



*Simulación CFD de la fundición por gravedad y su colada en los moldes para pesas adhesivas de balanceo de neumáticos*

*CFD simulation of gravity casting and casting into molds for adhesive tire balancing weights*

*Simulação CFD de fundição por gravidade e fundição em moldes para pesos de balanceamento de pneus adesivos*

Paúl Esteban Bazante-del Pozo<sup>I</sup>  
[pbazante.mdm@uisek.edu.ec](mailto:pbazante.mdm@uisek.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0002-9043-5168>

Edilberto Antonio Llanes-Cedeño<sup>III</sup>  
[antonio.llanes@uisek.edu.ec](mailto:antonio.llanes@uisek.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0001-6739-7661>

Johnny Marcelo Pancha-Ramos<sup>II</sup>  
[johnny.pancha@esPOCH.edu.ec](mailto:johnny.pancha@esPOCH.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0001-7320-2154>

Jorge Luis Lema-Loja<sup>IV</sup>  
[jorgelema@uti.edu.ec](mailto:jorgelema@uti.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0002-1515-4526>

**Correspondencia:** [pbazante.mdm@uisek.edu.ec](mailto:pbazante.mdm@uisek.edu.ec)

Ciencias técnicas y aplicadas  
Artículo de revisión

\***Recibido:** 20 de abril de 2021 \***Aceptado:** 18 de mayo de 2021 \* **Publicado:** 17 de junio de 2021

- I. Magíster en Diseño Mecánico Mención en Fabricación de Autopartes de Vehículos, Ingeniero Mecánico, Universidad Internacional SEK, Quito, Ecuador.
- II. Magíster en Sistemas Automotrices, Ingeniero en Mecánica Automotriz, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- III. Master en Eficiencia Energética, Doctor Dentro del Programa de Doctorado en Ingeniería Rural, Ingeniero Mecánico Automotriz, Universidad Internacional SEK, Quito, Ecuador.
- IV. Magister en Sistemas Automotrices Msc, Ingeniero en Mecánica Automotriz, Universidad Tecnológica Indoamérica, Ambato, Ecuador.



## Resumen

Los elementos fundidos de gran precisión hacen que sea necesario tener un conocimiento más profundo de las variables y fenómenos que intervienen en las diferentes etapas del proceso, lo cual hace inevitable tener reproceso, desperdicios y por lo tanto mayores costos. Se utilizó en esta investigación las técnicas como dinámica de fluidos computacionales (CFD), que permite analizar el proceso de llenado y el comportamiento de la colada en el interior del molde para evaluar por ejemplo la cantidad de material, rangos de temperatura, módulo de enfriamiento, entrada de aire y varios tiempos que aportan la optimización de la colada en el molde. Como resultado se obtuvo la perspectiva de la fabricación de las pesas de plomo que fueron simuladas para un molde permanente, la identificación de distintas etapas del proceso de la colada en el interior del molde, y poderse determinar la ubicación, dimensiones más adecuadas para las pesas estudiadas.

**Palabras clave:** Inyección electrónica de combustible; análisis de fallas y efectos; mantenimiento; mejora de calidad; vehículo.

## Abstract

The high precision cast elements make it necessary to have a deeper knowledge of the variables and phenomena that intervene in the different stages of the process, which makes reprocessing, waste and therefore higher costs unavoidable. Techniques such as computational fluid dynamics (CFD) were used in this research, which allows to analyze the filling process and the behavior of the casting inside the mold to evaluate, for example, the amount of material, temperature ranges, cooling modulus. , air inlet and various times that contribute to the optimization of the casting in the mold. As a result, the perspective of the manufacture of the lead weights that were simulated for a permanent mold was obtained, the identification of different stages of the casting process inside the mold, and being able to determine the location and the most suitable dimensions for the weights. studied.

**Keywords:** Electronic fuel injection; failure and effects analysis; maintenance; quality improvement; vehicle.

## Resumo

Os elementos fundidos de alta precisão tornam necessário um conhecimento mais aprofundado das variáveis e fenômenos que intervêm nas diferentes fases do processo, o que torna o reprocessamento, desperdício e conseqüentemente custos mais elevados. Técnicas como a dinâmica computacional de fluidos (CFD) foram utilizadas nesta pesquisa, que permite analisar o processo de enchimento e o comportamento da fundição dentro do molde para avaliar, por exemplo, a quantidade de material, faixas de temperatura, módulo de resfriamento., Entrada de ar e vários momentos que contribuem para a otimização da fundição no molde. Como resultado, obteve-se a perspectiva da fabricação dos pesos de chumbo que foram simulados para um molde permanente, a identificação das diferentes etapas do processo de fundição no interior do molde, e podendo determinar a localização, as dimensões mais adequadas para o pesos estudados.

**Palavras chave:** Injeção eletrônica de combustível; análise de falhas e efeitos; manutenção; melhoria da qualidade; veículo.

## Introducción

En varios sectores industriales como es el automotriz, 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 (Cueva, Lucero, Guzmán, Rocha, y Espinoza, 2018). 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 transferencia de calor que están estrechamente relacionados con el flujo de metal que llena las cavidades del molde (Rodríguez Moliner, Parada Expósito, & Ordóñez Hernández, 2010).

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. García Chacón (2013), menciona que el 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. Además 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).

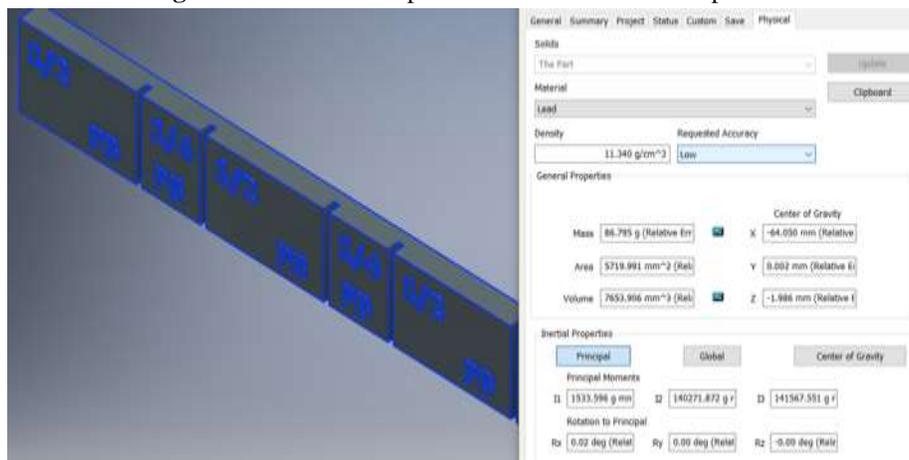
El proceso de fundición lleva consigo varios problemas o defectos, Gondkar & Inamdar (2014) dice que, la simulación computacional es una herramienta poderosa que permite mejorar la calidad mediante la predicción, ubicación y eliminación de los defectos, aumentar el rendimiento reduciendo el volumen de 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).

En este trabajo se analizara la simulación de la fundición de las tiras de pesas, considerando la necesidad 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 (Servicio Nacional de Aduana del Ecuador, 2018), dividido para el peso de las tiras que es de 84 gramos.

## Metodología

La investigación se propone en el dimensionamiento del modelo de distribución de colada, donde se toma la geometría y las dimensiones del elemento que se simulara 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 esto 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. Además, una vez obtenido la geometría del 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. Estas en el mercado se venden en tiras de 8 unidades (ver figura 1), las que son más utilizadas en el mercado nacional para vehículos livianos, son de un peso de  $\frac{1}{4}$ , y  $\frac{1}{2}$  de onza o su equivalente aproximado de 7 y 14 gramos respectivamente.

Figura 1: Variables Propiedades físicas de la tira de pesas



## Material aplicado a las pesas

Según el análisis químico el elemento aleante con mayor presencia es el plomo con 99%, se observa en la tabla 1, el análisis de composición química de las muestras obtenidas en 15 negocios locales dedicados al balanceo de neumáticos, revelan que son fabricadas a base de plomo, por lo que este será el material elegido para la colada.

**Tabla 1:** Elementos aleantes de las probetas

Muestra		Elementos					
		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

### Cálculos sistema de colada

Los cálculos de 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, de acuerdo a la tabla 2 se especifica las ecuaciones de trabajo para dimensionamiento. 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 transcurre hasta que el material comienza a formar estructuras cristalinas completamente sólidas desprendiendo la suficiente cantidad de calor para ello.

**Tabla 2:** Ecuaciones aplicadas al sistema de alimentación de la fundición

Variabes	Ecuaciones	Cita
$V_{maz}$ 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	$V_{maz} = k \cdot c \cdot V_{pieza}$	Navas, Batista, & Suchkov (1990)
$V_{maz}$ es el volumen, $A_{maz}$ el área, $D_{maz}$ el diámetro y $h_{maz}$ la altura de la mazarota respectivamente.	$A_{maz} = \pi \cdot D_{maz} \cdot \left( h_{maz} + \frac{1}{2} D_{maz} \right)$	Navas et al. (1990)
Módulo de enfriamiento	$M_{enfriamiento} = \frac{V_{pieza}}{A_{pieza}}$	Navas et al. (1990)
Velocidad de colada; Ley de Torricelli	$v_2 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_2}$	(García Chacón, 2013)

diámetro de la base del bebedero, se despeja la ecuación del número de Reynolds	$D_2 = \frac{Re \cdot \eta}{v_2 \cdot \rho}$	(García Chacón, 2013)
El diámetro inferior mínimo que debe tener el cono del bebedero	$D_1 = D_2 \cdot \sqrt[4]{\frac{h_2}{h_1}}$	(García Chacón, 2013)
La taza de cola de forma cónica	$D_{taza\_s} = 1.3 \cdot D_{taza\_i}$	Boatswain Medina (2018)
cálculo del canal de ataque	$A_{c.colada} = \left( \frac{B_{mayor} + b_{menor}}{2} \right) \cdot h$	Boatswain Medina (2018)
tiempo de llenado	$t_{lt} = \frac{V}{A \cdot v}$	Garcés García (2016)
el tiempo de solidificación	$t_{st} = B \left( \frac{V}{A} \right)^n$	(Contreras Sánchez, Tapia Martínez, Vargas Moreno, & Villegas Valdés, 2008)

De los valores de diámetros calculados para efectos de la simulación se trabaja con 8.5 mm, quedando dimensionada la mazarota como se muestra en la figura 2. 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. Los elementos del sistema de colada quedaron dimensionados y se resumen en la figura 2, 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.

**Figura 2:** Dimensiones sistemas de alimentación de forma esquemática

Bebedero		Taza de colada	
$D_{beb\_i}$ (mm)	3	$D_{taza\_i}$ (mm)	10
$D_{beb\_s}$ (mm)	4	$D_{taza\_s}$ (mm)	13
$h_{beb}$ (mm)	20	$h_{taza}$ (mm)	10
$V_{beb}$ (mm <sup>3</sup> )	193.732	$V_{taza}$ (mm <sup>3</sup> )	1044.580
$A_{beb}$ (mm <sup>2</sup> )	239.615	$A_{taza}$ (mm <sup>2</sup> )	576.597

Mazarota		Pozo de colada	
$D_{maz}$ (mm)	8.5	$D_{pozo}$ (mm)	7
$h_{maz}$ (mm)	17	$h_{pozo}$ (mm)	10
$V_{maz}$ (mm <sup>3</sup> )	964.665	$V_{pozo}$ (mm <sup>3</sup> )	384.85
$A_{maz}$ (mm <sup>2</sup> )	567.450	$A_{pozo}$ (mm <sup>2</sup> )	296.881

	Canales	
	Colada	Ataque
$B_{mayor}$ (mm)	5	3
$b_{menor}$ (mm)	2.5	1.5
$h$ (mm)	5	3
$V$ (mm <sup>3</sup> )	767.813	337.838

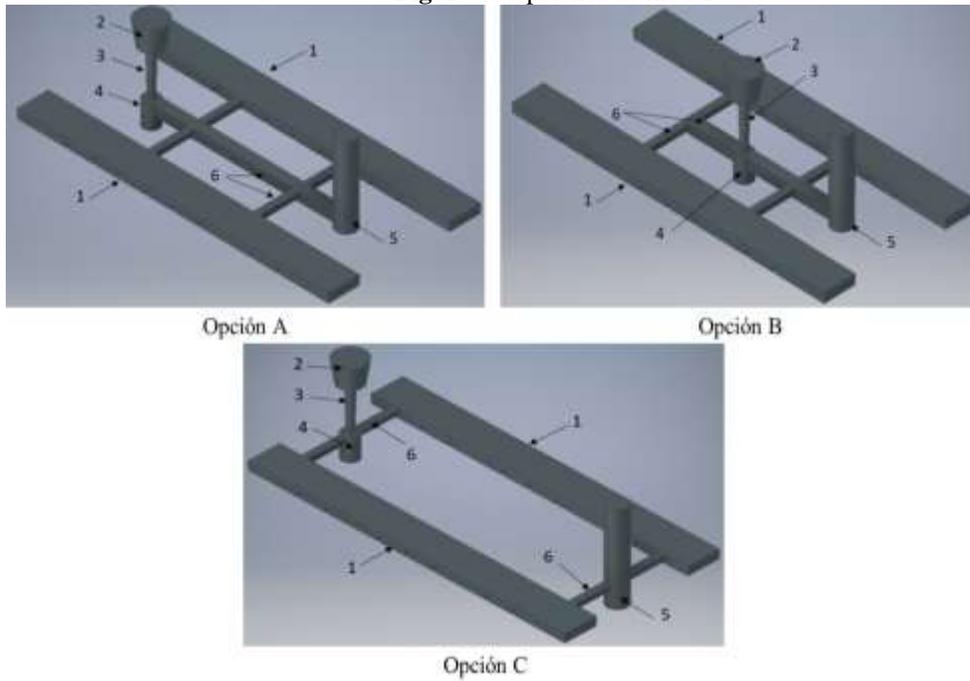
### **Simulación del sistema de la colada CFD**

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, 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 una en la geometría del 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 3 (Bazante del Pozo, 2019), 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 que se simulará. 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.

**Figura 3:** Opciones de modelo



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 3, se muestra el tamaño de malla que se utilizó para cada opción, y para cada simulación.

**Tabla 3:** Tamaño de malla de los modelos simulados

<b>Modelo</b>		
<b>Simulación número</b>		<b>OPCIÓN A</b>
Tamaño de Malla (mm)	Colada	1
	Caja	3
Número de Elementos	2D	49654
	3D	1101577
<b>Modelo</b>		
<b>Simulación número</b>		<b>OPCIÓN B</b>
Tamaño de Malla (mm)	Colada	1

	Caja	3
Número de Elementos	2D	48744
	3D	1069010
<b>Modelo</b>		
<b>Simulación número</b>		<b>OPCIÓN C</b>
Tamaño de Malla (mm)	Colada	1
	Caja	3
Número de Elementos	2D	46186
	3D	868829

Una de las condiciones de frontera que se necesita para poder simular es un coeficiente de transferencia de calor entre el molde y el material a colarse, esto debido a que se encuentran en contacto directo como en la tabla 4 (Villarruel-Jaramillo, Rocha-Hoyos, Cedeño, y Martínez-Gómez, 2021), 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 Veleceta, 2014).

**Tabla 4:** Datos de entrada o condiciones de borde para la simulación

<b>Condiciones de frontera</b>	
Gravedad ( $m/s^2$ )	9.81
Coficiente de convección de aire ( $w/m^2.K$ )	10
Temperatura del aire ( $^{\circ}C$ )	20
Caudal másico de colada ( $kg/s$ )	0.0614
Presión atmosférica ( $N/m^2$ )	102700
Temperatura del molde ( $^{\circ}C$ )	300
Temperatura del colada ( $^{\circ}C$ )	700
Coficiente de transferencia $h(w/m^2.K)$	1800

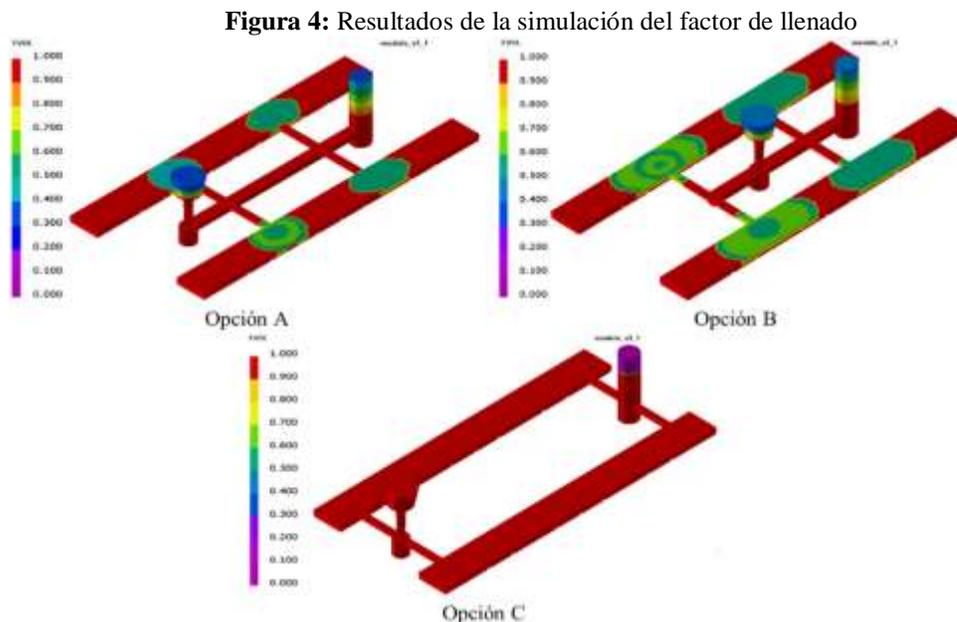
### ***Post-procesamiento***

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.

## Resultados y discusión 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 4 y el mallado más fino de 1mm para la colada y 3mm para el molde.

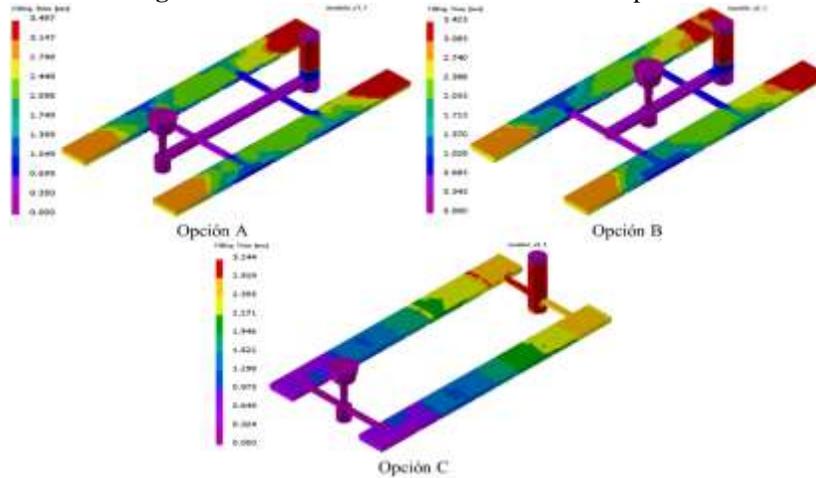
Estos resultados en la figura 4, son mostrados cuando el molde tiene un 100% de llenado e indican la confianza de llenado del molde, siendo las partes de color rojo las que se llenan primero y el morado indica las partes que son llenadas al final, esto debido a la forma como ingresa el fluido. Las imágenes 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.



El resultado de la figura 5 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

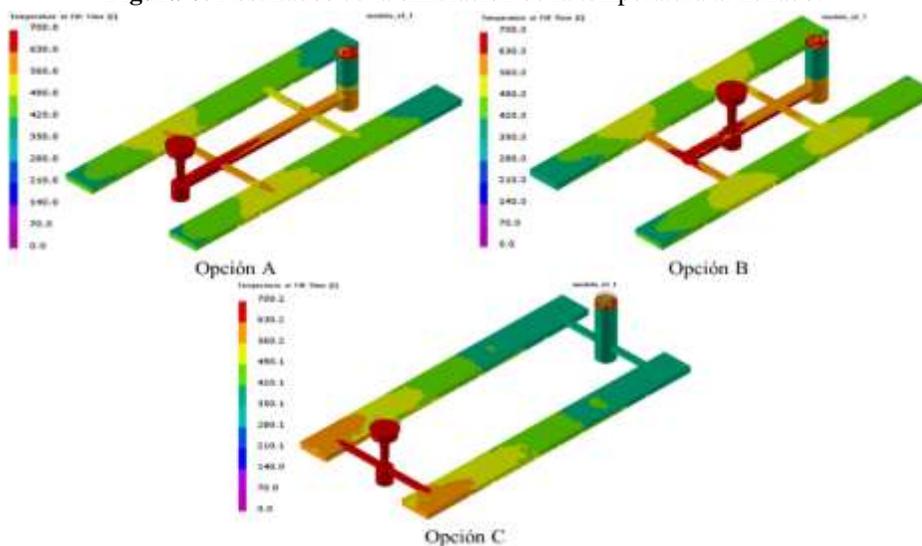
mazarota indica que es la última en llenarse lo cual es congruente con la lógica de llenado que debe tener el molde.

**Figura 5:** Resultados de la simulación del tiempo de llenado



Como se ve la figura 6 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.

**Figura 6:** Resultados de la simulación de la temperatura al llenado.



El resultado de la figura 7, 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.

Figura 7: Resultados de la simulación del tiempo de solidificación.

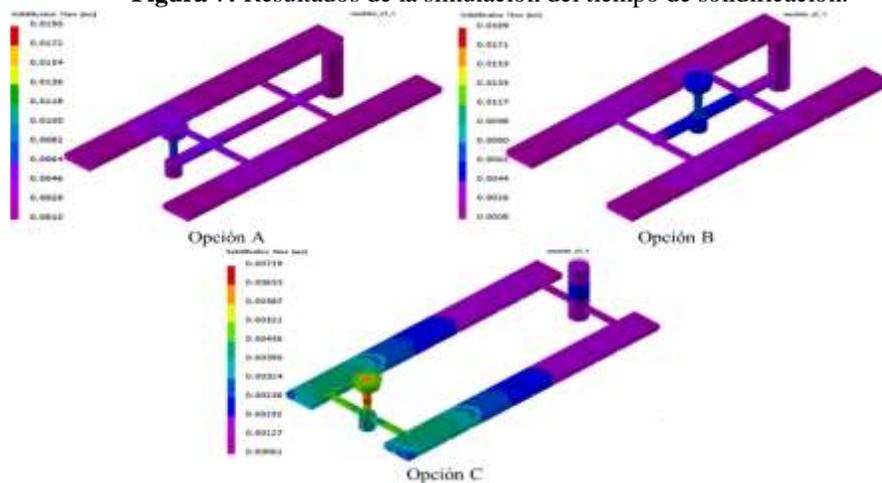
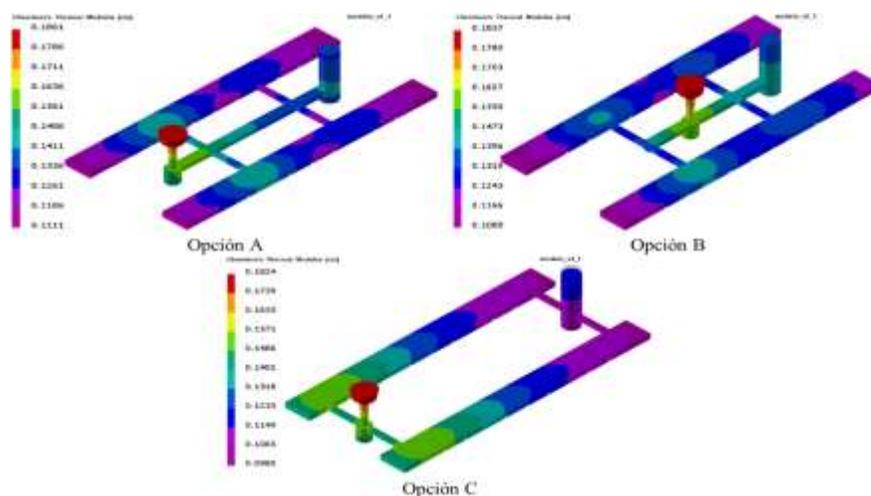
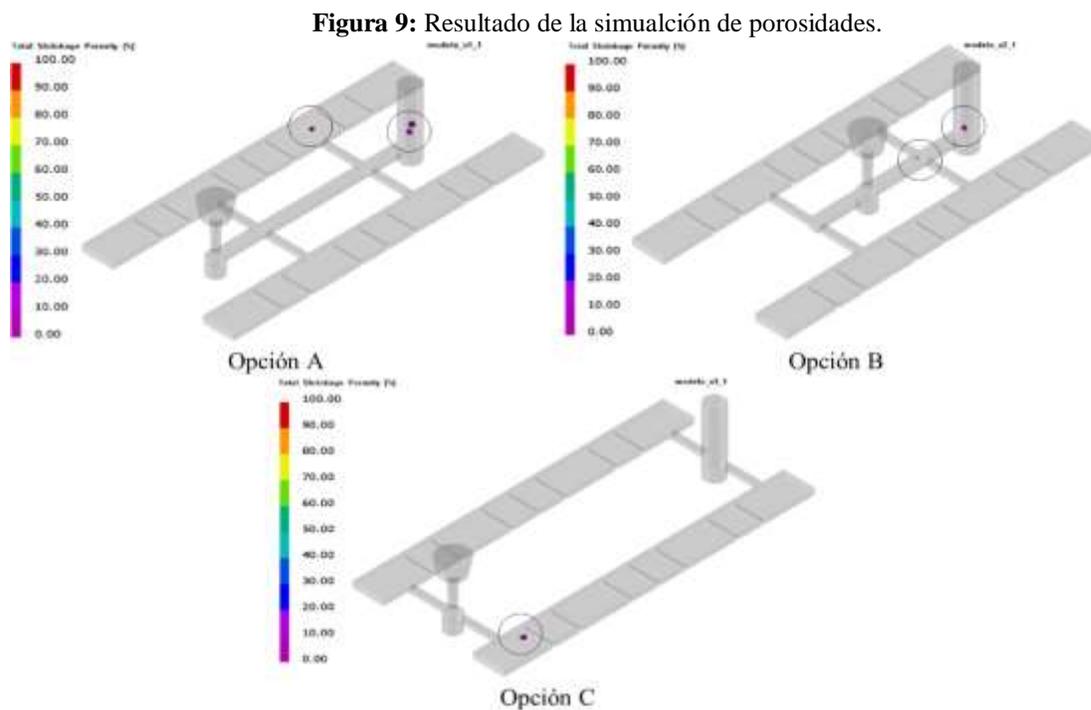


Figura 8: Resultados de la simulación del módulo de enfriamiento.



El módulo de enfriamiento mostrado en la figura 8, 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. 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.

Como se puede observar en la figura 9, 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.



La selección del modelo se evaluará los resultados de las simulaciones, para determinar el modelo ideal, que asegurará un buen comportamiento de la colada y un producto final deseado. En la tabla

5, 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 será el elegido para el diseño del molde. Según 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. Además, según Nimbulkar & Dalu (2016), concuerda con 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.

Se puede mencionar que 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 opción C es de 3.24 segundos, lo cual hace esta opción la adecuada, sin afectar el llenado. También 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 garantizando la fluidez del material.

**Tabla 5:** Comparación de opciones de modelo

	<b>Opción A</b>	<b>Opción B</b>	<b>Opción C</b>	<b>Opción Deseable</b>
Factor de llenado	80	60	90	%=100
Tiempo de llenado	3.497	3.425	3.244	Menor
Temperatura de llenado	330	342	354	Menor a 350 °C
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

El resultado de la simulación para el tiempo de solidificación, 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 y eso muestra ventaja en la manufactura.

### **Conclusiones y recomendaciones**

Los beneficios de la simulación en los procesos son de fundamental importancia para la productividad y eficiencia del mismo. De los resultados obtenidos con el software especializado en fundición, podemos mencionar que predice el comportamiento de la colada en el interior del molde, y poderse determinar la ubicación, dimensiones más adecuadas de los sistemas de colada para las pesas estudiadas.

Además, se logró determinar un modelo mediante la comparación de los resultados obtenidos de las simulaciones de las tres opciones, de las cuales, se eligió que la opción C es la de mejor prestaciones para nuestro caso de estudio. Donde se obtuvo la masa adecuada para las pesas de balanceo de  $\frac{1}{4}$  y  $\frac{1}{2}$  onza o su equivalencia aproximada de 7 y 14 gramos, dando como resultado un error menor al 1%.

Una vez determinado el modelo, se podrá diseñarse y fabricarse un molde prototipo, en cual se pretender realizar las pruebas de fundición reales que ayudaron a corroborar los resultados obtenidos, que este caso no es parte del estudio

### **Referencias**

1. Abate, G., Pérez, D., Pouton, J., Martínez Krahmer, D., & Brignone, J. (2015). ANÁLISIS TEÓRICO DE UNA PIEZA DE FUNDICIÓN NODULAR POR EL MÉTODO DE LOS MÓDULOS GEOMÉTRICOS Y SIMULACIÓN NUMÉRICA.
2. Bazante del Pozo, P. E. (2019). Diseño de un molde permanente de fundición por gravedad para la fabricación de pesas adhesivas de plomo utilizadas en balanceo de neumáticos.
3. Boatswain Medina, E. J. (2018). Sistema de colada. Retrieved from [https://issuu.com/efrainjosueboatswainmedina/docs/f\\_cap\\_02-06\\_sistema\\_de\\_colada\\_\\_1\\_](https://issuu.com/efrainjosueboatswainmedina/docs/f_cap_02-06_sistema_de_colada__1_)

4. 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>
5. 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
6. Cueva, E., Lucero, J., Guzmán, A., Rocha, J., & Espinoza, L. (2018). Revisión del estado del arte de baterías para aplicaciones automotrices. *Enfoque UTE*, 9(1), 166-176.
7. Elbel, T., & Havlicek, F. (2014). *Theory of Foundry Processes*.
8. 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>
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Narváez Reyes, J. A., Chamba Román, M. Á., & Quito Veleceta, M. F. (2014). Estudio para la producción de bloques de motor estacionario de combustión interna de 250cc mediante molde permanente. Cuenca.
14. Navas, E., Batista, A., & Suchkov, A. N. (1990). *Métodos de Cálculo en Fundición*.

15. 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>
16. 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>
17. 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).
18. 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>
19. Rodríguez Moliner, T., Parada Expósito, A., & Ordóñez Hernández, U. (2010). Predicción de defectos en piezas fundidas mediante el uso de la simulación. *Revista Cubana de Ingeniería*, 1(2), 55–60.
20. Servicio Nacional de Aduana del Ecuador. (2018). Importaciones no petroleras.
21. Vázquez, V. H. (n.d.). El rol de la simulación de procesos en el diseño de moldes y troqueles.
22. Villarruel-Jaramillo, A., Rocha-Hoyos, J. C., Cedeño, E. A. L., & Martínez-Gómez, J. (2021). Multi-criteria decision making for lower bumper stiffener material change in a sports utility vehicle with CAE simulation. *International Journal of Mathematics in Operational Research*, 18(2), 187-209.

© 2020 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons

Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)