hallar las áreas del sistema.

Descenso de colada

Por medio de la siguiente ecuación se hallará el área del bebedero.

$$S_d = \frac{V_t}{t_v} * \frac{2B}{\sqrt{H_i} + \sqrt{H_f}} * \frac{1}{\sqrt{2g}}$$

Por CAD:

Para realizar estos cálculos, valores como el volumen a llenar, el escalonamiento y el coeficiente de caudal permanecen constantes, siendo estos, respectivamente:

Volumen a llenar:

$$V_p = 175,53 \text{ cm}^3$$

Escalonamiento:

$$1: 0,35: 0,35$$

Coefficiente de caudal:

$$B = 1,7$$

Los datos que se deben hallar nuevamente son:

Módulo de referencia:

$$M_{referencia} = 0,36 \text{ cm}$$

Tiempo de llenado:

De la Figura 17, cruzando el módulo de referencia de 0,36 cm con el tipo de la aleación, el tiempo de vaciado es.

$$t_v = 2,3 \text{ s}$$

Descenso

Para reemplazar en la siguiente ecuación, los datos de volumen de a pieza, H_i , H_f y la gravedad, permanecen constantes.

$$S_d = \frac{V_t}{t_v} * \frac{2B}{\sqrt{H_i} + \sqrt{H_f}} * \frac{1}{\sqrt{2g}}$$

Resolviendo la ecuación con los valores conocidos se obtiene que:

$$S_d = 1,7 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

Donde:

$$V_t = V_m + \frac{V_p}{2} = 3,51 * 10^{-4} m^3$$
$$H_f = 0,066 m$$
$$g = 9,81 \frac{m}{s}$$

Por lo tanto,

$$S_d = 1,9 * 10^{-4} m^2$$

Despejando el diámetro de la formula,

$S_d = \pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2$, tenemos que el diámetro del bebedero es:

$$D = 15,4 mm$$

Canal

Para hallar el área del canal, se multiplica el área del bebedero por el factor de escalonamiento, es decir:

$$S_c = 0,35 * 1,9 * 10^{-4} m^2$$
$$S_c = 6,6 * 10^{-5} m^2$$

Asumiendo que el canal tiene una geometría cuadrada, la medida de cada lado es:

$$L_c = 8,11 mm$$

Ataques

De la misma forma que en el canal, el área del bebedero se debe multiplicar por el factor de escalonamiento y así hallar el área del ataque.

$$S_a = 0,35 * 1,9 * 10^{-4} m^2$$
$$S_a = 6,6 * 10^{-5} m^2$$

En este caso la geometría del ataque es rectangular, donde el ancho es cuatro veces la altura y como se espera tener

Donde:

$$D = 14,9 mm$$

Canal

El área de la sección del canal está dada por la siguiente ecuación:

$$S_c = 0,35 * 1,7 * 10^{-4} m^2$$
$$S_c = 6,2 * 10^{-5} m^2$$

Por lo tanto, para un cuadrado:

$$L_c = 7,85 mm$$

Ataque

Al igual que el paso anterior,

$$S_a = 6,2 * 10^{-5} m^2$$

Donde, asumiendo que la sección es rectangular, siendo el ancho cuatro veces la altura y un solo ataque, tenemos que la distancia es la siguiente.

$$L_a = 5,6 mm$$

dos canales de ataque, la ecuación para hallar el valor de la distancia es:

$$S_a = 2 * (4 * L_a^2)$$

Despejando L_a , tenemos que.

$$L_a = 2,9 \text{ mm}$$

ii. Método 2 – “Manufacturing Technology”.

Por Formas:

Con el fin de hallar las dimensiones del canal y ataque, se escogió una relación de colada de 1:3:3. Pero antes de hallar el área del bebedero se debe encontrar el tiempo de llenado por medio de la ecuación:

$$t = k * \sqrt{W_t} \text{ y } W_t = \frac{V_{total} * \rho_s}{Y}$$

Para resolver la ecuación es necesario conocer los siguientes datos.

$$k = 8$$

$$V_{total} = V_p + V_m = 4,52 * 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$\rho_s = 2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$Y = 0,7$$

Por lo tanto,

$$W_t = 1,74 \text{ kg}$$

$$t = 10,56 \text{ s}$$

Área del bebedero.

$$A_c = \frac{W_t}{C * \rho_L * t * \sqrt{2 * g * H}}$$

Donde:

$$C = 0,8$$

$$\rho_L = 2375 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$H = 0,10 \text{ m}$$

Por lo tanto,

$$A_c = 5,5 * 10^{-5} \text{ m}^2$$

Por CAD:

Para estos cálculos la relación de colada es igual a la establecida anteriormente, 1:3:3. Para hallar el tiempo, tenemos que

$$t = k * \sqrt{W_t} \text{ y } W_t = \frac{V_{total} * \rho_s}{Y}$$

Donde:

$$k = 8$$

$$V_{total} = V_p + V_m = 3,98 * 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$\rho_s = 2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$Y = 0,7$$

Por lo tanto,

$$W_t = 1,53 \text{ kg}$$

$$t = 9,91 \text{ s}$$

Área del bebedero

$$A_c = \frac{W_t}{C * \rho_L * t * \sqrt{2 * g * H}}$$

Los valores de las variables C, la densidad del aluminio en estado líquido y altura permanecen constantes a las establecidas anteriormente, por lo tanto.

$$A_c = 5,2 * 10^{-5} \text{ m}^2$$

Para un bebedero de sección circunferencial, el diámetro es:

$$D = 8,1 \text{ mm}$$

Asumiendo que el área de la sección del bebedero, el diámetro es:

$$D = 8,4 \text{ mm}$$

Área del canal

Para hallar el área del canal, se multiplica el área del bebedero por el factor de la relación de colada, es decir:

$$A_R = 3 * 5,5 * 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$A_R = 1,7 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

Asumiendo que el canal tiene una geometría cuadrada, la medida de cada lado es:

$$L_R = 12,90 \text{ mm}$$

Área del ataque

De la misma forma que en el canal, el área del bebedero se debe multiplicar por el factor de la relación de colada y así hallar el área del ataque.

$$A_G = 3 * 5,5 * 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$A_G = 1,7 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

La geometría del ataque es rectangular, donde el ancho es cuatro veces la altura, por lo tanto, el valor de esta distancia es:

$$L_G = 4,6 \text{ mm}$$

Área del canal

De acuerdo a lo establecido en la relación de colada, el área del canal es:

$$A_R = 3 * 5,2 * 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$A_R = 1,6 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

Por lo tanto, para una sección cuadrada, la medida del lado será.

$$L_R = 12,49 \text{ mm}$$

Área del ataque

Por medio de la formula,

$$A_G = 3 * 5,2 * 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$A_G = 1,6 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

Donde el lado del rectángulo es:

$$L_G = 4,4 \text{ mm}$$

En la Tabla 8 se encuentra un resumen de las dimensiones halladas, tanto para el bebedero como para el canal y el ataque. Es importante aclarar que aunque las dimensiones por Formas son muy similares a las halladas por CAD, las medidas halladas por Formas buscan llenar por la sección A mientras que las halladas por CAD buscan llenar por la sección B, ver Tabla 6.

Tabla 8. Resumen dimensiones del sistema de llenado del catapiz.

	Diámetro bebedero mm		Lado del canal mm		Lado del ataque mm	
	Formas	CAD	Formas	CAD	Formas	CAD
Método 1	15,4	14,9	8,11	7,85	2,9	2,9
Método 2	8,4	8,1	12,9	12,49	4,6	4,4

Análisis del segundo componente: polea.

Al igual que en Análisis del primer componente: Catapiz., este numeral se compone básicamente de: cálculo de los módulos, luego del sistema de alimentación y por último el de llenado, en donde por cada sistema primero se empleó el primer método y luego el segundo.

1. Descomposición de la polea en secciones

La siguiente figura muestra la descomposición de la Figura 25 en elementos simples. La sección A corresponde a una barra infinita, B y C a una placa infinita, y la sección D a otra barra infinita.

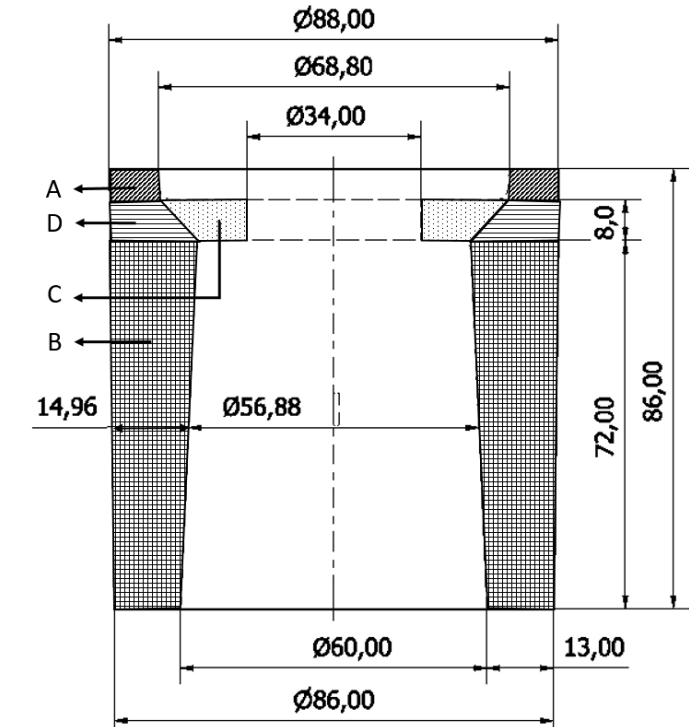



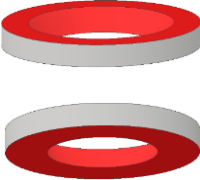


Figura 34. Dimensiones y descomposición de la polea en elementos simples.

Con el fin de hallar el módulo de enfriamiento de cada sección, primero identifiqué que elemento es resultado de una unión. Como se observa en la Tabla 9, solo la sección D cumple con esta característica.

Tabla 9. Análisis de cada sección de la polea.

Sección	Elemento simple	Imagen se la sección	Área de la unión mm ²	Área de transferencia de calor mm ²	¿Es resultado de una unión?
A	Barra infinita		2.841,9	4.916,4	No

Sección	Elemento simple	Imagen se la sección	Área de la unión mm ²	Área de transferencia de calor mm ²	¿Es resultado de una unión?
B	Placa infinita		35.697,7	41.363,6	No
C	Placa infinita		1.930,8	4.224,6	No
D	Barra infinita		8.881,6	2.211,7	Si

2. Determinación del módulo geométrico y de enfriamiento

Al igual que en los cálculos del catapiz, el módulo geométrico de las secciones de la polea se hallaron tanto por las ecuaciones de la Figura 8, las cuales se identificarán con el nombre de Formas, como por la fórmula descrita en el marco teórico, $M = \frac{V}{A_s}$, identificando este método como CAD.

A continuación, se describe como se hallaron los valores de los módulos geométricos de cada elemento, exceptuando el de la sección D.

- Sección A



Figura 35. Sección A de la polea.

Por Forma:

De acuerdo a la Figura 8, la ecuación del módulo para una barra infinita, teniendo en cuenta que tiene una unión, es:

$$(M_g)_A = \frac{TW}{W + 2T}$$

Por CAD:

Para hallar el módulo geométrico se necesita conocer dos valores de la sección A con el fin de reemplazarlos en la siguiente fórmula.

Donde:

T : altura = 6 mm

W : ancho = 9,6 mm

Por lo tanto,

$$(M_g)_A = 2,7 \text{ mm}$$

$$(M_g)_A = \frac{V}{A_s}$$

Donde:

V : volumen = 14.611,6 mm³

A_s : área de transferencia de calor = 4.916,4 mm²

Por lo tanto,

$$(M_g)_A = 3 \text{ mm}$$

- Sección B

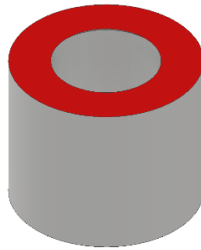


Figura 36. Sección B de la polea.

Por Forma:

La ecuación para una placa infinita, de acuerdo a la Figura 8, es:

$$(M_g)_B = \frac{T}{2}$$

Donde:

T : altura = 15 mm

Por lo tanto,

$$(M_g)_B = 7,5 \text{ mm}$$

Por CAD:

Para hallar el módulo geométrico se necesita conocer dos valores de la sección B con el fin de reemplazarlos en la siguiente fórmula.

$$(M_g)_B = \frac{V}{A_s}$$

Donde:

$V = 255.408,5 \text{ mm}^3$

$A_s = 41.363,6 \text{ mm}^2$

Por lo tanto,

$$(M_g)_B = 6,17 \text{ mm}$$

- Sección C

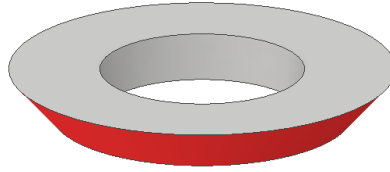


Figura 37. Sección C de la polea.

Por Forma:

Al igual que en la sección anterior, el módulo geométrico está dado por la siguiente ecuación:

$$(M_g)_C = \frac{T}{2}$$

Donde:

$$T = 8 \text{ mm}$$

Por lo tanto,

$$(M_g)_C = 4 \text{ mm}$$

Por CAD:

Para hallar el módulo geométrico de la sección C, la fórmula es:

$$(M_g)_B = \frac{V}{A_s}$$

Donde:

$$V = 13.261,8 \text{ mm}^3$$

$$A_s = 4.224,6 \text{ mm}^2$$

Por lo tanto,

$$(M_g)_C = 3.14 \text{ mm}$$

Del mismo modo que en el análisis del catapiz, el módulo hallado por Formas no es completamente igual al hallado por CAD, pero en este caso, esta diferencia no afecta drásticamente el diseño de los sistemas, ver Tabla 10, ya que el orden en el que se solidifican las secciones no varía, es decir, de acuerdo a los cálculos, el primer elemento en solidificarse, para ambos casos, es la sección A, y el último en solidificarse es la sección B. Debido a esto, se decidió trabajar solo con los datos obtenidos por CAD.

En la Tabla 10 se observa un resumen de los cálculos realizados, adicionalmente se muestra el módulo de enfriamiento de cada elemento, excluyendo la sección D.

Tabla 10. Módulos de enfriamiento de la polea.

Sección	Módulo geométrico mm		Coeficiente de forma	Módulo de enfriamiento mm
	Forma	CAD		CAD
A	2,7	3,0	0,85	2,55
B	7,5	6,17	0,95	5,86
C	4,0	3,14	0,95	3,0

3. Determinación de los módulos resultantes de las uniones



Figura 38. Sección D de la polea.

Como se presentó en la Tabla 9, solo la sección D es resultado de una unión, por lo tanto el módulo de enfriamiento de esta sección se halla de la siguiente forma:

Por CAD:

El módulo resultante de la unión (RU) de la sección D se halla por medio de la siguiente ecuación:

$$(M_{RU})_D = (M_e)_B * W$$

Donde:

$(M_e)_C$: módulo de enfriamiento de $C = 6,4 \text{ mm}$

W : coeficiente corrector de forma por union

Para hallar este coeficiente de forma de la Figura 10, es necesario hallar la siguiente relación e identificar el tipo de unión, en este caso es en L.

$$\frac{(M_e)_C}{(M_e)_B}$$

Donde:

$$(M_e)_B = 6,4$$

$$(M_e)_C = 3,0$$

Por lo tanto,

$$\frac{(M_e)_C}{(M_e)_B} = 0,46$$

Al cruzar este valor de 0,46 con la línea de unión en L, el coeficiente de forma resultante es: $W = 0,65$. De lo anterior:

$$(M_e)_D = 4,16 \text{ mm}$$

Al hallar el módulo de enfriamiento de todas las secciones, ver Tabla 11, se puede conocer el orden en el que se solidificara cada sección. De lo anterior se puede concluir que, por CAD la primera sección en solidificarse es la sección C y la ultima en solidificarse en la sección B.

Tabla 11. Orden de solidificación de las secciones de la polea.

Sección	Módulo de enfriamiento mm
	CAD
A	2,55
B	5,86
C	3,0
D	4,16

A. Dimensiones del sistema de alimentación (mazarota)

Por medio de los datos de la Tabla 11 se hallaran las dimensiones de la mazarota, primero por el método 1, "SISCALCO", y luego por el método 2, "Non-Ferrous Foundryman's".

i. Método 1 – "SISCALCO" (Jorge Osorio Z., 1989).

Una vez establecido que los datos a emplear son los brindados por los cálculos de CAD, se procedió a calcular el diámetro, altura y unión del sistema de alimentación por medio se los pasos del primer método.

Por CAD:

De acuerdo a los pasos del SISCALCO, una vez identificado el módulo de la última sección en solidificarse, se aplican las tres reglas del mazarotado.

- Regla del módulo de enfriamiento

$$M_m = 1.2 * M_p$$

Donde:

$$M_p: \text{módulo de la ultima sección en solidificarse} = 0,59 \text{ cm}$$

Por lo tanto,

$$M_m = 0,71 \text{ cm}$$

Al conocer el módulo de la mazarota se puede conocen los valores del diámetro, altura y volumen, gracias a las ecuaciones de las Gráfica 1 a Gráfica 3, respectivamente.

Por lo tanto,

$$D_m = 48,113 * M_m - 0,68$$

$$D_m = 33,5 \text{ mm}$$

$$H_m = 95,71 * M_m + 0,41$$

$$H_m = 68,4 \text{ mm}$$

$$V_m = \pi * \left(\frac{D_m}{2}\right)^2 * H_m$$

$$V_m = 60.289 \text{ mm}^3 = 60,3 \text{ cm}^3$$

- Regla del radio de acción

Para hallar el radio de acción, ver Figura 15, es necesario conocer el valor del espesor de placa equivalente, por medio de la siguiente ecuación:

$$e = 2 * M_p = 12 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el radio de acción es aproximadamente 115 mm, lo cual indica que la mazarota tiene la capacidad de alimentar toda la pieza, ver Figura 39.

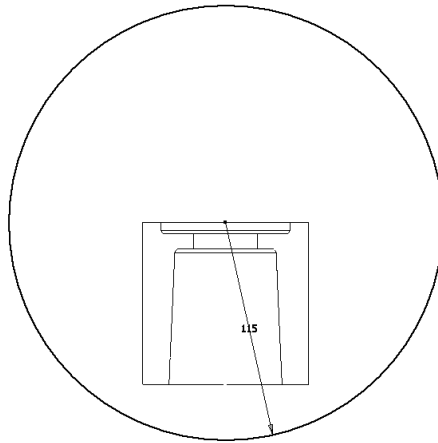


Figura 39. Radio de acción de la polea, CAD.

- Regla de las contracciones

La siguiente ecuación permite hallar el volumen de contracción global.

$$V_g = K' * R * V_p$$

Donde:

$$K' = 6$$

$$R = 7\%$$

$$V_p = 311,4 \text{ cm}^3$$

V_g : volumen de contracción global

Por lo tanto,

$$V_g = 130,8 \text{ cm}^3$$

Al compararlo con el volumen de la mazarota, donde $V_m = 60,3 \text{ cm}^3$, se puede ver que la regla no se cumple, lo que quiere decir que el volumen de una mazarota no satisface las necesidades de la pieza, lo cual lleva a plantear el uso de dos mazarotas, para un volumen total de:

$$V_{mt} = V_m * 2 = 120,6 \text{ cm}^3$$

Donde:

V_{mt} : sumatoria del volumen de las mazarotas

V_m : volumen de la mazarota

Este volumen total de las mazarotas tampoco cumple la regla de las contracciones ya que este volumen es menor al volumen de contracción total. Con el fin de cumplir la desigualdad, se puede pensar en un cambio en las dimensiones de la mazarota, en este caso se aumentará el diámetro como se observa a continuación, mientras la altura permanece constante.

$$D_m = 35 \text{ mm}$$

$$H_m = 68,4 \text{ mm}$$

$$V_m = 65.808 \text{ mm}^3 = 66 \text{ cm}^3$$

Si realizamos el mismo planteamiento anterior, de considerar dos mazarotas en el sistema, la regla de la contracción se cumple:

$$V_{mt} = V_m * 2 = 132 \text{ cm}^3 > V_g = 120,6 \text{ cm}^3$$

ii. Método 2 – “Non-Ferrous Foundryman’s”

Al igual que en el primer método, por medio de los cálculos hallados por CAD, se calcularon las medidas del sistema de alimentación, empleando el segundo método como se describe a continuación.

Por CAD:

Al igual que en el primer método, el módulo de la mazarota por CAD es:

$$M_m = 1.2 * M_p = 7,1 \text{ mm}$$

Asumiendo que la geometría de la mazarota es cilíndrica, reemplazamos $H = 1.5 * D$ en la siguiente ecuación:

$$M_m = \frac{D * H}{2 * D + 4 * H} = \frac{1,5}{8} D$$

Conociendo el módulo de la mazarota, se puede obtener el valor del diámetro, la altura y el volumen.

$$D_m = \frac{M_m}{0,1875}$$

$$D_m = 37,9 \text{ mm}$$

$$H_m = 1,5D$$

$$H_m = 56,8 \text{ mm}$$

$$V_m = \pi * \left(\frac{D_m}{2}\right)^2 * H_m$$

$$V_m = 64.079 \text{ mm}^3 = 64 \text{ cm}^3$$

- Comprobación de dimensiones

De la siguiente ecuación,

$$V_m \geq V_p * \frac{S}{C}$$

Tenemos que:

$$V_m = 64 \text{ cm}^3$$

$$V_p = 331,4 \text{ cm}^3$$

$$S = 8\%$$

$$C = 12\%$$

Por lo tanto,

$$64 \text{ cm}^3 > 221 \text{ cm}^3$$

Como se puede observar la desigualdad no se cumple, por lo tanto, se puede concluir que el sistema necesita tener dos mazarotas, es decir:

$$V_{mt} = V_m * 2 = 128 \text{ cm}^3$$

Donde:

V_{mt} : sumatoria del volumen de las mazarotas

V_m : volumen de la mazarota

Pero aun con dos mazarotas, la desigualdad no se cumple, lo que implica un cambio en las dimensiones de la mazarota, al igual que en el método anterior. En este caso solo se modificará el diámetro, mientras que la dimensión de la altura permanecerá contante.

$$D_m = 50 \text{ mm}$$

$$H_m = 56,8 \text{ mm}$$

$$V_m = 111.527 \text{ mm}^3 = 111,5 \text{ cm}^3$$

Por lo tanto, la desigualdad para dos mazarotas con esta nueva dimensión se cumple, como se observa a continuación.

$$V_{mt} = V_m * 2 = 223 \text{ cm}^3 > 221 \text{ cm}^3$$

De los cálculos realizados se obtuvieron las siguientes medidas para dos mazarotas, ver Tabla 12.

Tabla 12. Resumen de las dimensiones de las mazarotas para la polea.

	CAD	
	Diámetro mm	Altura mm
Método 1	35	68,4
Método 2	50	57

B. Dimensiones del sistema de llenado

Empleando la información de la Tabla 10 y las dimensiones del componente, se desarrollaron los dos métodos.

i. Método 1 – “SISCALCO”

Por medio de los pasos brindados por el “SISCALCO” se encontraron las dimensiones del área del bebedero y los canales de llenado del sistema.

Por CAD:

Los datos que se empleados son

- Volumen a llenar:

$$V_p = 311,4 \text{ cm}^3$$

- Módulo de referencia:

De la Tabla 11, se puede ver que el menor módulo es, de acuerdo a la Figura 17.

$$M_{referencia} = 0,25 \text{ cm}$$

- Escalonamiento:

De la Figura 16, el escalonamiento para aleaciones oxidables está dado por $1:\sqrt{H_i}:\sqrt{H_i}$, si H_i es 0,1 m se obtiene el siguiente escalonamiento.

$$1: 0,35: 0,35$$

- Tiempo de llenado:

Cruzando el módulo de referencia de 0,25 cm con el tipo de la aleación, el tiempo de vaciado es, de acuerdo a la Figura 17.

$$t_v = 3,5 \text{ s}$$

- Coeficiente de caudal:

Sabiendo que la altura de la tapa, de 4 in, es menor a 0,2 m y suponiendo que $S_d = 0,8 * S_a$, tenemos que el valor de B para dos ataques es 1,6.

Una vez conocidos los valores, se puede hallar las áreas del sistema.

1. Descenso de colada

Por medio de las siguientes ecuaciones se hallará el área del bebedero.

$$H = \frac{\sqrt{H_i} + \sqrt{H_f}}{2}$$

Donde:

$$H_i = 0,1 \text{ m}$$

$$H_f = 0,015 \text{ m}$$

Por lo tanto, $H=0,219 \text{ m}$

$$S_d = \frac{V_b * B}{t_v * \sqrt{H} * \sqrt{2g}}$$

Donde:

$$V_b = V_p = 3,11 * 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Por lo tanto,

$$S_d = 6,9 * 10^{-5} \text{ m}^2$$

Despejando el diámetro de la fórmula, $S_d = \pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2$, tenemos que el diámetro del bebedero es:

$$D = 9,3 \text{ mm}$$

2. Canal

Para hallar el área del canal, se multiplica el área del bebedero por el factor de escalonamiento, es decir:

$$S_c = 0,35 * 6,9 * 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$S_c = 2,4 * 10^{-5} \text{ m}^2$$

Asumiendo que el canal tiene una geometría cuadrada, la medida de cada lado es:

$$L_c = 5 \text{ mm}$$

3. Ataques

De la misma forma que en el canal, el área del bebedero se debe multiplicar por el factor de escalonamiento y así hallar el área del ataque.

$$S_a = 0,35 * 6,9 * 10^{-5} m^2$$

$$S_a = 2,4 * 10^{-5} m^2$$

En este caso la geometría del ataque es rectangular, donde el ancho es cuatro veces la altura y se asumirá un solo canal de ataque. Por lo tanto, el valor de esta distancia es:

$$L_a = 2,5 mm$$

ii. Método 2 – “Manufacturing Technology”.

Por medio de los pasos del segundo método, se hallarán nuevamente las dimensiones del sistema de llenado, como se observa a continuación.

Con el fin de hallar las dimensiones del canal y ataque, se escogió una relación de colada de 1: 3: 3. Pero antes de hallar el área del bebedero se debe encontrar el tiempo de llenado por medio de la ecuación:

$$t = k * \sqrt{W_t} \quad y \quad W_t = \frac{V_{total} * \rho_s}{Y}$$

Para resolver la ecuación es necesario conocer los siguientes datos.

$$k = 8$$

$$V_{total} = V_p + V_m = 3,11 * 10^{-4} + 2,23 * 10^{-4} m^3 = 5,34 * 10^{-4} m^3$$

$$\rho_s = 2700 \frac{kg}{m^3}$$

$$Y = 0,7$$

Por lo tanto,

$$W_t = 2 kg$$

$$t = 11,3 s$$

4. Área del bebedero.

$$A_c = \frac{W_t}{C * \rho_L * t * \sqrt{2 * g * H}}$$

Donde:

$$C = 0,8$$

$$\rho_L = 2375 \frac{kg}{m^3}$$

$$g = 9,81 \frac{m}{s^2}$$

$$H = 0,10 m$$

Por lo tanto,

$$A_c = 6,5 * 10^{-5} m^2$$

Asumiendo que el área de la sección del bebedero es circular, el diámetro es:

$$D = 9,2 mm$$

5. Área del canal

Para hallar el área del canal, se multiplica el área del bebedero por el factor de la relación de colada, es decir:

$$A_R = 3 * 6,5 * 10^{-5} m^2$$

$$A_R = 1,95 * 10^{-4} m^2$$

Asumiendo que el canal tiene una geometría cuadrada, la medida de cada lado es:

$$L_R = 14 mm$$

6. Área del ataque

De la misma forma que en el canal, el área del bebedero se debe multiplicar por el factor de la relación de colada y así hallar el área del ataque.

$$A_G = 3 * 6,5 * 10^{-5} m^2$$

$$A_G = 1,95 * 10^{-4} m^2$$

La geometría del ataque es rectangular, donde el ancho es cuatro veces la altura, por lo tanto, el valor de esta distancia es:

$$L_G = 7 mm$$

En la Tabla 13 encuentra un resumen de las dimensiones halladas, tanto para el bebedero como para el canal y el ataque.

Tabla 13. Resumen dimensiones del sistema de llenado de la polea.

	Diámetro bebedero mm	Lado del canal mm	Lado del ataque mm
	CAD	CAD	CAD
Método 1	9,3	5	2,5
Método 2	9,1	14	7

3.2 Discusión Resultados

En esta sección se analizarán los resultados obtenidos en cada componente, comenzando por el catapiz y finalizando con la polea.

A. Catapiz

Una vez realizados los cálculos de los sistemas de llenado y alimentación, se obtuvo el siguiente diseño para cada método, ver Figura 40 a Figura 43.

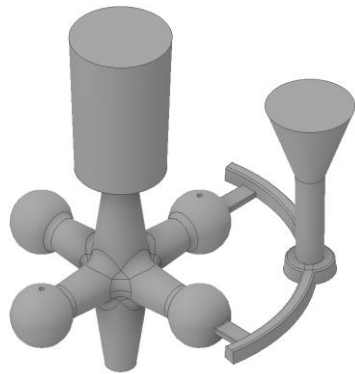


Figura 40. Método 1 – Formas, catapiz.

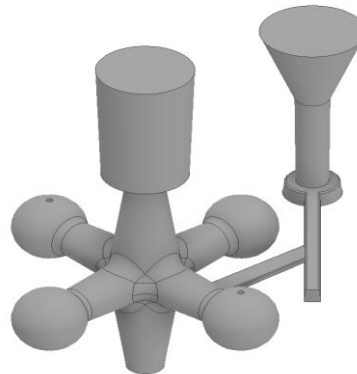


Figura 41. Método 1 – CAD, catapiz

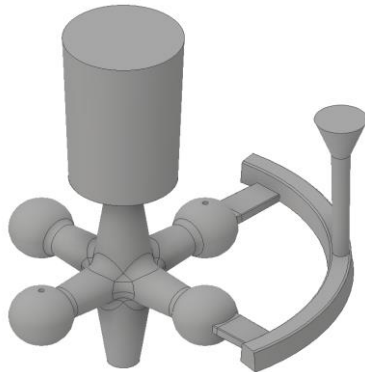


Figura 42. Método 2 – Formas, catapiz

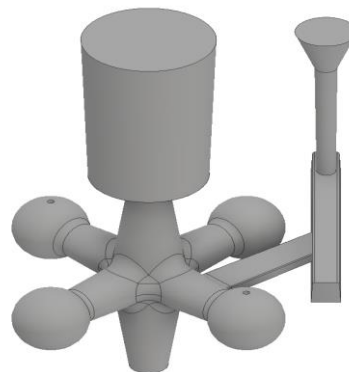


Figura 43. Método 2 – CAD, catapiz

Los resultados obtenidos mediante el análisis numérico se verificaron empleando el software *SolidCast*®, para su uso, en todas las simulaciones realizadas a continuación, se tuvo en cuenta que, al agregar las formas el componente tiene una prioridad uno, el sistema de alimentación una prioridad dos y el sistema de llenado una prioridad tres. Como material de fundición se seleccionó el Al 206, el cual tiene un punto de fusión de aproximadamente 650 °C, más un sobrecalentamiento de 100°C, supone una temperatura inicial del material de 750 °C. Y, por último, el material del molde fue Silica Sand. Como resultado de la simulación se analizó analizando la distribución de variables como la temperatura y el tiempo de solidificación, para corroborar el orden de solidificación calculado por ambos métodos, la densidad del material para identificar rechupes y puntos calientes.

1. Temperatura y tiempo

Una vez corrida la simulación se obtuvo la temperatura y el tiempo de solidificación del diseño como se observa en las Figura 44 a Figura 47. Como se puede ver en la

escala, el color amarillo indica la sección con mayor temperatura o la que requiere mayor tiempo para solidificarse, contrario al color azul.

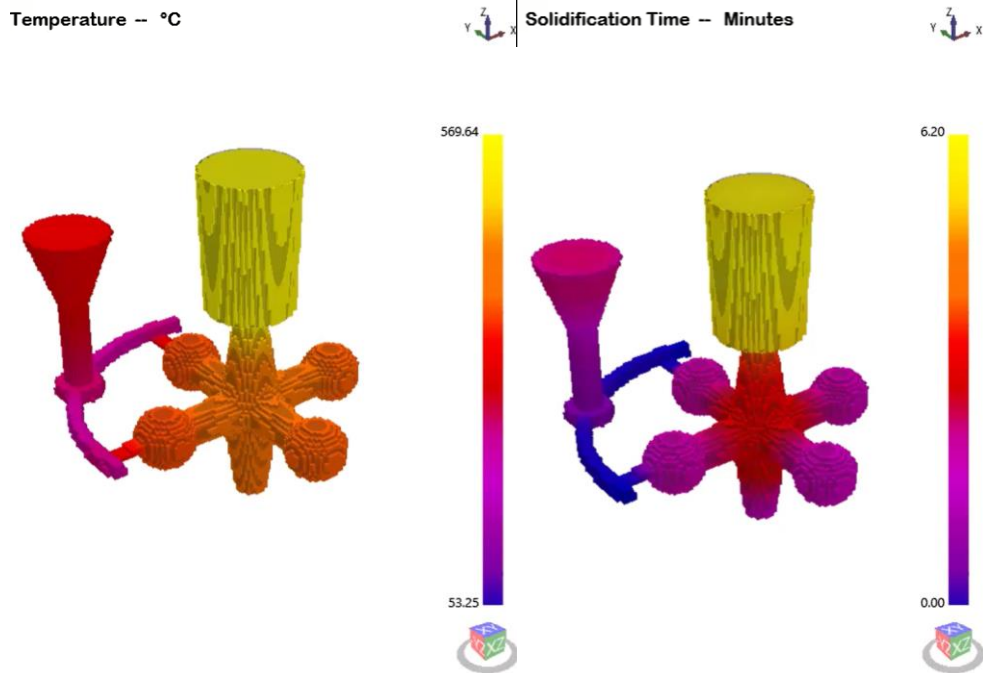


Figura 44. Temperatura y tiempo de solidificación del método 1 – Formas, catapiz

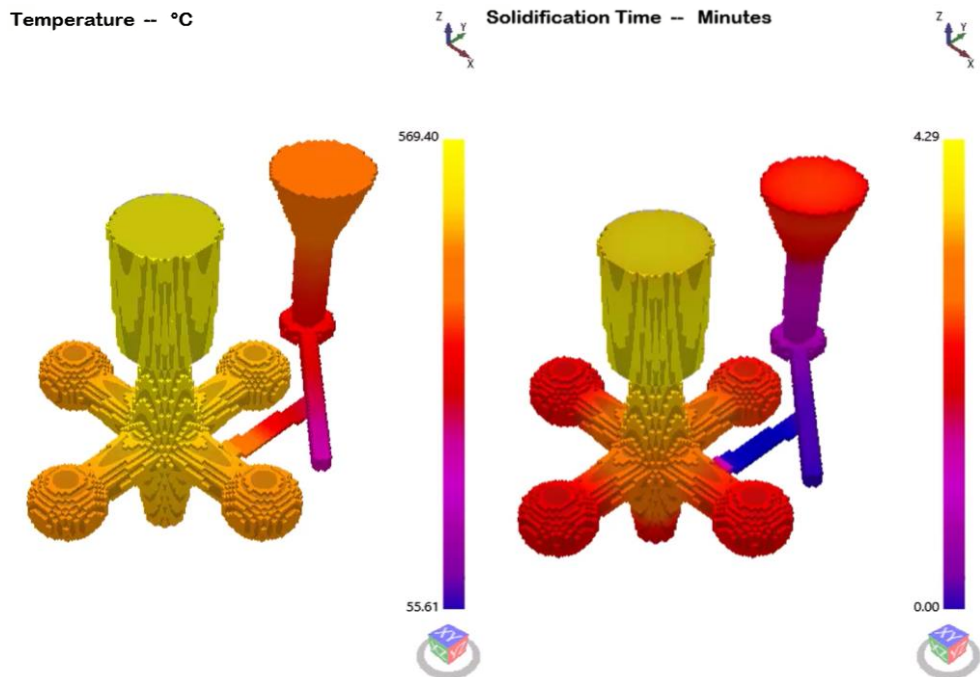


Figura 45. Temperatura y tiempo de solidificación del método 1 – CAD, catapiz

Comparando las simulaciones con el orden de solidificación del componente, ver Tabla 14, se observa que tanto en método 1 – Formas como el método 2 – Formas,

las simulaciones son consecuentes con el orden calculado, pero la sección C superior de ambos métodos está a mayor temperatura que la sección C inferior, ver Figura 29, esto se debe a la ubicación de la mazarota. Por el contrario, el orden de los métodos 1 – CAD y método 2 – CAD es diferente de los mostrados en la tabla, ya que, como se puede observar en las Figura 45 y Figura 47, en ambos casos, la sección de menor temperatura es la sección A, seguida de la B, C (inferior), D y C (superior), ver Tabla 4, y por último la mazarota.

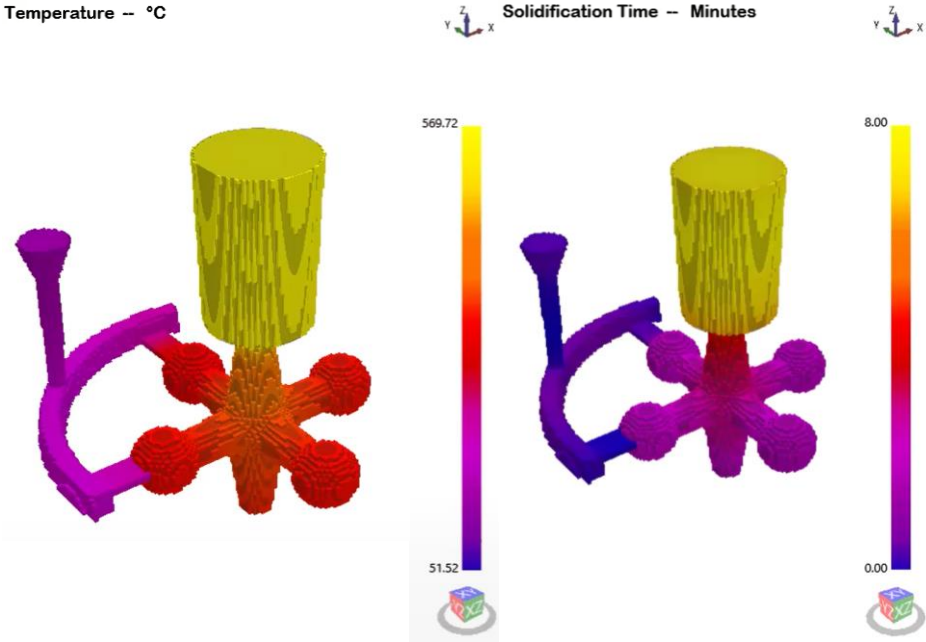


Figura 46. Temperatura y tiempo de solidificación del método 2 – Formas, catapiz

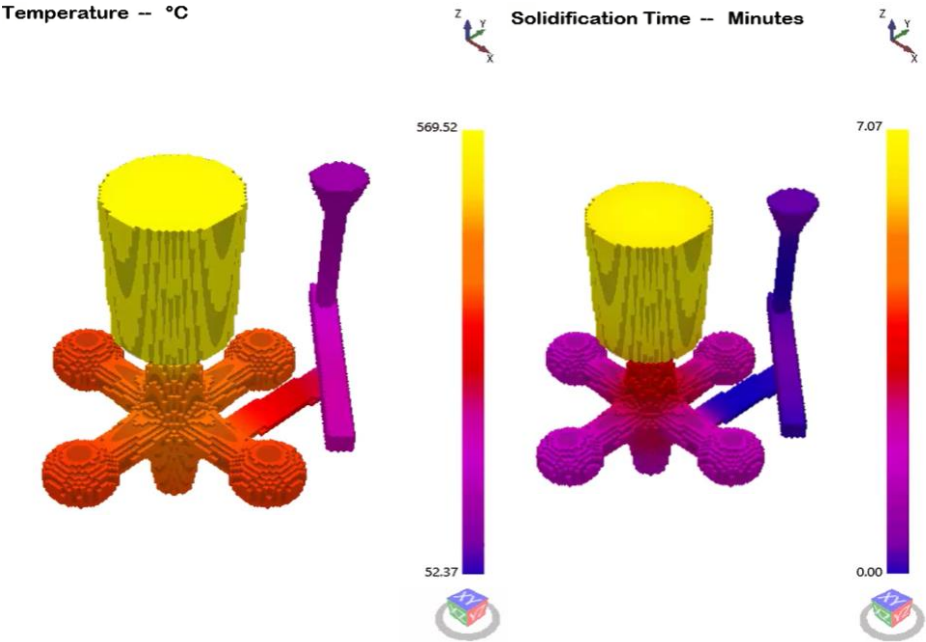


Figura 47. Temperatura y tiempo de solidificación del método 2 – CAD, catapiz

Tabla 14. Orden de solidificación del catapiz.

Orden	1	2	3	4
Método 1 – Formas	A	B	C	D
Método 1 – CAD	B	C	A	D
Método 2 – Formas	A	B	C	D
Método 2 - CAD	B	C	A	D

Se puede decir que el cambio en el orden de solidificación se debe a la presencia de la mazarota y del sistema de llenado, ya que estos no fueron tomados en cuenta al hallar los módulos de las secciones y por lo tanto dan una nueva dirección al orden en que se solidifican las secciones.

2. Densidad

Por medio de este resultado se puede observar si el tamaño y la ubicación de la mazarota es la deseada o si las dimensiones de los canales son las correctas, ya que de no ser así se obtendrían zonas, identificadas con amarillo, donde la densidad del material es menor que uno, lo que significa que el componente tendría algún tipo de cavidad, normalmente conocida como rechupe.

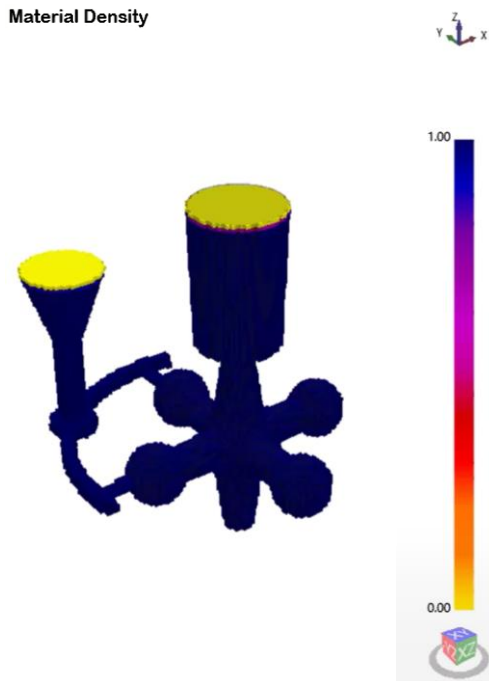


Figura 48. Densidad del material, método 1 – Formas, catapiz

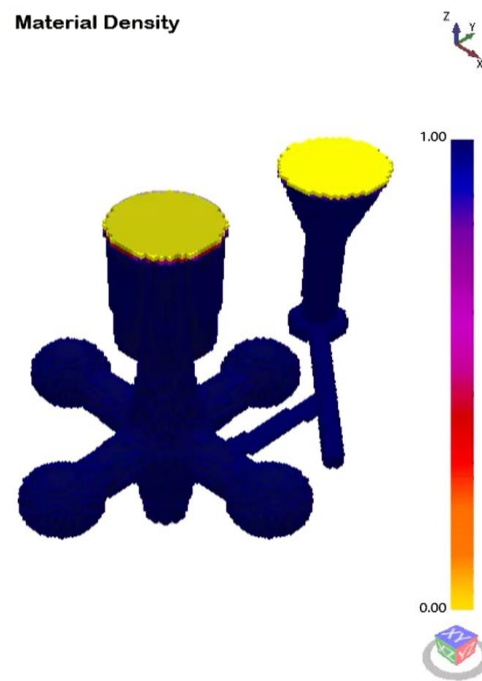


Figura 49. Densidad del material, método 1 – CAD, catapiz

En los resultados, ver Figura 48 a Figura 51, se puede observar que para los cuatro métodos los menores valores de densidad están localizadas en la parte superior del embudo y de la mazarota, esto es lo que normalmente se busca al diseñar los sistemas, es por esto que se puede decir que por medio de los cuatro métodos se obtendrán componentes si discontinuidades por rechupe o cavidad.

Adicionalmente, se puede observar, en los resultados de método 2 – Formas, en la unión entre el bebedero y el canal una disminución de densidad, pero esto no supone una discontinuidad ya que se trata del sistema de llenado y no del componente.

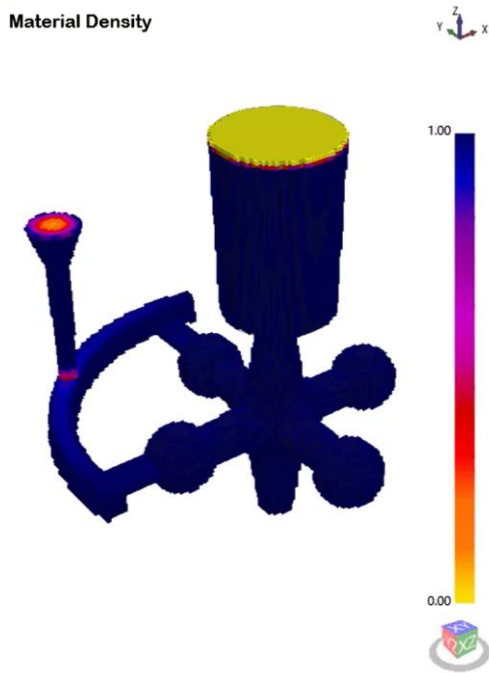


Figura 50. Densidad del material, método 2 – Formas, catapiz

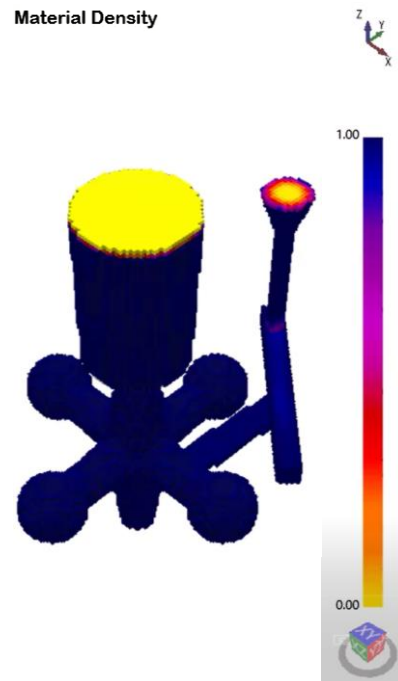


Figura 51. Densidad del material, método 2 – CAD, catapiz

Este análisis es de suma importancia ya que permite identificar las zonas donde el material sufrirá una mayor contracción y que por deficiencias en el diseño, ya sea en el volumen o la ubicación de la mazarota o en la sección de los canales, el sistema de alimentación no está realizando correctamente su función.

Como se puede observar, el análisis de esta simulación es de gran importancia ya que permite realizar cambios en el diseño, debido a observaciones de discontinuidades que podrían afectar la calidad del componente, antes de realizar la práctica de fundición, de la cual no se pueden realizar modificaciones.

3. Puntos calientes

El análisis de los puntos calientes o *hot spots*, permiten identificar los puntos o zonas donde el calor va a concentrarse, lo cual puede causar discontinuidades como proyecciones metálicas o rechupes (AFS, 2008).

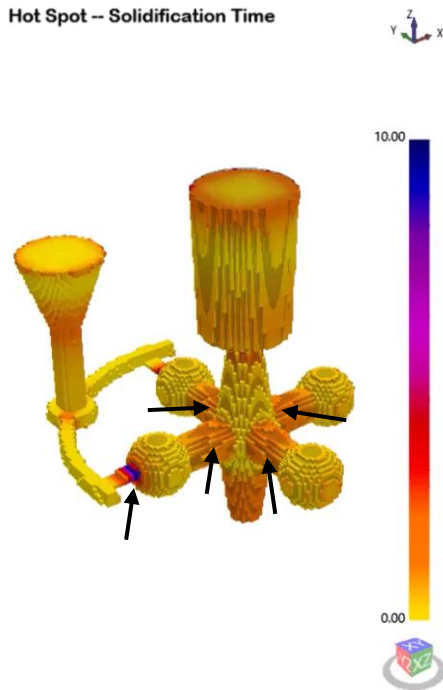


Figura 52. Hot Spot, método 1 – Formas, catapiz

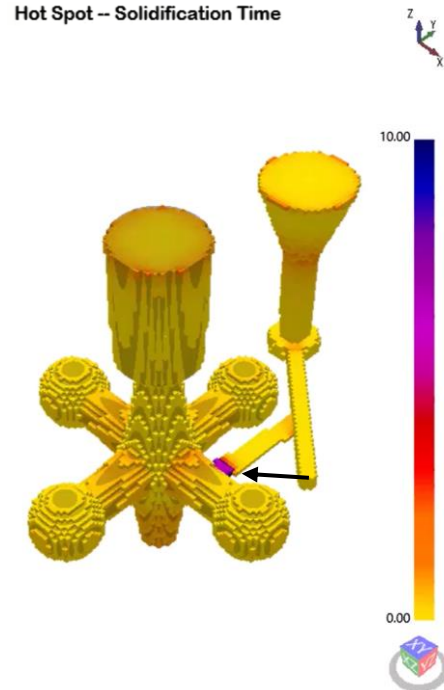


Figura 53. Hot Spot, método 1 – CAD, catapiz

De acuerdo a los resultados, ver Figura 52 aFigura 55, el método más crítico es el método 1 – Formas, donde se observa que la unión entre el componente y el sistema de llenado, es la de mayor concentración de temperatura y adicionalmente tienen presencia de puntos calientes en los brazos del componente, como se indica con las flechas en la Figura 52, seguido en criticidad por el método 2 – Formas.

De lo mencionado se puede observar que para obtener el mismo componente, el diseño del sistema de llenado de la Figura 52 yFigura 54 no es la más óptima ya que podría generar consecuencias indeseadas, mientras que en el diseño de la Figura 53 y Figura 55 no se observa este tipo de fenómeno, ver flechas.

Hot Spot -- Solidification Time

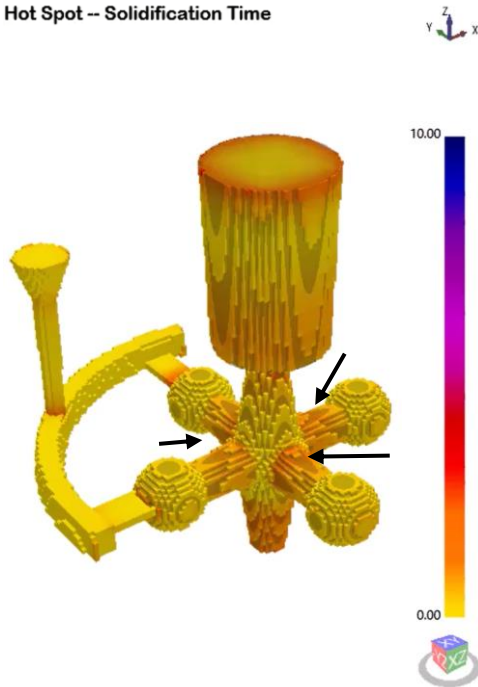


Figura 54. Hot Spot, método 2 – Formas, catapiz

Hot Spot -- Solidification Time

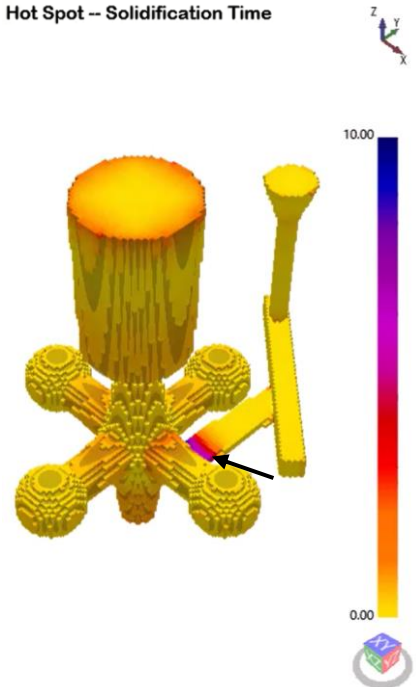


Figura 55. Hot Spot, método 2 – CAD, catapiz

4. Resultados de la práctica de fundición

Luego de realizar las simulaciones y observar que los sistemas calculados podrían estar bien diseñados, se procedió a realizar los modelos del componente y de los sistemas, como se puede ver de la Figura 56 aFigura 59. Mientras que el modelo del catapiz fue realizado en MDF, los otros modelos fueron impresos en 3D en ABS.



Figura 56. Modelo del componente y de los sistemas, método 1 – Formas, catapiz



Figura 57. Modelo del componente y de los sistemas, método 1 – CAD, catapiz

Una vez obtenido los modelos, se procedió a realizar los moldes de arena, comenzando por la tapa, como se observa en de la Figura 56 aFigura 59, en la cual se ubicaban correctamente los modelos para luego llenar de arena la caja, la cual debía ser correctamente apisonada con el fin de cumplir con ciertos indicadores de calidad mencionados en el marco teórico.



Figura 58. Modelo del componente y de los sistemas, método 2 – Formas, catapiz



Figura 59. Modelo del componente y de los sistemas, método 2 – CAD, catapiz

Luego de realizar tanto la tapa como la base del molde, Figura 60, se retiró los modelos y se limpió la cavidad que posteriormente fue llenada con metal fundido y del cual se llevó un registro de tiempo de llenado con el fin de compararlo con el tiempo hallado anteriormente.



Figura 60. Moldes en arena del catapult

Antes de clasificar los defectos y discontinuidades obtenidos es importante identificar la aplicación del componente, la cual en este caso es servir como figura decorativa y por lo tanto no está sometida a esfuerzos importantes.

- Método 1 – Formas

Como se puede observar en la Figura 61, los rechupes de la fundición están localizados en la parte superior del embudo y de la mazarota, este fenómeno concuerda con el simulado en la Figura 48 y no supone una discontinuidad para el componente.



Figura 61. Método 1 - Formas, resultado vista superior, escala 1:5, catapult

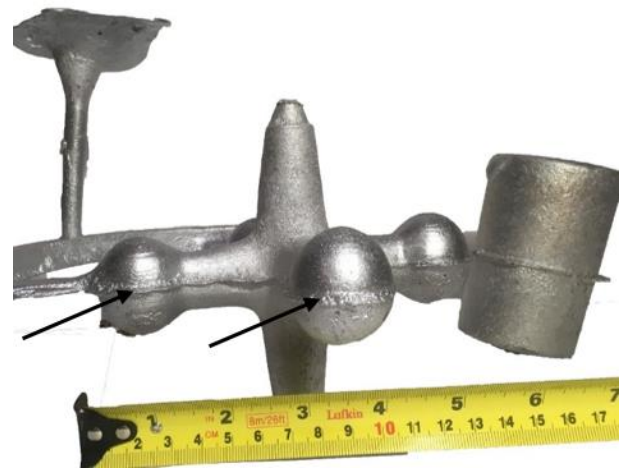


Figura 62. Método 1 - Formas, resultado vista frontal, escala 1:2.5, catapult

Las cavidades esférica o semiesféricas que se observan principalmente en la Figura 63 y Figura 64, son identificadas como poros o microporos y se podría clasificar como defecto, si el tamaño de estas cavidades es relativamente grande y afectar el acabado superficial que se desea dar un componente decorativo.

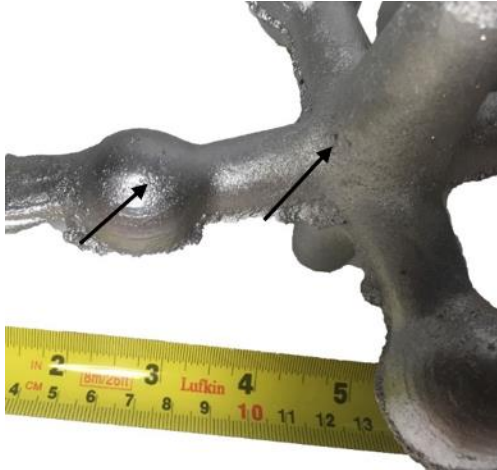


Figura 63. Método 1 - Formas, resultado vista superior, escala 1:2, catapiz

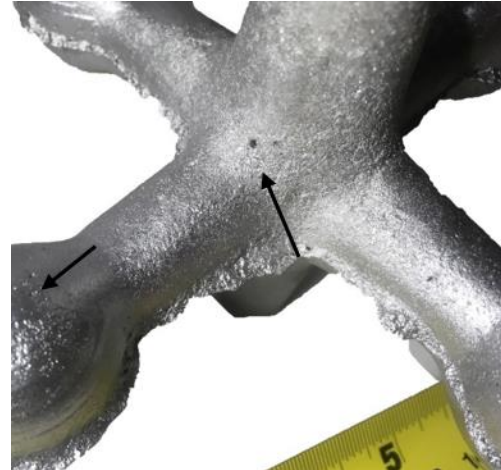


Figura 64. Método 1 - Formas, resultado vista superior, escala 1:1.7, catapiz

De la Figura 61 a la Figura 66 se observa justo en la mitad del componente proyecciones metálicas, esto puede deberse a que el proceso se realizó con un modelo partido y la alineación de la cavidad de parte superior con la inferior no fue la más precisa, o por el contrario puede ser consecuencia de los puntos calientes analizados en la Figura 52; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** En este caso esto supone solo una discontinuidad ya que esta proyección podría ser eliminada por medio de un proceso de pulido.



Figura 65. Método 1 - Formas, resultado vista frontal, escala 1:1.4, catapiz



Figura 66. Método 1 - Formas, resultado vista frontal, escala 1:1, catapiz

Por ultimo en la Figura 65 y Figura 66, se puede observar que la superficie inferior de la esfera no es tan lisa como la superior, esto se debe a un defecto por incrustaciones de arena en el componente, principalmente por un mal apisonado de la arena o una mala limpieza de las cavidades durante el proceso de moldeo.

- Método 1 – CAD

En las Figura 67 y Figura 68, se puede observar una depresión en la parte superior del embudo y la mazarota, gracias a su ubicación no representan un defecto para el componente. Pero como se ve en la Figura 69 hay presencia de pequeñas cavidades en la superficie del componente, esto puede ser un defecto , al igual que el método anterior, si se necesita un muy buen acabado superficial.



Figura 67. Método 1 - CAD, resultado vista frontal, escala 1:3.3, catapiz



Figura 68. Método 1 - CAD, resultado vista frontal, escala 1:3.3, catapiz



Figura 69. Método 1 - CAD, resultado vista superior, escala 1:2, catapiz

En comparación con el método anterior las proyecciones metálicas son mucho menores, esto puede ser consecuencia del proceso de fabricación del molde, siendo este muy manual y con poca precisión en la forma de apisonado de la arena, o por otro lado puede estar relacionado con el diseño del sistema de llenado como se concluyó en la simulación de puntos calientes, ver Figura 53. En este componente se observó un mejor acabado superficial, de lo cual se podría concluir que se realizó un buen proceso del moldeo, por lo tanto, la arena estaba lo suficientemente compactada y no tendió a desprenderse.

- Método 2 – Formas

Se puede decir que con respecto a los otros resultados, el componente tiene presencia de microporos pero en menor cantidad, Figura 71, y de las cuatro piezas es la que posee un mejor acabado superficial, ver Figura 70, esto puede ser el resultado de la baja temperatura con la cual la fundición comienza a solidificarse, ver Figura 46, ya que los gases del metal son evacuados con mayor facilidad sin saturar el molde de arena.



Figura 70. Método 2 - Formas, resultado vista frontal, escala 1:0.19, catapiz

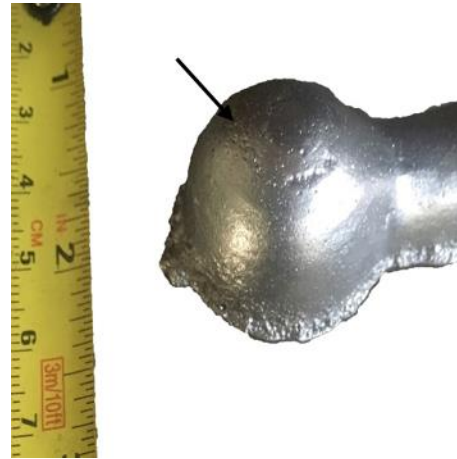


Figura 71. Método 2 - Formas, resultado vista superior, escala 1:0.07, catapiz

- Método 2 – CAD

Al igual que en los métodos ya analizados la Figura 72 y Figura 73 muestran presencia de rechupes en la mazarota y el embudo, las cuales no se consideran como defectos, pero los microporos observados en la Figura 74 y Figura 75 afectan la calidad del componente debido al tamaño de las cavidades.



Figura 72. Método 2 - CAD, resultado vista frontal, escala 1:3.3, catapiz



Figura 73. Método 2 - CAD, resultado vista superior, escala 1:5, catapiz

En la Figura 74 y Figura 75 también se puede observar proyecciones metálicas, siendo la primera mayor que la segunda a causa de un mal apisonado de la arena. En la última figura se puede observar como en la parte superior de la esfera hay un

defecto causado una incrustación, donde la arena no fue correctamente apisonada o removida de la cavidad.



Figura 74. Método 2 - CAD, resultado vista superior, escala 1:1.8, catapiz

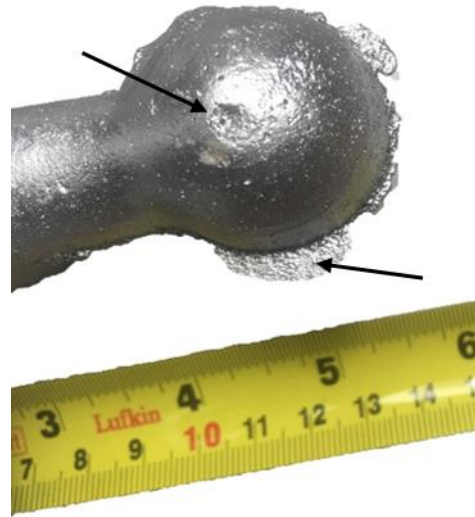


Figura 75. Método 2 - CAD, resultado vista superior, escala 1:1.6, catapiz

4.1. Control de calidad

Con el fin de realizar una mejor valoración de la calidad sobre los componentes fundidos, se hizo el END más favorable, tintas penetrantes. Este proceso consistió en aplicar, como su nombre lo indica, una tinta penetrante, y luego de esperar cierto tiempo y limpiado el componente, se aplicó una tinta reveladora, a partir de la cual se pudo observar discontinuidades como microporos. A continuación, se muestran los resultados obtenidos por cada método.

- Método 1 – Formas

Como se puede ver en la Figura 76 y Figura 77, hay una concentración de microporos en el núcleo o centro del catapiz, esto, como se observó en la simulación de Hot Sports, ver Figura 52, puede deberse a una concentración de calor en esta zona. En este caso la presencia de estos microporos no representa un defecto en el componente, pero al afectar el acabado superficial, se debe evitar lo máximo posible.



Figura 76. Método 1 – Formas, END, tintas penetrantes, escala 1:0.025, catapiz



Figura 77. Método 1 – Formas, END, tintas penetrantes, escala 1:0.0125, catapiz

- Método 1 – CAD

Al igual que en el método anterior, se observa microporos en la unión de la sección C con la sección B, ver Figura 78 y Figura 79. Una de las posibles causas puede estar ligada al proceso de moldeado o al proceso de vertido o fundición del material. De igual forma no representa un defecto en el componente, pero su presencia lo es lo más deseado en la superficie del componente.



Figura 78. Método 1 – CAD, END, tintas penetrantes, escala 1:0.015, catapiz



Figura 79. Método 1 – CAD, END, tintas penetrantes, escala 1:0.008, catapiz

- Método 2 – CAD

En el resultado obtenido por este método, ver Figura 80 y Figura 81, la presencia de microporos se mucho menor a las observadas anteriormente. Por lo tanto, este tipo de acabado superficial es el más ideal para una pieza ornamental.



Figura 80. Método 2 – CAD, END, tintas penetrantes, escala 1:0.014, catapiz



Figura 81. Método 2 – CAD, END, tintas penetrantes, escala 1:0.0125, catapiz

B. Polea

Al igual que con el catapiz, una vez realizados los cálculos de los sistemas se continuo con el diseño los dos métodos, como se ve en la Figura 82 y Figura 83, con el fin de realizar la simulación y analizar la temperatura y el tiempo de solidificación, la densidad del material y los *hot spots*.

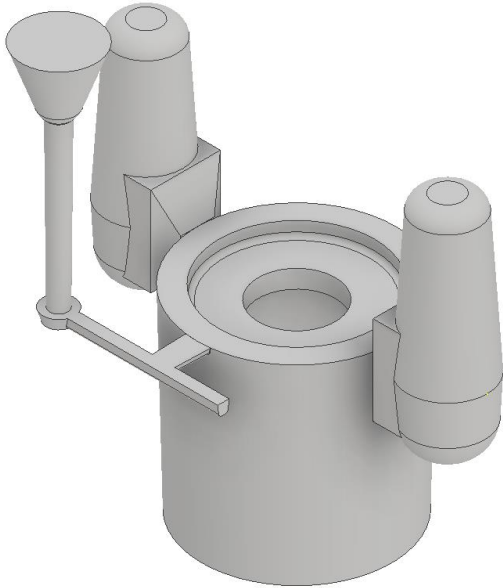


Figura 82. Método 1, polea

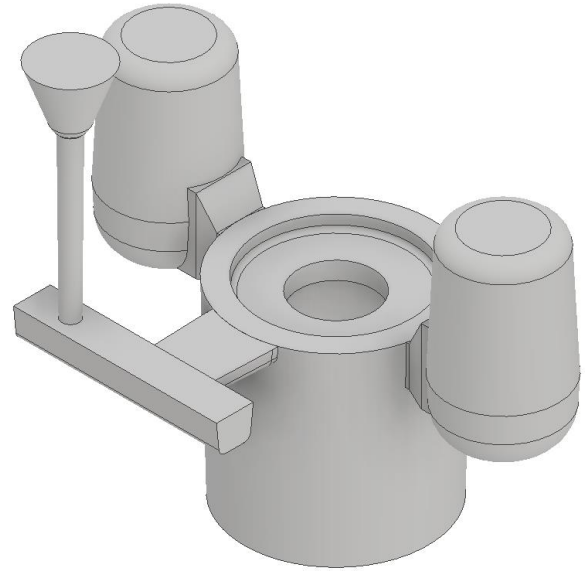


Figura 83. Método 2, polea

1. Temperatura y tiempo de solidificación

Como se puede observar tanto en la Figura 84 y Figura 85, todas las secciones del componente, descritas en la Tabla 9, de acuerdo a la simulación, tienen la misma temperatura, por lo tanto identificar el orden de solidificación de cada una de estas es complicado, pero si se puede observar que en el método 1, la parte superior de la mazarota tienen una temperatura un poco inferior a la del componente, pero en el tiempo de solidificación si se puede observar una gran diferencia, lo cual indica que el tiempo en el que se solidificara la mazarota es menor a la del componente, siendo esto perjudicial al realizar el proceso de fundición, ya que la mazarota no cumplirá con la función de alimentar los vacíos provocados por la contracción del componente. Por el contrario, en la simulación del segundo método se puede observar como la temperatura de las mazarotas es mucho mayor a la del componente, al igual que el tiempo de solidificación de la mazarota es mayor a la del componente, esto indica que el diseño cumple con el objetivo principal de un sistema de alimentación.

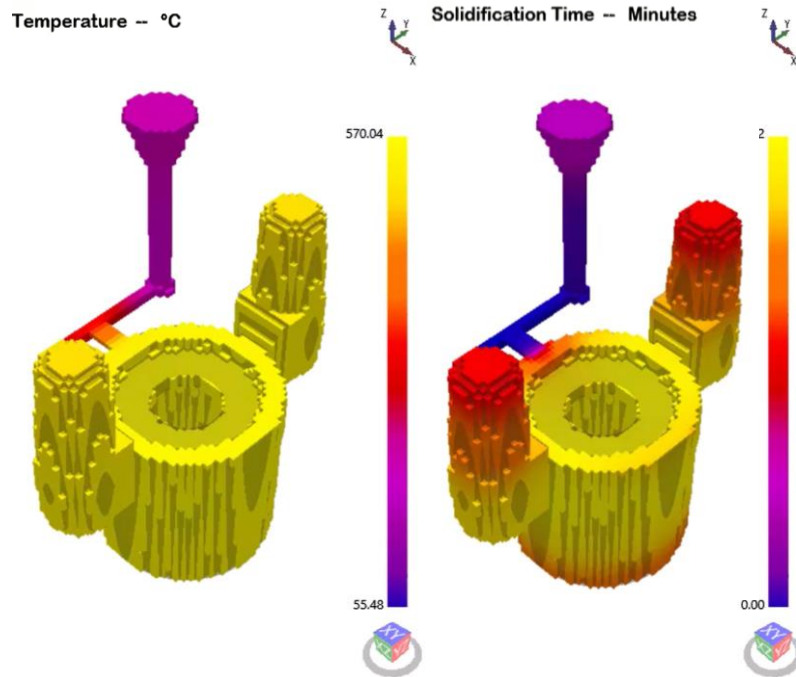


Figura 84. Temperatura y tiempo de solidificación del método 1, polea

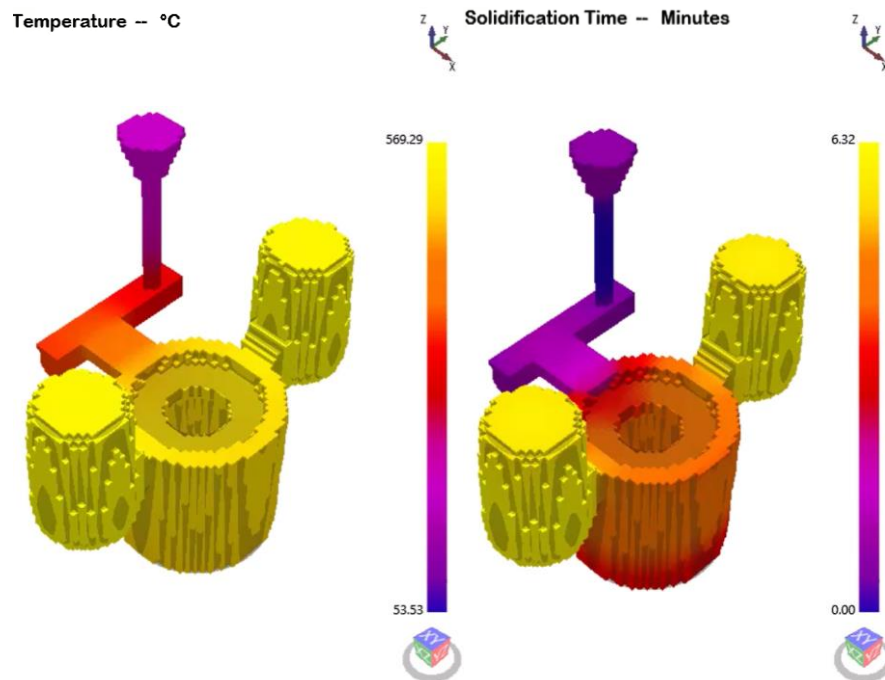


Figura 85. Temperatura y tiempo de solidificación del método 2, polea

2. Densidad del material

Por medio del análisis realizado al primer componente, el catapiz, se puede concluir que la polea no tendrá rechupes o depresiones que afecten la calidad de la pieza, a pesar de que anteriormente se observó que la mazarota del método 1 comenzará

a solidificarse antes que el componente. De acuerdo a la Figura 86 y Figura 87 estas cavidades están correctamente ubicadas ya que se encuentran en la parte superior del embudo y las mazarotas y no en alguna sección del componente o de la mazarota.

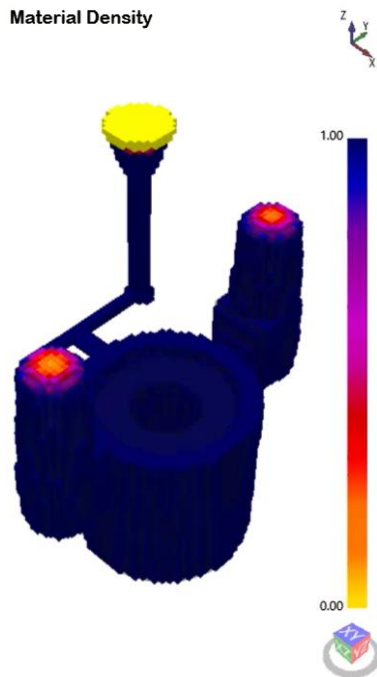


Figura 86. Densidad de la materia, método 1, polea

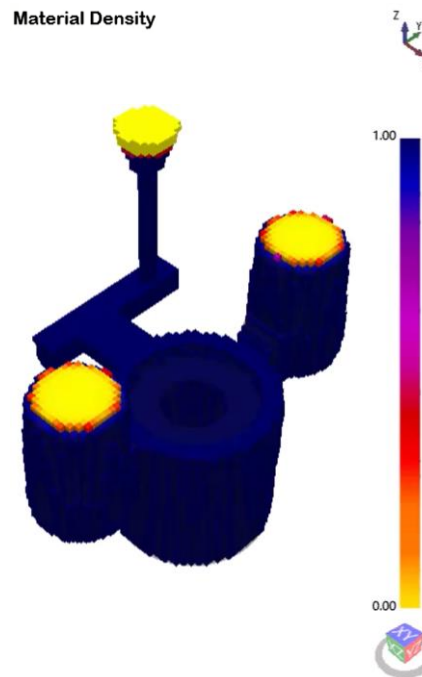


Figura 87. Densidad de la materia, método 2, polea

3. Puntos calientes

De acuerdo a las Figura 88 y Figura 89, se puede observar como el segundo método tiene un mayor número de puntos en los cuales se concentra el calor que en el primer método. Esto, como se ha mencionado anteriormente, puede ocasionar proyecciones metálicas o rechupes, los cuales pueden ser clasificados como defectos.

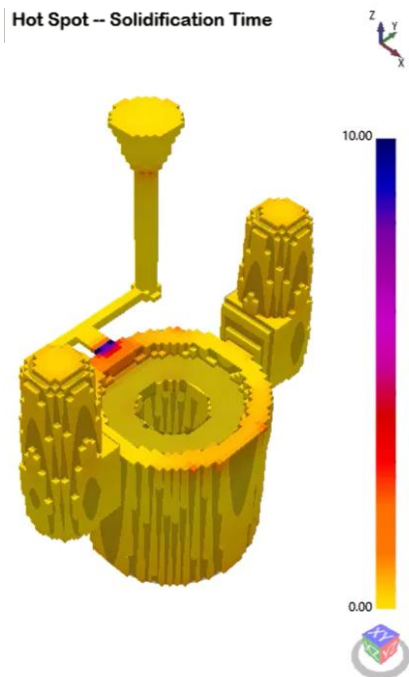


Figura 88. Hot Spot, método 1, polea

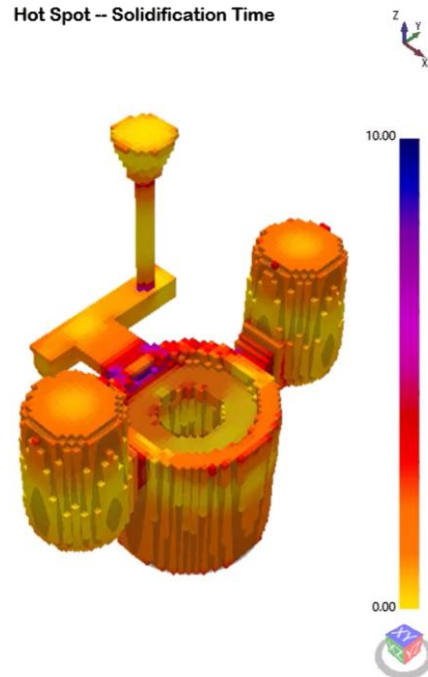


Figura 89. Hot Spot, método 2, polea

4. Resultados de la práctica de fundición

Al igual que con el componente anterior, después de analizar las simulaciones, se realizaron los modelos tanto del componente como de los sistemas por medio de impresión 3D ABS, ver Figura 90 y Figura 91.



Figura 90 . Modelo del componente y sus sistemas, método 1, polea



Figura 91. Modelo del componente y sus sistemas, método 2, polea

Luego se hicieron los moldes en arena, ver Figura 86, primero ubicando correctamente los modelos y por ultimo llegando los espacio vacíos con arena, la cual debía ser correctamente apisonada para obtener la calidad deseada del molde.

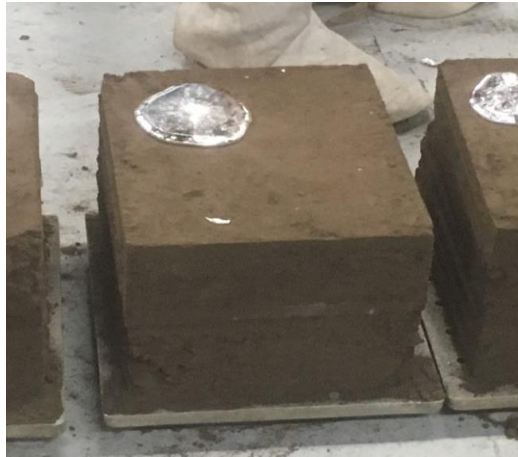


Figura 92. Moldes en arena de la polea

A continuación, se analizarán los resultados del segundo componente, polea, pero con el fin de clasificar correctamente los defectos y las discontinuidades es necesario aclarar que esta polea es un elemento mecánico el cual está sometido a esfuerzos continuos, es decir, tiene una condición de carga media.

- Método 1

Se puede concluir que la ubicación de los rechupes mostrados en la Figura 93 son los esperados, y por lo tanto el sistema de llenado y alimentación cumplieron con el propósito del proceso.

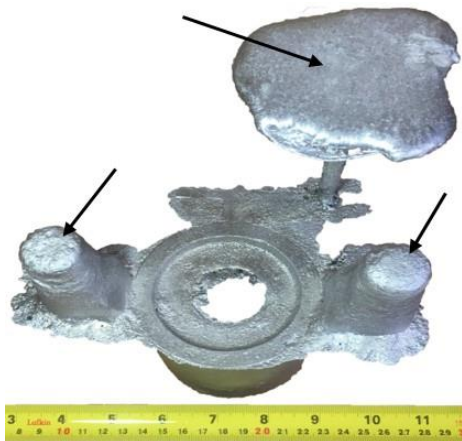


Figura 93. Método 1, resultado vista frontal, polea

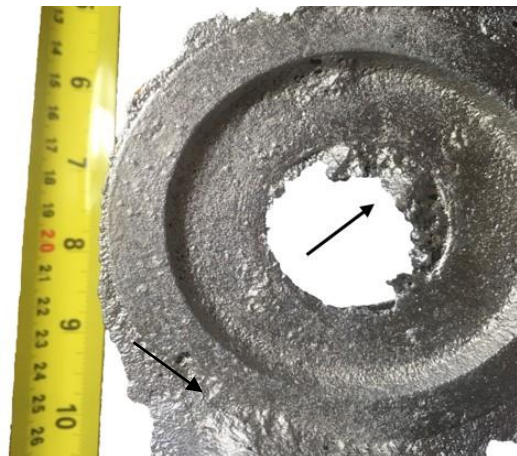


Figura 94. Método 1, resultado vista superior, polea .

Como se especificó anteriormente este es un componente de carga media, por lo tanto, los microporos observadas en la Figura 94, son catalogados como defectos ya que su condición de esfuerzos hace que el tamaño, considerablemente grande, de estas cavidades sean puntos críticos o concentradores de esfuerzos. Adicionalmente se puede ver en la Figura 94 y Figura 95 como hubo un desprendimiento de arena, probablemente causado por un mal apisonado de esta zona, lo cual se considera como un defecto por el hecho de ser un componente de ensamble y por lo tanto sus medias deben ser lo más precisas posible. Por último, se considera como defecto la incrustación de arena observada en la parte inferior del componente, ver Figura 95, ya que estas cavidades son aún más críticas que las mencionadas inicialmente.



Figura 95. Método 1, resultado vista inferior, polea.

- Método 2

De acuerdo a la aplicación mencionada, componente de carga media, a partir de los resultados obtenidos se pueden observar varios defectos. Primero, en la Figura 96, se observa en la parte inferior una incrustación de arena de un tamaño considerable, esto es un defecto ya que en el momento en que esta pieza se someta a esfuerzos, esta zona se convertirá en un concentrador de esfuerzos y en consecuencia el componente se comenzara a agrietar. Segundo, en la Figura 97, se observa en el centro un tipo de proyección metálica, esto afecta el ajuste entre el eje y el orificio, es por esto que se cataloga como un defecto. Por último, en la Figura 99, se observa un tipo de proyección metálica conocida como vena, esta puede considerarse como una discontinuidad si posteriormente se realiza un adecuado proceso de pulido, de lo contrario se considerado como un defecto ya que este tipo de componente se emplean en mecanismos con poca tolerancia entre sus elementos.



Figura 96. Método 2, resultado vista frontal, escala 1:0.063, polea

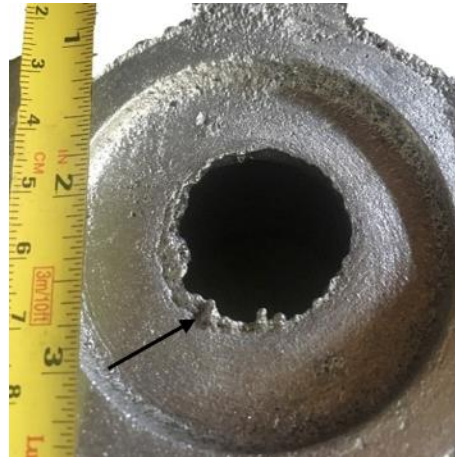


Figura 97. Método 2, resultado vista superior, escala 1:0.073, polea



Figura 98. Método 2, resultado vista frontal, escala 1:0.17, polea

4.1. Control de calidad

De igual forma que en el método anterior, se aplicó tintas penetrantes a los componentes con el fin de identificar presencia de microporos como se analizará a continuación.

- Método 2

De los resultados obtenidos se puede decir que las cavidades o microporos observados de la Figura 99 a la Figura 101, son causadas por un proceso de moldeo deficiente, ya que estos defectos no presentan algún tipo de simetría, debido a los puntos calientes generados en parte por la ubicación de las mazarotas, ni por la unión entre el sistema de llenado y el componente. Por el contrario estos defectos se encuentran ubicados aleatoriamente, sin seguir algún patrón descrito en la simulación de hot spots de la Figura 55.

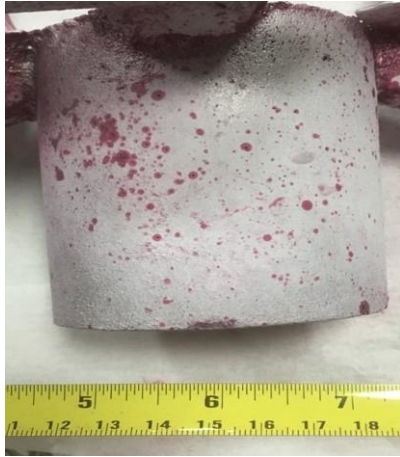


Figura 99. Método 2, END, tintas penetrantes, vista frontal, escala 1:0.01, polea



Figura 100. Método 2, END, tintas penetrantes, vista inferior, escala 1;0.011, polea



Figura 101. Método 2, END, tintas penetrantes, vista superior, escala 1:0.0125, polea

4. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

De acuerdo a los resultados obtenidos fue posible concluir que, por un lado, los sistemas de llenado y alimentación hallados por el método 1 – CAD resultan ventajosos para el componente del catapiz, por las razones listadas a continuación:

1. Con este diseño no solo se cumple la función principal de llenar toda la cavidad antes de comenzar a solidificarse y alimentar la pieza satisfactoriamente, sino que, en el caso de la mazarota, el volumen hallado por este método fue más eficiente, ya que cumplió su función con el menor volumen. Esto se traduce en una reducción de costos al realizar grandes volúmenes de producción.
2. Este diseño presenta menos puntos calientes en el componente, lo que implica menos discontinuidades como proyecciones metálicas o cavidades.

Por otro lado los resultados de la experimentación directa indican que el método 2 – Formas permite alcanzar un acabado superficial superior en el primer componente, ya que como se observó en la simulación de temperatura (ver Figura 46), las secciones tenían temperaturas más bajas respecto a los demás métodos, de este modo los gases de fundición no saturaban los espacios vacíos del molde y salían sin mayor resistencia.

En cuando a las actividades de inspección realizadas, vale la pena aclarar que algunos de los defectos o discontinuidades observadas y reportadas en los componentes, no fueron observados en las simulaciones realizadas. En algunos casos su predicción estaba por fuera del alcance del software empleado y en otros casos la información disponible para la selección de variables estaba limitada, por la no instrumentación del laboratorio empleado. A continuación, se plantea un listado de las fuentes de incertidumbre asociadas naturalmente al proceso y específicamente al desarrollo de este trabajo de grado:

1. Las condiciones para realizar la mezcla de arena, donde las proporciones de agua y arena no eran exactas, por lo tanto, las propiedades de un molde con respecto a otro variaban. El porcentaje de humedad en la mezcla, las altas temperaturas dentro del laboratorio en los días de fundición y la cantidad de veces en la que se reutilizaba la arena de prácticas anteriores podría afectar la calidad de la arena y por lo tanto del proceso.
2. El proceso de moldeo es totalmente manual, lo que implica que todos los moldes no tenían las mismas características y/o propiedades. En unos procesos la arena era apisonada con mayor presión que en otros, esto afecta ciertos indicadores de calidad de la arena como la permeabilidad, ya que en algunos casos la arena va a estar más compactada y el paso de los gases resulta más complejo.
3. La forma en la que se funde el metal no es estandarizada, es decir variables como la temperatura, el tiempo, la cantidad de combustible, no son constantes en todas la practicas realizadas, por lo tanto, no se puede garantizar que el material de

todos los componentes es exactamente el mismo, lo cual podría afectar los resultados obtenidos.

4. Al igual que la temperatura de vaciado no era constante en el llenado de todos los componentes, a causa de las condiciones de fundición del material, la velocidad de vaciado tampoco fue igual para cada componente ya que el vaciado es un proceso completamente manual, por lo tanto, no se puede garantizar las mismas condiciones.

En el desarrollo de este trabajo de grado fue posible evaluar el efecto de los factores de diseño en el cálculo de sistemas de llenado y alimentación, y una conclusión importante es que el trabajo experimental en fundición requiere una cantidad significativa de trabajo físico y preparación previa, por lo tanto, el uso de herramientas como *SolidCast*®, para la verificación vía software de múltiples alternativas de diseño en los sistemas mencionados se resalta como una alternativa ideal.

5. TRABAJOS FUTUROS

Como trabajos futuros se propone realizar una medición experimental en la cual se verifiquen las temperaturas durante los procesos, es decir durante la fusión del material y el vaciado, ya que con temperaturas como la de sobrecalentamiento se emplearon en el diseño de los sistemas de llenado y alimentación. Adicionalmente hacer una verificación empleando espectrometría por emisión óptica de la composición química de la aleación empleada.

Aunque en este trabajo muchas factoras fueron constantes, como el tipo de arena, procesos como la preparación alteraban la mezcla final, ya que propiedades como la humedad no fueron estrictamente controladas. Es por esto que se plantea garantizar unas características específicas de la arena, con el fin de que ciertas variables pasen a ser un factor constante durante todas las pruebas de fundición.

Finalmente, se plantea en un ejercicio posterior realizar una verificación de los niveles de contracción, especialmente al tener en cuenta que en el caso de la polea debe incorporarse la variación asociada al componente impreso respecto al CAD original y respecto al componente final obtenido.

REFERENCIAS

- A. Ghosh, A. K. M. (2001). Manufacturing science ghosh-CG Aspirants-- By EasyEngineering.net.pdf - Google Drive. Retrieved August 30, 2018, from https://drive.google.com/file/d/1Oq9_k1RRfqIWg9kltlGHiz-QOsBJTtobF/view
- AFS. (2008). *Casting Defects Handbook: Iron & Steel*.
- AJIBOLA AYOOLA, W. (2012). EFFECT OF CASTING MOULD ON MECHANICAL PROPERTIES OF 6063 ALUMINUM ALLOY. *Journal of Engineering Science and Technology*, 711.
- Biezanek noyoutage. (2018). Croning core, as the best of precision. Retrieved September 7, 2018, from <http://www.biezanek-noyoutage.fr/croning-cores/?lang=en>
- Black, J. T., Kohser, R. A., & DeGarmo, E. P. (Ernest P. (2008). *Materials and Processes in Manufacturing*. Wiley.
- Brown, J. R. (1999). Foseco Non-Ferrous Foundryman's. *Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook*, (11), 28–38. <https://doi.org/10.1016/B978-075064286-6/50019-X>
- Chang, Y., & Hocheng, H. (2001). The fowability of bentonite bonded green molding sand. *Journal of Materials Processing Technology*.
- Choudhar, C. M., Narkhede, B. E., & Mahajan, S. K. (2013). Modeling and Simulation with Experimental Validation of Temperature Distribution during Solidification Process in Sand Casting. *International Journal of Computer Applications*.
- Choudhari, C. M., Narkhede, B. E., & Mahajan, S. K. (2014). Casting Design and Simulation of Cover Plate Using AutoCAST-X Software for Defect Minimization with Experimental Validation. *Procedia Materials Science*, 6, 786–797. <https://doi.org/10.1016/J.MSPRO.2014.07.095>
- Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna*. (Mc Graw Hill, Ed.).
- Groover, M. P. (2010). Fundamentals of Modern Manufacturing. Materials, Processes, and Systems. *Fundamentals of Modern Manufacturing*.
- Hasan, M., & Begum, L. (2015). Semi-continuous casting of magnesium alloy AZ91 using a filtered melt delivery system. *Journal of Magnesium and Alloys*, 3(4), 283–301. <https://doi.org/10.1016/J.JMA.2015.11.005>
- Hyuk-Jae Kwon, H.-K. K. (2018). Computer aided engineering (CAE) simulation for the design optimization of gate system on high pressure die casting (HPDC) process. Retrieved from https://ac-els-cdn-com.recursosbiblioteca.eia.edu.co/S0736584517300650/1-s2.0-S0736584517300650-main.pdf?_tid=a5afeb34-bfc7-4f4b-a282-0d62641d01c8&acdnat=1535651234_0e89d5b432951e4a47be6ebb5e79257b

- Ingle, P. D., & Narkhede, B. E. (2018). A Literature Survey Of Methods To Study And Analyze The Gating System Design For Its Effect On Casting Quality. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 5421–5429. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2017.12.129>
- John Brown. (2007). *Foseco Ferrous Foundryman's Handbook*. Retrieved from https://ac-els-cdn-com.recursosbiblioteca.eia.edu.co/B9780750642842500132/3-s2.0-B9780750642842500132-main.pdf?_tid=4583e947-15da-4003-af40-a9f695784d75&acdnat=1535742015_91fb12b64713433c924790c5704025c5
- Jorge Osorio Z. (1989). *Siscalco : sistema simplificado del calculo de alimentadores y de canales de coladas para piezas vaciadas en arena*. UdeA.
- Kalpakjian, S. (2010). *Manufacturing engineering and technology*. Prentice Hall.
- Kalpakjian, S., Schmid, S. R., & Sánchez García, G. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Pearson Educación.
- Manjunath Patel G C, Arun Kumar Shettigar, M. B. P. (2018). A systematic approach to model and optimize wear behaviour of castings produced by squeeze casting process. Retrieved from https://ac-els-cdn-com.recursosbiblioteca.eia.edu.co/S152661251830046X/1-s2.0-S152661251830046X-main.pdf?_tid=3df5f19c-695a-4d4f-a5ed-21f32e315398&acdnat=1535649245_ae5b618ff1409254ce882387a5457102
- Manufacturing Network. (2018). Sand Casting - The Designers & Buyers Guide» Manufacturing Network. Retrieved October 28, 2018, from <https://www.manufacturingnetwork.com/knowledgebase/view/30>
- Mehta, N. D., Gohil, A. V., & Doshi, S. J. (2018). Innovative Support System for Casting Defect Analysis – A Need of Time. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 4156–4161. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2017.11.677>
- P. N. Rao. (2009). *Manufacturing Technology*.
- Parappagoudar, M. B., Pratihari, D. K., & Datta, G. L. (2007). Forward and reverse mappings in green sand mould system using neural networks. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2007.01.005>
- RAO, P. (2009). *Manufacturing Technology Volume-1*.
- Rao, T. V. R. (1996). *Metal Casting Principles and Practice*.
- Sachin L. Nimbalkar, R. S. D. (2016). Design optimization of gating and feeding system through simulation technique for sand casting of wear plate. Retrieved from https://ac-els-cdn-com.recursosbiblioteca.eia.edu.co/S2213020916300015/1-s2.0-S2213020916300015-main.pdf?_tid=f4c63256-0ab2-4815-8552-c9fa7805f43e&acdnat=1535651249_68e1af4c27b5c8a8f0f671ce91cc2e06
- Saikaew, C., & Wiengwiset, S. (2012). Optimization of molding sand composition for

quality improvement of iron castings. *Applied Clay Science*, 67–68.
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2012.07.005>

Titov, N. D. (1981). *Tecnología del Proceso de Fundición*.

Uday Apte, by B., & Professor, M. D. (1978). A STUDY OF THE GATING SYSTEM OF CASTINGS PRODUCED BY THE FULL-MOLD PROCESS.