

Análisis numérico de la temperatura de vertido y de precalentamiento del molde en la formación de la porosidad en probetas de hierro gris

Numerical analysis of the pouring and preheating temperature of the mold in the development of porosity in gray iron samples

Lisandra Pupo-Salazar¹, Alberto Arias-Ambruster¹, Rigoberto Pastor Sánchez-Figueredo^{2,*}, Asdrúbal Braulio García-Domínguez³, Fausto Hernán Oviedo-Fierro⁴

¹Centro de Estudios CAD/CAM, Campus “Oscar Lucero Moya”, Avenida XX Aniversario s/n, Piedra Blanca. Universidad de Holguín. Holguín, Cuba.

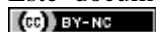
²Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Holguín. Holguín, Cuba.

³Centro de Estudios de Explotación, Fabricación y Recuperación de Equipos y Piezas (CEEFPREP). Universidad de Camagüey. Circunvalación norte km 5½. Camagüey, Cuba.

⁴Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.

*Autor de correspondencia: rigo@uho.edu.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional](#)



Recibido: 15 agosto 2021 **Aceptado:** 31 agosto 2021 **Publicado:** 2 de septiembre 2021

Resumen

Uno de los retos de la industria metalmeccánica relacionada con la fundición de piezas, es el aumento de la calidad de las fundiciones. Esta depende de diversos factores determinantes que influyen en su comportamiento y en la obtención de las propiedades mecánicas deseadas. Debido al elevado costo de la fabricación de las piezas fundidas, la utilización de herramientas computacionales de simulación que permitan a los ingenieros asegurar a priori, la calidad de las mismas, constituye un paradigma en los actuales contextos de desarrollo tecnológico. El presente trabajo tiene como objetivo mostrar la predicción a través de la simulación numérica, de los posibles defectos que se pueden originar en una fundición en moldes de arena, cuando se utilizan diferentes temperaturas de vertido y de precalentamiento del molde. Se analiza el caso de la obtención de probetas de hierro gris por el método de vertido por gravedad. Se describen los comportamientos en las etapas de llenado del molde y la solidificación del metal. Los resultados indican que, con los estudios realizados, se pueden identificar los parámetros adecuados para una mejor fundición.

Palabras clave: simulación numérica, porosidad, solidificación, ProCAST

Abstract

One of the challenges of the metalworking industry related to the casting of parts is increasing the quality of castings. This depends on various determining factors that influence its behavior and in obtaining the desired mechanical properties. Due to the high cost of manufacturing castings, the use of computational simulation tools that allow engineers to ensure a priori, their quality, constitutes a paradigm in the current contexts of technological development. The present work aims to show the prediction through numerical simulation, of the possible defects that can originate in a casting in sand molds, when different pouring and preheating temperatures of the mold are used. The case of obtaining gray iron specimens by the gravity pouring method is analyzed. The behaviors in the stages

of filling the mold and solidification of the metal are described. The results indicate that, with the studies carried out, the appropriate parameters for a better casting can be identified.

Keywords: numerical simulation, porosity, solidification, ProCAST

1. Introducción

Uno de los métodos más extendidos en la producción de piezas metálicas es la fundición. Las piezas obtenidas por colada resultan en general menos costosas que por otros métodos como la forja, estampado o soldadura. La utilización de métodos numéricos para mejorar la producción de las piezas por este proceso tecnológico, constituye una de las áreas de interés en los ámbitos investigativos y empresariales.

Zhang et al. [1] utilizaron los software ProCAST y JmatPro para simular el proceso de fundición de una aleación de níquel, en una pieza con paredes delgadas, con el objetivo de su optimización. Se demostró la mejora del proceso de fundición utilizando el software ProCAST, que se adapta a la simulación de la fundición y resuelve el problema de transferencia de calor mediante el método de los elementos finitos (FEM). Los resultados de utilizar el software JmatPro se consideraron adecuados al compararlos con los resultados de cálculo y los experimentales.

Sun et al. [2] propusieron una técnica de optimización para el diseño de parámetros del sistema de una fundición de magnesio basada en el método Taguchi. Los procesos de llenado del molde y la solidificación se simularon con el software MAGMASOFT®. Los resultados indicaron que los parámetros del sistema de alimentación del metal afectan significativamente la calidad de la fundición. Se optimizaron cuatro parámetros del sistema de alimentación, teniendo en cuenta las características, incluida la velocidad de llenado, la porosidad y el rendimiento del producto.

Yangqing et al. [3] estudiaron la pala de la turbina como uno de los componentes críticos del motor de un avión. Si bien la fundición es un proceso ideal para tales componentes, se requiere de una determinación precisa del perfil del molde de fundición. En este trabajo, se propone una metodología de diseño inverso para la fundición con el software ProCAST. Los autores demuestran que, con el ProCAST, se puede establecer el perfil de matriz optimizado para la fundición de este tipo de piezas.

Herman et al. [4] confirman que la precisión dimensional de la fundición de la aleación Inconel 738 LC se ve afectada por la elección del método y el tiempo de enfriamiento de la fundición. Estudiaron la deformación inicial de la fundición de las palas del rotor. Esta investigación mostró los primeros pasos para describir el complejo proceso de deformaciones de las cuchillas de aleación Inconel, producidas con tecnología de fundición mediante la comparación de resultados de imágenes térmicas, simulaciones en el software ProCAST y mediciones experimentales.

Según Bhatt et al. [5], un sistema de alimentación bien diseñado es importante para garantizar la mejor calidad de las piezas fundidas. Para las piezas fundidas nuevas o las piezas fundidas que tienen tasas de rechazo muy altas, la modificación del diseño del sistema de alimentación es de primordial importancia. La simulación del sistema de alimentación proporciona la ubicación del punto o puntos donde las posibilidades de defectos son altas. Esta información se puede utilizar para modificar el diseño del sistema de alimentación.

En la investigación de Fu et al. [6], se presenta el análisis de piezas fundidas complejas de aleación de magnesio, de paredes delgada, basada en la simulación numérica y la fabricación de prototipos rápidos. Los procesos de llenado y solidificación se simularon utilizando el ProCAST. Los resultados

de la simulación mostraron que, en comparación con el sistema de alimentación inferior, el sistema de alimentación vertical modificado, contribuyó a proporcionar un patrón de llenado estable y eliminar la porosidad de la fundición. Por su parte, Mostafaei et al. [7] presentaron un nuevo modelo para la predicción de las propiedades mecánicas de piezas fundidas de Al A357. El modelo propuesto se desarrolló a partir de los datos de una serie de probetas sin defectos. Se determinó que el estudio predice con éxito las propiedades de tracción de las aleaciones de Al A357 fundidas.

Babaei et al. [8], investigaron las interacciones térmicas y mecánicas entre los dos componentes de un bimetálico fundido. Se analizaron la transferencia de calor, la solidificación y la distribución de las tensiones generadas a lo largo de la interfaz del bimetálico, utilizando los softwares Thermo-Calc, ProCAST y ANSYS. Los resultados no mostraron cambios notables en la estructura del inserto y coincidieron con los resultados experimentales.

Se concluye de estos estudios que la simulación por el método de los elementos finitos de los procesos de fundición de metales, constituye una herramienta predictiva de gran valor para los procesos de mejora de la calidad de este proceso tecnológico. El presente trabajo tiene como objetivo mostrar la predicción a través de la simulación numérica, de los posibles defectos que se pueden originar en una fundición en moldes de arena, cuando se utilizan diferentes temperaturas de vertido y de precalentamiento del molde. Se analiza el caso de la obtención de probetas de hierro gris por el método de vertido por gravedad.

2. Materiales y Métodos

2.1 Modelación de la transferencia de calor y del llenado

El mayor desafío en la simulación de la transferencia de calor en el metal fundido ha sido el cambio de fase. Considerando la solidificación de una aleación, hay tres regiones: una región del sólido, una región totalmente líquida, y una región que consiste en líquido disperso entre las dendritas sólidas. Para modelar este cambio de fase se requiere una estricta imposición de las condiciones de frontera. Normalmente, esto podría lograrse con un elemento finito que se transforma para ajustarse a la interface, sin embargo, esto es computacionalmente caro.

Para superar la pérdida de información de la frontera se necesitan desarrollar tratamientos especiales que reconozcan esta discontinuidad. El más simple está basado en la fracción de sólido en cada celda computacional. Una vez se calcula, es necesario tener en consideración el calor latente perdido durante la solidificación. El método de la entalpía es el que se utiliza con mayor frecuencia.

El desafío que enfrenta el modelado del llenado, es el desarrollo de un algoritmo de solución que pueda resolver las ecuaciones de momento y de continuidad simultáneamente. Aunque hay una diversidad de vías para hacerlo, en el campo de la modelación de la solidificación los métodos dominantes han sido reiterativos. Los métodos más populares son: SMAC, SOLA y SIMPLE. Aunque cada método se diseñó para ser una mejora en su predecesor, en la práctica cada método tiene un elemento que lo distingue. El reto que enfrenta el modelado de flujo de metal durante la solidificación ha sido simular la disminución de la velocidad durante la interface sólido/líquido.

2.2 Ecuaciones de Navier-Stokes

La mecánica de fluidos se basa en las ecuaciones de conservación, también conocidas como ecuaciones de Navier-Stokes. Estas ecuaciones se basan en los principios de conservación de la

masa, el momento y la energía, y se utilizan para formular modelos matemáticos del llenado de moldes y la solidificación de piezas fundidas [9].

La conservación de la cantidad de movimiento se expresa mediante la Segunda Ley del Movimiento de Newton que, aplicada a problemas de flujo de fluidos, constituye la ecuación de la cantidad de movimiento. La aplicación del principio de conservación de energía, expresado por la Primera Ley de la Termodinámica, conduce a la ecuación de energía. Es útil aplicar principios de conservación al elemento infinitesimal (volumen de control) derivado por la malla 3D y derivar de esta manera las ecuaciones diferenciales gobernantes.

La Figura 1 muestra un volumen de control estacionario en dos dimensiones, centradas en P, a través de las cuales fluye el fluido. En ausencia de fuentes de masa internas y/o sumideros en el volumen de control, las ecuaciones de conservación de la masa establecen que la tasa de acumulación de masa es igual a la entrada neta de masa por convección. La entrada neta es solo la diferencia entre la cantidad de entrada y de la salida [10].

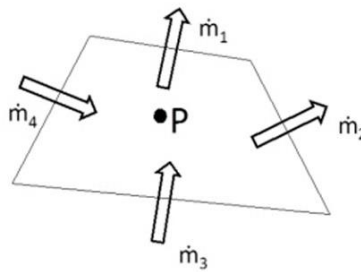


Fig.1 Principio de conservación de la masa

La ley de conservación de la masa puede ser escrito por la ecuación (1).

$$\frac{dm}{dt} = \sum_{j=1}^n \dot{m}_j \quad (1)$$

Donde m denota la masa de fluido en el volumen de control, y \dot{m} denota el caudal de masa a través de la cara j del volumen de control. La suma se efectúa sobre todas las caras del volumen de control. La ecuación (1) contiene una masa desconocida del volumen de control y el caudal de masa a través de las caras. La masa puede expresarse por el producto de la densidad y el volumen, mientras que el flujo de masa en el producto de la densidad, el área de superficie y el componente normal a la cara del vector de velocidad. La forma final de la ecuación de continuidad será según (2).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_1}(\rho v_1) + \frac{\partial}{\partial x_2}(\rho v_2) + \frac{\partial}{\partial x_3}(\rho v_3) = 0 \quad (2)$$

También se puede expresar como se indica en (3)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (3)$$

Donde ρ denota la densidad del fluido, y v_1, v_2, v_3 son componentes cartesianos del vector de velocidad en las direcciones de las coordenadas espaciales respectivas.

Ley de la conservación de la energía

La ecuación de conservación de energía describe el balance de la energía total (interna más cinética) sobre un volumen de control. La ecuación de energía térmica se puede obtener a partir de la ecuación de energía total por sustracción de la energía cinética. La forma final de ecuación de conservación de energía térmica se puede expresar a través de la expresión (4).

$$(\partial c_p) \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_1} (v_1 c_p T) + \frac{\partial}{\partial x_2} (v_2 c_p T) + \frac{\partial}{\partial x_3} (v_3 c_p T) = \left[\frac{\partial}{\partial x_1} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_3} \right) \right] + \mu \phi_T + L \frac{\partial f_s}{\partial t} + S_T \quad (4)$$

Donde k representa la conductividad térmica, S_T denota las fuentes de calor de volumen (si las hay), ρ denota la densidad del fluido y v_1, v_2, v_3 son componentes cartesianos del vector de velocidad en las direcciones de las coordenadas espaciales respectivas. El segundo término en el lado derecho de la ecuación (4) representa el aumento de la velocidad de la energía interna por disipación viscosa (μ) mientras que el tercer término es responsable de la liberación de calor latente (L), de acuerdo con la curva de fracción sólida (f_s). ϕ_T se define según expresa la ecuación (5).

$$\phi_T = \left[\left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right)^2 - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right)^2 \quad (5)$$

Conducción térmica

Cuando existe un gradiente de temperatura, se encontrará una transferencia de energía desde la región de alta temperatura a la región de baja temperatura. Esto se denomina conducción térmica, y el flujo de calor por unidad de área será proporcional al gradiente de temperatura normal, con una constante de proporcionalidad llamada conductividad térmica. La Ley de la conducción térmica de Fourier se puede escribir como expresa la ecuación (6).

$$q = -kA \frac{\delta T}{\delta x} + \nabla(\partial v) = 0 \quad (6)$$

Donde $q[W]$, es el flujo de calor difusivo (flujo de calor) perpendicular a través de la superficie del área $A[m^2]$, k es la conductividad térmica $[W/mK]$ y T es la temperatura en $[K]$ o $[^\circ C]$. El signo menos de la ecuación (6) indica que el calor se calcula con valor positivo en la dirección en que realmente fluye.

2.3 Simulación del proceso de fundición

Para simular el proceso de fundición, se siguen una serie de pasos lógicos que permiten representar numéricamente el problema a estudiar.

a) Definición de la geometría de la pieza

El primer paso en el proceso de modelación es la definición de la geometría de la pieza a fundir. Los programas informáticos de simulación contemporáneos brindan la capacidad de importar la geometría de la pieza de un fichero con extensión STL, IGS, STEP de un sistema CAD. Es importante durante el proceso de modelación, incluir todos los elementos que puedan tener una

influencia significativa en el llenado de la cavidad del molde y la posterior solidificación de la pieza (Figura 2).

Después de la definición de la geometría, esta debe dividirse en un número discreto de elementos de volumen segmentados para los cálculos posteriores. Esto se realiza a través de algoritmos de mallados específicos (Figura 2). El punto más crítico a tener en cuenta es la influencia del tamaño de la malla en el cálculo. La precisión de los resultados aumenta con una malla pequeña. Por otro lado, el tiempo de cálculo aumenta a medida que la malla se vuelve más fina.

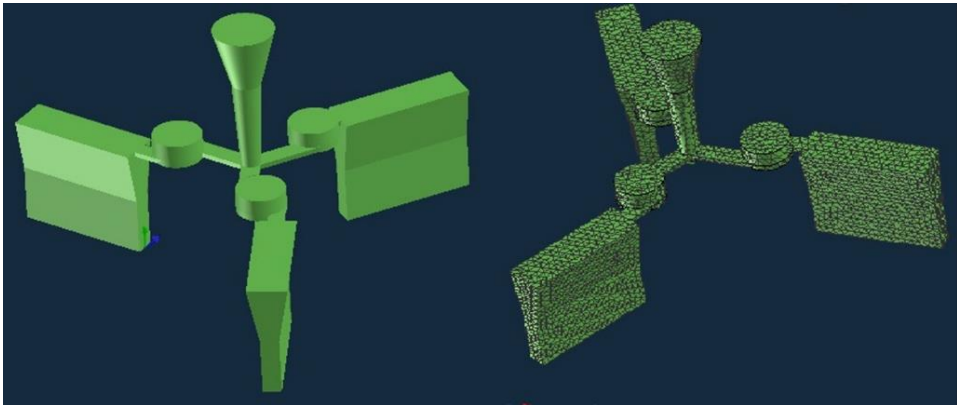


Fig.2 Modelo CAD importado (a) y modelo mallado en el software de fundición (b)

b) Definición de los parámetros tecnológicos

En este paso deben definirse las propiedades termo físicas de los materiales involucrados en el sistema de colada y deben especificarse las condiciones iniciales (por ejemplo, las temperaturas iniciales). También se necesitan condiciones límite para las incógnitas, como la velocidad o la presión del metal líquido que se vierte en la fundición o el coeficiente de transferencia de calor entre los diversos materiales en el sistema de fundición.

c) Simulación

En este paso, las ecuaciones que rigen el proceso de llenado y solidificación de la fundición se resuelven en la malla computacional, utilizando el material definido y los parámetros del proceso. Con este fin, el dominio a analizar, dividido en un número muy alto de volúmenes, y las condiciones fijadas por las ecuaciones diferenciales integrales que controlan el problema, se imponen a través de solucionadores específicos con referencia a un número finito de puntos relacionados con dicha subdivisión.

d) Evaluación de los resultados

Los resultados de una simulación de llenado y solidificación de moldes son los valores de la variable dependiente (temperatura, presiones, velocidades) en la malla computacional. La evaluación de los resultados se logra visualizando estos valores en tres dimensiones y combinando los valores de las variables dependientes.

3. Resultados y Discusión

A continuación, se analizan los resultados obtenidos en el proceso de simulación por elementos finitos, para obtener probetas de hierro gris por el método de vertido por gravedad. En la Tabla 1 se muestran los resultados de los defectos para las fundiciones de hierro gris. Se observa que la mayor porosidad ocurre a una temperatura de vertido (T_v) de 1 500°C, con un volumen de vertido (V_v) de 1,5 kg/s y a una temperatura de precalentamiento (T_p) de 700°C. En la Figura 3 se muestran las zonas críticas, donde se origina la porosidad por contracción en la pieza formada durante la solidificación. Esta depende de las condiciones de llenado y de su transferencia térmica. A partir de las zonas críticas, se ubican puntos para analizar el comportamiento de la porosidad por contracción en función de la solidificación (Figura 4).

Tabla 1. Resultados de los defectos para las fundiciones de hierro gris (porosidad y aire atrapado)

T_v (°C)	V_v (kg/s)	T_p (°C)	Porosidad (%)	Aire atrapado ($g \cdot m^3$)
1 400	1,5	650	3,000483	0,000116
1 400	1,5	700	2,630041	0,000124
1 400	1,5	750	2,695015	0,000120
1 450	1,5	650	2,898611	0,000122
1 450	1,5	700	2,709177	0,000118
1 450	1,5	750	2,689257	0,000119
1 500	1,5	650	3,142089	0,000122
1 500	1,5	700	3,224735	0,000116
1 500	1,5	750	2,740910	0,000119

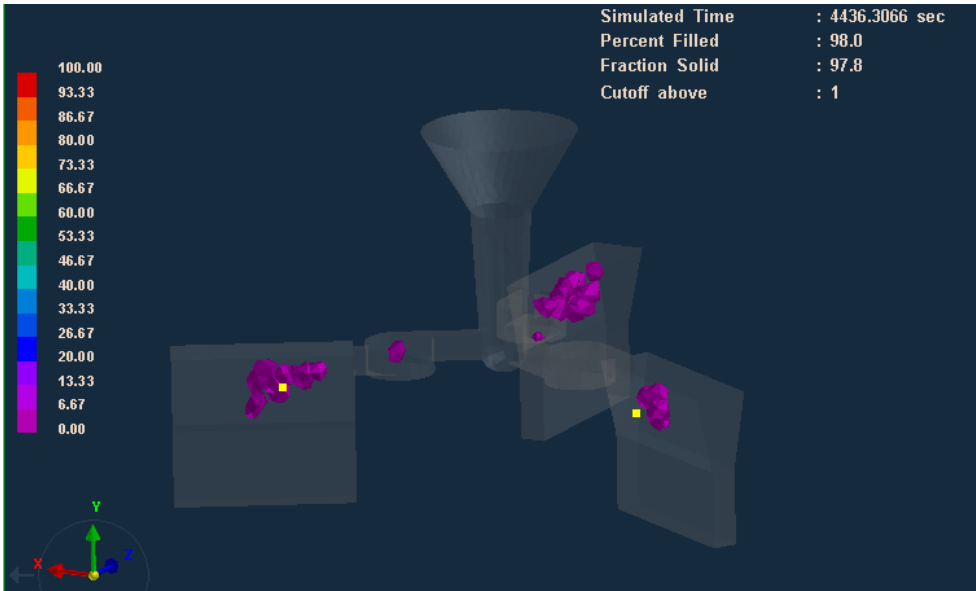


Fig.3 Zonas críticas donde se origina la porosidad por contracción a 1400°C; 1,5 kg/s y 700°C

En la Figura 4 se observa el mecanismo de solidificación del hierro gris, desde su estado de fusión a 1400°C. A esta temperatura, el hidrógeno atmosférico reacciona con los óxidos férricos del caldo metálico formando metal libre más vapor de agua según las reacciones (1-4).

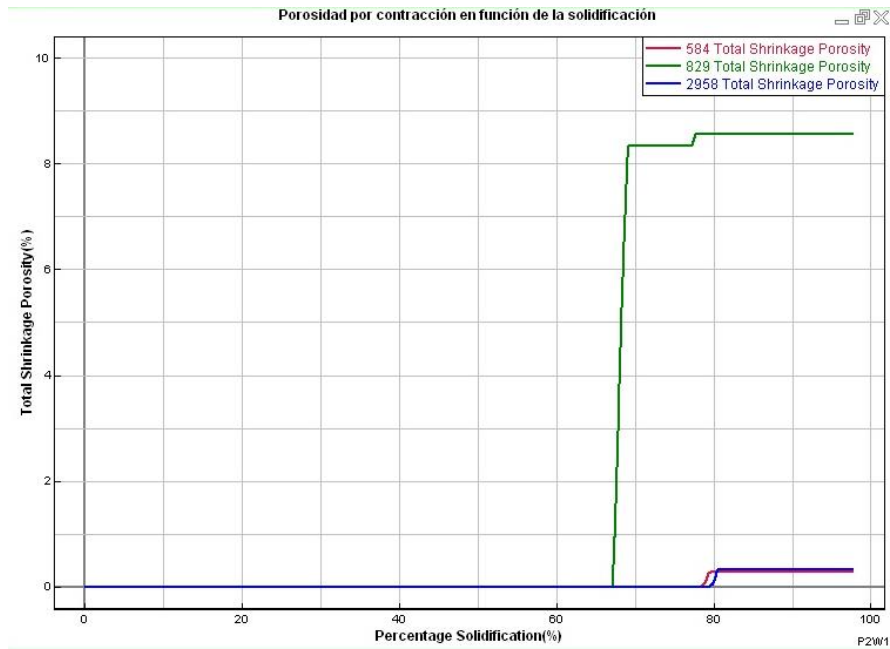


Fig.4 Porosidad por contracción en función de la solidificación a 1400°C; 1,5 kg/s y 700°C



Bajo estas condiciones, la solidificación ocurre por capas orientadas desde la periferia al centro, lo cual provoca que estos vapores de agua queden atrapados dentro del fundido formando poros, sopladuras e inclusiones metálicas. El porcentaje de porosidad por contracción tiene relación directa con la formación de las capas, en dependencia del avance del frente de enfriamiento y de la solidificación. En la Figura 4 se muestra como el punto 829 es el de mayor porcentaje de porosidad por contracción en un 8,85%, y la menor incidencia es el punto 584 con un valor de porosidad de un 0,3%, debido a un mayor avance del frente de enfriamiento y solidificación, lo cual influye en el porcentaje de porosidad por contracción.

En la Figura 5, se puede apreciar que el punto 829 a 0,000130 $g \cdot cm^3$ de aire atrapado, obtiene su mayor volumen de porosidad por contracción de 8,7%. Esto se debe a que, si existe un aumento del aire atrapado, también aumenta la porosidad por contracción, donde influyen el frente de solidificación y la temperatura de vertido.

Se observa que el punto 584 a 0,000140 $g \cdot cm^3$ de aire atrapado, su volumen de porosidad por contracción es de 0,3%. En el punto 2 958, para un valor de 0,000190 $g \cdot cm^3$ de aire atrapado, el volumen de porosidad por contracción es de 0,5%. De la figura podemos inferir que el oxígeno presente en una aleación metálica fundida, puede presentarse en forma de óxidos metálicos con el C, Si, Al, Ti, Mn, S, etc. Estos óxidos pueden ejercer como puntos de nucleación heterogénea para la formación de escorias, entre otros constituyentes. Además, un aumento de la velocidad de enfriamiento sin cambio en la temperatura de vertido a 1 400°C, trae en este caso el aumento del volumen del rechupe. En el proceso de solidificación, cada nivel va produciendo una corteza sólida acompañada de la disminución del volumen de la aleación, lo que al final produce la formación de concentraciones de contracción.

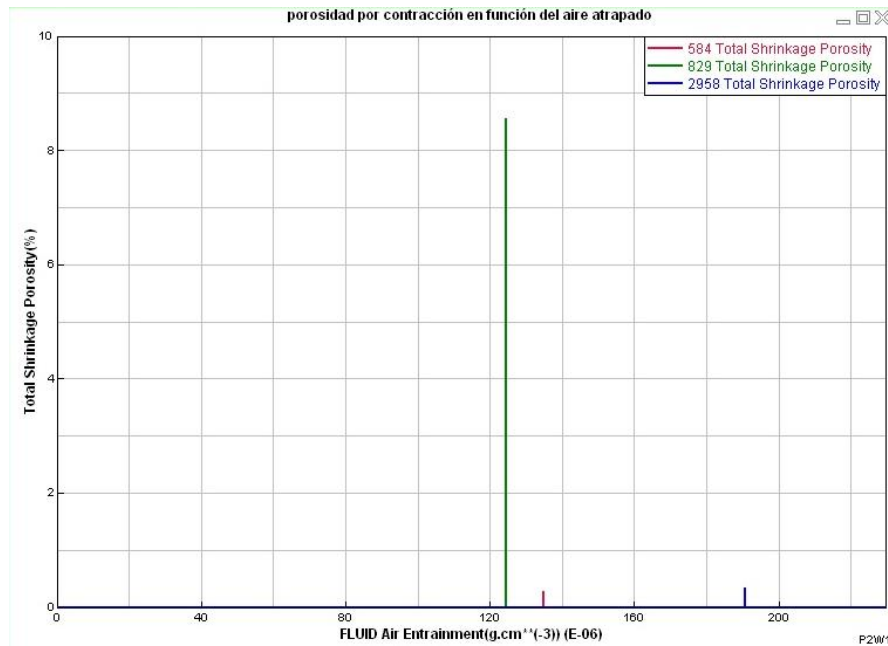


Fig.5 Porosidad por contracción en función del aire atrapado a 1400°C; 1,5 kg/s y 700°C

4. Conclusiones

La modelación y simulación a través de herramientas por el método de los elementos finitos, del proceso de llenado y solidificación de probetas de aleaciones de hierro gris, por el método de vertido por gravedad permitió conocer el comportamiento de la formación de la porosidad por contracción, y el porcentaje de aire atrapado generado por las contracciones. La selección adecuada de las temperaturas de vertido, la temperatura de precalentamiento del molde y la velocidad de vertido, permitió modelar y simular el comportamiento de una tecnología de fundición que garantice una mínima aparición de defectos en las piezas.

Referencias

1. Zhang, X., Li, S., Luo, H., Cao, X., Feng, D., Li, S., *Simulation of Ni3Al-based alloy and investment casting process of its thin wall castings*. Israel Journal of Chemistry, 2007. **47**: p. 363-368. DOI: <https://doi.org/10.1560/IJC.47.3-4.363>.
2. Sun, Z., Hu, H., Chen, X., *Numerical optimization of gating system parameters for a magnesium alloy casting with multiple performance characteristics*. Journal of Materials Processing Technology, 2008. **199**: p. 256-264. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.08.036>.
3. Yangqing, D., Kun, B., Yangliu, D., Yiwei, D., *Reversing design methodology of investment casting die profile based on ProCAST*. China Foundry, 2010. **7**(2): p. 132-137.
4. Herman, A., Česal, M., Mikeš, P., *The deformation of wax patterns and castings in investment casting technology*. Archives of Foundry Engineering, 2012. **12**(1): p. 37-42. DOI: <https://doi.org/10.2478/v10266-012-0007-z>.
5. Bhatt, H., Barot, R., Bhatt, K., Beravala, H., Shah, J., *Design optimization of feeding system and solidification simulation for cast iron*. Procedia Technology, 2014. **14**: p. 357-364. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.08.046>.
6. Fu, Y., Wang, H., Zhang, C., Hao, H., *Numerical simulation and experimental investigation of a thin-wall magnesium alloy casting based on a rapid prototyping core making method*. International Journal of Cast Metals Research, 2018. **31**(1): p. 37-46. DOI: <https://doi.org/10.1080/13640461.2017.1365477>.

7. Mostafaei, M., Ghobadi, M., Beygi, R., Zarezadeh Mehrizi, M., Eisaabadi B, G., *New numerical/experimental model for prediction of tensile properties in aluminum A357 castings: the effect of microstructure and microshrinkages*. International Journal of Cast Metals Research, 2018. **31**(6): p. 332-345. DOI: <https://doi.org/10.1080/13640461.2018.1483480>.
8. Babaei, M. H., Niroumand, B., Maleki, A., Lashani Zand, M., *Simulation and experimental verification of interfacial interactions in compound squeeze cast Al/Al–Cu macrocomposite bimetal*. Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition), 2019. **29**(5): p. 950-963. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(19\)65004-1](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(19)65004-1).
9. Cebeci, T., Shao, J. P., Kafyeke, F., Laurendeau, E., *Computational Fluid Dynamics for Engineers*, 2005. Berlin: Springer-Verlag. ISBN 978-94-024-1215-4.
10. Anglada, E., Meléndez, A., Maestro, L., Domínguez, I., *Adjustment of numerical simulation model to the investment casting process*. Procedia Engineering, 2013. **63**: p. 75-83. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.272>.

Agradecimientos

Nuestro agradecimiento al Centro de Estudios CAD/CAM y al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Holguín (Cuba), al Centro de Estudios de Explotación, Fabricación y Recuperación de Equipos y Piezas (CEEFREP) de la Universidad de Camagüey (Cuba) y a la Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador por el apoyo brindado en esta investigación.

Conflicto de Intereses

No existe ningún conflicto de intereses.

Contribución de los autores

Lisandra Pupo-Salazar. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0379-593X>

Participó en la conceptualización de la investigación, curación de datos, investigación, metodología, redacción y edición.

Alberto Arias-Ambruster. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6297-8715>

Participó en el diseño de la investigación, conceptualización, curación de datos, redacción y edición.

Rigoberto Pastor Sánchez-Figueroa. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0200-0138>

Participó en el diseño de la investigación, conceptualización, supervisión, curación de datos y metodología.

Asdrúbal Braulio García-Domínguez. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2054-1045>

Participó en el diseño de la investigación, conceptualización, curación de datos y metodología.

Fausto Hernán Oviedo-Fierro. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1973-7577>

Participó en el diseño de la investigación, conceptualización, supervisión, curación de datos y metodología.