UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

Facultad de Arquitectura e Ingenierías

Maestría en Diseño Mecánico

Mención de Fabricación de Autopartes de Vehículos

Diseño de un Molde Permanente de Fundición por Gravedad para la Fabricación de Pesas Adhesivas de Plomo Utilizadas en Balanceo de Neumáticos

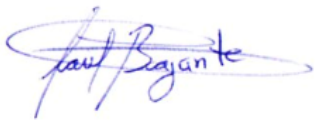
Paúl Esteban Bazante del Pozo

Nota del autor
Paúl Bazante del Pozo, Facultad de Arquitectura e Ingeniería,
Universidad Internacional SEK.
Director: Ing. Jaime Molina, M.Sc.
Codirector: Ing. Diego Bustamante, M.Sc.
Cualquier correspondencia concerniente a este trabajo puede dirigirse a:
pbazante.mdm@uisek.edu.ec

Declaración Juramentada

Yo, Paúl Esteban Bazante del Pozo, con cédula de identidad 0201986387, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado de calificación profesional; y que se ha consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente. El presente trabajo pertenece al programa de Desarrollo Tecnológico y se relaciona directamente con la Línea de Innovación en el Diseño de Procesos y Productos en el Ecuador a fin a la Facultad de Arquitectura.



Paúl Esteban Bazante del Pozo.

CI: 0201986387

Índice de Contenido

Declaración Juramentada 2
Índice de Contenido 3
Índice de Tablas 5
Índice de Figuras 6
Resumen 8
Introducción 9
Justificación 9
Problema 12
Objetivo general 13
Objetivos específicos 13
Estado del arte 14
Diseño del molde 15
Cálculos de las condiciones de la colada 17
Ley de Torricelli 18
Ley de la continuidad 18
Teorema de Bernoulli 19
Número de Reynolds 19
Tiempo de llenado 20
Tiempo de solidificación 21
Cálculo del sistema de alimentación y compensación de colada. 22
Cálculo de la Mazarota 23
Cálculo del Bebedero 24
Cálculo de la Taza de Colada 25
Cálculo Canales de Colada y Ataque 26
Cálculo del Pozo de Colada 29
Simulación de la colada. 29
Necesidad de la simulación 34
Fabricación del molde 34
Método 37
Tipo de investigación 37
Secuencia metodológica 38
Dimensionamiento del modelo de partida 39
Selección del material 44
Material para la colada 44
Material para el molde 46
Cálculos sistema de colada 47
Mazarota 47
Bebedero 50
Taza de Colada 52
Canales de Colada y Ataque 53
Pozo de Colada 54

Cálculo tiempo de llenado 55
Cálculo del tiempo de solidificación..... 55
Dimensiones del sistema de colada..... 56
Simulación de la colada 57
Pre-procesamiento..... 57
Procesamiento principal..... 58
Post-procesamiento..... 60
Mecanizado del molde 62
Parámetros de Corte..... 62
Operaciones de mecanizado..... 63
Tabla de operaciones de mecanizado..... 68
Resultados..... 71
Material para la colada..... 71
Material para el molde 71
Diseño sistema de colada..... 72
Resultados de la simulación de la colada..... 73
Resultados factor de llenado 74
Resultados tiempo de llenado 75
Resultados temperatura al llenado 76
Resultados tiempo de solidificación 77
Resultados tiempo para sólido 78
Resultados módulo de enfriamiento..... 79
Resultados entra de aire 80
Resultados vacíos..... 81
Resultados porosidades..... 82
Selección del Modelo..... 83
Diseño del molde 83
Fabricación del molde..... 86
Protocolo de pruebas..... 88
Resultados experimentales..... 90
Discusión de resultados..... 97
Conclusiones..... 109
Recomendaciones 110
Referencias bibliográficas..... 112

Índice de Tablas

Tabla 1. *Relaciones de colada más comunes* 28
Tabla 2. *Tabla de etapas, variables y niveles* 37
Tabla 3. *Tabla de producción de pesas requerida* 40
Tabla 4. *Dimensiones pesas de balanceo* 41
Tabla 5. *Propiedades física tira de pesas* 43
Tabla 6. *Condiciones del ensayo* 45
Tabla 7. *Propiedades del plomo* 45
Tabla 8. *Especificaciones acero AISI P20* 47
Tabla 9. *Dimensiones de la mazarota* 49
Tabla 10. *Dimensiones del bebedero* 52
Tabla 11. *Dimensiones de la taza de colada* 53
Tabla 12. *Dimensiones canal colada y ataque* 54
Tabla 13. *Dimensiones pozo de colada* 55
Tabla 14. *Tamaño de malla* 58
Tabla 15. *Datos de entrada o condiciones de borde* 60
Tabla 16. *Iteraciones cálculo coeficiente de transferencia de calor* 61
Tabla 17. *Parámetros de corte para taladrado.* 63
Tabla 18. *Parámetros de corte para fresado* 63
Tabla 19. *Parámetros de corte para fresado de acabado final* 63
Tabla 20. *Dimensiones de material en bruto* 64
Tabla 21. *Procesos de mecanizado de la placa base* 69
Tabla 22. *Procesos de mecanizado de la placa superior* 70
Tabla 23. *Elementos aleantes de las probetas* 71
Tabla 24. *Información general acero AISI P20* 72
Tabla 25. *Comparación de opciones de modelo* 83
Tabla 26. *Tiempo de mecanizado* 86
Tabla 27. *Resultados experimentales* 91
Tabla 28. *Masa individual de pesas pequeñas y grandes* 96
Tabla 29. *Error en el tiempo de llenado* 106
Tabla 30. *Error en masa de pesas de balanceo* 108

Índice de Figuras

Figura 1. Importaciones totales de neumáticos por segmento 10
Figura 2. Cantidad en dólares de importaciones de pesas para balanceo 11
Figura 3. Cantidad en peso de importaciones de pesas para balanceo..... 11
Figura 4. Tipos de flujo según número de Reynolds 20
Figura 5. Elementos sistema de alimentación de colada 22
Figura 6. Forma ideal del bebedero 25
Figura 7. Dimensionamiento de la taza de colada 26
Figura 8. Relación de coladas en los canales de alimentación 27
Figura 9. Dimensionamiento del canal de colada y ataque..... 28
Figura 10. Dimensionamiento del pozo de colada 29
Figura 11. Programas de simulación 31
Figura 12. Lógica en el software de simulación..... 32
Figura 13. Secuencia metodológica..... 38
Figura 14. Tira de pesas para balanceo 40
Figura 15. Modelo CAD de tira de pesas 41
Figura 16. Propiedades físicas de las pesas pequeñas 42
Figura 17. Propiedades físicas de las pesas grandes 42
Figura 18. Propiedades físicas de la tira de pesas 43
Figura 19. Muestras de pesas adhesivas 44
Figura 20. Puntos y alturas para el cálculo del bebedero. 50
Figura 21. Dimensiones sistemas de alimentación..... 56
Figura 22. Herramienta de corte a escuadra. 65
Figura 23. Herramienta de corte para planeado. 66
Figura 24. Herramienta de corte para cavidades. 67
Figura 25. Brocas para agujeros. 68
Figura 26. Opciones de modelo..... 73
Figura 27. Resultados de la simulación del factor de llenado 74
Figura 28. Resultados de la simulación del tiempo de llenado 75
Figura 29. Resultados de la simulación de la temperatura al llenado. 76
Figura 30. Resultados de la simulación del tiempo de solidificación. 77
Figura 31. Resultados de la simulación del tiempo para sólido. 78
Figura 32. Resultados de la simulación del módulo de enfriamiento. 79
Figura 33. Resultados de la simulación de la entrada de aire..... 80
Figura 34. Resultado de la simulación de vacíos. 81
Figura 35. Resultado de la simualción de porosidades. 82
Figura 36. Elementos del molde..... 84
Figura 37. Ensamble del molde. 85
Figura 38. Partes mecanizadas del molde 87
Figura 39. Ensamble del molde mecanizado. 87
Figura 40. Medición de temperatura del molde 89
Figura 41. Colada solidificada dentro del molde 89
Figura 42. Apertura del molde. 90
Figura 43. Resultado visual fundición 1..... 92

Figura 44. Resultado visual de la fundición 4 93
Figura 45. Resultado visual de la fundición 10 94
Figura 46. Resultado visual de la fundición 16 94
Figura 47. Resultado visual de la fundición 22 95
Figura 48. Análisis de resultados de las simulaciones vs deseado. 101
Figura 49. Convergencia de temperatura vs tiempo 102
Figura 50. Convergencia de la fracción sólida vs tiempo 103
Figura 51. Convergencia del factor de llenado vs tiempo. 104
Figura 52. Convergencia de porosidades totales vs tiempo. 105
Figura 53. Distribución normal del tiempo de llenado. 106
Figura 54. Distribución normal de masa de pesas pequeñas de balanceo 107
Figura 55. Distribución normal de masa de pesas grades de balanceo 107

Resumen

La fundición de metales es uno de los proceso más antiguos y utilizados en toda la industria en general, debido a esto el estudio y la tecnificación es necesaria para obtener elementos fundidos de calidad y disminuir al máximo los desperdicios. En este estudio se propone el diseño de un molde permanente de fundición para fabricar en el país pesas adhesivas de plomo, las cuales son utilizadas en el balanceo de neumáticos en la industria automotriz, estas pesas actualmente son importadas de países como Brasil, China, México, entre otros.

Para lo cual se seleccionó el material del molde más adecuado, se utilizó técnicas como dinámica de fluidos computacionales (CFD), que permiten conocer el proceso de llenado y el comportamiento de la colada en el interior del molde, se utilizaron herramientas computacionales de manufactura asistida (CAM) para el diseño y fabricación del molde. Como resultado se obtuvo el molde y posteriormente las pesas de plomo que fueron fabricadas mediante fundición en molde permanente, logrando cotejar de esta manera los resultados experimentales versus los arrojados por el software CFD.

Palabras claves: Ingeniería Mecánica, Diseño, Metalurgia, metales, plomo.

Introducción

Justificación

El desarrollo industrial del Ecuador tiene una tendencia creciente, gracias a los nuevos programas que impulsan la innovación, creatividad y emprendimiento en varios sectores. La industria es importante porque reduce la vulnerabilidad externa, genera empleo de calidad, propicia la transformación productiva, encadena otros sectores y es un vehículo de la innovación (Ministerio Coordinador de Producción, Empleo y Competitividad, 2010; Ministerio de Industrias y Productividad, 2015)

Las exportaciones del país, en su mayoría, son de productos primarios basados en recursos naturales, con las políticas actuales se pretende que la producción ecuatoriana se diversifique e inserte al mundo con manufactura y servicios de un mayor y mejor valor agregado, mediante empresas que ofrezcan innovación, que sean competitivas y con estándares de calidad de nivel mundial, todo esto está planificado para el año 2025 (Ministerio Coordinador de Producción, Empleo y Competitividad & Ministerio de Industrias y Productividad, 2016); (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2016).

La revista Sector Automotor en cifras de la Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador, reporta que el parque automotor tiene alrededor de dos millones de vehículos livianos y cerca de trescientos mil vehículos comerciales, además muestra un histórico de importaciones de neumáticos con un pico entre enero y febrero del 2017 y 2018 de las importaciones de neumáticos para el segmento de los livianos (Ver figura 1.)

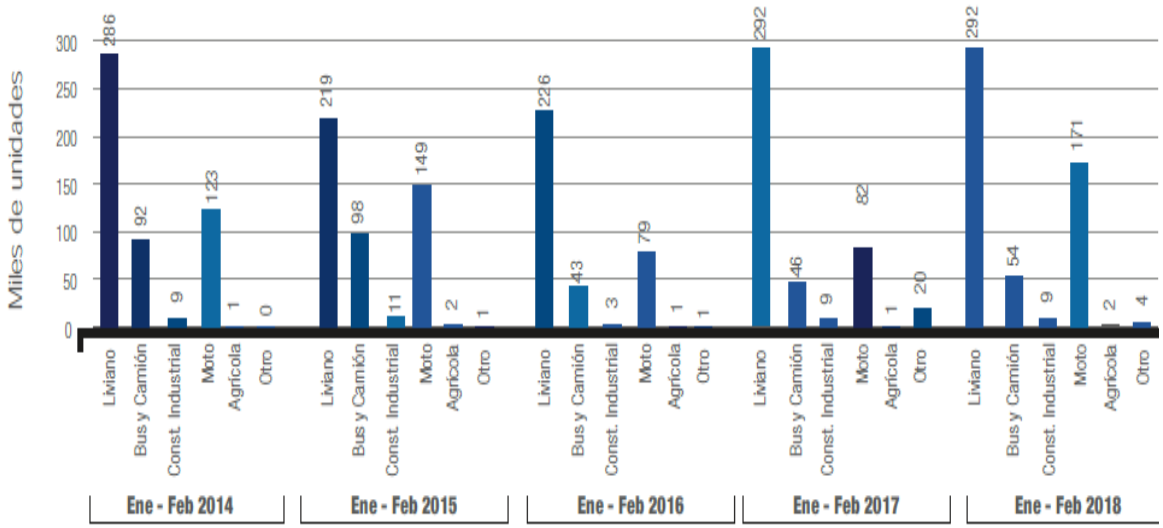


Figura 1. Importaciones totales de neumáticos por segmento

Recuperado de AEADE (2018)

Según la Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador (AEADE, 2018) el país tiene 4 empresas dedicadas al ensamblaje, 92 empresas autopartistas, 1271 entre empresas comercializadoras e importadoras, 81 empresas carroceras y 3126 empresas dedicadas a otras actividades de comercio relacionadas con el sector automotriz como por ejemplo: de servicios de mantenimiento y reparación, venta de autopartes, neumáticos, etc.

De estas empresas dedicadas a actividades de comercio relacionado con el sector automotor, una gran parte se corresponde al comercio de neumáticos, accesorios y servicio de enllantaje, alineación y balanceo, estas son grandes, medianas, pequeñas e incluso de carácter informal. Casi todas las empresas dentro de este sector ofrecen el servicio de balanceo de los neumáticos, proceso en el cual se utilizan pequeñas pesas que ayudan a equilibrar las masas del neumático o del aro, estas pesas van colocadas directamente al aro mediante unas pestañas de sujeción o mediante adhesivos.

Según información recopilada del Servicio Nacional de Aduana del Ecuador en el año 2016 se realizó importaciones de este producto por un valor de 450039.42 dólares con un peso de

130101.45 kilogramos, en 2017 con valor de 115086.35 dólares con un peso de 37399.18 kilogramos; y el año 2018 con un valor de 331075.46 y un peso de 90432.24 kilogramos, ver figura 2 y 3, provenientes en su mayoría de países como México, China, Brasil, Líbano, Perú, etc. Además, los valores de importaciones de neumáticos en el segmento de los livianos sugieren que la cifra de importación de las pesas vaya de la mano.

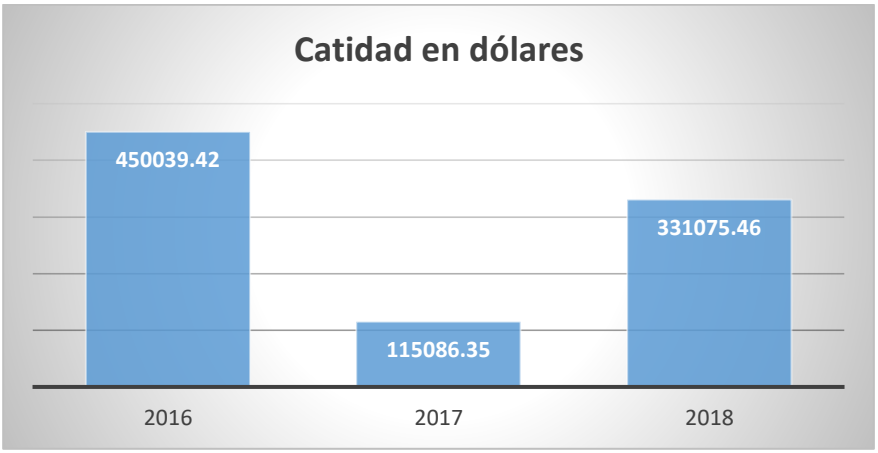


Figura 2. Cantidad en dólares de importaciones de pesas para balanceo

Recuperado de SENAE (2018)

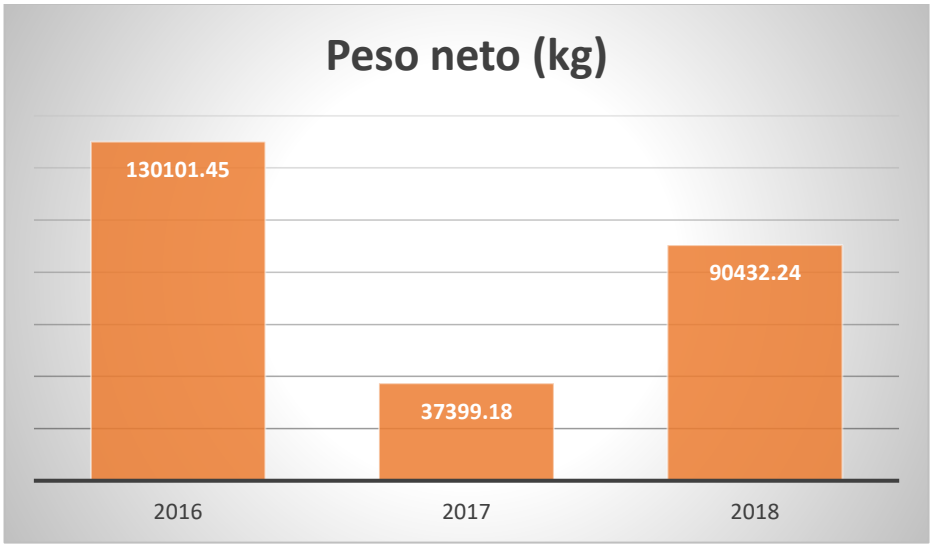


Figura 3. Cantidad en peso de importaciones de pesas para balanceo

Recuperado de SENAE (2018)

Problema

En esta era de globalización y estandarización, la metalmecánica es uno de los sectores que da vida a la economía del Ecuador y su progreso, por lo que se requiere cambios esenciales en el desarrollo de sus estrategias de crecimiento, utilización de mayor y mejor tecnología, fortalecimiento del recurso humano y crear vínculos entre empresas, para generar mayor producción nacional y con esto fomentar la fabricación de mejores productos con calidad de exportación (Loor Sandoval, 2018)**.**

La industria ecuatoriana está básicamente centrada en la fundición de metales ferrosos, pero muy poco a la fabricación de elementos fundidos no ferroso, sin embargo es deficiente y no alcanza a cubrir la demanda local, por causa de la fuerte y costosa tecnificación, así como inversión y tecnología de alto valor, motivo por el cual se debe acudir a la importación con el propósito de suplir la solicitación de sectores como manufacturero y automotriz que requieren de varios productos no ferrosos que son utilizados en el país (Donoso Carrillo, 2017).

Según la Unidad Técnica de Estudios para la Industria (2007), la mayor proporción de las exportaciones ecuatorianas de manufacturas de baja tecnología están perdiendo actividades comerciales, a pesar de la activa solicitación mundial, debido al desarrollo tecnológico y los estándares de calidad que se exigen actualmente para entrar a competir en los mercados internacionales.

Las pesas adhesivas para el balanceo de neumáticos son uno de los productos de gran demanda a nivel nacional e internacional, según investigación realizada en internet, no existen empresas que se dediquen a la fabricación de dichas pesa, motivo por el cual son de procedencia

importada, según el Servicio Nacional de Aduana del Ecuador (2018), estos elementos provienen en su mayoría de países como Brasil, China, México entre otros.

Por lo expuesto se considera adecuado un estudio que demuestre que las pesas para balanceo de neumáticos se pueden fabricar en el país, tratando así de sustituir las importaciones de estos elementos, aportando con el desarrollo industrial y las nuevas políticas económicas.

Objetivo general

Diseñar un molde permanente de fundición por gravedad, mediante simulación computacional para implementar la fabricación de pesas adhesivas de balanceo utilizadas en neumáticos.

Objetivos específicos

1. Simular el molde de fundición, mediante el uso de software especializado, a utilizarse en el proceso de simulación de la colada.
2. Analizar las variables del proceso de colada mediante simulación utilizando CFD, para resolverse los defectos en los procesos de llenado y solidificación del modelo propuesto.
3. Comprobar el elemento fundido a través de pruebas, para verificar su llenado total, porosidades y calidad superficial.
4. Validar los resultados a través de un molde prototipo para compararse con lo obtenido mediante simulación.

Estado del arte

En varios sectores industriales como es el automotriz y aeronáutico, la necesidad de elementos fundidos de gran precisión hace que sea necesario tener un conocimiento más profundo de las variables y fenómenos que intervienen en las diferentes etapas del proceso de fundición (Murcia, Ossa Henao, & Paniagua, 2011).

En la mayoría de lugares el proceso de fundición es usualmente diseñado y llevado a cabo por la experiencia y la intuición de los diseñadores, lo cual hace inevitable tener reproceso, desperdicios y por lo tanto mayores costos (Choudhari, Narkhede, & Mahajan, 2014).

Según Pattnaik, Karunakar, & Jha (2012), el proceso de fundición es conocido por su potencial para producir piezas de gran calidad, excelente acabado superficial, estrechas tolerancias y formas complejas que a través del mecanizado no es posible, además de permitir grandes volúmenes de producción. La complejidad de las piezas que la industria actual necesita ha hecho necesario que este proceso se tecnifique y desarrolle cada vez más, para poder cumplir con la demanda de la industria.

El proceso de fabricación mediante fundición consiste básicamente en el llenado de un molde que contiene la geometría deseada (modelo) con metal líquido (colada), que luego de solidificarse se abre el molde y se obtiene el producto deseado, es un proceso antiguo y de los más usados a nivel mundial. Macroscópicamente en la fundición se combinan el proceso de solidificación y trasferencia de calor que están estrechamente relacionados con el flujo de metal que llena las cavidades del molde (Rodríguez Moliner, Parada Expósito, & Ordóñez Hernández, 2010).

Diseño del molde.

Según Garcés García (2016), la fundición se pueden dividir en tres principales tipos: mediante molde no permanente utilizando modelo permanente, en molde no permanente utilizando modelo descartable y su variante con molde y modelo permanente.

La fundición mediante la técnica de moldes permanentes se utiliza para producir un volumen alto de piezas, debido a que el costo de los moldes es elevado, que generalmente los moldes son de acero, hierro fundido, latón, grafito, aleaciones refractarias y mecanizados por CNC. El producto que se obtiene de este proceso se lo fábrica generalmente de aluminio y sus aleaciones, o de algún otro metal con punto de fusión relativamente bajo. A la fundición en molde permanente se los puede clasificar según la forma como es llenado, es decir se puede introducir la colada a presión atmosférica (por gravedad), a baja presión y a alta presión (Garcés García, 2016).

La primera entrada para el proceso de simulación de la colada es el CAD en 3D del modelo o pieza que se requiere fabricar, este debe ser completo, en términos de geometría, y no debe tener caras pérdidas o líneas ocultas, debe estar totalmente dimensionado, no debe ser creado automáticamente a partir de figuras en 2D y debe estar asignado el material (Ravi, 2009), esta es una de las etapas en las que se deber prestar mucha atención en la creación del modelo, ya que este dependerá totalmente el molde. El CAD se lo puede generar en varios programas que existen en el mercado como puede ser, SolidWorks, Inventor, AutoCAD, etc.

Una vez diseñado el modelo a ser fundido se procede con el diseño del molde en el cual se tiene que tener las consideraciones necesarias para definir el tamaño, el vertedero, salidas de

aire, entradas, líneas divisoras, núcleos, la cantidad de piezas a fundirse y otros aspectos como la línea de partición, ángulo de desmolde, etc. (Pluma Torres & Gutiérrez Gonzáles, 2017).

En el diseño del molde la mayoría de los programas de simulación ya identifican y proponen una ubicación de los núcleos, entradas, vertederos, orificios, etc. Estos programas también ofrecen la opción de ubicar los componentes mencionados a gusto o necesidad de cada diseñador, claro está que va a depender del conocimiento y experticia de dicha persona (Gondkar & Inamdar, 2014), también se puede realizar el molde en cualquier programa de diseño CAD.

El material con el cual debe ser fabricado el molde para fundición debe tener la capacidad de mantener la exactitud dimensional, la calidad superficial en las piezas fabricadas, obtener la mayor duración posible y obviamente todo esto tomando en cuenta el costo versus el beneficio de llevarlo a cabo (Guerrero Rivera, 2006).

El espesor de los moldes permanentes para fundición no debe ser menor a 4mm para fabricar piezas de aleaciones con materiales no ferrosos como el aluminio, magnesio, estaño, zinc y plomo, las piezas fabricadas a través de estos moldes utilizando las aleaciones nombradas, no deben superar un tamaño máximo recomendado de 200kg y para utilizar con colada de fundición gris y aleaciones de cobre debe ser entre 9 y 13.6 kg, siendo estos moldes más utilizados para la fabricación de productos pequeños (Oviedo Fierro & Vinueza Lozada, 2010).

Según Kalpakjian & Schmid (2008), las superficies interiores del molde se recubren generalmente con algún material refractario, como por ejemplo el grafito, para aumentar la vida útil del molde y para evitar adhesión a las paredes facilitando el desmoldeo, también menciona que sirven como aislantes térmicos permitiendo de cierta manera controlar la velocidad de solidificación de la fundición.

Cálculos de las condiciones de la colada.

En el proceso se distinguen básicamente dos etapas, las cuales son: el vertido del metal en estado líquido para llenar el molde, y la segunda la solidificación del metal, etapas que pueden ser descritas mediante las ecuaciones de dinámica de fluidos, según Murcia et al. (2011), el proceso de colada en su etapa líquida es considerado como un fluido newtoniano, es decir, incomprensible, con flujo laminar y con una densidad constante, lo cual responde a las ecuaciones de conservación de la masa, momento y energía que son:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla.[\rho u] = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial [\rho u]}{\partial t} + \nabla.[\rho u u] = \nabla.[\mu \nabla u] + s \quad (2)$$

$$\frac{\partial [\rho H]}{\partial t} + \nabla.[\rho u H] = \nabla.[k \nabla T] \quad (3)$$

Donde ρ es la densidad, t es el tiempo de llenado del molde, μ es la viscosidad del material en estado líquido, k constante de conductividad térmica, H entalpía, T es la temperatura, g la gravedad, u vector velocidad, y el término S relaciona la convección natural y según el mismo autor es:

$$S = -\frac{C(1-f_1)}{f_1^3} u + \rho g \beta \left(T - T_{ref}\right) \quad (4)$$

Donde C es la constante que relaciona la fase de solidificación, f_1 la porción líquida y β es el coeficiente volumétrico de expansión.

De estas ecuaciones diferenciales se pueden encontrar soluciones analíticas que ha sido estudiadas y son de gran ayuda al momento de determinar o calcular los sistemas de

alimentación y vertido, para ello se va a explicar las leyes básicas que gobiernan el fenómeno de fluidos

Ley de Torricelli.

Torricelli dice que la velocidad de un fluido al pasar por un orificio en el fondo de un recipiente lleno, es la misma velocidad de un cuerpo en caída libre, es decir:

$$v_f = \sqrt{2gH} \tag{5}$$

Donde g es la gravedad en m/s y H la altura.

El flujo volumétrico del metal fundido viene dado por:

$$Q_v = A.v = A.\sqrt{2gH} \tag{6}$$

Donde Q_v es el flujo o caudal en m^3/s.

También con las mismas expresiones se puede calcular el caudal másico que viene expresado por Q_m medido en kg/s.

$$Q_m = Q_v.\rho = A.v.\rho = A\rho\sqrt{2gH} \tag{7}$$

Ley de la continuidad.

Esta ley dice que el flujo de un fluido que pasa a través de un canal lleno, es el mismo en todos los puntos del canal, tomado como 1 y 2 puntos diferentes (Elbel & Havlicek, 2014).

$$\rho_1.v_{1.}A_{1=}\rho_2.v_2.A_2 \tag{8}$$

Considerando que la densidad se mantiene constante, a lo largo de todo el proceso, aunque eso en la realidad no ocurre, ya que la densidad de los materiales varía con la temperatura, pero se puede asumir de esta manera para simplificar los cálculos, quedando:

$$v_{1.}A_{1=}v_{2}.A_{2} \tag{9}$$

Teorema de Bernoulli.

Este teorema relaciona la presión, velocidad, la elevación un fluido y las pérdidas de fricción en un sistema lleno de fluido, es decir la conservación de la energía (Kalpakjian & Schmid, 2008).

$$P_1 + \frac{\rho.v_1^2}{2} + \rho.g.H_1 = P_2 + \frac{\rho.v_2^2}{2} + \rho.g.H_2 \tag{10}$$

Número de Reynolds.

Es un número adimensional que se utiliza para describir la característica del flujo de un líquido, es decir para saber si el flujo es laminar o turbulento.

$$Re = \frac{v.D.\rho}{\eta} \tag{11}$$

Donde v es la velocidad del líquido, D el diámetro del canal, η la viscosidad dinámica y ρ la densidad del líquido.

Según Kalpakjian & Schmid (2008), en los sistemas de alimentación de colada un número de Reynolds está entre 2000 y 20000, donde un valor menor a 2000 representa un flujo laminar, entre 2000 y 20000 es una mezcla de flujo laminar y turbulenta, para fundición este valor resulta tolerable, y para Re mayor a 20000 es un flujo completamente turbulento, que podría causar atrapamiento de aire en el interior del molde.

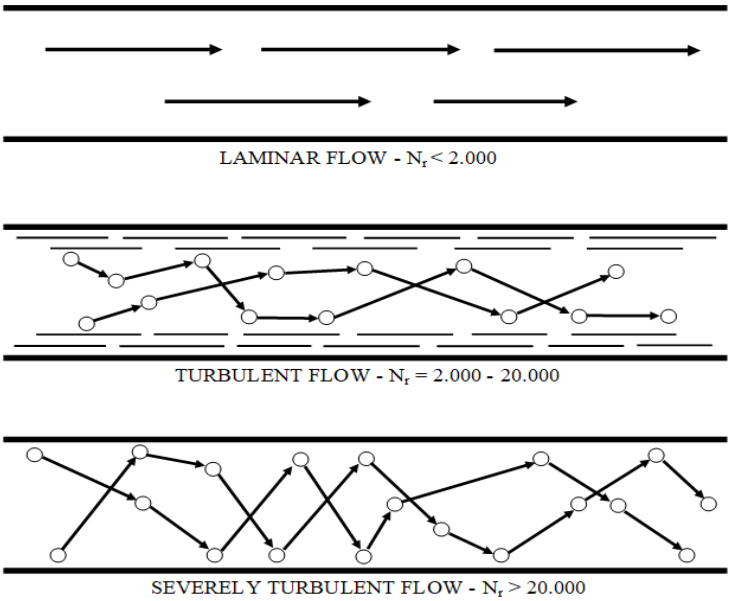


Figura 4. Tipos de flujo según número de Reynolds

Recuperado de Elbel & Havlicek (2014)

Tiempo de llenado.

Considerando que la altura de la base del bebedero sea la misma que la altura de los canales de alimentación, la velocidad de llenado permanece igual, y por las Leyes de la Continuidad, se puede expresar el tiempo de llenado como:

$$tlt = \frac{V}{Q} = \frac{V}{A.v} \tag{12}$$

Donde, tlt es el tiempo de llenado total del molde en segundos, V es el volumen de la cavidad del molde, Q el caudal volumétrico que puede ser expresados en términos del área trasversal del bebedero y su velocidad.

Según menciona Garcés García (2016), el tiempo de llenado deber ser multiplicado por un factor de 3, ya que el metal líquido que pasa a través de la sección transversal del bebedero no

ocupa todo el espacio, este valor fue tomado de forma experimental durante los procesos de fundición.

Tiempo de solidificación.

Para el tiempo de solidificación se puede utilizar la Regla de Chvorinov, la cual fue establecida en los años 40 por Nicolas Chvorinov e indica que una relación volumen/área mayor, solidificará más lentamente que una menor, esta regla fue creada a partir de ensayos y experiencias prácticas (Contreras Sánchez, Tapia Martínez, Vargas Moreno, & Villegas Valdés, 2008).

$$tst = B\left(\frac{V}{A}\right)^n \tag{13}$$

Donde, V es el volumen de la colada, A es la superficie de la colada en contacto con el molde, y B es una constante del molde, n es una constante que según Askeland & Phulé (2004), toma un valor de 2 y según Kalpakjian & Schmid (2008), puede estar entre 1.5 y 2.

Garcés García (2016), dice que la constante B es dependiente de las propiedades del molde y material de la colada, así como de las temperaturas a las cuales se van a realizar el proceso de colada, y puede calcularse mediante la siguiente fórmula.

$$B = \left[\frac{\rho_m L}{T_m - T_0}\right]^2 \left[\frac{\pi}{4k\rho c}\right]\left[1 + \left(\frac{c_m \Delta T_s}{L}\right)^2\right] \tag{14}$$

$$B = \left[\frac{\rho_m L}{T_m - T_0}\right]^2 \left[\frac{\pi}{4k\rho c}\right]\left[1 + \left(\frac{c_m (T_v - T_m)}{L}\right)^2\right] \tag{15}$$

Donde, T_m temperatura de fusión de la colada (K), T_o temperatura inicial de molde (K), ΔT_s es el sobrecalentamiento (K), T_v temperatura de vertido (K), L el calor latente de fusión (J/kg), k conductividad térmica del molde $(W/m.K)$, ρ densidad del molde (kg/m^3), c calor específico del molde $(J/kg\,.K)$, ρ_m densidad del metal (kg/m^3), c_m calor específico del metal $(J/kg\,.K)$.

Cálculo del sistema de alimentación y compensación de colada.

Un sistema de alimentación para fundición por gravedad elemental está compuesto por los elementos mostrados en la figura 5.

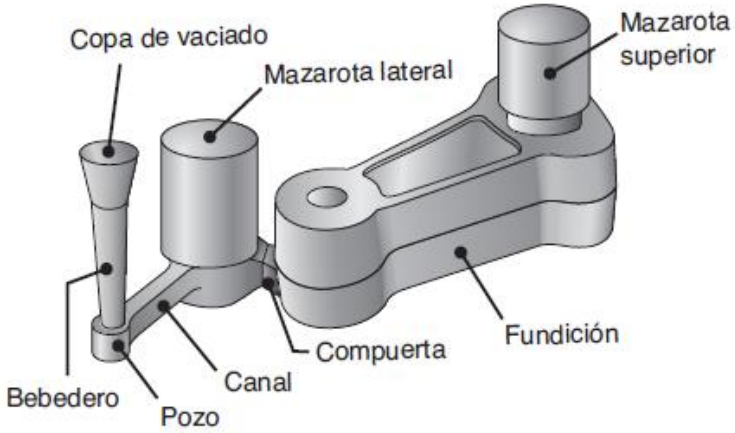


Figura 5. Elementos sistema de alimentación de colada

Recuperado de Kalpakjian & Schmid (2008)

- **Copa de vaciado:** también llamado copa de colada, su función es mantener alimentado de metal líquido al resto de cavidades del molde y retener escoria.
- **Bebedero:** su función es minimizar la turbulencia en el fondo del mismo, y evitar que se introduzca aire en el resto del sistema, el dimensionamiento del bebedero asegura un buen elemento fundido.
- **Pozo:** ayuda a reducir las turbulencias y evitar la introducción de aire al sistema.
- **Canal:** por lo general es una sección trasversal rectangular y distribuye el metal líquido hacia los canales de ataque de una manera uniforme.
- **Compuerta:** también llamados canales de ataque o de entrada son los encargados de distribuir la colada hacia las cavidades del molde, generalmente son rectangulares.

- **Mazarota:** puede o no formar parte del sistema de alimentación, pero también puede estar ubicado al final o en otro lugar, este elemento ayuda a reducir los defectos causados por contracción debido a la solidificación, son diseñados para ser el último elemento en solidificarse.

Cálculo de la Mazarota.

La mazarota debe ser colocada de manera estratégica en el molde, estas son muy útiles para controlar el proceso de enfriamiento, la mazarota debe solidificarse totalmente momentos después de la fundición, el volumen de la mazarota debe ser suficiente para compensar la contracción mediante la alimentación de metal y la presión debe evitar la formación de agujeros, además de ayudar al llenado de la cavidad (Kalpakjian & Schmid, 2008).

Según Navas, Batista, & Suchkov (1990), hay dos métodos de cálculo de la mazarota, el primero es el método del volumen y el segundo basando en el coeficiente del módulo de enfriamiento, detallados a continuación:

Volumen mínimo.

Se calcula el diámetro que debe tener la mazarota para poseer un volumen mínimo, mediante la siguiente ecuación:

$$V_{maz} = k.c.V_{pieza} \tag{16}$$

Donde V_{maz} es el volumen mínimo de la mazarota, k factor de seguridad que normalmente toma el valor de 2, c es el coeficiente de contracción del material a fundir y V_{pieza} es el volumen de la pieza que se requiere fabricar.

La mejor geometría para construir una mazarota es una esfera ya que solidifica más lentamente, pero debido a la dificultad en su fabricación lo más aconsejable es utilizar un cilindro por la facilidad de ser maquinado en el molde, además Navas et al. (1990), dice que la altura de mazarota puede ser considerada como dos veces su diámetro.

Módulo de enfriamiento.

El módulo de enfriamiento es un parámetro geométrico que relaciona el volumen de la pieza sobre el área de contacto de la pieza con el molde, y da una idea de la velocidad con la que se enfría la pieza (Navas et al., 1990).

$$M_{enfriamiento} = \frac{V_{pieza}}{A_{pieza}} \quad (17)$$

Según el mismo autor el módulo de enfriamiento de la mazarota M_{maz}, debe ser 1.2 veces mayor que el de la pieza, cumpliendo así con la condición mencionada anteriormente de que la mazarota debe solidificarse después de la pieza.

$$M_{maz} = 1.2\, M_{pieza} \quad (18)$$

Cálculo del Bebedero.

El llenado con el metal fundido y su flujo dentro de todas las cavidades del molde es un proceso crítico en la colada. Para que este proceso sea llevado a cabo con éxito el fluido debe llenar todos los sitios del molde antes de solidificarse esto depende de varios factores como la velocidad de vaciado, el tipo de flujo, temperatura de vaciado, además de la geometría del bebedero. (Contreras Sánchez et al., 2008).

García Chacón (2013), menciona que le bebedero debe dotar al fluido de la energía potencial y cinética necesaria para ocupar todas las cavidades del molde, tomando estas consideraciones se lo pueden modelar mediante el teorema de Bernoulli, con la ayuda de Reynolds para asegurar un flujo laminar y la ley de continuidad.

La forma teórica (figura 6) que debería tener el bebedero es de una hipérbola de cuarto grado, pero en la práctica, por cuestiones de fabricación, se puede reemplazar por un cono truncado, del cual es importante el diseño de la base del bebedero para asegurar una entrada correcta del flujo.

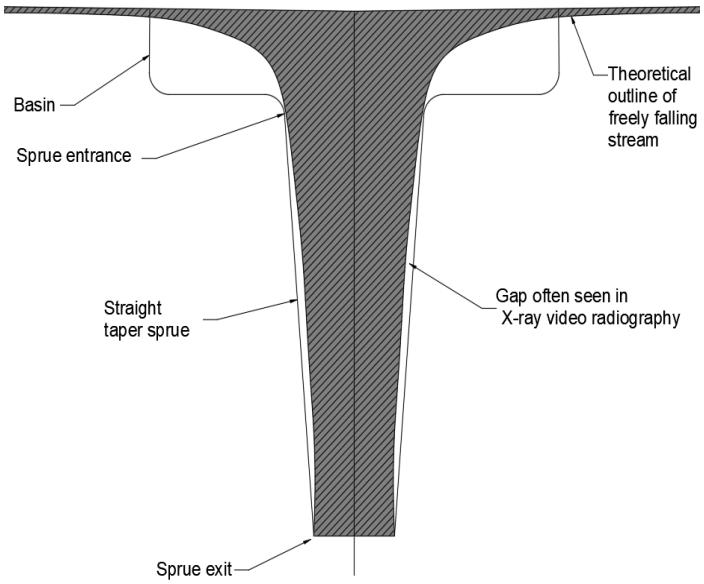


Figura 6. Forma ideal del bebedero

Recuperado de Elbel & Havlicek (2014)

Cálculo de la Taza de Colada.

La taza de colada se encuentra en la parte superior del bebedero, su función principal es de estabilizar el flujo de entrada, la geometría más utilizada es de forma cónica, esta forma tiene

poco control de la velocidad del fluido generando turbulencias, pero para fundiciones pequeñas se comporta de una manera tolerable (García Chacón, 2013).

La figura 7 recuperada de García Chacón (2013), es tomada como punto de partida para el dimensionamiento de la taza de colada.

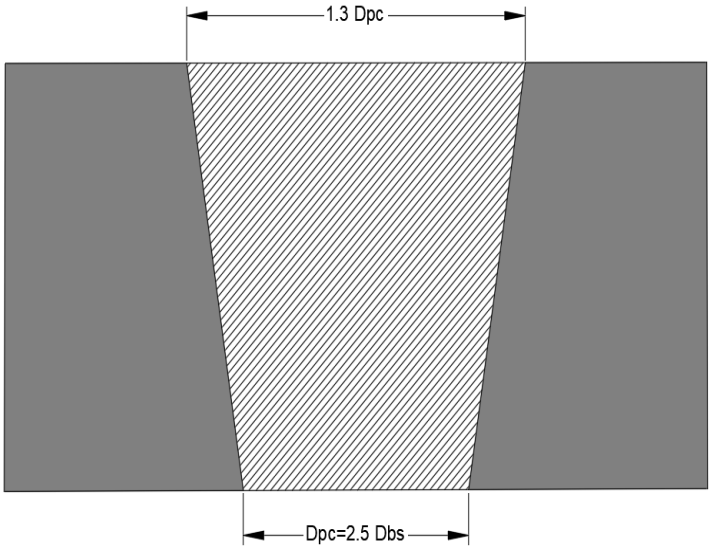


Figura 7. Dimensionamiento de la taza de colada

Recuperado de García Chacón, (2013)

El diámetro superior del bebedero en la figura está representado por Dbs, y Dpc es el diámetro inferior de la taza de colada, la altura de la taza de colada está definida por la altura del molde.

Cálculo Canales de Colada y Ataque.

Una vez calculado el diámetro de la base inferior del bebedero, se puede calcular el área de la base inferior y utilizarla para dimensionar el área que requieren los canales de colada. Para este cálculo se va a utilizar la relación de colada, describe las áreas de las secciones transversales

de los canales de colada y ataque con respecto a la sección de la base inferior del bebedero, esto se lo realiza para obtener caudales lo más uniformes posibles en todos los canales (Boatswain Medina, 2018).

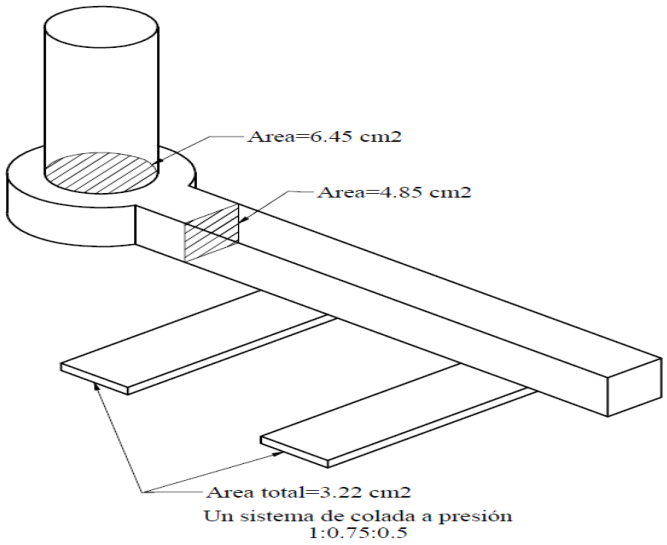


Figura 8. Relación de coladas en los canales de alimentación

Recuperado de Boatswain Medina (2018)

La relación de coladas viene dada por la experiencia de personas especialistas en el tema de fundición, así como varias relaciones empíricas para determinar las secciones de los canales, la relación de colada se expresa así:

$$A_{bebedero_i} : A_{c_colada} : A_{c_ataque} \tag{19}$$

Del mismo autor mencionado anteriormente, se muestra la tabla 1, que muestra las relaciones de coladas más utilizadas.

Tabla 1.
Relaciones de colada más comunes

Material	Relación
Acero	1:2:1.5
	1:3:3
	1:1:0.7
	1:2:2
Fundición Gris	1:3:3
	1:4:4
	1:1.3:1.1
Aluminio	1:2:4
	1:3:1
	1:3:3
Bronce	1:1:1
	1:1:3

Los canales de colada y de ataque pueden tener una forma rectangular o cuadrada, pero para facilitar el desmolde se los hace de sección transversal trapezoidal como se muestra en la figura 9.

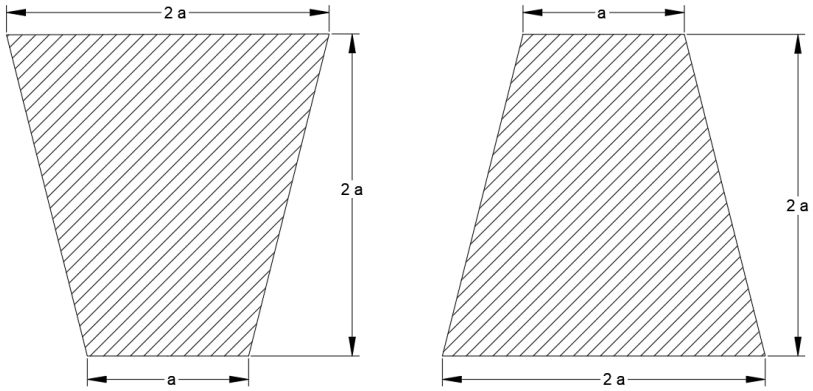


Figura 9. Dimensionamiento del canal de colada y ataque

Recuperado de Boatswain Medina (2018)

El proceso para el cálculo del canal de ataque es el mismo, hay que considerar cuantas piezas se fundirán simultáneamente, por lo que la relación de coladas para el canal de ataque se divide para 2, quedando:

$$A_{c_ataque} = A_{bebero_i} \tag{20}$$

Cálculo del Pozo de Colada.

García Chacón (2013), dice que el pozo es la zona de transición del bebedero con el canal de colada, su función es de asegurar una transición ligera, sosegada del metal, el fluido llega con mayor rapidez y lo direcciona horizontalmente hacia el canal. El autor sugiere un diseño cilíndrico por su facilidad de fabricación y sencillez, en base a la figura 10, la cual dice que ha sido confirmada por Isawa (1993).

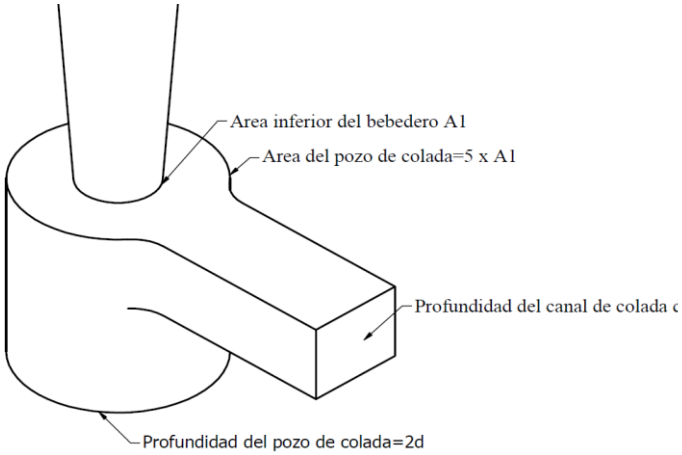


Figura 10. Dimensionamiento del pozo de colada

Recuperado de García Chacón (2013)

Simulación de la colada.

Las industrias que se dedican a producir elementos mediante fundición batallan a diario con defectos de calidad y productividad, ya que el control de los parámetros del mencionado

proceso es una tarea compleja y requiere de especial atención en las variables que afectan directamente al producto, para ello se han propuesto varias técnicas para tratar de sobrepasar estos defectos, como diagramas de causa efecto, diseño de experimentos (DoE), redes neuronales y simulación de fundición mediante software (Dabade & Bhedasgaonkar, 2013).

Según Pérez, Abate, Martínez Krahmer, Cagnoli, & Tamarit (2016), el volumen de la generalidad de los metales fundidos es superior en fase líquida que en sólida, estos se contraen al solidificarse, produciendo defectos como rechupes, porosidades, depresiones superficiales entre otros, para disminuir estos efectos la simulación computacional es una de las herramientas que permite la mejora del diseño de piezas nuevas así como de los procesos de fabricación.

En las empresas que se dedican a fabricar piezas fundidas existe un gran rechazo de productos terminados, debido a los mencionados defectos, en la actualidad existe varios programas computacionales que ayudan a simular las condiciones de enfriamiento, calentamiento, llenado, solidificación de un molde de fundición, permitiendo de esa manera evitar dichos problemas o defectos. Además, dichos programas permiten una retroalimentación de todo el proceso, abarcando desde el diseño del modelo y el molde, hasta las condiciones mencionadas anteriormente, siendo capaces de modificar cualquier parámetro en cualquier momento del proceso.

Estos programas computacionales, permiten generar elementos fabricados mediante fundición que tengan alta precisión con mejores acabados superficiales y evitan el reprocesamiento del producto final, aumentando la competitividad y reduciendo costos (Prabhakara Rao, Chakraverthi, Kumar, & Balakrishna, 2011).

Ravi (2010), menciona que en un estudio reciente el uso de CAD/CAM y la simulación reducen el tiempo promedio para obtener un buen producto al primer intento mediante fundición en un 30%, y redujo a la mitad la tasa de rechazo promedio (4.1%).

Algunos de los programas más usados son: QuikCAST, ViewCast, ProCAST, SolidCAST, Magmasosft, AutoCAST-X, Ansys, CFD de Autodesk, entro otros; cada uno de estos tienen sus ventajas y desventajas, que ofrece diferentes posibilidades, algunos más que otros, pero todo depende de la experiencia, conocimientos y necesidad de la persona que requiere usar dicho software. Ver figura 11.

Software Program	**Company and Location**
AutoCAST	Advanced Reasoning Technologies P. Ltd., Mumbai
CAP/WRAFTS	EKK, Inc., Walled Lake, Michigan, USA
CastCAE	CT-Castech Inc. Oy, Espoo, Finland
Castflow, Castherm	Walkington Engineering, Inc., Australia
JSCast	Komatsu Soft Ltd., Osaka, Japan
MAGMASoft	MAGMA GmbH, Aachen, Germany
MAVIS	Alphacast Software, Swansea, UK
Nova-Solid/Flow	Novacast AB, Ronneby, Sweden
PAM-CAST/ProCAST	ESI Group, Paris, France
RAPID/CAST	Concurrent Technologies Corp., USA
SIMTEC	RWP GmbH, Roetgen, Germany
SOLIDCast	Finite Solutions, Inc., Illinois, USA

Figura 11. Programas de simulación

Recuperado de Ravi (2008)

Estudios muestran que la simulación computacional utiliza varios métodos para resolver problemas de solidificación y enfriamiento del procesos de fundición, estos se basan en métodos de diferencias finitas (FDM), elementos finitos (FEM) o en elementos límites (BEM), pero en general el FEM es el más usado y brinda resultados precisos, rápidos y más fáciles de ejecutar (Choudhari et al., 2014)

Generalmente la lógica de los programas de simulación tiene tres partes, que son el preprocesamiento donde el programa lee el CAD de la geometría y genera el mallado, el procesamiento principal donde se añaden las condiciones de frontera y variables necesarias para procesar la información, y por último el post procesamiento donde se presentan los resultados y el análisis (Prabhakara Rao et al., 2011); hay autores que expanden un poco más esta lógica pero en definitiva se compone de entradas, salidas y retroalimentaciones como se puede ver en la figura 12.

Figura 12. Lógica en el software de simulación

Recuperado de Ravi (2010)

Se menciona el trabajo de Ravi (2010), que en el proceso de simulación de la fundición se pueden distinguir cinco facetas las cuales son:

1. **Recolección de información:** esta es la etapa más importe del proceso, ya que de la validez de la información recolectada dependerá los resultados del proceso. En este paso se requiere la información del modelo (es decir el CAD 3D), las propiedades del material del modelo, las propiedades termo físicas, densidad, conductividad térmica, viscosidad, coeficiente de expansión lineal, contracción volumétrica, y parámetros del proceso de fundición (Ravi, 2008).

2. **Métodos de diseño:** en este paso se crea o genera el molde partiendo del modelo, en el cual se agregan o generan los elementos propios de un molde como por ejemplo núcleos, cavidades, reboses, entradas de la colada, etc. Además, existen programas que simplifican la geometría para hacer más liviano el modelo 3D y consumir menos recursos computacionales.

3. **Simulación:** esta es la etapa más importante dentro de todo el proceso, aquí se especifican todas las entradas, las condiciones de frontera, las variables, además se crea o genera el mallado, dependiendo del software utilizado puede ser mediante elementos finitos o volúmenes finitos, de todo este proceso de introducción de datos depende los resultados obtenidos.

4. **Optimización:** aquí se puede comparar varias simulaciones con diferentes entradas o condiciones, mediante la variación de los parámetros y la comparación con los diferentes resultados obtenidos al variar dichos parámetros se puede seleccionar la mejor combinación u opción con el escenario más adecuado.

5. **Cierre del proyecto:** aquí se generan los reportes de los resultados, es necesario tener documentación que respalde y valide la simulación, aquí se incluyen documentos, imágenes, videos, etc.

Como se puede observar la simulación permite tener toda la información necesaria para dar una retroalimentación y si fuera necesario realizar un cambio en cualquier fase o etapa del proceso.

Necesidad de la simulación.

Como se ha mencionado anteriormente, el proceso de fundición lleva consigo varios problemas o defectos, Gondkar & Inamdar (2014) dice que, la simulación computacional es una herramienta poderosa que permite mejorar la calidad mediante la predicción, ubicación y eliminación de los defectos, aumentar el rendimiento reduciendo el volumen de los vertederos y las vías de llenado, un rápido desarrollo de nuevos elementos fundidos reduciendo el número de prototipos y el ahorro en desperdicio de material.

La simulación del proceso de fundición representará los procesos desde el punto de vista físico y matemático. A partir de la perspectiva matemática, los modelos se formulan como ecuaciones gobernantes y condiciones de frontera, para la generalidad de los problemas de ingeniería, los modelos no son lineales, lo cual dificulta mucho su resolución por medios convencionales, los métodos numéricos se emplean para transformar las ecuaciones no lineales en ecuaciones simultáneas y algebraicas. Estas ecuaciones representan la relación física del sistema de colada y el comportamiento del material (Fu & Yong, 2009).

Fabricación del molde.

El proceso de fabricación de un modele incluye el diseño, la manufactura como tal y las pruebas, por lo general las cavidades de los moldes poseen superficies complejas para ello los procesos más comunes utilizados en la fabricación son el fresado y la electroerosión, con el desarrollo de los centros de mecanizado por control numérico, hoy en día se puede fabricar

prácticamente cualquier geometría deseada (Arroyo Osorio, Mendes de Aguiar, & Rodríguez Baracaldo, 2012).

Contreras Sánchez, Tapia Martínez, Vargas Moreno, & Villegas Valdés (2008), mencionan que los centros de mecanizado hoy en día son de gran importancia ya que permiten manejar tolerancias muy estrechas, acabados de mejor calidad, eficiencia en la productividad, pero como todo desarrollo tecnológico implica mayores recursos económicos.

Estos centros de mecanizado por control numérico esta apoyados en software de manufactura asistida por computador (CAM), que la intención es reducir la intervención y limitación del hombre al producir piezas complejas, además permite verificar el proceso de fabricación de moldes en todas sus etapas, pero esto no quiere decir que no es necesaria la intervención humana, sino que se necesita de personal más capacitado para lograr un proceso exitoso (Ramírez Yánez, 2011).

Según Avendaño Zárate (2009), para iniciar con la manufactura asistida por computador es necesario identificar ciertos parámetros como son:

1. Las características del tipo de fresado (en dirección del avance o en contra).
2. Los tipos de operaciones que se van a realizar (selección de herramental).
3. Los parámetros de corte (velocidad de avance, velocidad de corte, número de filos, etc.)
4. Las características técnicas de la máquina en la cual va a ser fabricado (potencia, largo, ancho, altura de la bancada).

En el trabajo de Oviedo Fierro & Vinueza Lozada (2010), dice que la selección del material del molde depende de varios factores como la temperatura de colado del material, las

dimensiones de la pieza que se requiere fabricar, la cantidad de elementos a fabricarse, mecanibilidad, estabilidad dimensional, resistencia a la fatiga térmica, costos, etc.

Todos estos parámetros se encuentran en función de lo que se requiere fabricar y del factor económico disponible.

Método

Tipo de investigación

La investigación se va a realizar de tres formas, la primera es de tipo cualitativa que analizará los fenómenos que se presentan durante el proceso de colada mediante la obtención de información de varias fuentes investigativas, la segunda es de carácter cuantitativo ya que será necesaria información numérica para evaluar el comportamiento de la simulación y por último con un enfoque experimental mediante la generación de un prototipo para la evaluación de los resultados obtenidos mediante software.

En el ámbito académico se puede definir el tipo de investigación de manera más conveniente según el estudio que se va a realizar, pero en el caso de estudios experimentales es necesario que se conjuguen la investigación documental y la de campo, siendo así también este trabajo de tipo de investigación mixta (Escuela de Administración de Empresas, 2016).

Tabla 2.
Tabla de etapas, variables y niveles

Etapa	Variable		Niveles	Ref
1	Dimensionamiento del modelo	Dimensiones	Peso	Abate, Perez, Pouton, Martinez Krahmer, & Brignoe (2015) Ravi (2008)
2	Cálculos	Tiempo de llenado	Tiempo de solidificación Número de cavidades	Choudhari, Narkhede, & Mahajan (2014) Vazquez (s.f) Garcés (2016)
3	Selección de material	Molde	Fundición	Bhardwaj, Rawlani, & Mukherjee (2014) Jami & Llanes (2018)

Secuencia metodológica.

El estudio se va a realizar en siete etapas las cuales son: dimensionamiento del modelo para las pesas adhesivas mediante software CAD, selección de material idóneo tanto para el molde y colada, diseño de los sistemas de colada, diseño del molde, simulación, fabricación del molde prototipo, por último, una validación experimental mediante fundiciones utilizando el molde prototipo verificando el llenado, temperatura, rechupes, peso adecuado del producto, etc. (ver figura 13)

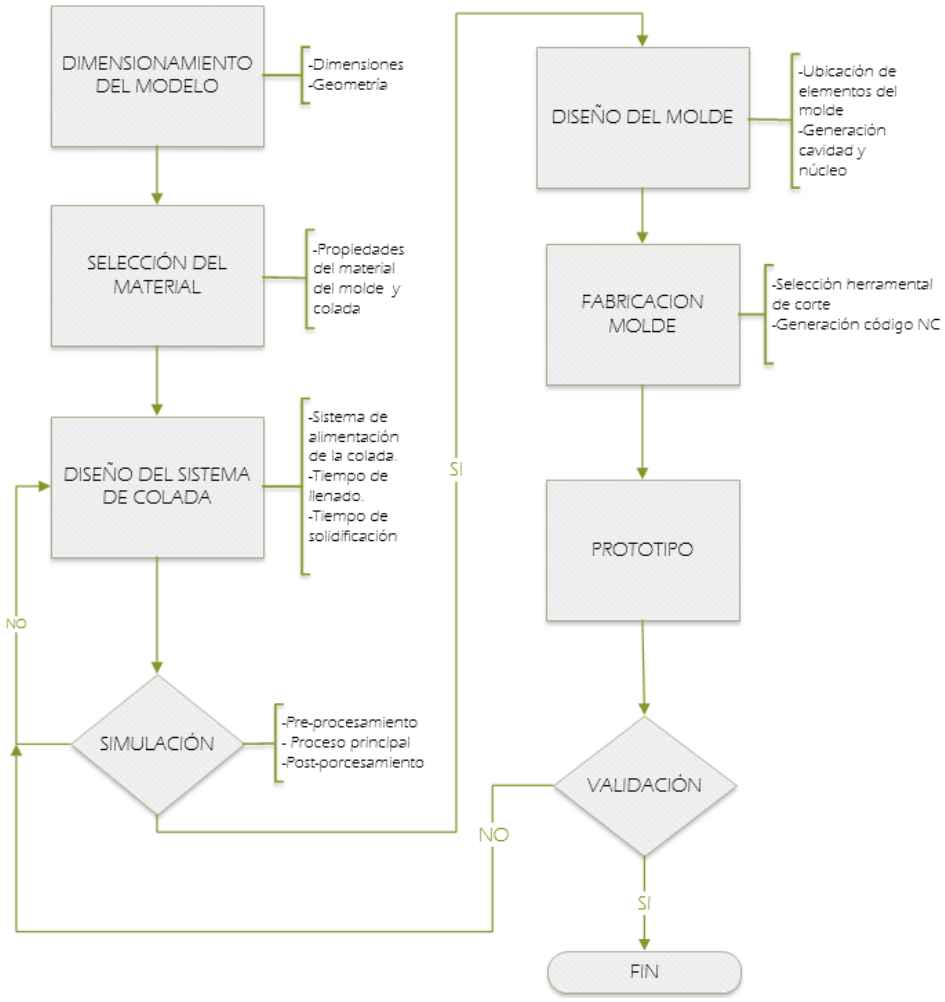


Figura 13. Secuencia metodológica

Dimensionamiento del modelo de partida.

Para el dimensionamiento del modelo se toma la geometría y las dimensiones del elemento que va a ser fabricado mediante el proceso de fundición, esto se lo realiza mediante la medición o ingeniería inversa de las pesas comercializadas en el país. Abate, Pérez, Pouton, Martínez Krahmer, & Brignone (2015), coincide que este debe ser el primer paso que se debe dar para el diseño de un molde para fundición. El modelo CAD va a ser generado mediante el software de Autodesk, Inventor. Además, una vez obtenido la geometría de modelo mediante software se le añade las propiedades del material y se puede verificar computacionalmente el peso, que es el parámetro que más interesa para el caso de las pesas de balanceo.

Para dimensionar el modelo se va a utilizar un calibrador vernier digital que tiene una apreciación de 0.1 mm y una exactitud de ± 0.2mm, este instrumento va a ser utilizado para generar un modelo previo con la geometría tomada de una pesa de balanceo, ya utilizada de desecho.

Las pesas de balanceo en el mercado se venden en tiras de 8 unidades (ver figura 14), las que son más utilizadas en el mercado nacional para vehículos livianos, son de un peso de ¼, y ½ de onza o su equivalente aproximado de 7 y 14 gramos respectivamente.

Las tiras de pesas necesarias para cubrir la demanda nacional se van a determinar a partir del valor en peso de las importaciones del año 2018, que fue de 90432 kilogramos, dato que fueron tomados del sitio web de la Aduana del Ecuador y mostrados anteriormente en la figura 3, divido para el peso de las tiras que s de 84 gramos.

Figura 14. Tira de pesas para balanceo

Recuperado de https://cuenca.doplim.ec/pesas-para-balanceo-id-536249.html

Tabla 3.
Tabla de producción de pesas requerida

Producción	Cantidad
Número de tiras (total)	1076574
Número de tiras (mensual)	89715
Número de tiras (diarias)	4486
Número de tiras (por hora)	561

Como se puede observar en la tabla 3, el número de tiras por hora necesarias son de 561, por esta razón se desea diseñar un molde en el cual se pueda fabricar dos tiras de forma simultánea, teniendo de esta manera un proceso más eficiente.

Definido que se van a realizar tiras mixtas de 7 y 14 gramos, se procede a generar el modelo CAD, partiendo de las dimensiones tomadas con el calibrador las cuales se encuentran en la tabla 4, para esto se utilizó Autodesk Inventor y el resultado del modelo CAD se lo puede ver en la figura 15.

Tabla 4.
Dimensiones pesas de balanceo

	Pesa 7 gr	Pesa 14 gr
Largo (mm)	11	22
Ancho (mm)	14	14
Espesor (mm)	4	4

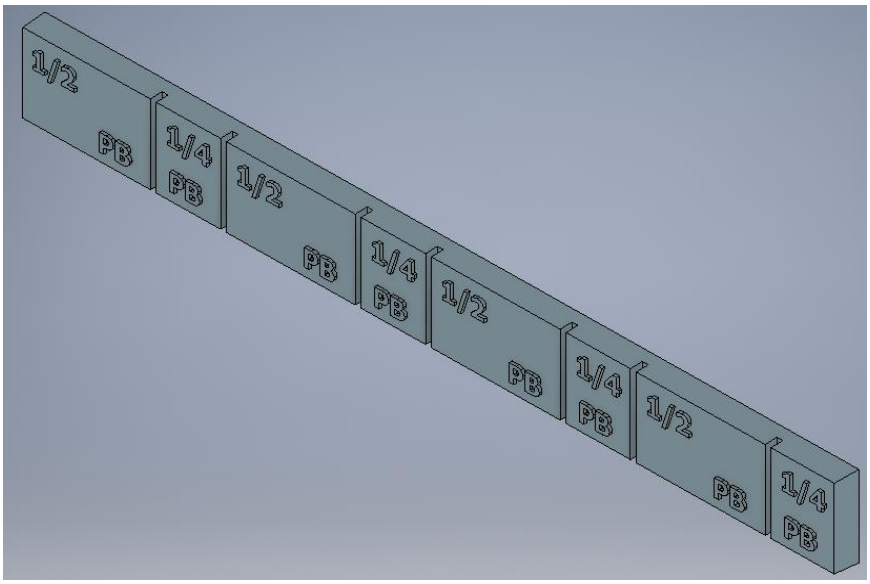


Figura 15. Modelo CAD de tira de pesas

En el software de diseño del CAD se introduce el material deseado, en este caso se utilizará plomo, y se puede constatar las propiedades dimensionales de las pesas de 7 gramos y 14 gramos, mostrado en la figura 16 y 17 respectivamente; y de toda la tira en la figura 18, mediante estos datos arrojados por el software se verifica que el peso de cada pesa es el correcto de acuerdo a las dimensiones dadas y la densidad del material.

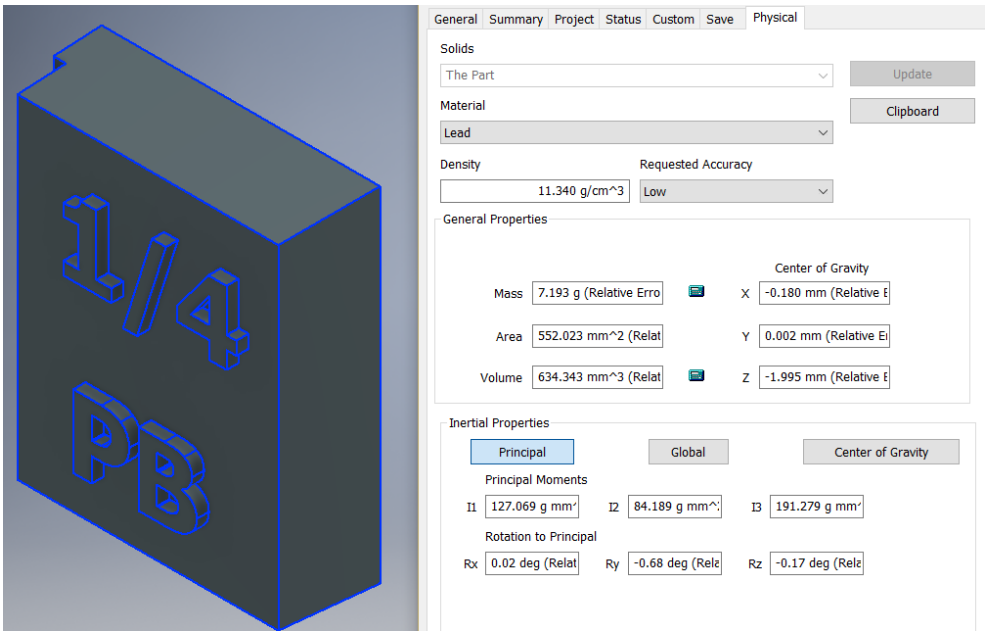


Figura 16. Propiedades físicas de las pesas pequeñas

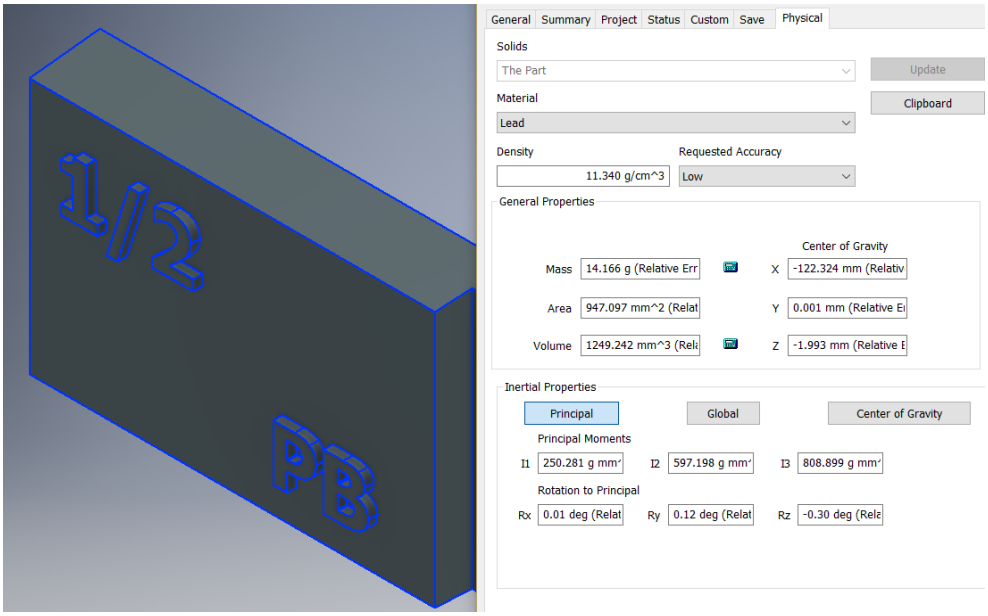


Figura 17. Propiedades físicas de las pesas grandes

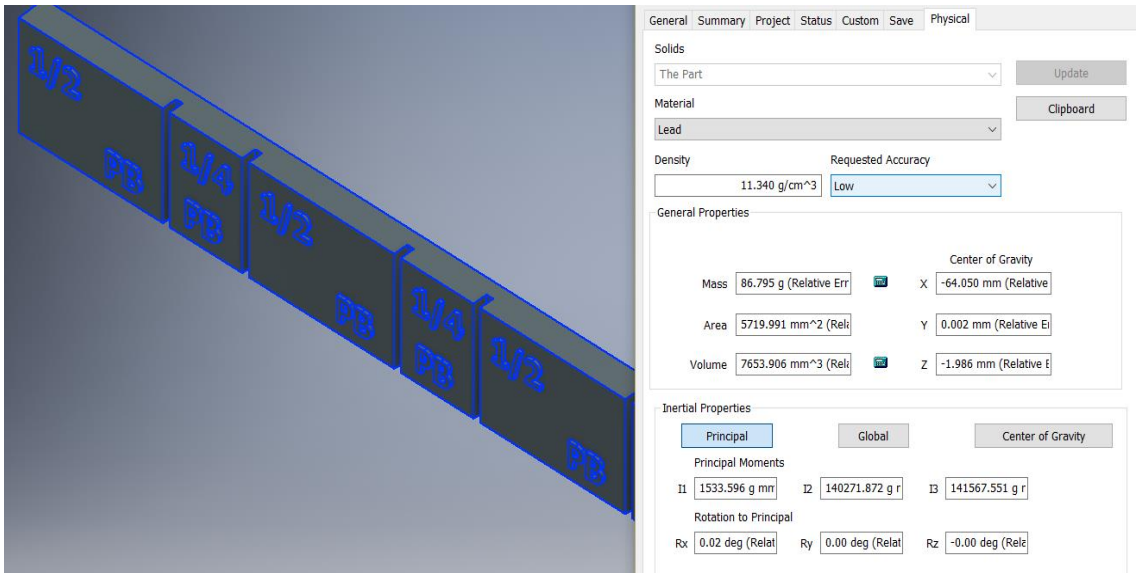


Figura 18. Propiedades físicas de la tira de pesas

Como se puede observar en las figuras 16, 17 y 18, las masa tanto de las pesas individuales, así como de la tira, concuerdan con los valores necesarios para cada pesa y con el obtenido de la tira en la tabla 5, si se observa en las figuras existe un pequeño exceso de masa, el cual va a ser compensado con la contracción volumétrica que sufre el material al momento de solidificarse en el molde, en este apartado se centrará netamente en dimensionar el modelo tratando de acercarse lo más posible al peso de 7 y 14 gramos, ya que es el parámetro más relevante en el caso de las pesas de balanceo de neumáticos.

Tabla 5.
Propiedades física tira de pesas

Propiedad	**Valor**
Masa (g)	86.795
Área (mm^2)	5719.991
Volumen (mm^3)	7653.906

Selección del material.

Material para la colada.

Para identificar el material que será usado, se obtuvo 15 muestras en locales de enllantado y balanceo de neumáticos en los que utilizan las mencionadas pesas de balanceo, como se puede observar en la figura 19, los especímenes fueron llevados al laboratorio del Centro Carrocero de Tungurahua para un análisis químico bajo norma ASTM E1085 2016, que es el método de prueba estándar para el análisis de acero de baja aleación por longitud de onda dispersiva de rayos x, espectrometría de fluorescencia.

A **B** **C**

Figura 19. Muestras de pesas adhesivas

Para el análisis químico se utilizó un Espectrómetro OLYMPUS DPO2000-C, con una precisión de 0.01 y las condiciones de temperatura, presión y energía en las que fueron realizadas el ensayo, bajo la norma ASTM E1085 2016, se muestran en la tabla 6.

Tabla 6.
Condiciones del ensayo

Condiciones del ensayo	
Lugar de ejecución del ensayo	Laboratorios Centro Carrocero Tungurahua
Fecha de ensayo	19 de noviembre de 2018
Tipo de ensayo	Cuantitativo
Temperatura del ensayo	21.5 °C
Presión atmosférica	1027 hPa
Energía	40 keV

Para ver el informe completo y detallado se puede referir al anexo 1, según el análisis químico el elemento aleante con mayor presencia es el plomo con 99%, en la tabla 7 se muestran algunas propiedades esenciales, que son útiles para el proceso de fusión del mencionado material.

Tabla 7.
Propiedades del plomo

Propiedades	**Valor**
Densidad [kg/m³]	11340
Tª fusión [C]	327.5
Tª ebullición [C]	1740
Entalpía de fusión [kJ/mol]	4.799
Viscosidad Dinámica [kg/m.s]	0.00247
Calor específico [J/(K·kg)]	129
Conductividad térmica [W/(K·m)]	35.3
Coeficiente de contracción [%]	2.6
Capacidad calorífica [J/g·ºC]	0.129
Densidad líquida (g/cm³)	10.7
Calor latente de fusión (J/kg)	22.5

Material para el molde.

Bhardwaj, Rawlani, & Mukherjee (2014), dice que el material del molde debe tener estabilidad dimensional, resistencia a altas temperaturas, resistencia al choque térmico, resistencia a la fatiga, soportar ciclos térmicos prolongados y repetidos, además debe tener una maquinabilidad adecuada, el mecanizado de la cavidad es el factor de costo más severo, las tasas avance y desgaste de la herramienta también influyen en los costos.

El acero más común a utilizarse en la fabricación de moldes permanentes es el AISI P20 en condiciones pre endurecidas de 30 HRC, para condiciones de fundición de baja presión es decir en llenado por gravedad, esto según Jami y Llanes (2018).

Según información en el catálogo Aceros para moldes de fundición inyectada y mejora de su productividad, de la empresa UDDEHOLM, recomienda para fabricación de piezas fundidas de plomo, estaño y zinc, utilizar un acero pretemplado aleado de níquel, cromo y molibdeno, llamado IMPAX SUPREME, el cual es equivalente a un acero AISI P20 modificado.

En el Ecuador la empresa IVAN BOHMAN C.A posee este acero, en la página web se encuentran las especificaciones, de las cuales se ha recogido las más relevantes en la tabla 8.

Además de las propiedades mecánicas del acero AISI P20, posee buena resistencia superficial, resistencia térmica, buenas propiedades de maquinabilidad y para el pulido y fotograbado, dureza uniforme, también al venir pre templado reduce el costo de esta operación, que mejorar las propiedades en general para ser utilizado como material para fabricar moldes para fundición.

Tabla 8.
Especificaciones acero AISI P20

Propiedad	Valor
Densidad (kg/m^3)	7860
Límite de fluencia (N/mm^2)	900
Módulo de elasticidad (N/mm^2)	205000
Resistencia a tracción (N/mm^2)	1020
Resistencia a la compresión (N/mm^2)	850
Coeficiente de expansión térmica	12.7x10^{-6}
Calor específico (J/kgK)	460
Conductividad Térmica (W/mK)	42

Cálculos sistema de colada.

Los cálculos para las condiciones de colada según Choudhari et al. (2014), comienza con los sistemas de llenado, cavidades y elementos necesarios para la colada, estos elementos bien calculados y ubicados darán como resultado una fundición exitosa. Vázquez (s. f.), dice que para poder predecir el comportamiento de los materiales es necesario utilizar datos de entrada confiables.

Además de cálculos de tiempo de llenado, que según Garcés García (2016), es aquel donde el metal fundido se cola o entra por todo el vertedero a través del área transversal, y llena la cavidad del molde, también el mismo autor dice que el tiempo de solidificación es aquel que trascurre hasta que el material comienza a formar estructuras cristalinas completamente sólidas desprendiendo la suficiente cantidad de calor para ello.

Mazarota.

A continuación, se realizará el cálculo del diámetro de la mazarota utilizando los dos métodos nombrados anteriormente que son el volumen mínimo y el módulo de enfriamiento.

Volumen mínimo. - Para ello se partirá de la ecuación número 16, con lo que se tiene:

$$V_{maz} = k.c.2V_{pieza}$$

$$V_{maz} = 796.006\ mm^3$$

Cabe aclarar que el volumen de la pieza es multiplicado por dos, ya que se va a fabricar dos tiras de pesas con una sola colada, por lo que el volumen mínimo de la mazarota debe cubrir las dos piezas a fabricar, ahora aplicando la fórmula para encontrar el volumen de un cilindro se obtiene el diámetro mínimo que debe tener la mazarota.

$$V_{maz} = \frac{\pi.{D_{maz}}^2}{4}.h_{maz} \quad (21)$$

$$A_{maz} = \pi.D_{maz}.\left(h_{maz} + \frac{1}{2}D_{maz}\right) \quad (22)$$

$$h_{maz} = 2.D_{maz} \quad (23)$$

Donde V_{maz} es el volumen, A_{maz} el área, D_{maz} el diámetro y h_{maz} la altura de la mazarota respectivamente.

Sustituyendo la ecuación 22 en 23 y despejando el diámetro se tiene:

$$D_{maz} = \sqrt[3]{\frac{2.V_{maz}}{\pi}} \quad (24)$$

$$D_{maz} = 7.9726\ mm$$

Módulo de enfriamiento. - Reemplazando la ecuación 17 en 18 y tomando los valores geométricos de volumen y área de la pieza que se encuentran en la tabla 5 tenemos el módulo de la mazarota teórico.

$$M_{maz} = 1.6057$$

Ahora utilizando la fórmula 17 pero con la mazarota, y reemplazando las fórmulas de volumen y área 21 y 22 respectivamente, se obtiene:

$$M_{maz} = \frac{V_{maz}}{A_{maz}}$$

$$V_{maz} = M_{maz}.A_{maz}$$

$$\frac{\pi.D_{maz}^2.h_{maz}}{4} = M_{maz}.\pi.D_{maz}\left(h_{maz} + \frac{1}{2}D_{maz}\right)$$

$$D_{maz} = 5.M_{maz}$$

$$D_{maz} = 8.0285\ mm$$

De los valores de diámetros calculados por los dos métodos los cuales son 7.9726 y 8.0285 mm, se debe escoger el mayor, ya que este proporcionará el menor volumen mínimo requerido para que la mazarota cumpla con su función, es decir el diámetro de diseño de la mazarota es de 8.0285 mm que para efectos de fabricación se trabaja con 8.5 mm, quedando dimensionada la mazarota como se muestra en la tabla 9.

Tabla 9.
Dimensiones de la mazarota

Dimensión	Valor
D_{maz} (mm)	8.5
h_{maz} (mm)	17
V_{maz} (mm^3)	964.665
A_{maz} (mm^2)	567.45

En el caso de las pesas al ser elementos delgados, con espesores pequeños, no es necesario una mazarota, pero el cálculo para los demás componentes del sistema de alimentación parte del diseño y dimensionamiento de la mazarota, además esta servirá para ayudar con la evacuación de la posible formación de gases dentro del molde.

Bebedero.

Para comenzar con el diseño del bebedero, primero se necesita calcular la velocidad de vertido, utlizando la ecuación 5 de la Ley de Torricelli y asumiendo que la altura del salto del bebedero es de h_2=30 mm, es un espesor comercial del bloque de acero que se va a maquinar para la fabricación del molde, y en base la facilidad de fabricación h_1=10 mm.

$$v_2 = \sqrt{2.g.h_2}$$

$$v_2 = 0{,}7672\ {}^{m}/_{s}$$

En la figura 20 se muestra como se tomaron los puntos para los cálculos del bebedero.

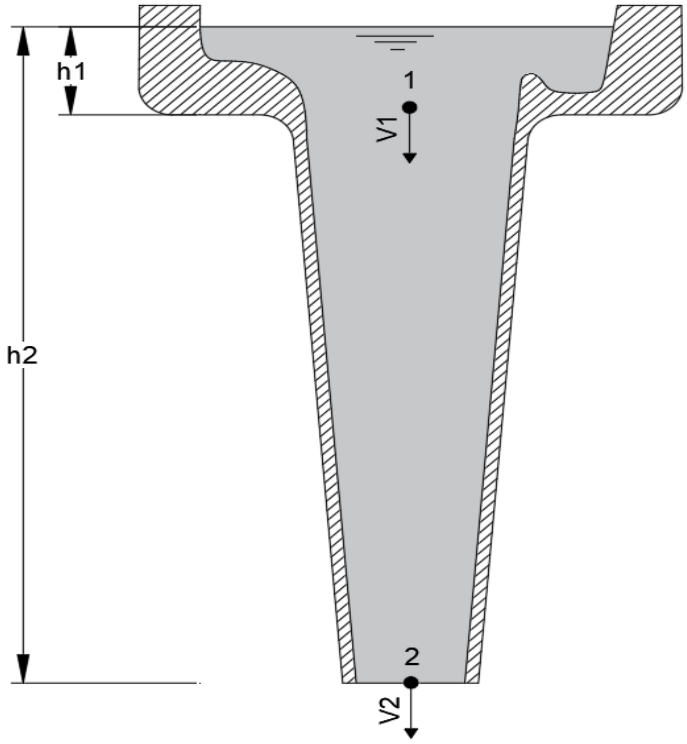


Figura 20.Puntos y alturas para el cálculo del bebedero.

Recuperado de Plaza Urrutia (2014)

Para determinar el diámetro de la base del bebedero, se despeja la ecuación 11, que representa el número de Reynolds, según lo mencionado anteriormente en los sistemas de llenado, el número de Reynolds varía típicamente entre 2000 y 20000, por lo cual se eligió un valor promedio de 10000, por lo que:

$$Re = \frac{v.D.\rho}{\eta}$$

$$D_2 = \frac{Re.\eta}{v_2.\rho}$$

$$D_2 = 2.8491\ mm$$

El diámetro inferior mínimo que debe tener el cono del bebedero es de 2.8491 mm, por cuestiones de fabricación se aproximará a 3 mm, como siguiente paso se calculará el diámetro superior, utilizando la ecuación 9 que es la Ley de continuidad.

$$v_1.A_{1=}v_2.A_2$$

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{v_2}{v_1}$$

$$\frac{\pi.\left(\frac{D_1}{2}\right)^2}{\pi.\left(\frac{D_2}{2}\right)^2} = \frac{\sqrt{2.g.h_2}}{\sqrt{2.g.h_1}}$$

$$\frac{D_1}{D_2} = \sqrt[4]{\frac{h_2}{h_1}}$$

$$D_1 = D_2.\sqrt[4]{\frac{h_2}{h_1}}$$

$$D_1 = 3.9482\ mm$$

Ya calculados los diámetros inferior y superior, D_2 y D_1 respectivamente, y la altura, queda dimensionado el bebedero, las dimensiones son redondeadas para facilitar la fabricación, como indica en la tabla 10.

Tabla 10.
Dimensiones del bebedero

Dimensión	Valor
D_{beb_i} (mm)	3
D_{beb_s} (mm)	4
h_{beb} (mm)	20
V_{beb} (mm^3)	193.732
A_{beb} (mm^2)	239.615

Taza de Colada.

De la figura 7 se deduce que:

$$D_{taza_i} = 2.5 \,.\, D_{beb_s} \tag{25}$$

$$D_{taza_i} = 10\ mm$$

$$D_{taza_s} = 1.3 \,.\, D_{taza_i} \tag{26}$$

$$D_{taza_s} = 13\ mm$$

La taza de cola de forma cónica queda dimensionada con los diámetros calculados anteriormente, y la altura por h_1 calculada que es la dimensión comercial menos la altura del bebedero, las dimensiones se muestran en la tabla 11.

Tabla 11.
Dimensiones de la taza de colada

Dimensión	Valor
D_{taza_i} (mm)	10
D_{taza_s} (mm)	13
h_{taza} (mm)	10
V_{taza} (mm^3)	1044.580
A_{taza} (mm^2)	576.597

Canales de Colada y Ataque.

Como el plomo es un material denso se seleccionará una relación de colada para el acero, mostrada en la tabla 1, que es el material con la densidad de la tabla más elevada, entonces la relación de colada elegida es 1:2:2. De la relación de coladas mostrada en la tabla 1 y la ecuación 19 se tiene:

$$A_{c_colada} = 2A_{bebero_i} \tag{27}$$

La ecuación para determinar el área de un trapecio es:

$$A_{c_colada} = \left(\frac{B_{mayor}+b_{menor}}{2}\right).h \tag{28}$$

De las ecuaciones 27 y 28, reemplazado con la variable "a" de la figura 7, y las dimensiones del canal de colada, se tiene:

$$2A_{bebero_i} = \left(\frac{B_{mayor}+b_{menor}}{2}\right).h \left(\frac{B_{mayor}+b_{menor}}{2}\right).h$$

$$2\pi\left(\frac{D_{beb_i}}{2}\right)^2 = \left(\frac{2a+a}{2}\right).2a$$

$$a = \sqrt{\frac{\pi.D_{beb_i}^2}{6}}$$

$$a = 2.1708\ mm$$

El proceso para el cálculo del canal de ataque es el mismo, hay que considerar que como se van a fundir dos piezas se necesitan dos canales de ataque, por lo que la relación de coladas para el canal de ataque se divide para 2, quedando:

$$A_{c_ataque} = A_{bebero_i} \tag{29}$$

En la tabla 12 se muestra el dimensionamiento de los canales de colada y ataque, ya redondeado los valores para facilidad de fabricación.

Tabla 12.
Dimensiones canal colada y ataque

	Colada	Ataque
B_{mayor} (mm)	5	3
b_{menor} (mm)	2.5	1.5
h (mm)	5	3
V (mm^3)	767.813	337.838
A (mm^2)	18.75	6.75

Pozo de Colada.

De la figura 10, mostrada en secciones anteriores se deduce las siguientes ecuaciones:

$$A_{pozo} = 5A_{bebero_i} \tag{30}$$

$$\pi\left(\frac{D_{pozo}}{2}\right)^2 = 5.\pi\left(\frac{D_{beb_i}}{2}\right)^2$$

$$D_{pozo} = \sqrt{5}.D_{beb_i}$$

$$D_{pozo} = 6.7082\ mm$$

$$h_{pozo} = 2.h_{canal_colada} \tag{31}$$

$$h_{pozo} = 10\ mm$$

Quedando definido el pozo de colada de forma cilíndrica, se muestran las dimensiones del pozo en la tabla 13.

Tabla 13.
Dimensiones pozo de colada

Dimensión	Valor
D_{pozo} (mm)	7
h_{pozo} (mm)	10
V_{pozo} (mm^3)	384,85
A_{pozo} (mm^2)	296.881

Cálculo tiempo de llenado.

Para el tiempo de llenado se calcula el área inferior del bebedero con un diámetro de 3 mm obtenido previamente, el volumen total de la fundición obtenido mediante Inventor, se toma la ecuación 12 y se reemplaza los valores obtenidos de la ecuación 6, dando como resultado:

$$tlt = \frac{V}{A.v}$$

$$tlt = 3.5712\ \text{s}$$

Cálculo del tiempo de solidificación.

Para el tiempo de solidificación se utiliza la regla de Chvorinov descrita en la ecuación 13, 14 y 15, además de las propiedades del plomo y del acero para el molde que se encuentran en las tablas 7 y 8, la temperatura de vertido será de 650 a 700 grados centígrados, para asegurar que el metal entre totalmente líquido, así como la temperatura del molde de 250 a 300 grados

centígrados para asegurar el llenado completo antes de la solidificación, dando como resultado un tiempo de solidificación de:

$$tst = 0.0004571\ min$$

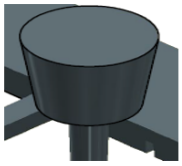
$$tst = 0.0274\ s$$

Dimensiones del sistema de colada.

Los elementos del sistema de colada quedaron dimensionados en los apartados anteriores, en la figura 21, se muestra las dimensiones de todos los sistemas, y el gráfico presenta las diferentes configuraciones para todo el sistema de colada, excluyendo la cavidad de la pieza.

Bebedero	
D_{beb_i} (mm)	3
D_{beb_s} (mm)	4
h_{beb} (mm)	20
V_{beb} (mm^3)	193.732
A_{beb} (mm^2)	239.615

Taza de colada	
D_{taza_i} (mm)	10
D_{taza_s} (mm)	13
h_{taza} (mm)	10
V_{taza} (mm^3)	1044.580
A_{taza} (mm^2)	576.597



Mazarota	
D_{maz} (mm)	8.5
h_{maz} (mm)	17
V_{maz} (mm^3)	964.665
A_{maz} (mm^2)	567.450

Pozo de colada	
D_{pozo} (mm)	7
h_{pozo} (mm)	10
V_{pozo} (mm^3)	384,85
A_{pozo} (mm^2)	296.881

Canales		
	Colada	Ataque
B_{mayor} (mm)	5	3
b_{menor} (mm)	2.5	1.5
h (mm)	5	3
V (mm^3)	767.813	337.838

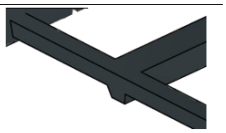


Figura 21. Dimensiones sistemas de alimentación

Simulación de la colada.

Para la etapa de simulación es necesario los datos e información recopilada en los pasos anteriores, además como menciona Prabhakara Rao et al. (2011), la simulación cuenta con tres etapas principales las cuales son: el pre-procesamiento en el cual el software lee las entradas del CAD y genera/lee la geometría y el mallado, el proceso principal en el cual se adicionan las condiciones de frontera, propiedades de los materiales utilizados, condiciones de la fundición y demás cálculos necesarios y como última el post-procesamiento en la cual se presentan los resultados y evaluaciones. Todo esto se lo va a realizar mediante un software especializado de fundición que se basa en métodos CFD.

Pre-procesamiento.

En esta fase se genera el mallado en el software de simulación para fundición, usando los archivos CAD previamente creados, se usará dos mallas diferentes, una en la geometría del sistema de colada y otra en el molde o la caja como tal.

En el software que se utilizó para la simulación el primer paso es crear una malla 2D, en la cual se define el tamaño de cada elemento, para después crear un mallado 3D con componentes tetraédricos, cabe mencionar que este software no permite calcular automáticamente un tamaño adecuado de malla, por lo que esto queda a decisión del diseñador.

Al tener dos mallas diferentes, permite variar el tamaño de cada malla por separado, la cual para el caso del molde o caja va a ser más gruesa para disminuir el trabajo computacional que se necesita para resolver un mallado más fino.

En la tabla 14 se muestra el tamaño de malla que se utilizó para cada opción, y para cada simulación.

Tabla 14.
Tamaño de malla

Modelo		**Opción A**		
Simulación número		**1**	**2**	**3**
Tamaño de Malla (mm)	Colada	7	5	1
	Caja	10	5	3
Número de Elementos	2D	2446	6940	49654
	3D	16341	44143	1101577

Modelo		**Opción B**		
Simulación número		**1**	**2**	**3**
Tamaño de Malla (mm)	Colada	7	5	1
	Caja	10	5	3
Número de Elementos	2D	2446	6880	48744
	3D	16347	43951	1069010

Modelo		**Opción C**		
Simulación número		**1**	**2**	**3**
Tamaño de Malla (mm)	Colada	7	5	1
	Caja	10	5	3
Número de Elementos	2D	2364	6742	46186
	3D	15388	42868	868829

Procesamiento principal.

Para el procesamiento principal de simulación se utilizan datos de entrada o condiciones de borde, que son iguales en todas las simulaciones y para las opciones de modelos propuestos, estas son propiedades del material tanto del molde como de la colada, el caudal másico de vertido de colada calculado con la ecuación 7, el valor de la gravedad, la temperatura ambiente en la parte externa del molde y un coeficiente de convección de aire, etc.

Una de las condiciones de frontera que se necesita para poder simular es un coeficiente de trasferencia de calor entre el molde y el material a colarse, esto debido a que se encuentran en contacto directo, este coeficiente no se encuentra tabulado para todos los materiales, siendo así que mayormente se encuentran para ciertas aleaciones de aluminio utilizadas para la colada y con moldes de acero o arena (Narváez Reyes, Chamba Román, & Quito Velecela, 2014).

Para obtener el coeficiente se basará en la teoría del módulo de enfriamiento o más conocida como la regla de Chvorinov, la cual se encuentra explicada en el estado del arte y un método iterativo utilizando el software de simulación.

Al introducir en el software un coeficiente de trasferencia elevado se producirá un enfriamiento rápido de la pieza a fundirse, y al introducir un valor bajo el enfriamiento tomará más tiempo, en las dos condiciones se puede obtener mediante el software un valor del promedio del módulo de enfriamiento, esta operación va a ser repetida hasta encontrar un valor que se acerque al módulo obtenido mediante la ecuación 17 con valor de 0.1406 cm.

Para realizar las pruebas con diferentes valores del coeficiente de trasferencia fue necesario variar la temperatura, tanto del molde como de la colada, partiendo que la temperatura de fusión de la colada ronda alrededor de los 330 grados centígrados, y la temperatura del molde para este caso será menor a la temperatura de la colada, debido a que el elemento a fabricarse es de espesor delgado, por lo que un molde caliente facilitará el llenado del mismo.

Los parámetros que serán usados como condiciones de frontera para las simulaciones, se encuentran en la tabla 15.

Tabla 15.
Datos de entrada o condiciones de borde

Condiciones de frontera	
Gravedad (m/s^2)	9.81
Coeficiente de convección de aire ($w/m^2.K$)	10
Temperatura del aire (°C)	20
Caudal másico de colada (kg/s)	0.0614
Presión atmosférica (N/m^2)	102700
Temperatura del molde (°C)	300
Temperatura del colada (°C)	700
Coeficiente de trasferencia h($w/m^2.K$)	1800

En la tabla número 16 se muestran los valores del módulo de enfriamiento arrojados por el software durante la simulación, estos valores son a lo largo de toda la colada pero para efectos de encontrar un valor que se aproxime al calculado se realiza un promedio, el valor promedio más cercano obtenido es de 0.1402 cm, lo cual sugiere utilizar un coeficiente de transferencia de calor entre la colada y el molde de h=1800 ($W/m^2.K$) con unos valores de temperatura de 300 y 700 °C para el molde y la colada respectivamente.

Post-procesamiento.

Aquí se llevó a cabo la recolección de los resultados obtenidos de la simulación para las tres opciones modelo, y dando como resultado las gráficas de los resultados de diferentes parámetros como factor de llenado, tiempo de llenado, temperatura al llenado, tiempo de solidificación, tiempo para sólido, módulo de enfriamiento, entrada de aire, vacío y porosidades etc, estos parámetros serán analizados posteriormente en la sección de discusión de resultados.

Tabla 16.

Iteraciones cálculo coeficiente de transferencia de calor

Temperatura (°C)	Coeficiente de trasferencia de calor h ($W/m^2.K$)	Módulo de enfriamiento (cm)															Promedio
Molde=200 Colada=600	h=400	1.3490	1.3210	1.2929	1.2649	1.2368	1.2088	2.1808	1.1527	1.1247	1.0967	1.0686	1.0406	1.0125	0.9845	0.9565	0.9284	1.2012
	h=500	1.2644	1.2346	1.2047	1.1748	1.1450	1.1151	1.0852	1.0554	1.0255	0.9956	0.9658	0.9359	0.9060	0.8762	0.8463	0.8164	1.0404
	h=1000	1.0846	1.0569	1.0292	1.0015	0.9738	0.9461	0.9184	0.8908	0.8631	0.8354	0.8077	0.7800	0.7523	0.7246	0.6969	0.6693	0.8769
	h=1500	No se llena																
Molde=300 Colada=600	h=1000	0.2509	0.2447	0.2385	0.2323	0.2261	0.2198	0.2136	0.2074	0.2012	0.1950	0.1888	0.1825	0.1763	0.1701	0.1639	0.1577	0.2043
	h=1500	0.2358	0.2291	0.2224	0.2156	0.2089	0.2022	0.1954	0.1887	0.1820	0.1753	0.1685	0.1618	0.1551	0.1484	0.1416	0.1349	0.1853
	h=2000	0.2279	0.2209	0.2139	0.2069	0.1999	0.1929	0.1859	0.1790	0.1720	0.1650	0.1580	0.1510	0.1440	0.1370	0.1301	0.1231	0.1755
	h=2500	No se llena																
Molde=300 Colada=650	h=2000	0.2003	0.1940	0.1878	0.1816	0.1753	0.1691	0.1629	0.1566	0.1504	0.1442	0.1379	0.1317	0.1255	0.1192	0.1130	0.1067	0.1535
	h=2200	0.1989	0.1925	0.1861	0.1797	0.1733	0.1669	0.1605	0.1541	0.1477	0.1413	0.1349	0.1285	0.1221	0.1157	0.1093	0.1029	0.1509
	h=2400	0.1988	0.1922	0.1856	0.1790	0.1724	0.1658	0.1593	0.1527	0.1461	0.1395	0.1329	0.1263	0.1197	0.1131	0.1066	0.1000	0.1494
	h=2600	No se llena																
Molde=300 Colada=700	h=1600	0.1839	0.1780	0.1728	0.1673	0.1618	0.1564	0.1507	0.1452	0.1397	0.1343	0.1286	0.1231	0.1177	0.1122	0.1065	0.1010	0.1425
	h=1800	0.1824	0.1766	0.1711	0.1655	0.1599	0.1543	0.1486	0.1430	0.1374	0.1318	0.1261	0.1205	0.1149	0.1093	0.1036	0.0980	0.1402
	h=2000	0.1809	0.1752	0.1694	0.1637	0.1580	0.1522	0.1465	0.1408	0.1351	0.1293	0.1236	0.1179	0.1121	0.1064	0.1007	0.0950	0.1379
	h=2200	0.1794	0.1738	0.1677	0.1619	0.1561	0.1501	0.1444	0.1386	0.1328	0.1268	0.1211	0.1153	0.1093	0.1035	0.0978	0.0920	0.1357

Mecanizado del molde.

Quadros, Consoni, & Quintão (2005), dice que los fabricantes de moldes aprovechan el desarrollo de las tecnologías avanzadas de fabricación para optimizar las operaciones de mecanizado, reduciendo el tiempo de trabajo, eliminado reprocesos innecesarios y aumentando el acabado superficial de los elementos fabricados mediante estas técnicas modernas.

Como se mencionó en el párrafo anterior se fabricará el molde prototipo mediante manufactura avanzada CNC, para ello es necesario determinar las condiciones de corte, operaciones y los herramentales a ser usados, además se generará el código de máquina, todo esto mediante software especializado CAM, que permite conocer los tiempos estimados de mecanizado o algún inconveniente que se presente durante el proceso como colisiones o puntos ciegos que no alcanza la herramienta.

Parámetros de Corte.

El molde va a ser fabricado en un acero AISI P20, sus propiedades, así como recomendaciones de la velocidad y avance de corte para taladrado y fresado tanto para desbaste grueso, fino y acabado final se encuentran en el anexo 2, pero las que van a ser utilizadas para el maquinado están resumidas en las siguientes tablas 17,18 y 19, cabe recordar que estos parámetros de corte son los recomendados por el fabricante del material del molde, pero de ser necesarios en el momento del mecanizado pueden ser variados de acuerdo a la disponibilidad de maquinaria y herramientas en el país.

Tabla 17.
Parámetros de corte para taladrado.

Herramienta HSS		
Diámetro (mm)	**Velocidad de corte Vc (m/min)**	**Velocidad de avance f (mm/rev)**
-5	14 16	0.08 0.15
5 10	14 16	0.15 0.25
10 15	14 16	0.25 0.30
15 20	14 16	0.30 0.35

Tabla 18.
Parámetros de corte para fresado

Fresado de cara y escuadra con herramienta de carburo		
Acabado	**Grueso**	**Fino**
Velocidad de corte Vc (m/min)	80 150	150 190
Avance por diente fz (mm/diente)	0.2 0.4	0.1 0.2
Profundidad de corte (mm)	2 4	2

Tabla 19.
Parámetros de corte para fresado de acabado final

Fresado de acabado Final			
Herramienta	**Carburo**	**Inserto de Carburo**	**HSS**
Velocidad de corte Vc (m/min)	70 110	80 120	15 19
Avance por diente fz (mm/diente)	0.03 0.2	0.08 0.2	0.05 0.35

Operaciones de mecanizado.

El molde constará de tres piezas, que son la placa base y dos placas superiores, en la placa base irá ubicada la cavidad del modelo, el pozo de colada, los canales de alimentación y parte de la mazarota, en las placas superiores estarán ubicados la taza de colada, el bebedero y la

parte restante de la mazarota, estos elementos de la placa superior se encuentran divididos por un plano que separa la placa superior del molde en dos.

Para facilitar el proceso de mecanizado la placa superior se la dividirá en dos partes posterior al mecanizado de las cavidades, en la tabla 20 se muestra las dimensiones de la pieza en bruto, que son los espesores comerciales disponibles en el país.

Tabla 20.
Dimensiones de material en bruto

	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Peso(kg/m)
Placa base	25	200	40
Placa superior	35	200	76

Todas las herramientas de corte que se utilizan están tomadas del catálogo de herramientas rotativas de metal duro integral del fabricante SANDVIK, el cual se lo puede encontrar en su sitio web oficial, todas las abreviaturas y dimensiones de las herramientas se encuentran en el mismo.

Contorneado a escuadra de lados.

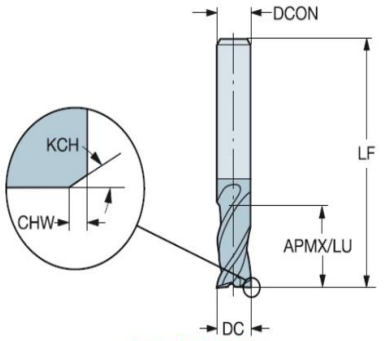
En esta operación se realiza el rectificado de todos los lados de las dos placas del molde, por lo general se utiliza fresas planas que posean un filo que cubra el espesor total del material, en este primer proceso no es necesario un acabado fino, será suficiente con que las caras queden perpendiculares, además no se necesita dejar una sobre medida para posteriores mecanizados, en la figura 22 se muestra la herramienta seleccionada.

Fresa de metal duro integral CoroMill® Plura para planeado en escuadra

Recta, corte central. Dureza ≤ 48HRc

Fresas de ranurado helicoidales de 30-35 grados universales

	1P222-XA
CNSC	0
FHA	35°
BSG	DIN 6527 K
TCDC	h10
TCDCON	h6



DC	CZC_{MS}	APMX	CHW	KCH	LU	ZEFP	Código de pedido	P 1630	M 1630	K 1630	N 1630	S 1630	Dimensiones, mm DCON	LF
25.0	25	32.5	0.30	45°	32.0	4	1P222-2500-XA	☆	☆	☆	☆	☆	25.0	121.0

Figura 22. Herramienta de corte a escuadra.

Recuperado del catálogo de herramientas de SANDVIK.

Planeado de caras.

Esta operación también llamada careado, consiste en dar la planitud y acabado necesario a las caras del molde, se realizan dos operaciones en la cara de contacto entre placas, la primera será el desbaste grueso dejando una sobre medida de 0.5mm y uno de acabado, las dos operaciones serán realizadas con una fresa de planear, variando los parámetros de corte, herramienta mostrada en la figura 23.

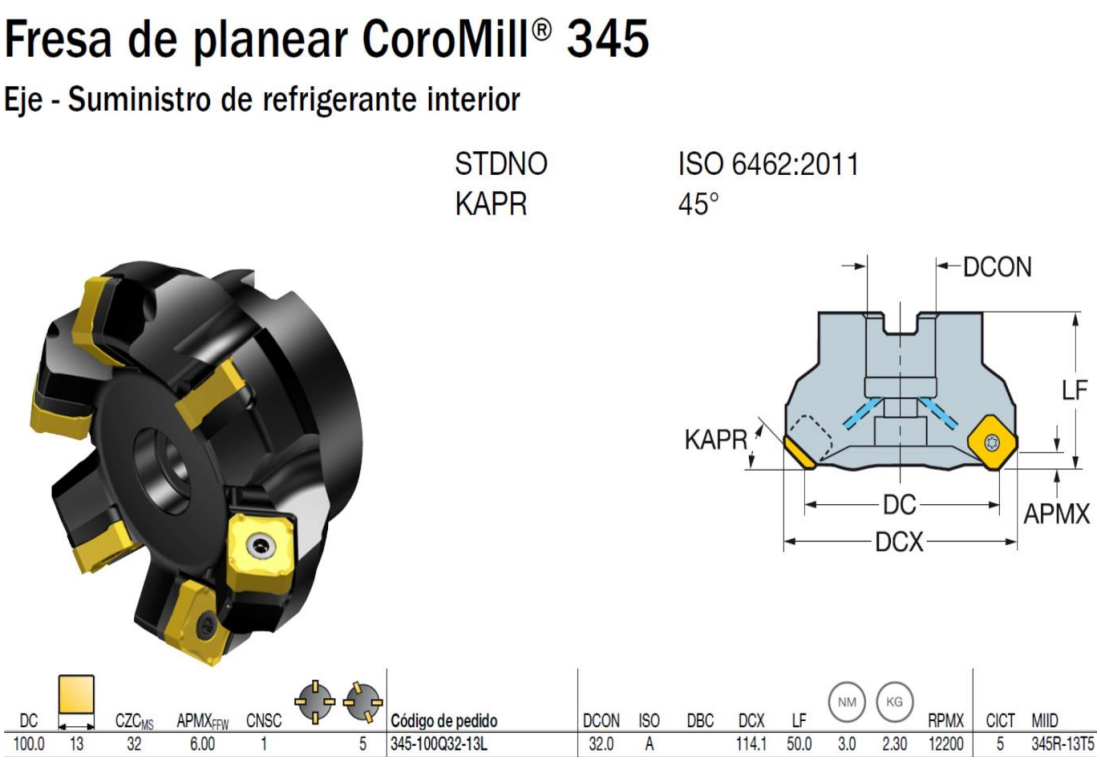


Figura 23. Herramienta de corte para planeado.

Recuperado del catálogo de herramientas de SANDVIK.

Contorneado de cavidades.

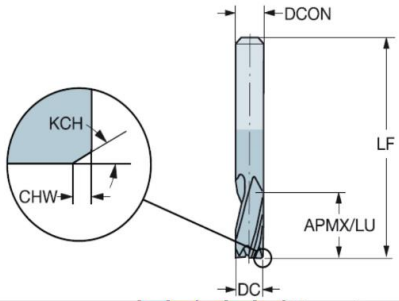
En el contorneado se da la forma de la cavidad del molde, dejando una sobre medida de 0.5 mm para el acabado final, se usará una fresa similar a la de la primera operación, pero de diferente tamaño, en el acabado final se usará una herramienta del mismo tipo, pero de un diámetro menor y variando los parámetros de corte, estas herramientas están mostradas en la figura 24.

Fresa de metal duro integral CoroMill® Plura para planeado en escuadra

Recta, corte central. Indicada para tolerancias de chavetero. Dureza ≤ 48HRc

Fresas de ranurado helicoidales de 30-35 grados universales

	1P231-XA
CNSC	0
FHA	30°
BSG	DIN 6527 L
TCDC	e8
TCDCON	h6



								P	M	K	N	S	Dimensiones, mm	
DC	CZC_{MS}	APMX	CHW	KCH	LU	ZEFP	Código de pedido	1630	1630	1630	1630	1630	DCON	LF
1.0	3	4.5			4.0	3	1P231-0100-XA	☆	☆	☆	☆	☆	3.0	38.0
5.0	6	10.5	0.13	45°	10.0	3	1P231-0500-XA	☆	☆	☆	☆	☆	6.0	57.0

Figura 24. Herramienta de corte para cavidades.

Recuperado del catálogo de herramientas de SANDVIK.

Taladrado de agujeros.

Los agujeros necesarios para los pasadores de centrado y pernos de sujeción serán realizados con brocas del tamaño necesario, las cuales se muestran en la figura 25.

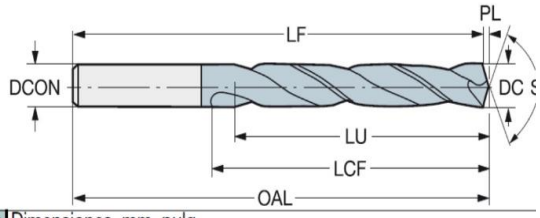
Además, para el mecanizado de las cavidades como el pozo de colada, taza de colada, mazarota y canales, se escogerá el mismo tipo de herramientas mostradas en las figuras 24 y 25 pero de diferentes medidas, que se adapten a la necesidad de mecanizado.

Broca de metal duro integral CoroDrill® 460

Mango HA

Suministro de refrigerante exterior

TCHA H9
CNSC 0



DC	DC"	LU	LU"	ULDR	CZC_{MS}	Código de pedido	P GC34	M GC34	K GC34	N GC34	S GC34	H GC34	Dimensiones, mm, pulg. DCON	DCON"	OAL	OAL"	LF	LF"	LCF	LCF"	PL	PL"
4.00	.157	12.6	.496	3	6	460.1-0400-012A0-XM	☆	☆	☆	☆	☆	☆	6.00	.236	66	2.598	65.4	2.575	24	.945	0.6	.024
4.00	.157	20.6	.811	5	6	460.1-0400-020A0-XM	☆	☆	☆	☆	☆	☆	6.00	.236	74	2.913	73.4	2.890	36	1.417	0.6	.024
5.00	.197	15.7	.618	3	6	460.1-0500-015A0-XM	☆	☆	☆	☆	☆	☆	6.00	.236	66	2.598	65.3	2.571	28	1.102	0.7	.028
5.00	.197	25.7	1.012	5	6	460.1-0500-025A0-XM	☆	☆	☆	☆	☆	☆	6.00	.236	82	3.228	81.3	3.201	44	1.732	0.7	.028
8.00	.315	25.2	.992	3	8	460.1-0800-024A0-XM	☆	☆	☆	☆	☆	☆	8.00	.315	79	3.110	77.8	3.063	41	1.614	1.2	.047
8.00	.315	41.2	1.622	5	8	460.1-0800-040A0-XM	☆	☆	☆	☆	☆	☆	8.00	.315	91	3.583	89.8	3.535	53	2.087	1.2	.047

Figura 25. Brocas para agujeros.

Recuperado del catálogo de herramientas de SANDVIK.

Tabla de operaciones de mecanizado.

En las siguientes tablas 21 y 22 se muestran los procesos de mecanizado necesarios para elaborar el molde, así como el tiempo que toma cada operación sin contar con los tiempos muertos, además se presenta imágenes de los procesos simulados en un software CAM.

Tabla 21.
Procesos de mecanizado de la placa base

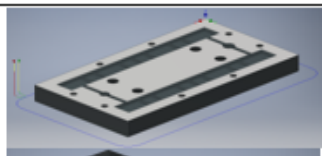
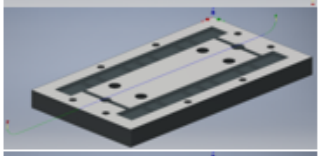
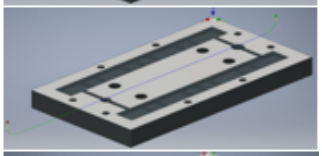
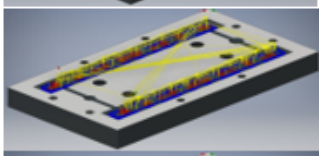
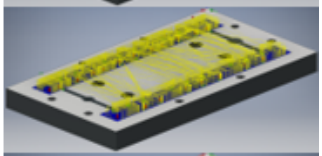
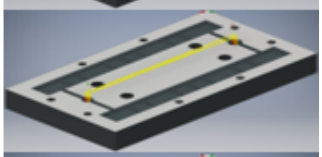
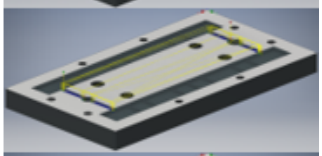
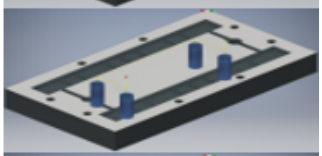
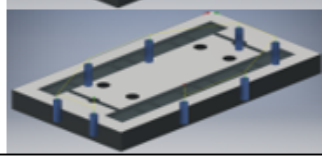
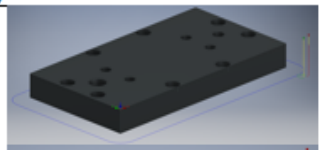
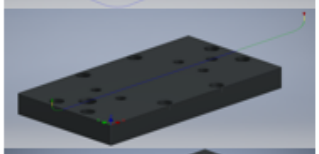
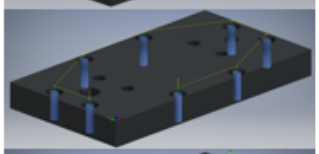
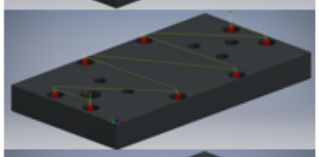
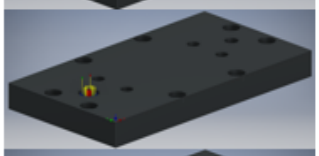
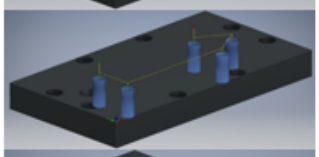
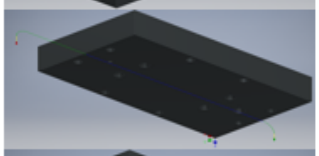
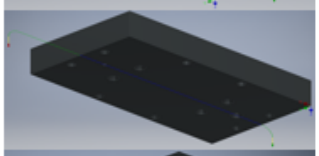
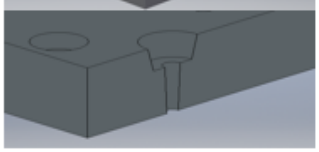
Placa Base								
Operación		Herramienta			Parámetros de corte			Grafico
#	Tipo	Tipo	Diámetro	Material	Vc (m/min)	fz (mm/diente)	Ap (mm)	
1	Contorneado exterior	Fresa de escuadrar	15 mm	HSS	150	0.4	20	
2	Planeado cara inferior	Fresa de planear	100 mm	Carburo	150	0.4	1	
3	Planeado cara superior	Fresa de planear	100 mm	Carburo	150	0.4	1	
4	Acabado cara superior	Fresa de planear	100 mm	Carburo	120	0.2	1	
5	Contorneado cavidades	Fresa de escuadrar	5 mm	HSS	150	0.4	1	
6	Acabado cavidades	Fresa de escuadrar	1 mm	HSS	15	0.05	0.1	
7	Fresado cilíndrico	Fresa de escuadrar	3 mm	HSS	150	0.4	20	
8	Fresado canales	Fresa de escuadrar	1 mm	HSS	150	0.4	0.5	
9	Taladrado	Broca	8 mm	HSS	16	0.25	20	
10	Taladrado	Broca	5 mm	HSS	14	0.15	20	

Tabla 22.
Procesos de mecanizado de la placa superior

Placa Superior								
Operación		Herramienta			Parámetros de corte			Grafico
#	Tipo	Tipo	Diámetro	Material	Vc (m/min)	fz (mm/diente)	Ap (mm)	
1	Contorneado exterior	Fresa de escuadrar	15 mm	HSS	150	0.4	20	
2	Planeado cara superior	Fresa de planear	100 mm	Carburo	150	0.4	1	
3	Taladrado	Broca	5 mm	HSS	14	0.15	20	
4	Fresado cilíndrico	Fresa de escuadrar	3 mm	HSS	150	0.4	20	
5	Fresado cilíndrico	Fresa de escuadrar	3 mm	HSS	150	0.4	20	
6	Taladrado	Broca	8 mm	HSS	16	0.25	20	
7	Planeado cara inferior	Fresa de planear	100 mm	Carburo	150	0.4	1	
8	Acabado cara inferior	Fresa de planear	100 mm	Carburo	120	0.2	1	
9	Corte	Electro erosión	0.30 mm	Latón				
10	Corte bebedero	Electro erosión	0.30 mm	Latón				

Resultados

Material para la colada

Como se ha mencionado, al realizar el ensayo de análisis de composición química mediante espectrometría de fluorescencia la mayor cantidad de elementos aleantes de las muestras analizadas contenían plomo como se muestra en la tabla 23.

Tabla 23.
Elementos aleantes de las probetas

		Elementos					
Muestra		**Pb**	**Fe**	**Sb**	**P**	**Si**	**Cu**
A	% Contenido	99.75	0.25	-	-	-	-
	±Error	0.03	0.03	-	-	-	-
B	% Contenido	97.57	1.37	0.64	0.161	0.157	-
	±Error	0.07	0.05	0.05	0.004	0.009	-
C	% Contenido	99.71	0.24	-	-	-	0.05
	±Error	0.03	0.03	-	-	-	0.009

Como se puede observar en la tabla 23, el análisis de composición química de las muestras obtenidas en 15 negocios locales dedicados al balanceo de neumáticos de la ciudad de Quito, rebelan que son fabricadas a base de plomo, por lo que este será el material elegido para la colada.

Material para el molde

Según investigaciones de campo, y también a través de internet el material más común, y que se encuentra con facilidad en el mercado nacional es el acero AISI P20, el cual es

comercializado por IVAN BOHMAN, ubicada en la ciudad de Quito y Aceros Boehler del Ecuador, ubicada en la ciudad de Guayaquil.

Además, el acero AISI P20 es utilizado específicamente para trabajos en caliente, como moldes de inyección de termoplásticos, moldes de extrusión para termoplásticos, moldes de soplado, moldes prototipo para fundición por inyección de aluminio, lo que lo hace de primera elección para la fabricación del molde de fundición por gravedad de esta investigación, en la tabla 24 se muestran algunos datos del material, para más especificaciones ver el anexo 2.

Tabla 24.
Información general acero AISI P20

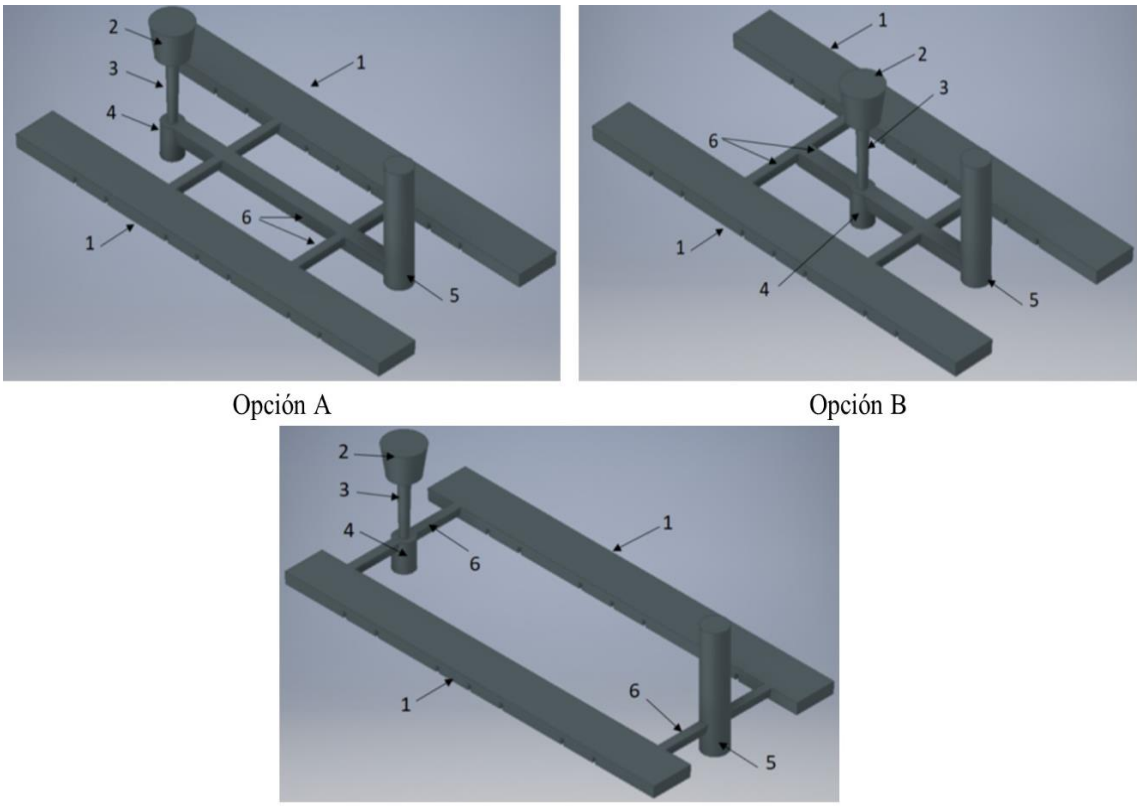
Información General							
Análisis típico	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S
%	0.37	0.3	1.4	2	1	0.2	<0.01
Normas equivalentes	UNE F-5303, F-3404 W.-Nr. 12738, 1.2311 (mejorado)						
Estado suministrado	Templado y revenido a 290 - 300 HB						

Nota: información tomada del catálogo en línea de IVAN BOHMAN.

Diseño sistema de colada

El diseño del sistema de colada se realizará a partir del dimensionamiento realizado de cada uno de los sistemas de la colada, los datos del material, recolectados previamente tanto del molde como de la colada y con base en el CAD del modelo de las pesas obtenido, se ubicarán los vertederos, salidas, núcleos, cavidades, de acuerdo a las necesidades, a través del software CAD.

A continuación, en la figura 26, se presentan tres posibles opciones de la ubicación de los diferentes componentes del sistema de colada, los cuales constan de pozo de colada, bebedero, taza de colada, canales de alimentación y mazarota.



1.Tira de pesas, 2. Taza de colada, 3. Bebedero, 4. Pozo de colada, 5. Mazarota, 6. Canales de colada.

Figura 26. Opciones de modelo

Estas opciones de modelo definirán la geometría de la cavidad del molde, serán evaluados mediante simulaciones del comportamiento de la colada, para determinar cuál es la mejor configuración de los sistemas de colada, plano de partición y demás elementos necesarios del molde.

Resultados de la simulación de la colada

A continuación, se analizan los resultados de las simulaciones comparando los parámetros más relevantes obtenidos entre las tres opciones de modelo, con las condiciones de borde definidas en la tabla 15 y el mallado más fino de 1mm para la colada y 3mm para el molde.

Resultados factor de llenado.

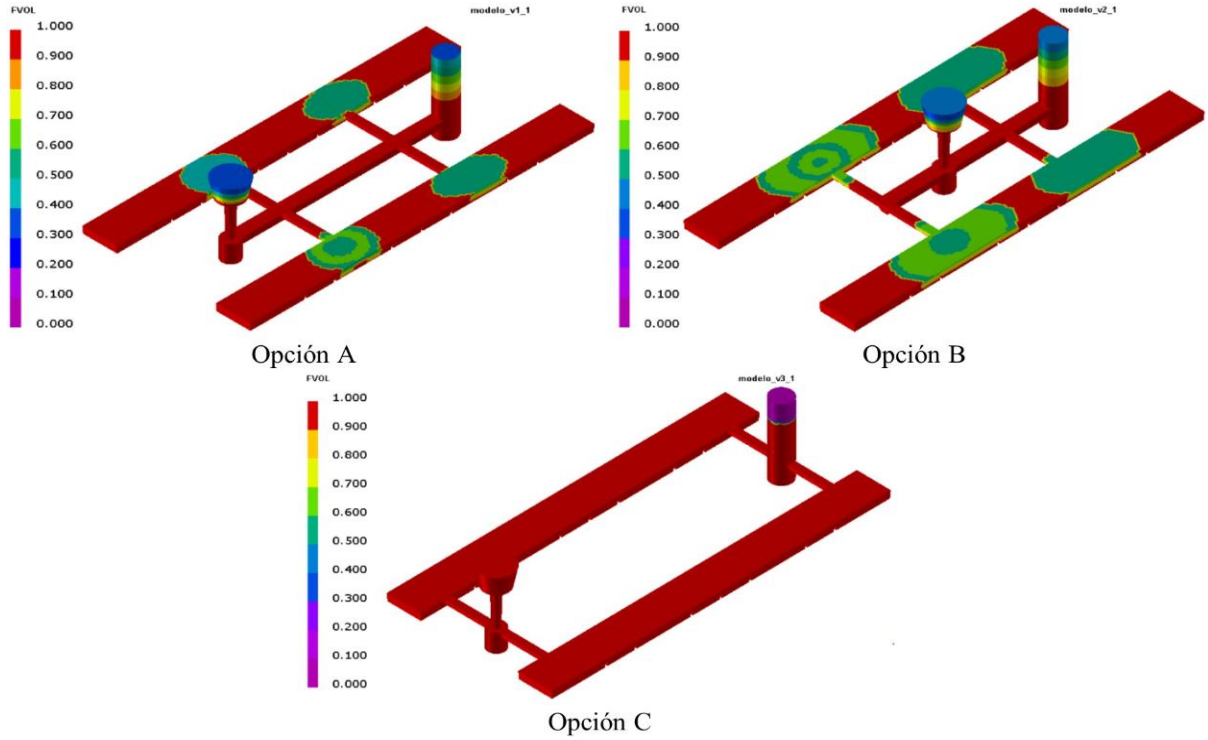


Figura 27. Resultados de la simulación del factor de llenado

Estos resultados en la figura 27, son mostrados cuando el molde tiene un 100% de llenado e indican la confianza de llenado del molde, siendo las partes de color rojo las que se llenan primero y el morado indica las partes que son llenadas al final, esto debido a la forma como ingresa el fluido. Al ver las imágenes en la opción A y B el llenado del molde es de forma irregular por la ubicación de los sistemas de alimentación, pero en la opción C se aprecia un llenado más estructurado y uniforme, debido a la ubicación del bebedero en un extremo y la mazarota por la que sale la colada al otro extremo.

Resultados tiempo de llenado.

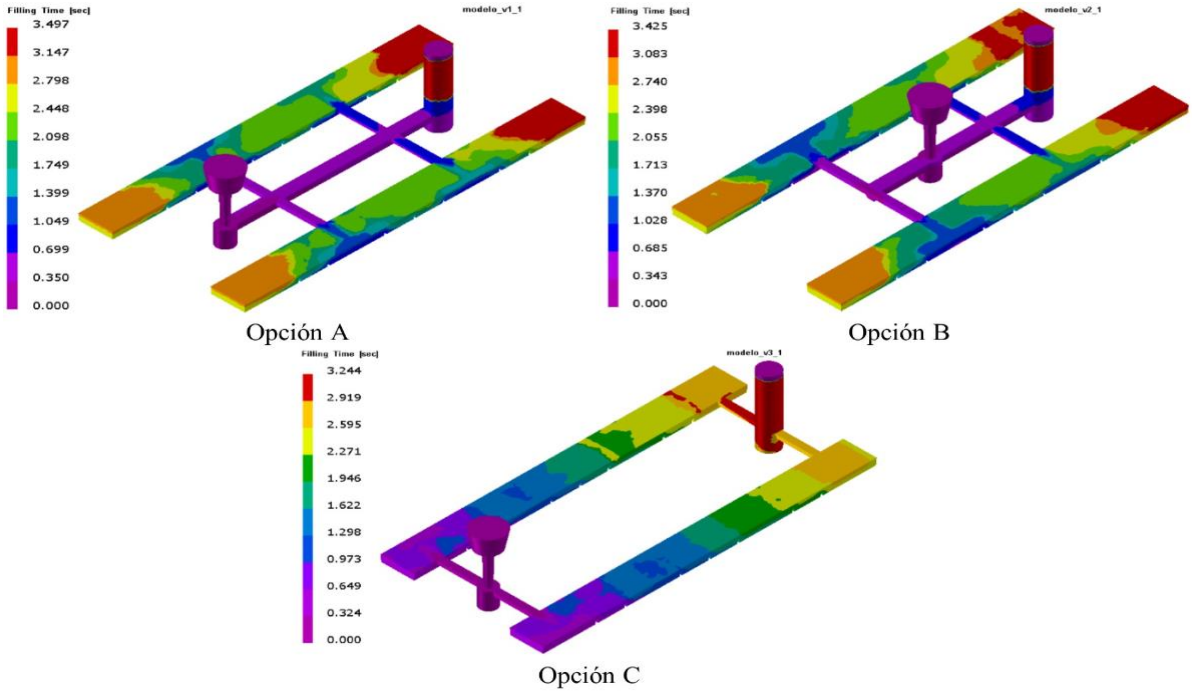


Figura 28. Resultados de la simulación del tiempo de llenado

Este resultado de la figura 28 indica cuanto se demora en alcanzar la colada los diferentes puntos del molde, las zonas de color morado se llenarán primero y las de color rojo al final. En la opción C, la simulación indica que el llenado del molde es más rápido con un tiempo total de 3.244 segundo que las otras opciones y además se llena de una manera más uniforme, lo cual sugiere que el fluido es menos turbulento siendo beneficioso para el proceso de colado, el color rojo mostrado en la mazarota indica que es la última en llenarse lo cual es congruente con la lógica de llenado que debe tener el molde.

Resultados temperatura al llenado.

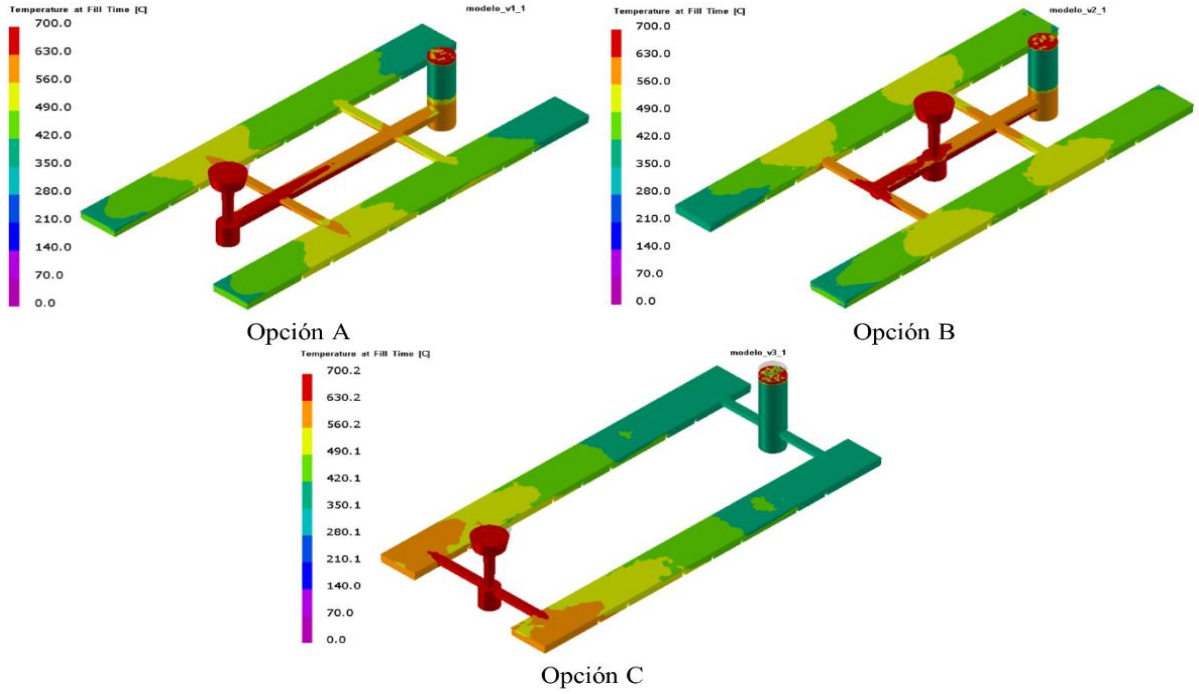


Figura 29. Resultados de la simulación de la temperatura al llenado.

Como se ve la figura 29 en los tres casos la temperatura más alta indicada por el color rojo, muestra la temperatura de vertido que es alrededor de los 700 °C y la temperatura más baja indicada por el color verde oscuro, para las tres opciones se muestra que la temperatura en la mazarota está sobre los 327 °C que es la temperatura de fusión del plomo, lo que indica que la colada al estar líquida fluye llenando por completo el molde.

Resultados tiempo de solidificación.

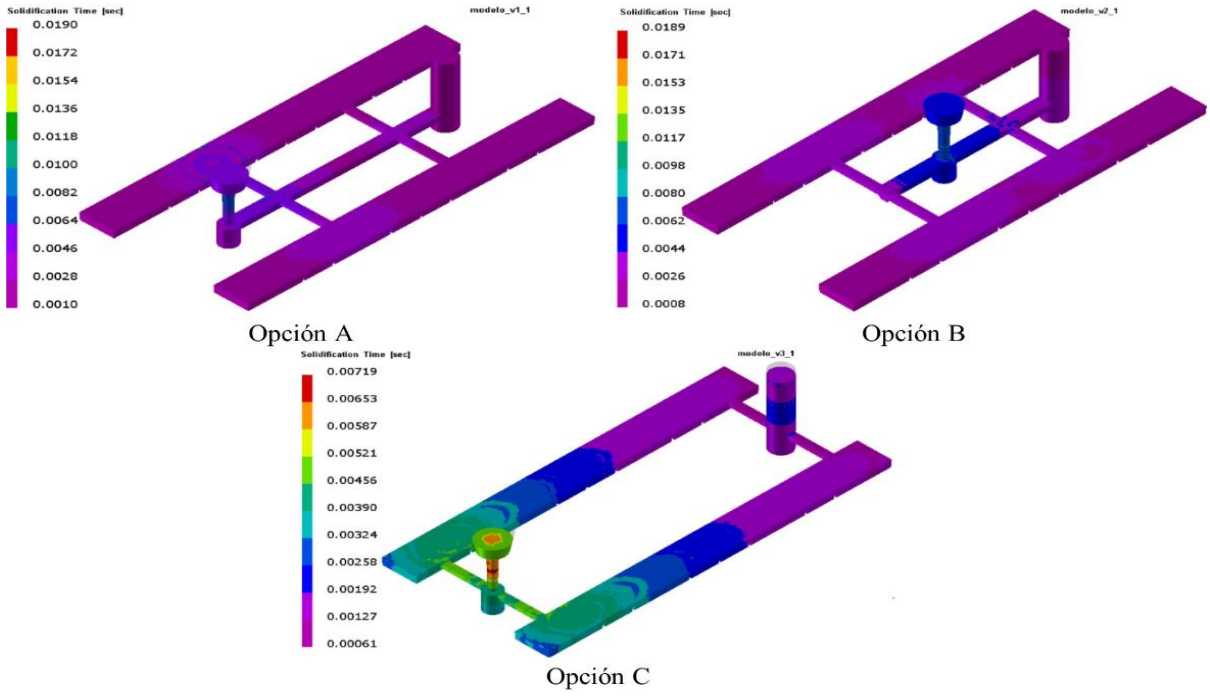


Figura 30. Resultados de la simulación del tiempo de solidificación.

El resultado de la figura 30, indica el tiempo en que permanece la colada en la zona de transición líquido-sólido, es decir, el tiempo que se demora el plomo fundido desde la temperatura de vertido 700 °C hasta la temperatura de sólido de 327.5 °C. El color tomate muestra las partes en la que tarda más en solidificar y el color morado los que solidifican más rápido. Como se observa en las gráficas, la opción A y B el tiempo de solidificación es menor y con una distribución similar para toda la colada, que la opción C. La opción C, muestra que el tiempo es mayor en la zona del bebedero lo que indica de igual forma que el llenado es de mejor manera, debido a que es la última parte en solidificarse, permitiendo la fluidez del plomo hacia todas las zonas del molde.

Resultados tiempo para sólido.

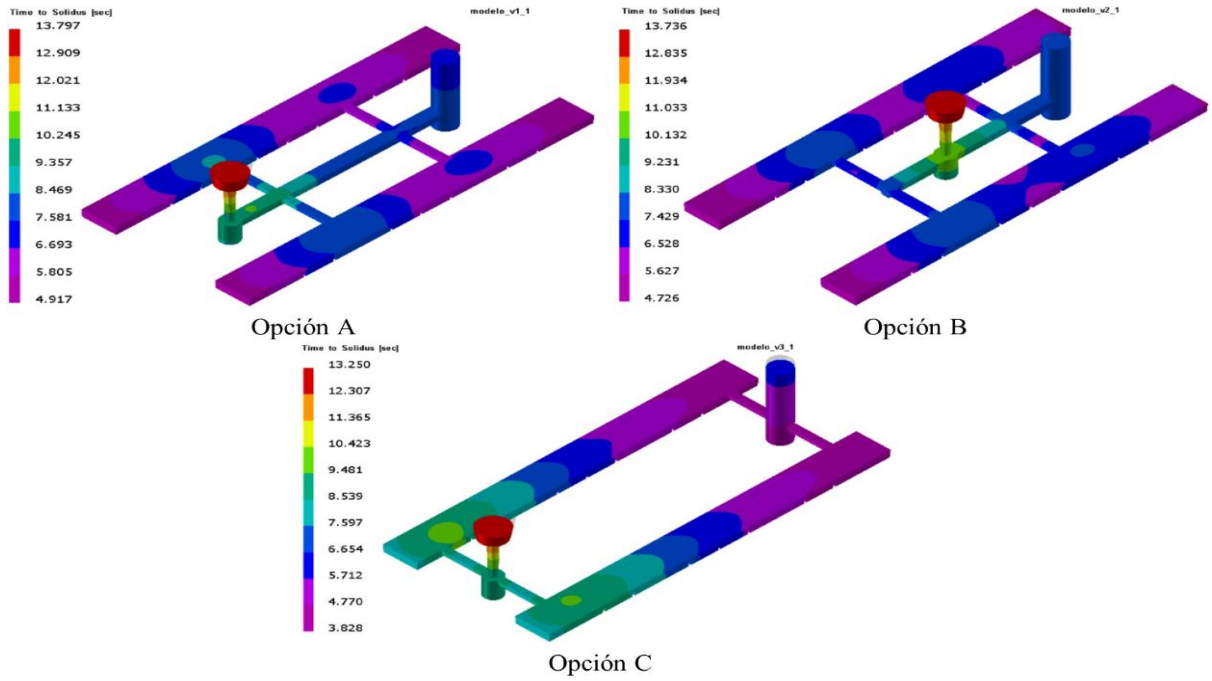


Figura 31. Resultados de la simulación del tiempo para sólido.

La figura 31, representa el tiempo desde el vertido de la colada hasta que todo alcanza la temperatura de sólido, el color rojo indica el tiempo máximo que necesita para solidificarse por completo y el color morado el tiempo mínimo, para las simulaciones se eligió una temperatura de vertido de 700 °C y una temperatura final de sólido de 300 °C, la que deberá alcanzar todo el sistema, por esta razón el tiempo para la opción A y B es alrededor de los 13.7 segundos, y en la opción C tiene un tiempo inferior con 13.25 segundos, en esta opción la solidificación es más uniforme, comenzado por el lado de la mazarota.

Resultados módulo de enfriamiento.

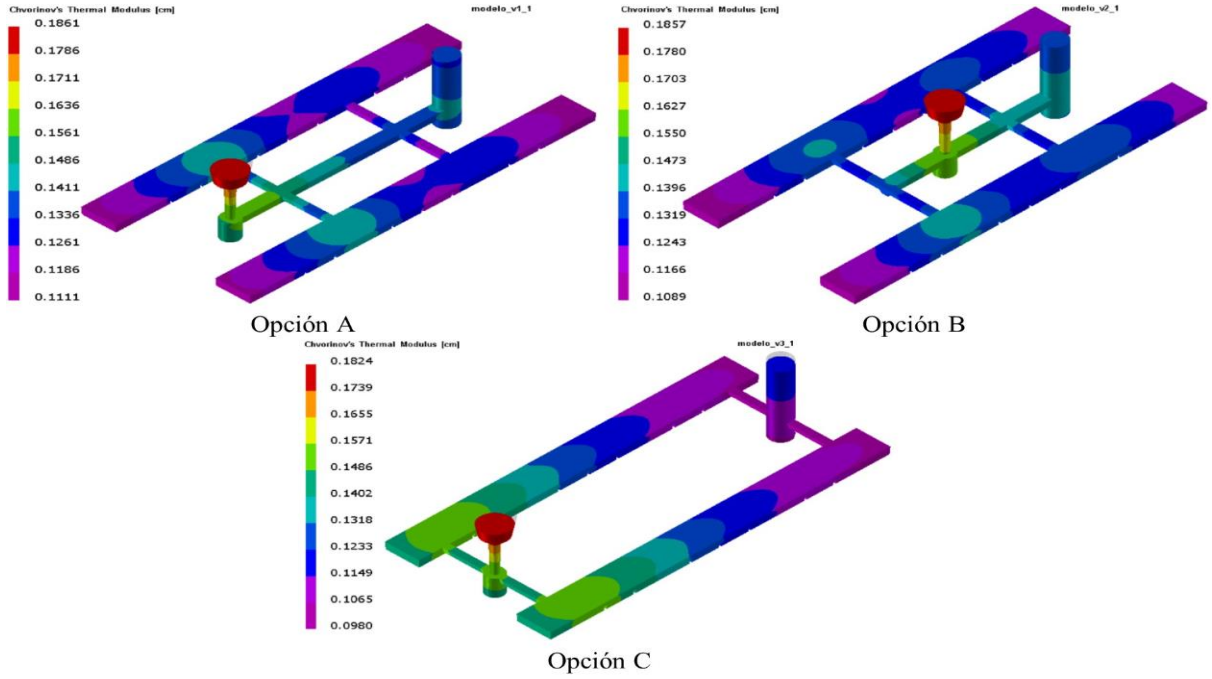


Figura 32. Resultados de la simulación del módulo de enfriamiento.

El módulo de enfriamiento mostrado en la figura 32, indica la velocidad con la que se enfría una pieza, cabe recalcar que este parámetro es netamente experimental y es una aproximación para dar una idea del comportamiento de la pieza a ser fabricada, todas las opciones de la gráfica presentada, tienen un módulo de enfriamiento promedio, de 0.14 cm, este valor debe ser cercano al resultado encontrado analíticamente mediante la ecuación 17. El color rojo indica el mayor valor del módulo de enfriamiento observado en la taza de colada y el morado el menor valor que se encuentra en las zonas finales y mazarota.

Resultados entra de aire.

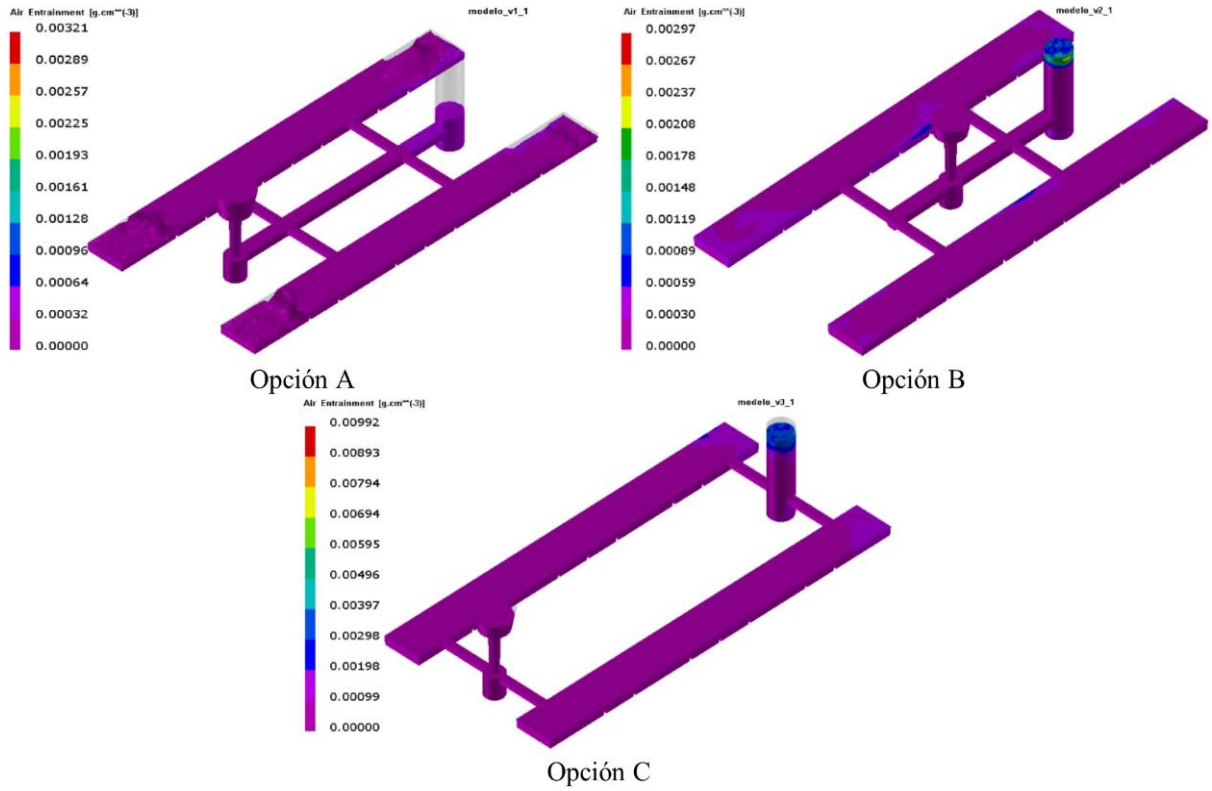


Figura 33. Resultados de la simulación de la entrada de aire

El resultado de la figura 33, representa el arrastramiento de aire que ocurre cuando ingresa la colada por el bebedero, a pesar que el bebedero está diseñado para evitar este fenómeno, sin embargo, el aire que se encuentra dentro del molde tiene que ser evacuado y arrastrado por la colada hacia afuera mediante canales de expulsión y en este caso mediante la mazarota. El color morado es el menor valor indicando que no existe atrapamiento de aire y el color azul mostrado en algunas zonas revela la presencia de aire. En la opción C todo el aire es arrastrado hacia la mazarota, lo que no ocurre en las otras opciones, sugiriendo una mejor ubicación de los sistemas de alimentación de colada.

Resultados vacíos.

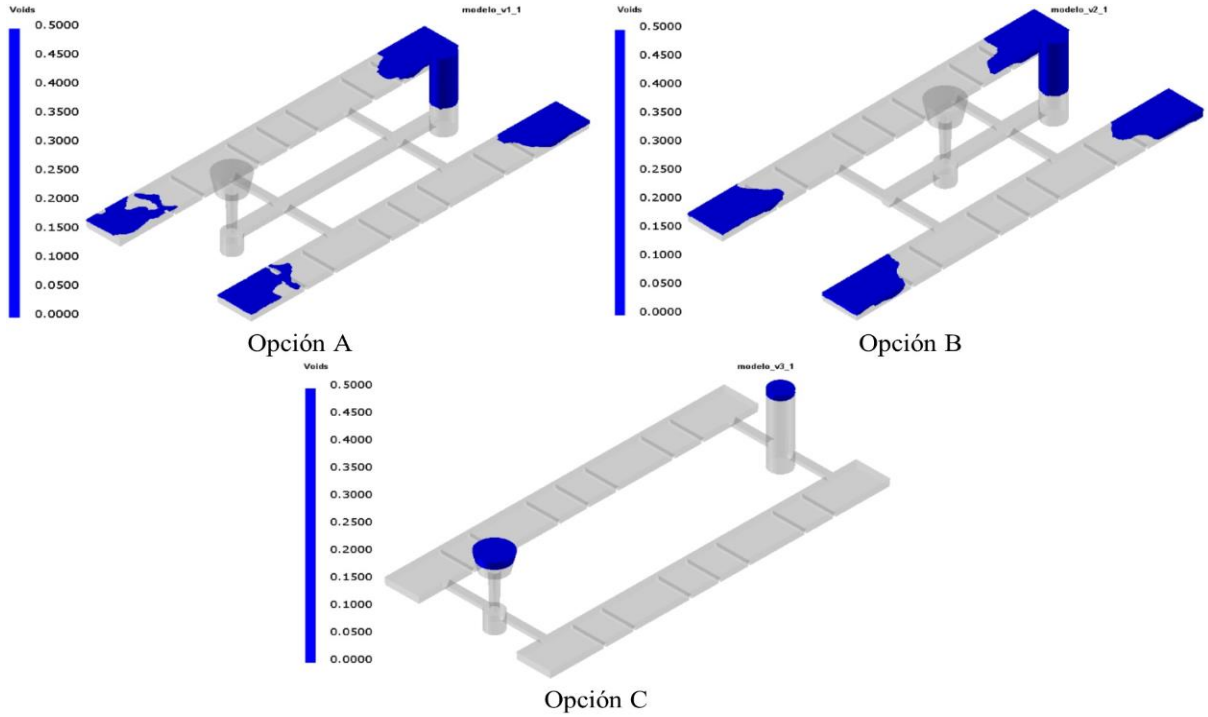


Figura 34. Resultado de la simulación de vacíos.

Los resultados de la figura 34, van relacionados con los de la entrada del aire, como se observa las partes azules de los gráficos representan posibles lugares donde puede quedar aire atrapado o gases, haciendo que el llenado sea deficiente, repercutiendo en la calidad de la pieza, siendo considerados como posibles defectos. En la opción C, se muestra un vacío en la zona de la mazarota y taza de colada, pero estos vacíos no influyen en la calidad de la pieza, ya que estos componentes del sistema de alimentación serán removidos posteriormente y reutilizados.

Resultados porosidades.

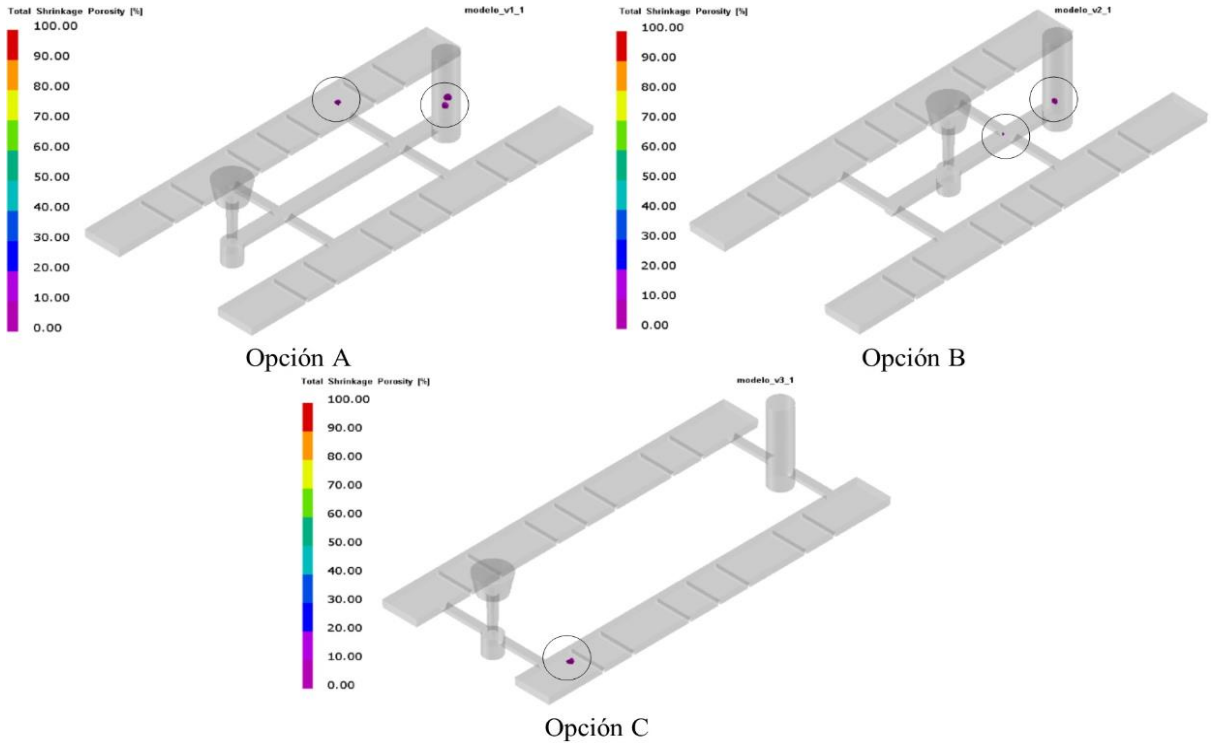


Figura 35. Resultado de la simualción de porosidades.

Como se puede observar en la figura 35, encerrados en círculos y representados por el color morado que indica un valor entre 0% y 10% de porosidades totales, en los tres resultados las porosidades son mínimas, teniendo más defectos la opción A en la parte de la mazarota siendo una zona sin importancia. Cabe aclarar que la pieza a ser fabricada no es una pieza de precisión siendo las porosidades de poca relevancia.

Selección del Modelo

Para la selección del modelo se evaluará características deseadas vs los resultados de las simulaciones, para determinar el modelo ideal, que asegurará un buen comportamiento de la colada y un producto final deseado.

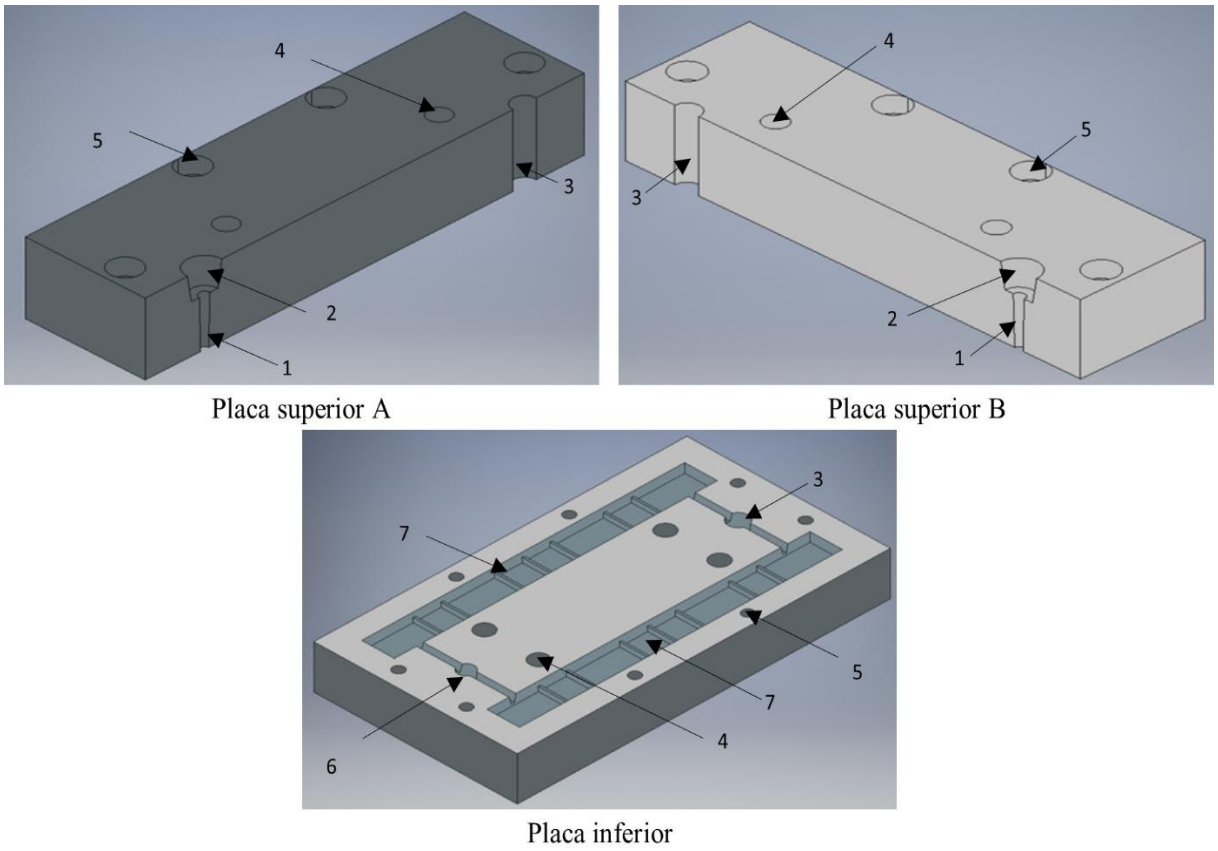
Tabla 25.
Comparación de opciones de modelo

	Opción A	Opción B	Opción C	Deseable
Factor de llenado	80	60	90	%=100
Tiempo de llenado	3.497	3.425	3.244	Menor
Temperatura de llenado	330	342	354	Mayor
Tiempo de solidificación	0.005	0.0051	0.00623	Mayor
Tiempo para sólido	13.8	13.74	13.15	Menor
Módulo de enfriamiento	0.1486	0.1473	0.1402	0.1401
Entrada de aire	22	15	7	%=0
Vacíos	20	20	5	%=0
Porosidades	1	3	1	0

En la tabla número 25, se realizó una comparación de los resultados obtenidos de las simulaciones entre modelos, de la cual se observa que la opción C posee los valores más cercanos en todos los criterios a los deseados, por lo tanto, la opción C es la elegida para el diseño del molde.

Diseño del molde

Con el material y el modelo elegido se procede al diseño del molde, es decir la placa inferior y las dos placas superiores, el mismo que se realizó mediante un software CAD, mostradas en la figura 36.



1. Bebedero, 2. Taza de colada, 3. Mazarota, 4. Agujero para centradores, 5. Agueros pernos de cierre, 6. Pozo de colada, 7. Cavidades de la pieza.

Figura 36. Elementos del molde.

Las partes del molde están diseñadas para que puedan ser ensambladas rápidamente y facilitando el desmoldeo de la pieza fundida, el ensamble del molde se muestra en la figura 37.

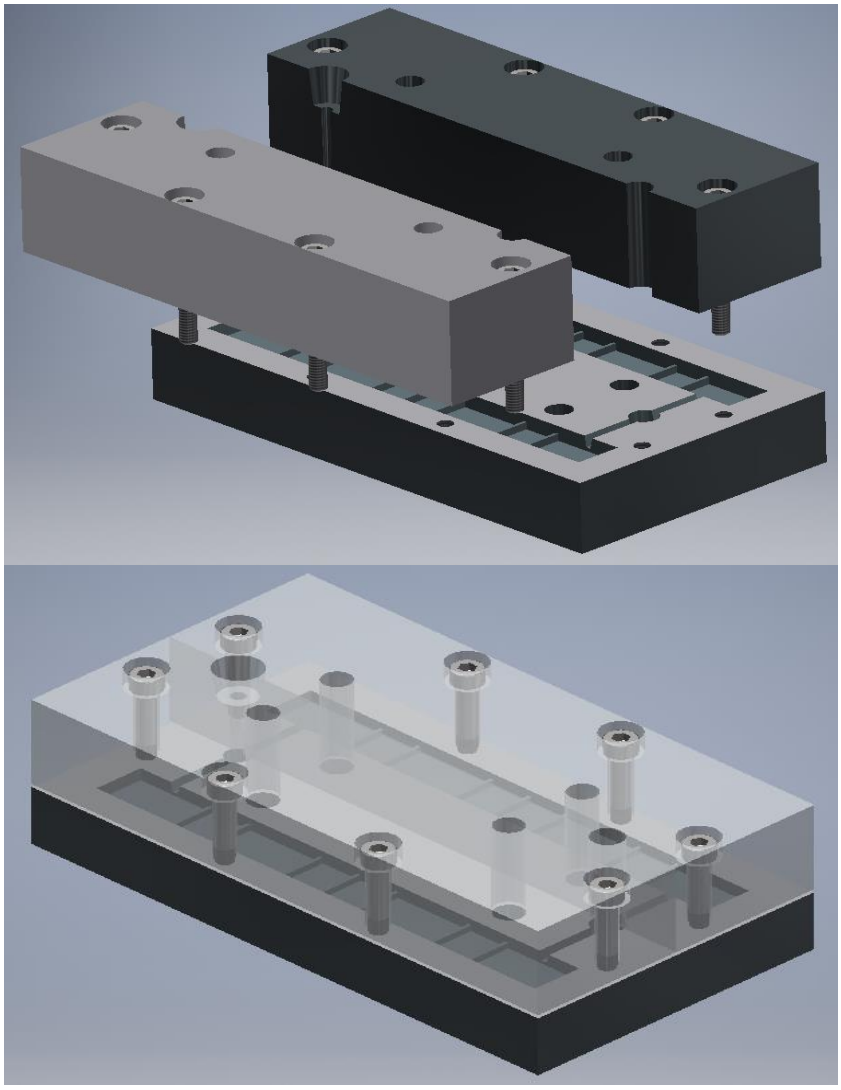


Figura 37.Ensamble del molde.

La placa inferior y las placas superior se sujetan entre sí por guías centradoras y 8 pernos Allen M5 en la periferia, de forma que se garantice el cerrado del molde y la geometría del producto final, el plano detallado se lo puede encontrar en el anexo 3.

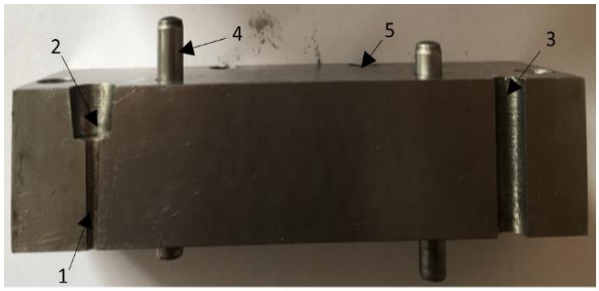
Fabricación del molde

El tiempo total de fabricación del molde es de 227. 21 minutos, sin tomar en cuenta los tiempos muertos, el tiempo de mecanizado necesario para cada placa se puede observar en la tabla número 26, el mecanizado del molde se realizó utilizando una maquina CNC, el código G de la placa base y de la placa superior se encuentra en el anexo 4 y 5 repespectivamente, el producto final se observa en la figura número 38.

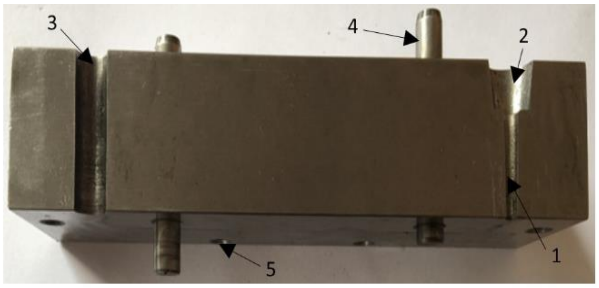
Tabla 26.
Tiempo de mecanizado

Placa Superior		
Operación		Tiempo mecanizado
#	Tipo	t(min)
1	Contorneado exterior	0.5
2	Planeado cara superior	0.52
3	Taladrado	1.32
4	Fresado cilíndrico	1.02
5	Fresado cilíndrico	0.57
6	Taladrado	1.78
7	Planeado cara inferior	0.52
8	Acabado cara inferior	0.92
9	Corte	8
10	Corte bebedero	12
Tiempo total (min)		27.15

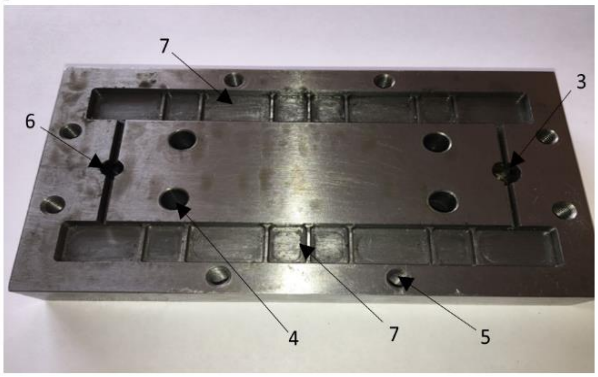
Placa Base		
Operación		Tiempo mecanizado
#	Tipo	t(min)
1	Contorneado exterior	0.5
2	Planeado cara inferior	0.52
3	Planeado cara superior	0.52
4	Acabado cara superior	0.92
5	Contorneado cavidades	23.97
6	Acabado cavidades	165.2
7	Fresado cilíndrico	3.38
8	Fresado canales	3.23
9	Taladrado	1.23
10	Taladrado	1.13
Tiempo total (min)		200.6



Placa superior A



Placa superior B



Placa inferior

1. Bebedero, 2. Taza de colada, 3. Mazarota, 4. Agujero centradores, 5. Agueros pernos de cierre, 6. Pozo de colada, 7. Cavidades de la pieza.

Figura 38.Partes mecanizadas del molde

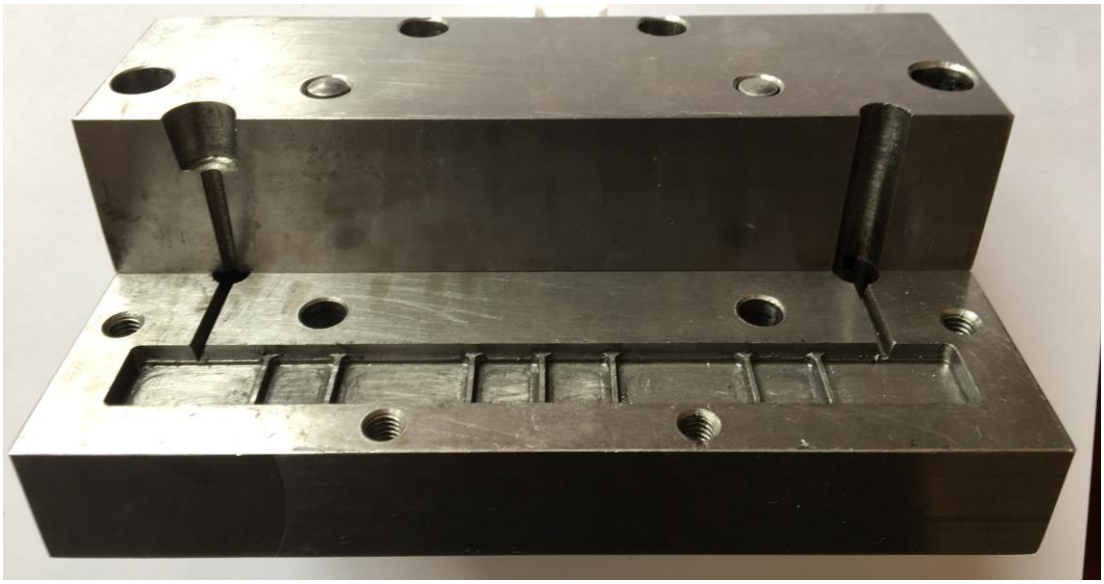


Figura 39.Ensamble del molde mecanizado.

Protocolo de pruebas

El plomo es un mineral que al ser fundido libera gases tóxicos, según Tong, von Schirnding, & Prapamontol (2000), en países en vías de desarrollo la regulación y control de procesos industriales en los cuales se utiliza este material, es escaza o casi nula, a pesar que la concientización sobre la exposición al plomo y sus consecuencias cada vez más va tomando importancia.

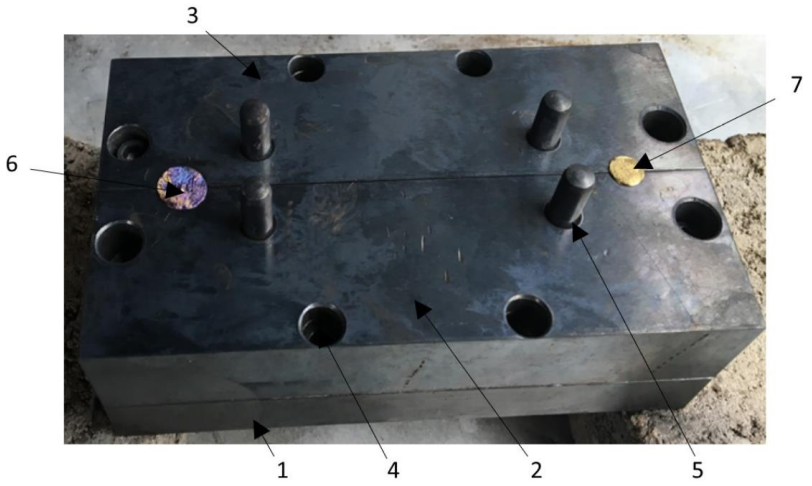
Para realizar la fundición del plomo es necesario utilizar equipos de protección, sobre todo cuando existe una exposición prolongada produciendo efectos sobre la salud a largo plazo, por eso la Organización Mundial de la Salud (2017), sugiere la utilización de equipo de protección como: monos de cuerpo entero, delantales, guantes, cascos de seguridad, calzado o fundas de calzado, respiraderos, viseras faciales y gafas con ventilación que cumplan las normas OSHA, 2002 o CCA, 2016. Además de estos equipos de protección personal es necesario contar con las instalaciones adecuadas en un espacio abierto y con ventilación.

Es necesario fundir el material elegido para la colada, en este caso el plomo, que su punto de fusión es de aproximadamente 327.5 °C, para garantizar el llenado completo del molde se lo lleva a una temperatura entre 600 y 700 °C, para lo cual se utiliza un horno de GLP, llegando a esta temperatura en aproximadamente 20 minutos, mientras es fundido el material para la colada, se calienta el molde a una temperatura aproximada de 300 °C como se puede ver en la figura 40, el cual se demora en alcanzar esta temperatura 15 minutos aproximadamente.

Para verificar la temperatura se utilizó un pirómetro marca TOP, con un rango de medición de -50 a 1300 °C y una precisión de 0.1 °C, además se utilizó un cronómetro para verificar el tiempo de llenado del molde, con una precisión de 0.01 segundos.

Figura 40.Medición de temperatura del molde

Cuando la colada y el molde se encuentran a temperatura requerida, se procede a verter la colada en el molde a través del bebedero hasta observar que salga por la mazarota como se observa en la figura 41, tomando el tiempo desde que se inicia el vertido hasta que ha salido por la mazarota.



1. Placa inferior, 2. Placa superior A, 3. Placa superior B, 4. Pernos de cierre, 5. Centradores, 6. Taza de colada, 7. Mazarota.

Figura 41. Colada solidificada dentro del molde

Una vez que ha solidificado el material de la colada, se procede con el desmoldeo, tomando en cuenta que es necesario utilizar equipo de protección, en la figura 42 se muestra el molde ya completamente abierto.

1.Taza de colada, 2. Bebedero, 3. Canales de alimentacion, 4. Pieza fundida, 5. Mazarota.

Figura 42. Apertura del molde.

Además, se necesita medir las pesas individualmente para comprobar que tengan el peso de ¼ y ½ onza o 7 y 14 gramos aproximadamente, para lo cual se utilizará una balanza electrónica de marca STRIB, que mide hasta 200 gramos, con una precisión de 0.01 gramos.

Resultados experimentales

A continuación, en la tabla 27, se muestran los resultados obtenidos de las pruebas, en estos resultados se muestran los parámetros que se puede medir como son la temperatura de la colada, la temperatura del molde, el tiempo de llenado, y cualitativamente el acabado superficial, además si el molde se llenó completamente o no.

Tabla 27.
Resultados experimentales

Fundición	Temperatura (°C)		Tiempo de llenado (s)	Llenado	Acabado superficial
	Molde	Colada			
1	280.2	683.1		Incompleto	Malo
2	294.2	685.2		Incompleto	Malo
3	293.8	698.2	3.34	Completo	Regular
4	295.2	699.4	3.18	Completo	Regular
5	296.1	704	3.24	Completo	Bueno
6	296.4	709.9	3.25	Completo	Bueno
7	296.8	701.2	3.33	Completo	Bueno
8	297.5	705.2	3.23	Completo	Bueno
9	297.7	700.9	3.23	Completo	Bueno
10	298.8	701.8	3.22	Completo	Bueno
11	299.2	703.2	3.25	Completo	Bueno
12	300.1	708.3	3.23	Completo	Bueno
13	300.4	700.3	3.27	Completo	Bueno
14	301.1	712.4	3.21	Completo	Bueno
15	301.2	714.3	3.15	Completo	Bueno
16	301.2	706.2	3.22	Completo	Bueno
17	303.3	704.8	3.26	Completo	Bueno
18	303.4	712.2	3.17	Completo	Bueno
19	305.2	706.7	3.25	Completo	Bueno
20	306.2	704.3	3.20	Completo	Bueno
21	307.0	711.3	3.19	Completo	Bueno
22	309.4	710.4	3.19	Completo	Bueno
23	315.3	701.4	3.21	Completo	Bueno
24	330.1	715.9	3.14	Completo	Bueno
25	336.1	711.2	3.16	Completo	Bueno

Además, en los gráficos 43, 44, 45, 46 y 47 se muestran los resultados experimentales de forma visual, las imágenes son correspondientes a fundiciones seleccionados al azar, se muestran después de desmoldados y por ambos lados, en donde se puede apreciar el acabado superficial y el llenado.

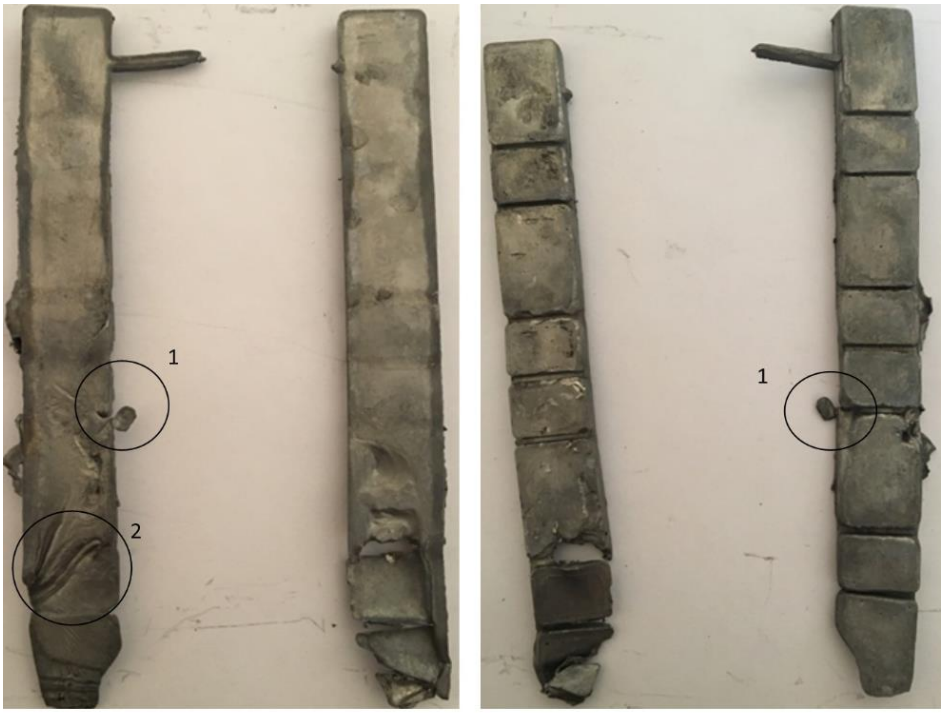


Figura 43.Resultado visual fundición 1

Como se puede ver en la figura 43, la fundición 1 se realizó a una temperatura de vertido de 683.1 °C y una temperatura de molde de 280.2 °C, al no tener la temperatura adecuada el molde no se llenó por completo, además en la zona 1 se tiene penetraciones o rebabas por falta de apriete al cerrar el molde, en la zona 2 se observan un arrastre de material en fase solida-liquida en cual también indica solidificación temprana, causando una pieza fallida por completo.

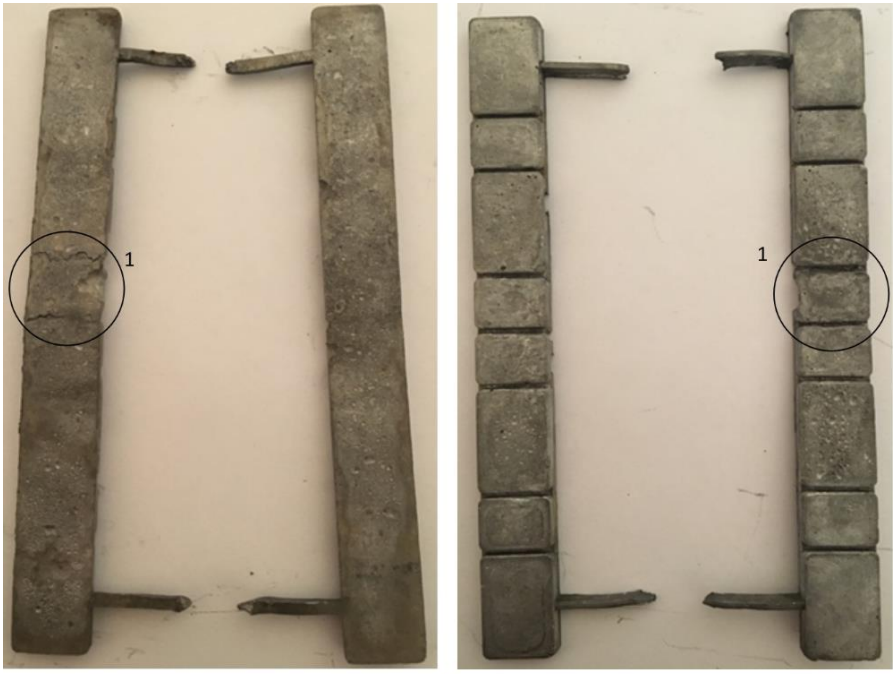
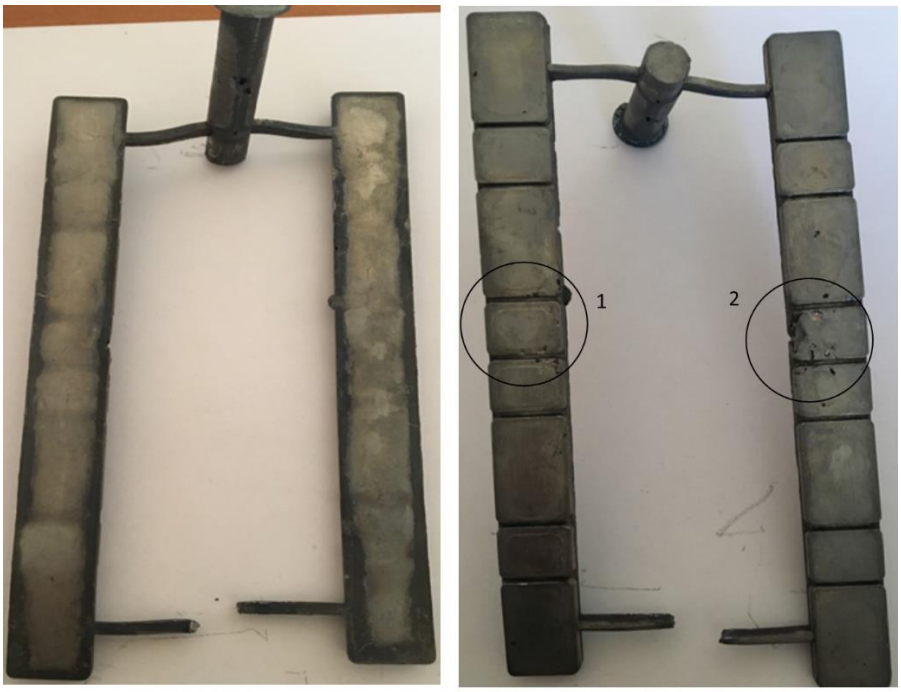


Figura 44. Resultado visual de la fundición 4

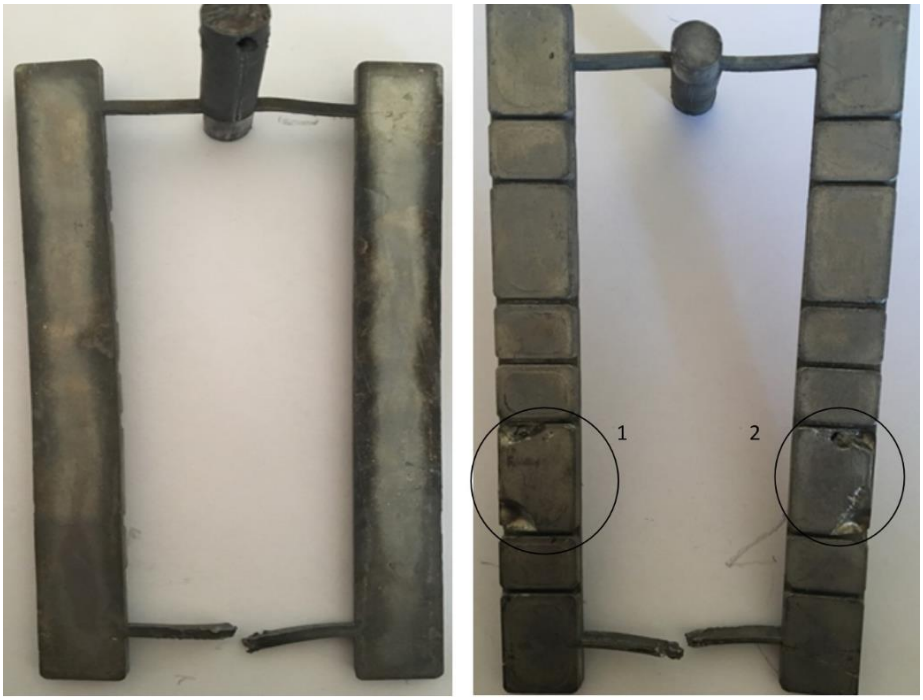
En la figura 44, la zona 1 muestra defectos en los dos lados de la fundición, se aprecia un vacío en lado A con salida hacia el lateral de la pieza originado por incrustaciones de escoria, las gritas visualizadas en el lado A fueron ocasionadas al momento del desmolde por lo que no son consideradas como defectos.

El acabado superficial en general posee pequeñas sopladuras, que pueden deberse a evaporación de gotas de agua generadas por condensación del aire, esto puede ser debido a que el molde aun no alcanzaba una temperatura estable.



Lado A Lado B

Figura 45. Resultado visual de la fundición 10



Lado A Lado B

Figura 46. Resultado visual de la fundición 16

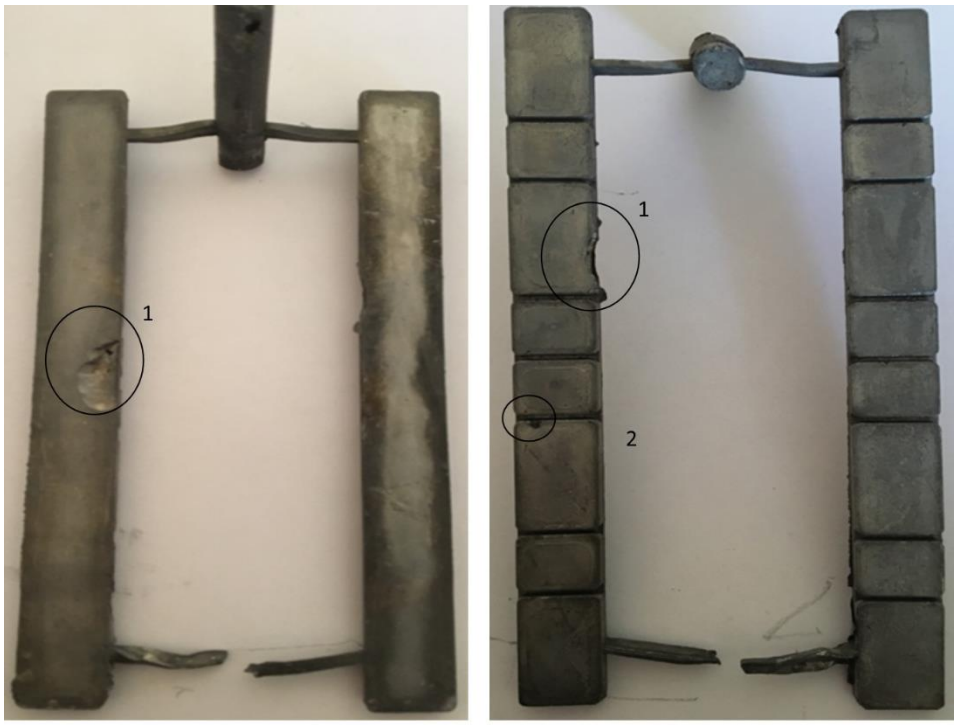


Figura 47. Resultado visual de la fundición 22

Los resultados visuales de las fundiciones 10, 16 y 22, mostrados en las figuras 45, 46 y 47 respectivamente, poseen un buen acabado superficial, en las zonas delimitadas con círculos se encuentran incrustaciones de escoria debido al uso de pesas de reciclaje, las cuales posee una cinta doble faz para su adherencia al aro de la rueda, lo cual, al momento de fundir el plomo quedan incluidos en la colada a pesar de que el material fue limpiado previamente, generando estos defectos.

Uno de los resultados que se espera en la fabricación de las pesas, es que posean la masa adecuada para balancear las ruedas, en este estudio se fabricaron pesas para autos livianos, los cuales deben ser de ¼ y ½ onza, es decir aproximadamente 7 y 14 gramos, para ello se cortaron las tiras de pesas fabricadas y se pesaron individualmente, obteniendo los datos mostrados a continuación en la tabla 28.

Tabla 28.
Masa individual de pesas pequeñas y grandes

Masa(gr)		
Probeta	Pequeña	Grande
1	7.05	14.23
2	7.03	14.28
3	6.99	14.15
4	6.93	14.2
5	7.09	14.11
6	7.05	14.13
7	7.02	14.12
8	7.07	14.18
9	7.06	14.19
10	7.07	14.2
11	7.05	14.21
12	7.05	14.19
13	7.06	14.18
14	7.09	14.17
15	7.05	14.16
16	7.08	14.17

Discusión de resultados

Al determinar la geometría del modelo de la pieza a fabricar mediante mediciones de las pesas utilizadas en negocios locales, se encontró que posee una geometría en forma trapezoidal la cual facilita la extracción del molde, además de permitir girar y adaptarse a la curvatura del aro del neumático para poder ser adheridas. Songer, Murfreesboro, & Tenn (1976), coinciden también que la geometría de una pesa de balanceo debe ser un trapecio rectangular, ya que esta forma al tener ángulos en sus caras tiene la capacidad de girar y adoptar la curvatura del aro.

Para definir el material de las pesas se tomaron muestras en 15 negocios que se dedican al enllantaje y balanceo de ruedas, fueron analizadas por el método de espectrometría de fluorescencia, los resultados obtenidos fueron que el material utilizado en esta actividad es el Plomo (Pb), al poseer densidad elevada, las pesas tendrán una masa alta comparada con su volumen, lo cual puntualiza la carga necesaria para el balanceo. Songer et al.(1976), también menciona que el plomo es usado para fabricar las pesas de balanceo, ya que al poseer una densidad elevada, permite aplicar la carga de forma puntal en una zona específica del aro del neumático; por lo que en este estudio se determina que el primer material de elección es el plomo.

En la selección del material para el molde se realizó un estudio de campo con el fin de evaluar materiales utilizados para moldes permanentes disponibles en el mercado que posean propiedades como: resistencia a altas temperaturas, estabilidad dimensional, resistencia al choque térmico, resistencia a la fatiga, soportar ciclos térmicos prolongados y repetidos, buena maquinabilidad, se determinó que el material idóneo es el acero AISI P20 Modificado, este material también es sugerido por Jami & Llanes (2018).

El siguiente paso fue el diseño de los sistemas de colada, para llegar a un diseño óptimo de los sistemas de alimentación se planteó tres opciones, en las cuales varían la posición de los elementos del sistema de colada, de ello se obtuvieron los resultados visibles en la figura 28, en donde se observa la posición de la taza de colada, bebedero, pozos de colada, mazarota y canales de colada, para las tres opciones, según Nimbulkar & Dalu (2016), la calidad de la fundición es directamente proporcional a la eficiencia de los sistemas de colada, un mal diseño de estos sistemas puede resultar en la aparición de defectos en la fundición.

El paso a seguir fue la simulación de la colada, en la que se obtuvieron los resultados visibles en las figuras 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34 y 35 donde se observa el comportamiento de la colada en el interior del molde para las tres opciones de modelo planteadas, y analizadas a continuación:

- El resultado del factor de llenado óptimo es 100%, por lo que la mejor opción de modelo es la C con un porcentaje de llenado del 95%, como se puede observar en la figura 27 el 5% faltante se encuentra ubicado en la salida de la mazarota, zona que no repercute en la calidad de la pieza si es llenada o no por completo, garantizando el llenado completo del molde.
- El tiempo de llenado deseable es el menor, pero sin comprometer la calidad del producto final, en la figura 28 se observa que el tiempo para la opción A y B, ronda alrededor de los 3.4 segundos y para la poción C es de 3.24 segundos, lo cual hace esta opción la adecuada, sin afectar el llenado.
- La temperatura al llenado para las tres opciones varía entre 700°C y 350°C, observado en la figura 29, mientras este valor no baje de 350°C es aceptable debido a que temperaturas menores a la mencionada causarán solidificación

temprana y el no llenado del molde; en la opción C se muestra una distribución uniforme de la temperatura siendo más alta en la zona de entrada garantizado la fluidez del material.

- El resultado de la simulación para el tiempo de solidificación mostrado en la figura 30, indica que en la opción A el material de la colada solidificará más pronto en una parte de la zona del canal de alimentación causando el llenado incompleto del molde; la opción B podría tener problemas de llenado en la parte intermedia de la pieza, de igual forma debido a la solidificación temprana; la opción C es la más adecuada debido que el tiempo de solidificación menor se encuentra en la zona de la mazarota, lo cual sugiere que el llenado del molde será completo y de forma gradual.
- La figura 31 muestra el tiempo para sólido, el cual representa el tiempo necesario para llegar a la temperatura del sistema, en este caso de 300 °C, se puede observar una vez más como sugieren el resto de parámetros analizados que en la opción C la solidificación comienza en el lado de la mazarota con dirección al bebedero, lo cual indica un llenado completo con un tiempo para llegar a la temperatura indicada de 13.25 segundos.
- El módulo de enfriamiento mostrado en la figura 32, de igual forma indica que la opción C es la más adecuada, debido a que enfriará uniformemente comenzado en la mazarota hacia el bebedero, lo que garantiza el llenado del molde.
- Se produce un atrapamiento de aire (ver figura 33) en las opciones A y B debido a que la ubicación del bebedero es en el centro del molde, lo cual distribuye la colada hacia los extremos causando que al momento de solidificarse queden

vacíos (ver figura 34) al no tener salida el aire; en la opción C al tener ubicados a los extremos de la pieza la entrada y salida de colada, el aire es arrastrado hacia la mazarota y por tanto es expulsado, teniendo un llenado completo del molde.

- Las pesas de balanceo al no ser una pieza de precisión, no es de importancia el análisis de porosidades, sin embargo, para las 3 opciones no supera el 10% ubicadas en zona como la mazarota y canales de alimentación que son sistemas que posteriormente se remueven de la piza final (ver figura 35).

La opción más adecuada fue la observada en la figura 28 C, según el análisis de resultados de las simulaciones y evaluado en la figura 4, en la cual la mejor opción es la que se acerca a la barra de deseado por cualquier de los dos lados. Para Ravi (2010), los usos de simulaciones en las operaciones de fundición se convierten en una parte integral para alcanzar resultados de alta calidad y óptimo rendimiento en la fundición, ya que investigaciones realizadas en fundidoras a lo largo de la India, revelan que el uso de simulaciones reduce hasta el 30% de errores en este proceso.

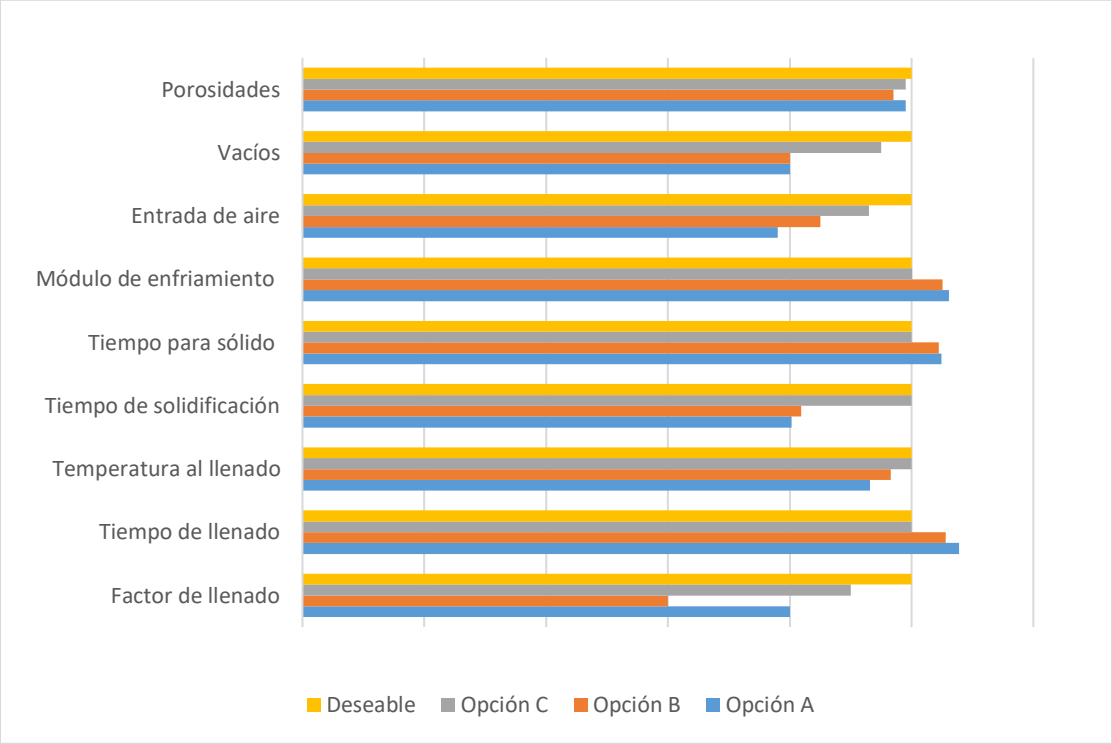


Figura 48. Análisis de resultados de las simulaciones vs deseado.

Las convergencias de los resultados más relevantes obtenidos en las simulaciones se muestran en las figuras 49, 50, 51 y 52, las simulaciones fueron realizadas con las condiciones de mallado de la tabla 14 y las condiciones de borde de la tabla 15.

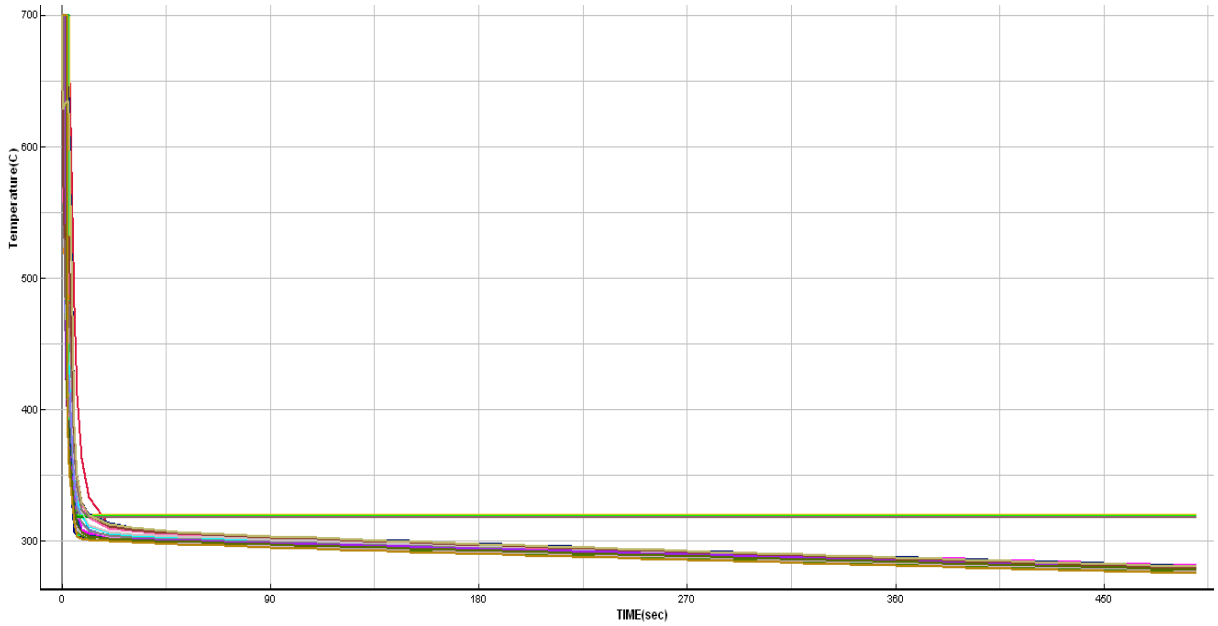


Figura 49.Convergencia de temperatura vs tiempo

En la figura 49 se observa como los valores de temperatura que parten de 700 °C, que es la temperatura de vertido de la colada, todos descienden a un valor de 327 en un tiempo de 45 segundos aproximadamente, temperatura la cual el material de colada se solidifica, lo que además indica, que en el segundo 3.5 que es el tiempo en el que se tarda el molde en llenarse, todo los puntos aún se encuentran en estado líquido, existen varias líneas ya que el software analiza los resultados en varios puntos del modelo CAD, demostrado que los resultados de solidificación y de llenado del molde convergen en todas las iteraciones realizadas por el software.

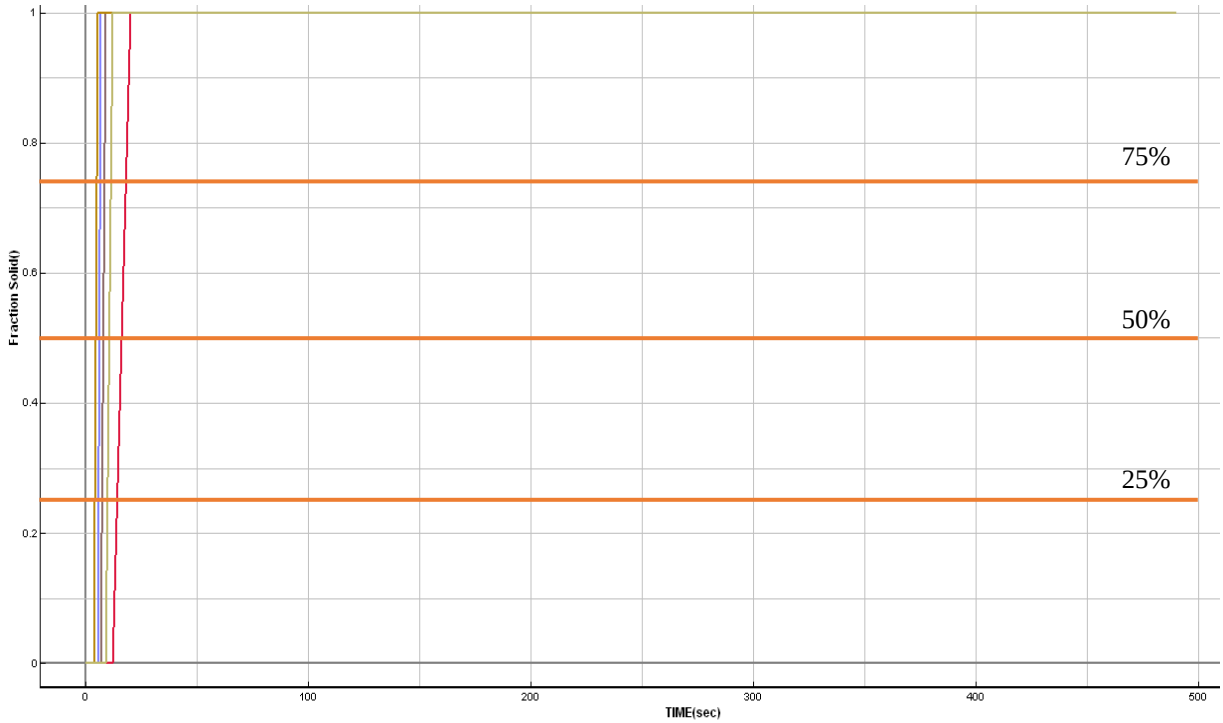


Figura 50. Convergencia de la fracción sólida vs tiempo

La figura 50, muestra como las soluciones llegan a un mismo punto, donde todas las iteraciones llegan al valor de 1 que representa que el material llega a su estado de sólido al 100%, es decir no hay zonas en la colada que se queden en estado de transición sólido-líquido, en la gráfica se puede observar que alrededor del segundo 10 la pieza se encuentra en estado de transición 50% líquido y 50% sólido, en el segundo 15 prácticamente toda la pieza se encuentra en estado sólido. De igual forma hay varias curvas de colores debido a que el software analiza los resultados en varios puntos que solidifican en diferentes tiempos, por ejemplo, la zona del bebedero al encontrase con mayor temperatura solidificara más tarde y la zona de la mazarota al encontrarse más lejos del foco de calor y por ser la última parte en llenar solidificar más rápido que otros lugares.

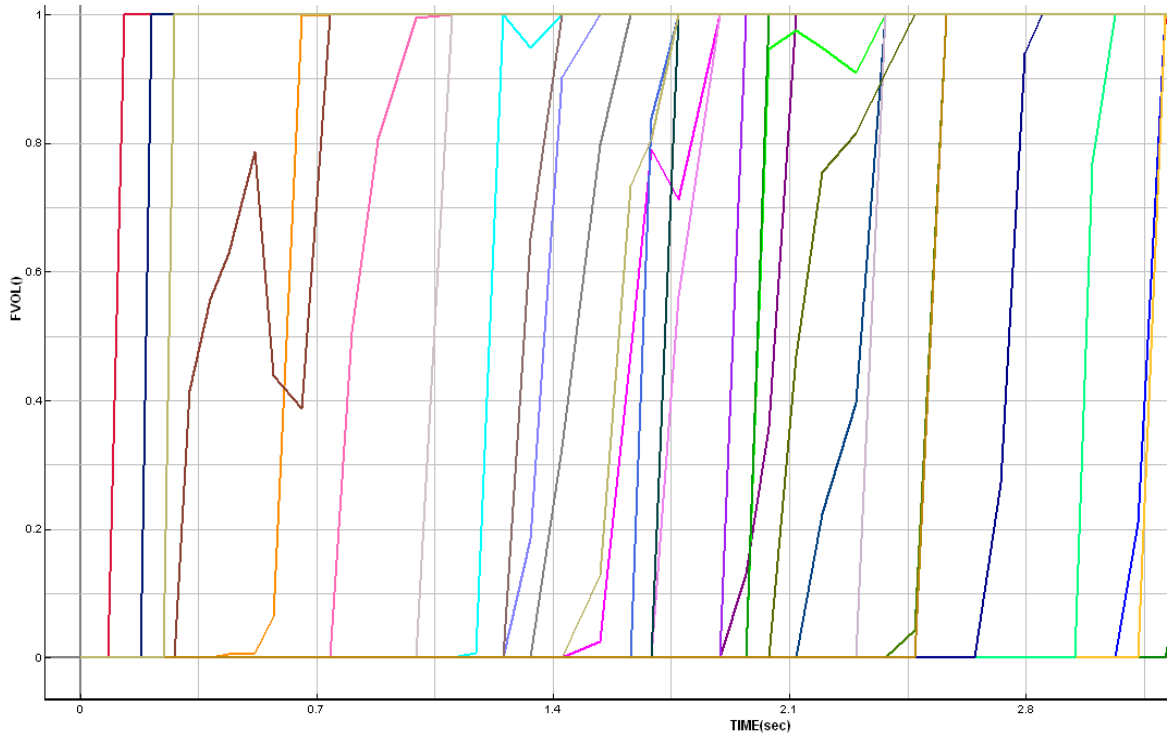


Figura 51.Convergencia del factor de llenado vs tiempo.

El resultado de la figura 51 es el más crítico, el programa muestra en las gráficas, varias soluciones que se realizaron en diferente tiempo y en diferentes puntos de la colada, como se muestra en la figura 27, el factor de llenado varía dependiendo del punto y del tiempo, hay ciertos lugares que por la geometría del molde, la confianza de llenado varia como indican las líneas de la gráfica, hasta que el flujo se estabilice y llene completamente, hay lugares que se llenan en menor tiempo y otros en mayo tiempo, pero sin embargo las líneas mostradas en esta gráfica llegan a un valor de 1, demostrando que la confianza del llenada en todo el molde es de 100% y que las iteraciones de las diferentes soluciones llegan al mismo punto.

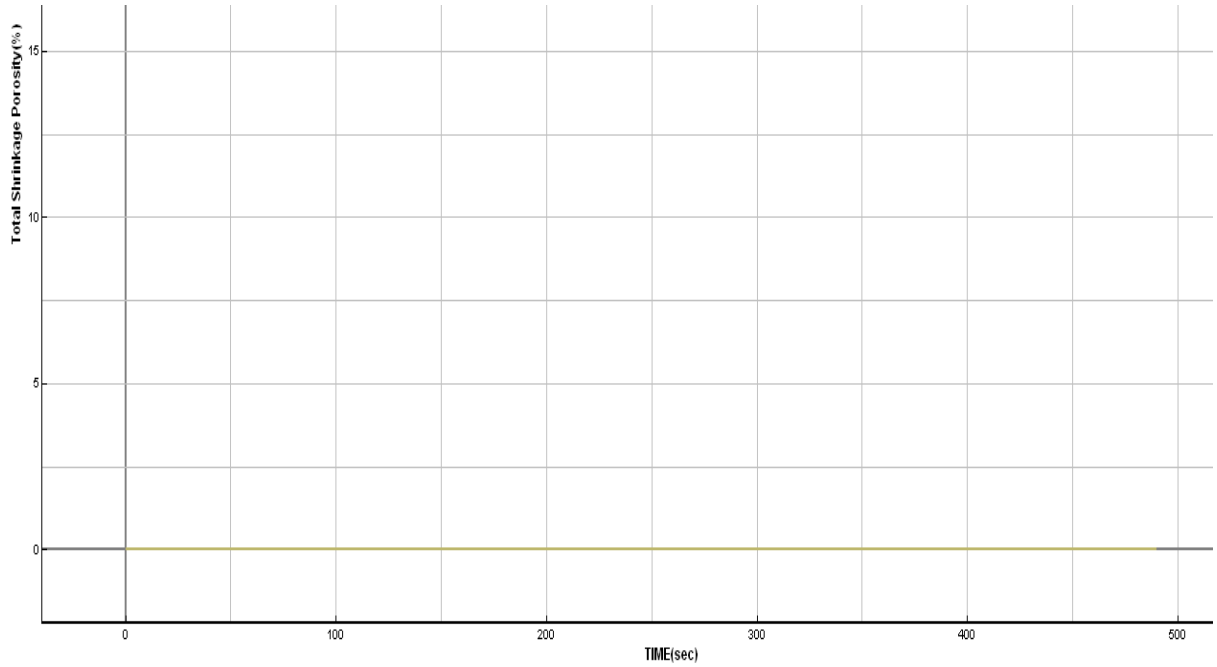


Figura 52.Convergencia de porosidades totales vs tiempo.

En la figura 52, todas las soluciones llegan al punto más bajo, ya que los problemas de porosidades en el modelo escogido son mínimos, por no decir nulos, y se puede observar los resultados mostrados en porcentaje en la figura 37.

Como siguiente punto a ser analizado son los resultados experimentales en los cuales se obtuvieron mediante el análisis estadístico de los mismos. A continuación, se presenta una imagen la distribución normal del tiempo de llenado.

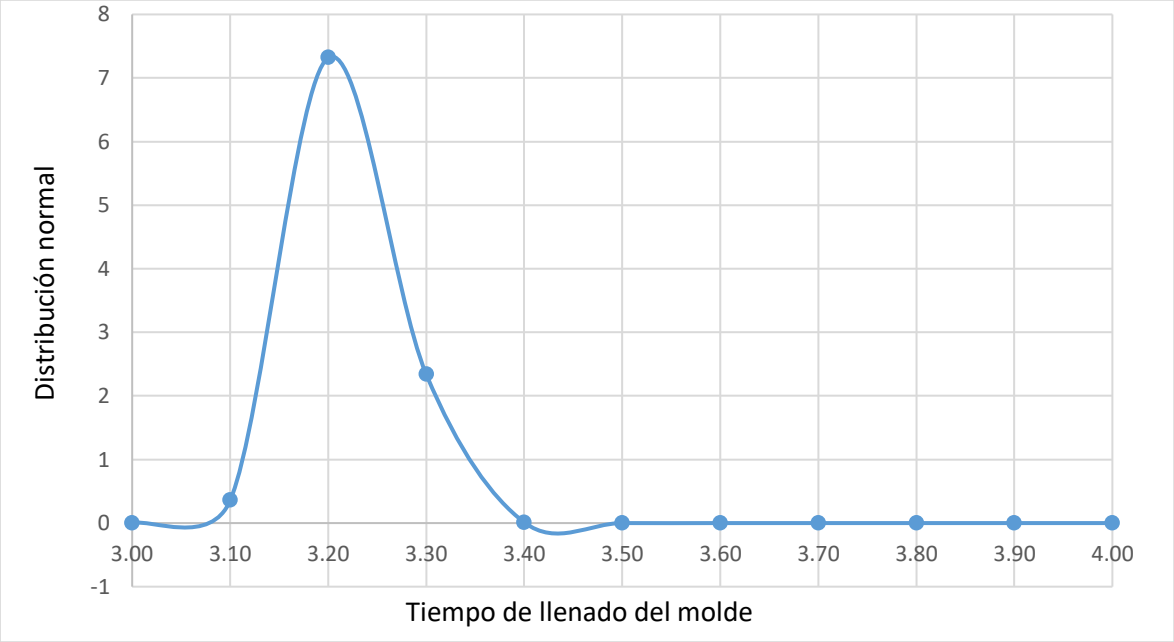


Figura 53. Distribución normal del tiempo de llenado.

Como se puede observar en la figura 53, la mayor parte de los valores de la distribución normal se encuentran cercanos a la media del tiempo de llenado, que calculado de los datos experimentales es de 3.223 segundos, con una desviación estándar de 0.04, comparando con los resultados obtenidos analíticamente y mediante el software, se obtiene:

Tabla 29.
Error en el tiempo de llenado

	Analítico	CFD	Experimental
T llenado (s)	3.571	3.244	3.223
Error porcentual		9.15	9.74

Como se puede ver en la tabla 29, los errores porcentuales en los dos casos son menores al 10%, que se encuentran dentro de un rango aceptable, además cabe recalcar y como menciona Murcia et al (2011), los parámetros del proceso de colada son difíciles de controlar y sobre todo

cuando se trata de una fundición por gravedad, en la cual el flujo o el caudal de vertido de la colada depende de la mano del operario, por lo tanto los resultados hallados en el presente estudio, se encuentran validados.

Como última variable a ser analizada es el peso individual de cada pesa, el cual fue medido como se indica en la sección de resultados, el peso ideal para las pesas utilizados más frecuentemente para autos livianos es de ½ y ¼ de onza, que en gramos es 7 y 14 respectivamente, estos valores son también mencionados por Songer et al (1976).

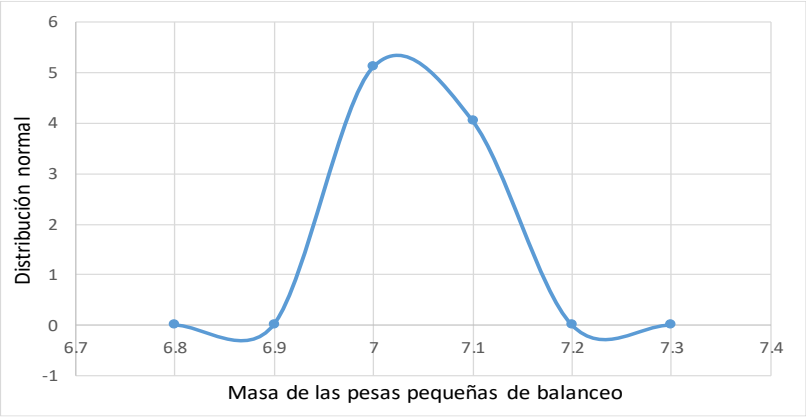


Figura 54. Distribución normal de masa de pesas pequeñas de balanceo

Figura 55. Distribución normal de masa de pesas grades de balanceo

En la figura 54 se muestra el gráfico de la campana de Gauss, para las pesas pequeñas, donde se observa que la mayor parte de datos se encuentran cercanos al valor de 7.04 gramos, con una desviación estándar de 0.04; en la figura 55 se muestra el mismo análisis para las pesas grandes donde el valor promedio es de 14.17 gramos, con una desviación estándar de 0.04.

En la tabla 30 se muestra el error porcentual obtenido en la masa al fabricar las pesas de balanceo.

Tabla 30. *Error en masa de pesas de balanceo*

Pesas	Peso requerido (gr)	Peso promedio experimental (gr)	Error %
Pequeñas	7.08	7.04	0.56
Grandes	14.18	14.17	0.07

Como se puede observar en los dos casos el error porcentual no supera el 1%, por lo que las pesas de los dos tamaños, se encuentran dentro del rango de aceptación para ser usadas en el balanceo de rudas automotrices.

Conclusiones

Mediante las pruebas de composición química efectuadas en los especímenes tomados de 15 negocios locales que se dedican a la actividad de enllantaje y balanceo de ruedas, se logró determinar que las pesas de balanceo son efectivamente fabricadas en un 99% a base de plomo.

Según investigaciones de campo, especificaciones de los fabricantes y sugerencias recolectadas de autores que han estudiado moldes para fundición, se definió que el material más adecuado para el molde es el acero AISI P20 por sus propiedades para trabajos en caliente, además de disponibilidad en el país.

Los resultados obtenidos de simulaciones realizadas en un software especializado en fundición, sirvieron para predecir el comportamiento de la colada en el interior del molde, y poder determinar la ubicación y dimensión más adecuada de los sistemas de colada.

Se logró determinar el modelo adecuado mediante la comparación de los resultados obtenidos de las simulaciones de las tres opciones de modelo, de las cuales se pudo elegir el más adecuado, que es la opción C (ver figura 26), quedando definido la configuración de todos los sistemas de colada.

Una vez determinado el modelo, se diseñó y fabricó un molde prototipo, en cual se utilizó para realizar pruebas de fundición que ayudaron a corroborar los resultados obtenidos mediante el software.

Los resultados de las pruebas revelaron que el diseño del molde es adecuado, los datos experimentales del tiempo de llenado se cotejaron con el calculado analíticamente y mediante el software, teniendo como error un porcentaje menor al 10%.

Por último, se obtuvo la masa adecuada para las pesas de balanceo de ¼ y ½ onza o su equivalencia aproximada de 7 y 14 gramos, dando como resultado un error menor al 1%.

Recomendaciones

Uno de los principales defectos obtenidos en la fabricación de las pesas de balanceo, fue el arrastramiento de escorias e impurezas, que se encuentran en la colada debido a que el material utilizado para la fundición era de reciclaje, a pesar de haberse realizado una limpieza previa; se recomienda analizar la posibilidad de utilizar algún agente químico que ayude con esta tarea.

El factor más influyente de todo el proceso de vertido de la colada, fue el caudal o flujo de entrada en el pozo de colada, ya que este depende de la persona que está realizado este proceso, además de ser un factor difícil controlar por lo que se recomienda tratar verter el material siempre a una misma distancia tomada desde la cara superior del molde y controlando el tiempo de llenado.

Se recomienda difundir los resultados de esta investigación a fin de impulsar la producción de pesas de balanceo de ruedas a nivel nacional, ya que a la fecha en que se realizó esta investigación es inexistente y las pesas que se usan en el país son importadas.

Además, se alienta a impulsar la realización de estudios similares con materiales alternativos a fin de reemplazar al plomo como material de fabricación, debido al alto impacto ambiental que puede generar, no solo en el proceso de fundición, sino al finalizar su ciclo de vida.

Como recomendación final debería realizarse un estudio para fabricar las mencionadas pesas de balanceo, utilizando otros procesos de fundición como, por ejemplo, fundición por

inyección a presión, para elevar la producción y de una forma automática para prevenir posibles riesgos a los operadores debido a la toxicidad del plomo.

Referencias bibliográficas

Abate, G., Pérez, D., Pouton, J., Mártinez Krahmer, D., & Brignone, J. (2015). ANÁLISIS TEÓRICO DE UNA PIEZA DE FUNDICIÓN NODULAR POR EL MÉTODO DE LOS MÓDULOS GEOMÉTRICOS Y SIMULACIÓN NUMÉRICA.

Arroyo Osorio, J. M., Mendes de Aguiar, M., & Rodríguez Baracaldo, R. (2012). EFECTO DEL MAQUINADO EN DURO EN LA REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE FABRICACIÓN DE CAVIDADES PARA MOLDES, 104–110.

Askeland, D. R., & Phulé, P. P. (2004). Ciencia e ingeniería de los materiales. Retrieved from https://books.google.com/books?id=2kpDKWJ7eYIC&pgis=1

Asociación de empresas Automotrices del Ecuador. (2017). *Sector Automotor en cifras*. Retrieved from http://www.aeade.net/wp-content/uploads/2017/03/Sector-en-cifras_6-Marzo-2017.pdf

Avendaño Zárate, J. J. (2009). *FABRICACIÓN DE UN MOLDE PROTOTIPO PARA UN RIN DE UNA LLANTA POR MEDIO DE CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO – MANUFACTURA ASISTIDA POR COMPUTADORA*. INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL DE MÉXICO.

Bhardwaj, A., Rawlani, M. V, & Mukherjee, C. K. (2014). “ Permanent Mold Casting ” Excellent Casting Method for Manufacture of Automotive Components. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, *2*(8), 2254–2255.

Boatswain Medina, E. J. (2018). Sistema de colada. Retrieved from

https://issuu.com/efrainjosueboatswainmedina/docs/f_cap_02-06_sistema_de_colada__1_

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*(Icmpc), 786–797. https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.095

Contreras Sánchez, R., Tapia Martínez, Á. H., Vargas Moreno, L. H., & Villegas Valdés, G. (2008). *FABRICACIÓN DE MOLDE PARA RIN DE ALUMINIO 38.1cm., POR FUNDICIÓN A BAJA PRESIÓN*. INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL DE MÉXICO.

Dabade, U. A., & Bhedasgaonkar, R. C. (2013). Casting defect analysis using design of experiments (DoE) and computer aided casting simulation technique. *Procedia CIRP*, *7*, 616–621. https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.042

Donoso Carrillo, J. C. (2017). *EL IMPACTO DE LA INDUSTRIALIZACIÓN EN EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE PRODUCTOS INTERMEDIOS DE HIERRO O ACERO SIN ALEAR COMO MECANISMO DE SUSTITUCIÓN DE IMPORTACIONES EN EL CONTEXTO DE CAMBIO DE LA MATRIZ PRODUCTIVA DE LA INDUSTRIA SIDERÚRGICA DEL ECUADOR*. UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DEL ECUADOR.

Elbel, T., & Havlicek, F. (2014). Theory of Foundry Processes.

Escuela de Administración de Empresas. (2016). *Guía Trabajos de Graduación*.

Fu, M. W., & Yong, M. S. (2009). Simulation-enabled casting product defect prediction in die casting process. *International Journal of Production Research*, *47*(18), 5203–5216.

https://doi.org/10.1080/00207540801935616

Garcés García, M. A. (2016). *DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y SIMULACIÓN DEL LLENADO DE UN MOLDE EN ARENA EN VERDE PARA FUNDICIÓN DE PIEZAS DE ALUMINIO BLANCO*. Escuela Politécnica Nacional.

García Chacón, J. A. (2013). *Estudio de la influencia de diferentes diseños de los sistemas de alimentación y compensación en la fundición en arena*. Universidad de Sevilla.

Gondkar, V. S., & Inamdar, K. H. (2014). Optimization of Casting Process Parameters through Simulation. *International Journal of Application or Innovation in Engineering and Management*, *3*(6), 276–283.

Guerrero Rivera, M. (2006). *DISEÑO DE MATRICES PARA LA MANUFACTURA DE COMPONENTES AUTOMOTRICES DE ACERO INOXIDABLE T304 MEDIANTE EL PROCESO DE CONFORMADO EN FRIO*. INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL. Retrieved from http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/2498/996_2006_ESIME-ZAC_MAESTRIA_guerrero_rivera_mario.pdf?sequence=1

Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. (2016). Evolución del sector manufacturero ecuatoriano 2010-2013. Retrieved from http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Bibliotecas/Libros/SECTOR MANUFACTURERO.pdf

Jami, M., & Llanes, E. (2018). *Diseño y construcción de un molde permanente para la fabricación de bornes de baterías automotrices*. UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK.

Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología* (Quinta edi).

Loor Sandoval, B. I. (2018). *Estudio de la evolución del sector metalmecánico cuya actividad es la fabricación de metales comunes en el Ecuador en el período 2010-2015*. Universidad Andina Simón Bolívar.

Ministerio Coordinador de Producción, Empleo y Competitividad, M., & Ministerio de Industrias y Productividad, M. (2016). Política Industrial del Ecuador 2016-2025.

Murcia, S. C., Ossa Henao, E. A., & Paniagua, M. A. (2011). Análisis De Sensibilidad De Flujos De Aluminio En Moldes Permanentes Al Tamaño De Malla Y Coeficiente De Transferencia Térmica, 1–10.

Narváez Reyes, J. A., Chamba Román, M. Á., & Quito Velecela, M. F. (2014). Estudio para la producción de bloques de motor estacionario de combustión interna de 250cc mediante molde permanente. Cuenca.

Navas, E., Batista, A., & Suchkov, A. N. (1990). Métodos de Cálculo en Fundición.

Nimbulkar, S. L., & Dalu, R. S. (2016). Design optimization of gating and feeding system through simulation technique for sand casting of wear plate. *Perspectives in Science*, *8*, 39–42. https://doi.org/10.1016/j.pisc.2016.03.001

Organización Mundial de la Salud. (2017). *Reciclaje de baterías de plomo-ácido usadas: consideraciones sanitarias*.

Oviedo Fierro, F., & Vinueza Lozada, A. (2010). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOLDE PERMANENTE UTILIZANDO EL SOFTWARE VULCAN*. ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL.

Pattnaik, S., Karunakar, D. B., & Jha, P. K. (2012). Developments in investment casting process - A review. *Journal of Materials Processing Technology*, *212*(11), 2332–2348. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.06.003

Pérez, D., Abate, G., Martínez Krahmer, D., Cagnoli, M., & Tamarit, G. (2016). ANÁLISIS DE DEFECTOS POR SOLIDIFICACIÓN EN UNA PIEZA FUNDIDA DE ALUMINIO , EMPLEANDO RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL Y SIMULACIÓN COMPUTACIONAL.

Pluma Torres, M. de J., & Gutiérrez Gonzáles, J. del S. (2017). CIRCUNSPECCIONES PARA ASEGURAR EL ÉXITO EN LA FUNDICIÓN DE METALES. *FUNDIDORES*, (238), 40.

Prabhakara Rao, P., Chakraverthi, G., Kumar, A. C. S., & Balakrishna, B. (2011). Application of Casting Simulation for Sand Casting of a Crusher Plate. *International Journal of Thermal Technologies*, *1*(1).

Quadros, R., Consoni, F., & Quintão, R. (2005). R & D outsourcing to research institutions : a new look into R & D in the Brazilian automobile industry. *Europe*.

Ramírez Yánez, E. A. (2011). *Desarrollo de un sistema de manufactura asistida por computadora para moldes*. INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL DE MÉXICO.

Ravi, B. (2008). Casting Simulation and Optimisation: Benefits, Bottlenecks, and Best Practices. *Indian Foundry Journal*, 1–12.

Ravi, B. (2009). Computer-aided Casting Design and Simulation, 1–8.

Ravi, B. (2010). Casting Simulation – Best Practices. *Transactions of 58th IFC*, 1–11. Retrieved from http://efoundry.iitb.ac.in/Academy/TechnicalPapers/2010/58thIFC-Ravi.pdf

Rodríguez Moliner, T., Parada Expósito, A., & Ordóñez Hernández, U. (2010). Predicción de

defectos en piezas fundidas mediante el uso de la simulación. *Revsita Cubana de Ingeniería*, *1*(2), 55–60.

Servicio Nacional de Aduana del Ecuador. (2018). *Importaciones no petroleras*.

Songer, H. D., Murfreesboro, & Tenn. (1976). WHEEL BALANCING WEIGHT.

Tong, S., von Schirnding, Y. E., & Prapamontol, T. (2000). Environmental lead exposure: a public health problem of global dimensions. *Bulletin of the World Health Organization*, *78*(9), 1068–1077. https://doi.org/10.1590/S0042-96862000000900003

Unidad Técnica de Estudios para la Industria. (2007). *Competitividad Industrial del Ecuador*. Programa Integrado entre el Ministerio de Industrias y Competitividad y la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. Quito.

Vázquez, V. H. (n.d.). El rol de la simulación de procesos en el diseño de moldes y troqueles.