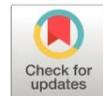


Optimización del proceso de fundición mediante el proceso de ingeniería inversa y aditiva de un cabezote de un motor de bajo cilindraje

*Optimization of the casting process through the reverse and additive
engineering process of a small displacement engine head*

- ¹ Edgar Fabián Sánchez Carrión  <http://orcid.org/0000-0002-8027-2799>
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Facultad de Mecánica, Riobamba,
Ecuador,
esanchez_c@esPOCH.edu.ec
- ² Edison Patricio Abarca Pérez  <http://orcid.org/0000-0001-7041-4805>
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Facultad de Mecánica, Riobamba,
Ecuador,
edison.abarca@esPOCH.edu.ec
- ³ Elvis Enrique Arguello  <http://orcid.org/0000-0001-5083-1011>
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Facultad de Mecánica, Riobamba,
Ecuador.
earguello@esPOCH.edu.ec



Artículo de Investigación Científica y Tecnológica

Enviado: 16/05/2022

Revisado: 27/06/2022

Aceptado: 01/07/2022

Publicado: 26/07/2022

DOI: <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v5i3.1.2249>

Cítese: Sánchez Carrión, E. F., Abarca Pérez, E. P., & Arguello, E. E. (2022). Optimización del proceso de fundición mediante el proceso de ingeniería inversa y aditiva de un cabezote de un motor de bajo cilindraje. *ConcienciaDigital*, 5(3.1), 236-253.
<https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v5i3.1.2249>



CONCIENCIA DIGITAL, es una revista multidisciplinar, **trimestral**, que se publicará en soporte electrónico tiene como **misión** contribuir a la formación de profesionales competentes con visión humanística y crítica que sean capaces de exponer sus resultados investigativos y científicos en la misma medida que se promueva mediante su intervención cambios positivos en la sociedad. <https://concienciadigital.org>
La revista es editada por la Editorial Ciencia Digital (Editorial de prestigio registrada en la Cámara Ecuatoriana de Libro con No de Afiliación 663) www.celibro.org.ec

Esta revista está protegida bajo una licencia Creative Commons Attribution Non Commercial No Derivatives 4.0 International. Copia de la licencia: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Palabras claves:

fundición de aluminio, CAD-CAM, ingeniería inversa, aleación, moldes en arena.

Keywords:

Aluminum casting, CAD-CAM, reverse engineering, alloying, sand casting

Resumen

Introducción: En la industria manufactura de piezas y partes en la industria automotriz se ha visto escasamente desarrollada en nuestro país, es por ello por lo que se ha creado políticas gubernamentales como el acuerdo ministerial N 14 264, el cual busca ampliar la gama de productos de fabricación nacional para la industria automotriz. **Objetivos:** El objetivo se enfoca en la obtención del modelo y los parámetros del proceso de manufactura para obtener un modelo mediante la ingeniería inversa; para conseguir un prototipo de alta calidad y económicamente viable. **Metodología:** El proceso de manufactura elegido es la fundición en arena el cual es un proceso que nos permite obtener figuras complejas con alta calidad y coste asequible, para ello es necesario realizar el elemento, el procedimiento aplicado es un proceso de escaneo, que el resultado es una nube de punto, para luego transformar a una malla y obtener un elemento sólido obteniendo las características iniciales del proceso. **Resultados:** Con las características del proceso de moldeo, mediante iteraciones teniendo un error de 0.39 % para un caudal de $0.17285433 \frac{kg}{s}$; Y el canal del bebedero tiene una forma tronco cónica teniendo diámetro superior de bebedero de 16,73 mm, y un diámetro inferior del bebedero de 10.21 mm. **Conclusiones:** Utilizamos manufactura aditiva para el proceso de fundición fue una vez obtenido los valores antes descritos para que la fundición sea óptima, obteniendo un cálculo económico para que nuestro proceso sea competitivo en relación calidad vs costo.

Abstract

Introduction: In the manufacturing industry of parts and parts in the automotive industry, it has been poorly developed in our country, which is why government policies have been created such as the ministerial agreement N 14 264, which seeks to expand the range of manufacturing products. national for the automotive industry. **Objectives:** The objective focuses on obtaining the model and the parameters of the manufacturing process to obtain a model through reverse engineering; to achieve a high-quality and economically viable prototype. **Methodology:** The chosen manufacturing process is sand casting, which is a process that allows us to obtain complex figures with high quality and affordable cost, for this it is necessary to make the element, the procedure

applied is a scanning process, which the result is a point cloud, to later transform to a mesh and obtain a solid element obtaining the initial characteristics of the process. **Results:** With the characteristics of the molding process, through iterations, having an error of 0.39% for a flow rate of 0.17285433 kg/s; And the sprue channel has a frustoconical shape having an upper sprue diameter of 16.73 mm, and a lower sprue diameter of 10.21 mm. **Conclusions:** We use additive manufacturing for the casting process once the values described above were obtained so that the casting is optimal, obtaining an economic calculation so that our process is competitive in relation to quality vs. cost.

Introducción

En el campo de la industria de la manufactura de piezas y partes para el campo automotriz se ha visto escasamente desarrollada en nuestro país, es por ello por lo que los gobiernos han creado políticas para que se pueda desarrollar la industria automotriz nacional mediante el acuerdo ministerial N 14 264, el cual busca ampliar la gama de productos de fabricación nacional para la industria automotriz.

Dentro del mercado automotriz ecuatoriano se ha visto un incremento de las importaciones de motos en el sector llegando a su pico más alto en el mes de mayo del 2021 con un total de 7824 unidades importadas, cifras reportadas por AEADE en su boletín del mes de mayo del 2022.

El desarrollo de este trabajo presenta un modelo de un elemento automotriz como es el cabezote de un motor de 100 cc. que dentro de la industria nacional es un producto que es ampliamente distribuido como repuestos y el alcance es presentar los parámetros de desarrollo de este producto mediante la fundición de arena para obtener un elemento funcional de producción nacional y que sea viable su manufactura, para así contribuir a la industria y al cambio de matriz productiva, teniendo en consideración la optimización de las características del material y su porcentaje de elementos aleantes a la matriz principal de aluminio (Gumbmann et al., 2017). Tanto las características de la fundición, así como los elementos complementarios para obtener un molde de arena, deben satisfacer las propiedades necesarias para el elemento fundido (Sadarang & Kumar, 2021). Así mismo este trabajo se enfoca en el diseño del elemento mediante ingeniería inversa mediante escaneo 3D y fotogrametría del elemento ya indicado

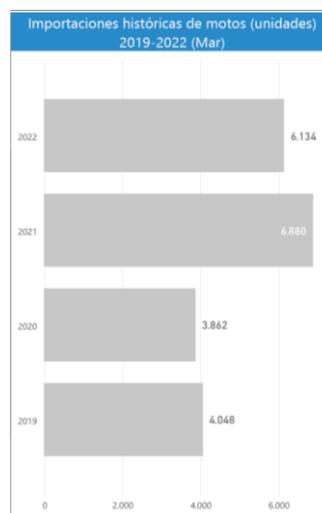
La fundición como proceso de manufactura es necesaria altos consumos de energía por lo cual para que la fundición de estos elementos sea viable económicamente es necesario tener en cuenta la eficiencia energética del proceso (Haraldsson & Johansson, 2018). Tomando en consideración debemos enfocarnos a que este proceso sea amigable con el medio ambiente, es por ellos que la manufactura aditiva nos ayuda a optimizar procesos y ahorrar energía en el proceso de la fundición (Sivarupan et al., 2019).

La investigación también enfoca el diseño y los parámetros del proceso de manufactura del cabezote de un motor de 100 cc. mono cilíndrico mediante la utilización de la ingeniería inversa y un método propio de fundición, ya que, en Ecuador no se cuenta con procesos de manufactura de piezas y partes automotrices de un motor de combustión interna tanto móviles como fijas, por tal razón, por ellos se estudia las variables óptimas del proceso manufactura de un cabezote mediante métodos de desagregación tecnológica. El que el proceso de manufactura seleccionado que va a ser la fundición por arena, dentro de los objetivos es reutilizar la arena de moldeo garantizando las propiedades de la arena y la preocupación ambiental (Venkata et al., 2021).

En la industria nacional el gobierno ecuatoriano en su intento por el cambio de la matriz productiva y para desarrollar la industria de manufactura automotriz de piezas y partes, establece la normativa gubernamental donde los vehículos motorizados ensamblados en el territorio nacional deben contener el 19% de autopartes fabricadas en el Ecuador, generando diferentes estrategias para reducir las importaciones en especial en el sector industrial automotriz.

Figura 1

Importaciones históricas de motos



Fuente: Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador (AEADE, 2020)

En la figura 1 podemos observar que en lo que van del año 2022 ya tenemos 6134 unidades de motocicletas importadas a nuestro país, según datos de la AEADE; podemos observar que es una industria en incremento a nivel nacional, a la cual según lo planteado anteriormente es un nicho de mercado en alza en nuestro país y es por ello por lo que es objeto de nuestro estudio. Cabe recalcar que la mayoría de los repuestos de esta industria vienen importados de otros países, y es por ello por lo que el objeto de estudio es los parámetros del proceso de manufactura de este.

Metodología

En los procesos de manufactura dentro de la industria automotriz, el proceso de fundición es muy ampliamente difundido para construir diversos tipos de maquinaria, un amplio campo es la construcción de piezas y partes automotrices que para ello es necesario un conocimiento técnico, CAD, del proceso de manufactura y la mecánica de fluidos.

Dentro del modelo que nos va a servir para la fundición es necesario tener claro las tolerancias, el proceso de moldeo, fundición y las variables de la fundición entre las cuales destaca los diferentes tipos de moldes para obtener una alta eficiencia, calidad y un coste competitivo para el mercado nacional. Teniendo en cuenta que la fabricación por fundición es llevar al material de relleno a una alta temperatura para introducir en un molde con la forma previa del objeto final que necesitamos, desde este punto el material se enfría produciendo una solidificación, un dato importante es que influyen entre otros parámetros en que el elemento final sea de fácil maquinabilidad (Dong et al., 2009). Los moldes más tradicionales son los de arena ya que por su costo y la complejidad de los elementos que se puede realizar es el más difundido y es el que se va a necesitar para los procesos aquí descritos. También es necesario considerar la cantidad de energía que está presente en la fundición que es un valor importante para la generación del costo de producción y así optimizar dicha energía (Carabalí et al., 2018).

Para obtener el elemento se utiliza procesos de escaneo del elemento original para así tener la pieza con las medidas correctas para la fundición, para ello utilizamos la ingeniería inversa: Se interpreta a la ingeniería inversa como la técnica de copiado de geometrías en diferentes aplicaciones artísticas, prototipado de elementos mecánicos, etc. Sin embargo, la ingeniería inversa es el proceso mediante el cual, el diseñador parte de la existencia de un sistema, elemento, o aplicación de ingeniería en cuestión para realizar su reproducción e innovación de forma eficiente y rápida, en especial cuando se trata de geometrías complejas (Monroy et al., 2013).

Una característica adicional es integrar la ingeniería aditiva al proceso de fundición para así optimizar el proceso ante su par tradicional para garantizar procesos de alta calidad (Hawaladar & Zhang, 2018). Por lo que es necesario obtener el elemento con las medidas reales para luego tener al modelo pasarlo a un programa para poder imprimirlo en 3D con

un filamento que nos garantice las medidas y poca deformación del elemento a ser fundido, para que este sirva de modelo para nuestro molde de arena, este proceso nos ayuda a optimizar el molde con elemento con el que conste toda la estructura interna y externa de nuestro elemento a fundir (Almaghariz et al., 2016). Una vez alcanzada las medidas necesarias de nuestros parámetros de molde se va a realizar el mismo procedimiento teniendo en cuenta las consideraciones detalladas para que el procedimiento sea compatible con la impresión en 3D (Snelling et al., 2019).

Resultados

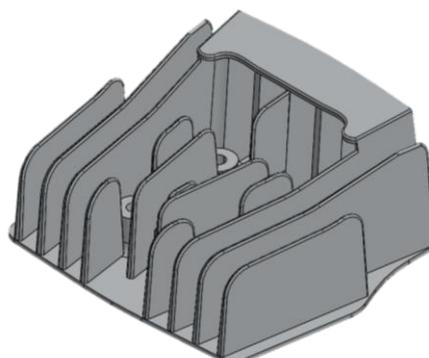
El elemento que se va a analizar en este trabajo es un block de motocicleta, el cual se utiliza la parte CAD para modelar dicho elemento y así encontrar las medidas iniciales para comenzar nuestro análisis del este proceso de fundición, calculando todos los parámetros necesarios que se van a detallar a continuación.

El material que vamos a utilizar en el presente trabajo será una Aleación de Aluminio 1060 que presenta diversos beneficios para el elemento, así como también vamos a utilizar una arena silíceá para el molde, que vamos a poder calcular todos los parámetros para nuestro trabajo.

Para el siguiente trabajo tenemos un cabezote del motor de 100 cc, para los parámetros geométricos del motor tenemos los siguientes datos que se presentan a continuación:

Figura 2

Elemento obtenido medias fotogrametría



$$h_{\text{bedero}} = 0,2 \text{ m}$$

$$T_{\text{amb}} = 20^{\circ} + 273^{\circ}\text{k} = 293^{\circ}\text{K}$$

$$\text{Área Superficial} = 0.2020949 \text{ cm}^2$$

$$M_p = 0.9685 \text{ kg}$$

$$\text{Volumen} = 3.5873083 \times 10^{-4} m^3$$

La fuerza de compresión, la permeabilidad del molde y la dureza son las tres importantes propiedades del molde de arena verde, donde estas propiedades están directamente influenciadas por el tipo de arena que se va a utilizar en la fundición (Nandagopal & Sivakumar, 2022). Es por ello por lo que necesitamos describir los datos del material a fundir tenemos en la siguiente tabla:

Tabla 1

Datos de material y arena a fundir

Datos material aluminio	Datos molde – Arena silícea
$TM = 933^{\circ}K$	$k = 0,52 \frac{w}{m^{\circ}k}$
$Hf = 3,91 \times 10^5 \frac{J}{kg}$	$\rho = 1600 \frac{kg}{m^3}$
$Mp = 198,42 \text{ g}$	$C\rho = 1170 \frac{J}{kg^{\circ}k}$
$\rho = 2400 \frac{kg}{m^3}$	
$C\rho = 1050 \frac{J}{kg^{\circ}K}$	

En primera instancia necesitamos obtener la constante del molde vamos a utilizar en el proceso y el cual depende de la arena que vamos a utilizar:

$$Cm = \frac{\pi}{4} \left(\frac{Dens_{mat} * H}{T_{mpf} - T_o} \right)^2 * \frac{1}{K * Dens_{molde} * C\rho_{molde}}$$

$$Cm = \frac{\pi}{4} \left(\frac{2400 \frac{kg}{m^3} * 3,91 \times 10^5 \frac{J}{kg}}{933^{\circ}K - 293^{\circ}K} \right)^2 * \frac{1}{0,52 \frac{w}{m^{\circ}k} * 1600 \frac{kg}{m^3} * 1170 \frac{J}{kg^{\circ}k}}$$

$$Cm = 2195339.99 \left(\frac{kg}{m^3} * \frac{J}{kg} \right)^2 * \frac{1}{\frac{w}{m^{\circ}k} * \frac{kg}{m^3} * \frac{J}{kg^{\circ}k}}$$

$$Cm = 2195339.99 \frac{J}{W * m^2} * \frac{W}{\frac{J}{s}}$$

$$Cm = 2195339.99 \frac{s}{m^2}$$

Con la información geométrica del elemento a fundir calculamos el tiempo en que comienza a solidificarse nuestro elemento teniendo en cuenta la regla Chvorinov que relaciona la constante del molde, el volumen y área superficial.

$$t_{TM} = Cm \left(\frac{V}{A} \right)^2$$

$$t_{TM} = 2195339.99 \frac{s}{m^2} \left(\frac{3.5873083 \times 10^{-4}}{0.2020949} \right)^2$$

$$t_{TM} = 6.917 \text{ s}$$

Para poder calcular el caudal es necesario determinar la masa total del sistema es necesario obtener la masa del elemento a fundir, pero también tener la masa del sistema de fundición, es por ello por lo que es necesario en este punto asumir a esta masa y tomaremos el valor de 1 Kg.

$$Q = \frac{m_{sd} + m_p}{t_{TM}}$$

$$Q = \frac{1kg + 0.9685 \text{ kg}}{6.917s}$$

$$Q = 0,285 \frac{kg}{s}$$

La altura del bebedero que consideramos es 200 mm y el flujo másico obtenido anteriormente obtenemos los siguientes datos complementarios al sistema de distribución del fundido.

$$Ap = 700 \text{ mm}^2$$

$$\text{Área canal colada} = 350 \text{ mm}^2$$

$$\text{Área Superior bebedero} = 300 \text{ mm}^2$$

$$\text{Área inferior bebedero} = 118 \text{ mm}^2$$

Con estos valores podemos obtener las dimensiones para el bebedero el canal y el área de la puerta para el fundido como se presenta a continuación.

El área superior del elemento:

$$D1 = \sqrt{\frac{4 * A_{sup}}{\pi}}$$

$$D1 = \sqrt{\frac{4 * 300mm^2}{\pi}}$$

$$D1 = 19.54 \text{ mm}$$

El área inferior:

$$D2 = \sqrt{\frac{4 * A_{inf}}{\pi}}$$

$$D2 = \sqrt{\frac{4 * 118}{\pi}}$$

$$D2 = 12.25 \text{ mm.}$$

Con lo que vemos que el diámetro superior es más grande que el diámetro inferior con lo que nos aseguramos de que la forma sea troncocónica para evitar la entrada de burbujas de aire al canal de distribución. Con estos datos obtener el volumen del bebedero.

$$V_{bebe} = \frac{1}{3} x \pi h_{bebe} x \left(\frac{D_1^2}{4} + \frac{D_2^2}{4} + \frac{D_1 * D_2}{4} \right)$$

$$V_{bebe} = \frac{1}{3} \pi x 200mm x \left(\frac{(19,54)^2}{4} + \frac{(12,25)^2}{4} + \frac{19.54 * 12.25}{4} \right)$$

$$V_{bebe} = 40409.925 \text{ mm}^3$$

En el cálculo del ancho del canal lo definimos por:

$$e_{ci} = \sqrt{AC}$$

$$e_{ci} = \sqrt{350mm^2}$$

$$e_{ci} = 18.71 \text{ mm}$$

La longitud del canal lo definimos como un sistema en el que solo vamos a tener una sola entrada de alimentación a nuestro material fundido obteniendo el siguiente valor:

$$L_{cu} = \frac{Lc}{m}$$

$$L_{cu} = \frac{200\text{mm}}{1}$$

$$L_{cu} = 200 \text{ mm}$$

Con los datos obtenidos anteriormente definimos el valor del canal mediante la siguiente ecuación:

$$V_{canal} = AC * L_{cu}$$

$$V_{canal} = 350\text{mm}^2 * 200 \text{ mm}$$

$$V_{canal} = 70\ 000\text{mm}^3$$

Las condiciones geométricas de la base del bebedero la definimos mediante las siguientes ecuaciones:

$$V_{base} = \frac{\pi(2D_2)^2 * 2 * ec}{4}$$

$$V_{base} = \frac{\pi(2(12,25 \text{ mm}))^2 * 2 * 18.71\text{mm}}{4}$$

$$V_{base} = 17660.6229 \text{ mm}^3$$

Con los resultados obtenidos de los valores obtenemos el volumen total del sistema en el que vamos a fundir para comparar con el valor asumido.

$$VT = V_{bebe} * V_{canal} + V_{base}$$

$$VT = 40409.925 \text{ mm}^3 * 70\ 000\text{mm}^3 + 17660.6229 \text{ mm}^3$$

$$VT = 128070,54 \text{ mm}^3 \rightarrow [0.00012807 \text{ m}^3]$$

Con los valores del volumen del sistema procedemos a comparar si la masa asumida se encuentra dentro de los valores.

$$\rho_{SD} = \frac{m_{SD}}{V_{sd}}$$

$$m_{SD} = \rho_{SD} \times V_{sd}$$

$$m_{SD} = 2700 \frac{kg}{m^3} \times 0.00012807 m^3$$

$$m_{SD} = 0.3458 kg$$

Con la masa encontrada calculamos un nuevo caudal:

$$Q = \frac{m_{sd} + m_p}{t_{TM}}$$

$$Q = \frac{0.3458 kg + 0.9685 kg}{6.917s}$$

$$Q = 0,1900 \frac{kg}{s}$$

La masa asumida para este proceso es de 1 kg y dentro de nuestros cálculos tenemos una masa de 0.3458 Kg, el caudal estimado es 0.285 Kg/s y 0.19 Kg/s respectivamente, teniendo un error porcentual del 33.23 %; por lo que con esta nueva masa y caudal vamos a realizar una iteración hasta poder encontrar datos que se ajuste a nuestro sistema de distribución de colada.

Para poder validar la información de nuestros elementos a fundir, fue necesario realizar nuestro procedimiento hasta encontrar un error bajo que en nuestro caso fue de 0.39 %. En el gráfico podemos observar la curva que maneja el error hasta llegar a nuestra medida deseada.

Figura 3

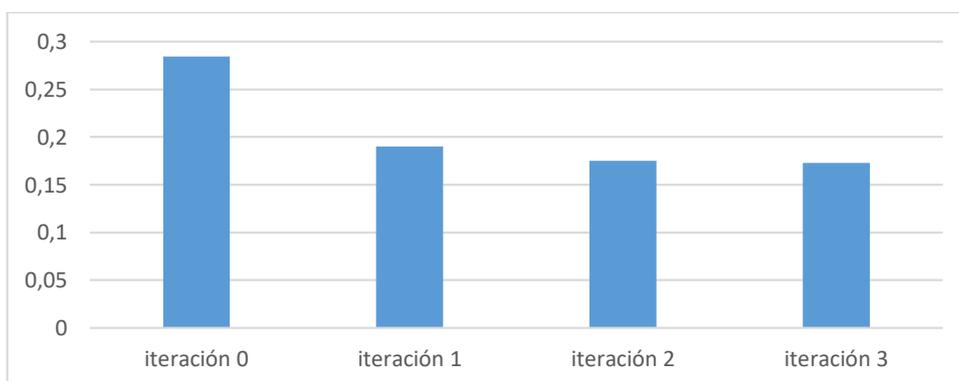
Errores en los parámetros de fundición



Como podemos observar en la figura 3 que los cálculos realizados logran estabilizarse en un caudal de $0.17285433 \frac{kg}{s}$, logrando un error menor del 10% con respecto al dato anterior, con este dato procedemos a trabajar en para encontrar las medidas de los diámetros del canal del bebedero.

Figura 4

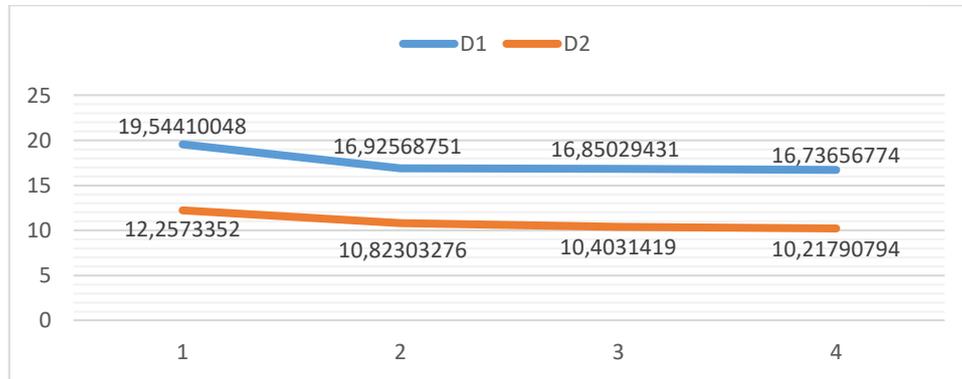
Medida del caudal en cada iteración



Una vez encontrado el valor del caudal corregido procedemos a encontrar tal y como se detalló en los procesos anteriores los diámetros de los bebederos; teniendo después del procedimiento un diámetro superior de bebedero de 16,73 mm, y un diámetro inferior del bebedero de 10.21 mm.

Figura 5

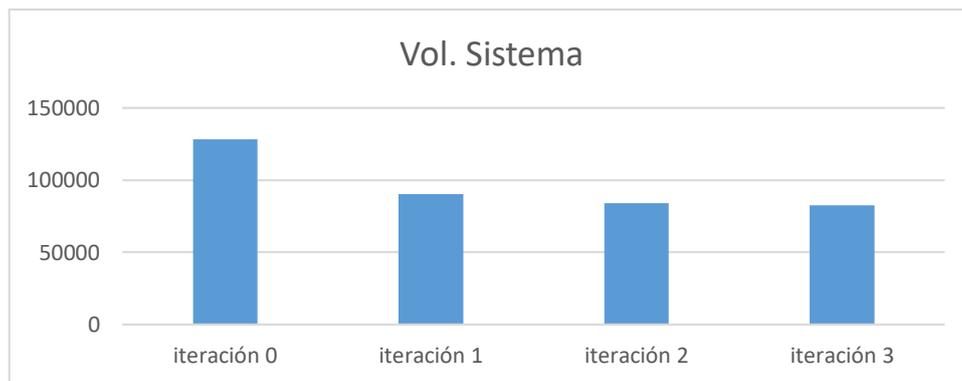
Medida del diámetro superior e inferior del bebedero en cada iteración



Un cálculo necesario es el proceso de encontrar el volumen del sistema y como observamos en la iteración 3 ya obtenemos un valor de 82373.2617 mm³.

Figura 6

Medida de la variación del volumen del sistema en cada iteración



El valor del volumen total del sistema nos permite encontrar la masa necesaria:

$$m_{SD} = 2700 \frac{kg}{m^3} \times (8.2373.2617 \times 10^{-5}) m^3$$

$$m_{SD} = 0.224 kg$$

Obteniendo la masa total necesaria para fundir nuestro elemento:

$$m_t = m_{sd} + m_p$$

$$m_t = 0.224 + 0.9685$$

$$m_t = 1.1925 Kg$$

Con los valores que hemos obtenido procedemos a introducirlo en un software CAD, y nos permite comprobar el volumen que vamos a necesitar para fundir el cabezote.

Figura 7

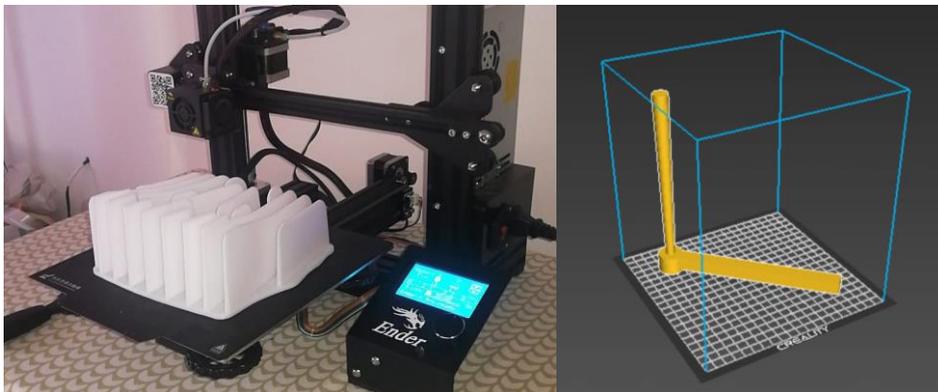
Medida del sistema de distribución



Posteriormente utilizando ingeniería aditiva (impresión 3D) crear nuestros modelos para la fundición. Modelo con el cual nos va a ayudar a moldear la arena, pero es necesario tener en cuenta que la arena de moldeo va a contener aglutinantes y otros parámetros para que nuestro modelo obtenido tenga la solidez adecuada que va a necesitar el elemento fundido (Goto et al., 2022). Estas características del modelo es importante tener en cuenta el tamaño de grano de la arena de moldeo para que la fundición obtenida sea satisfactoria a los elementos y condiciones detalladas en este trabajo (Sivarupan et al., 2020).

Figura 8

Impresión en 3D de los elementos



Para el costo de construcción que llevaría este cabezote y ya al tener ya la masa total de que se va a necesitar para el elemento, entre tanto la manufactura aditiva utilizada es necesario seleccionar el material de impresión correcto y la orientación de deposición de

material adecuadas para tener un elemento óptimo que sirva de modelo para el moldeo (Tezel et al., 2020). Por lo tanto, que el elemento es necesario considerar las operaciones posteriores del elemento fundido, que provienen de la ingeniería inversa y la facilidad del mecanizado (Jun & Li, 2022). El costo financiero se lo representa en la siguiente tabla:

Tabla 2

Costos de materia prima para la fundición

Descripción	Costo
Arena y Resina	\$ 75.00
Fundentes	\$ 100.00
Servicios CAD	\$ 40.00
Impresión 3D	\$ 40.00
Aluminio	\$ 30.00

Conclusiones

- Los parámetros óptimos para este proceso se lo realizo con una altura de bebedero de 200mm y un caudal de $0.17285433 \frac{kg}{s}$.
- Con el valor del caudal tenemos un diámetro superior de bebedero de 16,73 mm, y un diámetro inferior del bebedero de 10.21 mm. Estos parámetros se los realiza para una fundición en arena la cual nos sirve para las formas complejas que presenta el cabezote del motor y es una industria que se puede desarrollar en el país.
- Para la geometrización del elemento se utilizó la fotogrametría, ya que es una técnica adecuada para obtener toda la geometría para el proceso ya descrito. Así mismo utilizamos impresión 3D para el proceso de fundición fue una vez obtenido los valores finales para que la fundición sea óptima. Todo esto se lo realizaría para obtener una optimización del proceso con un alto relación costo vs. Calidad.

Referencias Bibliográficas

Almaghariz, E., Conner, B., & Lenner, L. (2016). Quantifying the Role of Part Design Complexity in Using 3D Sand Printing for Molds and Cores. *Inter Metal cast*, 10, 240–252.

- Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador [AEADE]. (2020). Anuario 2020. <https://www.aeade.net/wp-content/uploads/2022/03/Anuario-Aeade-2021/>
- Carabalí D., Forero C., & Cadavid Y. (2018). Energy diagnosis and structuring an energy saving proposal for the metal casting industry: An experience in Colombia. *Applied Thermal Engineering*, 137, 767-773.
- Dong X., Li X., Shan Z., & Liu F. (2009). Rapid Manufacturing of Sand Molds by Direct Milling. *Tsinghua Science & Technology*, 14, 212-215.
- Goto I., Kurosawa K., & Matsuki T. (2022). Effect of 3D-printed sand molds on the soundness of pure copper castings in the vicinity of as-cast surfaces. *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 77, 329-338.
- Gumbmann E., Geuser F., Sigli C., & Deschamps A. (2017). Influence of Mg, Ag and Zn minor solute additions on the precipitation kinetics and strengthening of an Al-Cu-Li alloy [J]. *Acta Materialia*, 133: 172–185.
- Haraldsson J., & Johansson M. (2018). Review of measures for improved energy efficiency in production-related processes in the aluminum industry – From electrolysis to recycling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93, 525-548.
- Hawaladar, N., & Zhang, J., A. (2018). Comparative study of fabrication of sand-casting mold using additive manufacturing and conventional process. *Int J Adv Manuf Technol*, 97, 1037–1045.
- Jun J., & Li H. (2022). Accuracy of CAD-CAM milling versus conventional lost-wax casting for single metal copings: A systematic review and meta-analysis, *The Journal of Prosthetic Dentistry*. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2022.05.018>.
- Nandagopal M., & Sivakumar K. (2022). Experimental investigation on influence of mould wall thickness and hardness on green sand mould permeability, *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.655>.
- Monroy, M. E., Arciniegas, J. L., & Rodríguez, J. C. (2013). Propuesta Metodológica para Caracterizar y Seleccionar Métodos de Ingeniería Inversa. *Información Tecnológica*, 24(5), 23–30. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000500004>
- Sadarang J., & Kumar R. (2021). Utilization of fly ash as an alternative to silica sand for green sand mold casting process. *Journal of Manufacturing Processes*, 68, 1553-1561.

- Snelling D., Williams C., & Druschitz, A. (2019). Mechanical and material properties of castings produced via 3D printed molds. *Additive Manufacturing*, 27, 199–207.
- Sivarupan T., El Mansori M, Coniglio N., & Dargusch M. (2020). Effect of process parameters on flexure strength and gas permeability of 3D printed sand molds. *Journal of Manufacturing Processes*, 54, 420-437.
- Sivarupan T., Upadhyay M., Ali Y., El Mansori M., & Dargusch M. (2019). Reduced consumption of materials and hazardous chemicals for energy efficient production of metal parts through 3D printing of sand molds. *Journal of Cleaner Production*, 224, 411-420.
- Tezel T., Ozenc M., & Kovan V. (2020). Impact properties of 3D-printed engineering polymers. *Materials Today Communications*, 26, 102-161.
- Venkata M., C. Kiran S., & Vasudeva V. (2021). Experimental investigation on the time-temperature history of Al-Si alloy while cooling in fresh and reclaimed silicate sand mould. *Materials Today: Proceedings*, 38, 2996-3004,

El artículo que se publica es de exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento de la **Revista Conciencia Digital**.



El artículo queda en propiedad de la revista y, por tanto, su publicación parcial y/o total en otro medio tiene que ser autorizado por el director de la **Revista Conciencia Digital**.



Indexaciones

