

Análisis numérico y validación experimental del vertido de metal fundido en molde de arena

Numerical Analysis and Experimental Validation of Pouring Casting Metal in Sand Mold



CU-ID: 2177/v31n3e08

✉ Santiago Amaury Santana-Reyes^{I*}, ✉ Inahudis Calzada-Pompa^I, ✉ Yoandrys Morales-Tamayo^{II},
✉ Yusimit Karina Zamora-Hernández^{III}, ✉ Elisney Matos García^{IV}

^IUniversidad de Granma, Facultad de Ciencias Técnicas, Dpto. de Ingeniería Mecánica, Bayamo, Granma, Cuba.

^{II}Universidad Técnica de Cotopaxi, Coordinación de Investigaciones, La Maná, Ecuador.

^{III}Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Departamento de Ingeniería Mecánica, Quevedo, Ecuador.

^{IV}División de Ventas de Piezas Granma, Bayamo, Granma, Cuba

RESUMEN: La fundición de metales representa un importante sector dentro de la industria mecánica. El método de vaciado de metal en moldes de arena ha sido utilizado durante milenios debido a la libertad que le permite al diseñador en términos de tamaño y forma. El objetivo de la presente investigación es establecer un modelo de simulación numérica, validado experimentalmente, del vertido de metal fundido en molde de arena teniendo como criterio de análisis los defectos internos en el cuerpo del soporte de los rodamientos de la grada de 4 500 lb. En esta investigación se realizó un análisis, a partir del Método de Elementos Finitos (MEF), del proceso de fundición teniendo en cuenta la temperatura de vertido del metal fundido, la temperatura de precalentamiento del molde y la velocidad de llenado, estos parámetros fueron registrados durante el ensayo experimental realizado del proceso. Un procedimiento de inspección es mostrado, en el que se utilizaron elementos de análisis visual de la pieza obtenida y de simulación por el MEF, para determinar la magnitud y localización de los defectos internos en el seno de la pieza. Los defectos fueron clasificados en sopladura, porosidad y unión fría, se apreció una correspondencia en cuanto a la localización de los mismos, entre el modelo simulado y el experimentado; mientras que el error relativo del área de los defectos en dichos modelos es menor al 10%.

PALABRAS CLAVE: fundición de metales, inspección, MEF, defectos, grada.

ABSTRACT: Metal foundry represents an important sector within the mechanical industry. The method of casting metal into sand molds has been used for millennia because the freedom it allows the designer in terms of size and shape. The objective of this research is to establish a numerical simulation model, experimentally validated, of molten metal pouring in a sand mold, taking as analysis criteria the internal defects in the body of the bearing support of the 4 500 lb. harrow. In this research, an analysis was carried out, from the Finite Element Method (FEM), of casting process taking into account the molten metal pouring temperature, the mold preheating temperature and the filling speed. These parameters were recorded during the experimental testing of the process. An inspection procedure is shown, in which elements of visual analysis of the piece obtained and of simulation by MEF were used to determine the magnitude and location of internal defects inside the piece. The defects were classified in blowhole, porosity and cold junction, a correspondence was appreciated in terms of their location, between the simulated and the experienced models; while the defects area relative error in these models is less than 10%.

Keywords: Metal Casting, Inspection, FEM, Defects, Harrow.

*Autor para correspondencia: Santiago Amaury Santana-Reyes, e-mail: ssantanar@udg.co.cu

Recibido: 04/12/2021

Aceptado: 24/06/2022

INTRODUCCIÓN

La fundición de metales es un proceso único entre todos los procesos de fabricación por una gran variedad de razones, siendo la más destacada: la posibilidad que ofrece en su configuración geométrica de hacer viable la producción de componentes con geometría compleja de cualquier metal (Stefanescu, 1998). Del proceso de fundición se puede obtener una extensa variedad de metales y aleaciones ferrosas, dado a que son los materiales de más amplio uso en la ingeniería. En virtud de su amplia gama de propiedades mecánicas, físicas y químicas, los metales y las aleaciones ferrosas se encuentran entre los más útiles de todos los metales (Kalpakjian y Schmid, 2008).

El proceso de fundición en moldes de arena es una técnica de manufactura antigua que utiliza la arena como un medio refractario para incrementar la calidad de la pieza fundida (Sunanda y Jagannadha, 2021). De acuerdo con Jacob *et al.* (2004), la fundición de metales representa un importante sector dentro de la industria mecánica. El método tradicional de vaciado de metal en moldes de arena ha sido utilizado durante milenios. Aunque el origen de la fundición en arena se remonta a los tiempos lejanos, sigue siendo la forma prevaleciente de fundición (Kalpakjian y Schmid, 2008), debido a la libertad que le permite al diseñador en términos de tamaño, forma y calidad (Stefanescu, 1998).

En la actualidad existen tendencias claras de la evolución de la tecnología de fundición, a causa de que se ha aumentado la eficiencia, produciendo piezas de más alta calidad en las que se disminuyen las tolerancias dimensionales. Debido a la especialización continua del sector y a las altas exigencias de la industria, la tecnología de fundición está cada vez más obligada a producir, de forma eficiente, piezas de mayor complejidad (Groover, 2010).

Según Abdullin (2013) citado por Suárez y Coello (2015), la ocurrencia de defectos en una pieza fundida, debe ser controlada desde el mismo proceso de elaboración de la tecnología de fundición por los tecnólogos, por lo tanto, el contar con una herramienta y una metodología para resolver esta situación es de gran ayuda y posibilita la mejora económica del proceso. En ese sentido, la tecnología de Ingeniería Asistida por Computadora (CAE, por sus siglas en inglés) se han constituido en una viable herramienta para la predicción y prevención de los defectos en las piezas fundidas. Es así que, de acuerdo con Kwon (2021), actualmente el desarrollo de las tecnologías CAE han reducido significativamente el proceso de ensayo-error existente en la construcción de moldes de fundición.

Autores como Sunanda y Jagannadha (2021), ante el reto tecnológico de la afectación de la calidad en poleas, provocada por los defectos en el proceso de

fundición, emplean la simulación numérica para analizar el llenado del molde y la solidificación del metal, con lo cual es posible predecir los defectos en el proceso. De igual manera, Rodríguez *et al.* (2004), ejemplifican las ventajas del uso de técnicas de simulación para predecir defectos en piezas fundidas. Los autores muestran las posibilidades del uso de este tipo de técnicas en el campo de la tecnología de la fundición.

Asimismo, Sorate *et al.* (2017), realizan la optimización del sistema de alimentación en el modelo de fundición de un apoyo de rodamientos, haciendo uso de un programa CAE que permite la simulación numérica del vertido y la solidificación de metales. El objetivo de la investigación es mejorar la calidad final de la pieza obtenida y, por tanto, aumentar el rendimiento del proceso de fundición. De igual manera, Kabnure *et al.* (2020), emplean la técnica de simulación numérica para predecir la localización y el nivel de la intensidad del fenómeno de la contracción en una brida de fundición de hierro dúctil. El análisis numérico permite determinar la necesaria modificación del sistema de alimentación del metal fundido al molde.

Rajkumar y Rajini (2021), plantean que, en función de minimizar el tiempo y el costo en la creación de los productos, las herramientas de CAD/ Manufactura Asistida por Computadora (CAM, por sus siglas en inglés) se han combinado con los requerimientos de la industria de la fundición. En tal sentido, todos los autores, antes mencionados, destacan que la simulación numérica del vertido y solidificación de metales constituye, en la actualidad, una necesaria técnica que debe ser empleada en las etapas iniciales del desarrollo de la tecnología para la obtención de piezas mediante el proceso de fundición, independientemente de las características del molde y del material a fundir.

Sin embargo, es una práctica, altamente aconsejable, validar los modelos de análisis numéricos a partir de técnicas de experimentación con el fin de establecer un estudio robusto del proceso de fundición. En ese sentido, Motoyama *et al.* (2020), realizan un estudio para medir la magnitud del alabeo en piezas de poco espesor obtenidas mediante la fundición en arena. Los autores realizan ensayos experimentales del proceso de fundición y posteriormente, basados en los resultados experimentales, efectúan simulaciones por el MEF. Los resultados de la deformación, por ambas metodologías de análisis, en la pieza de fundición gris estudiada, son comparados determinándose que no existen diferencias significativas.

Los defectos internos, derivados del proceso de fundición, en el cuerpo del soporte de los rodamientos de la grada 4 500 lb, son un factor importante en la salida de servicio de la pieza, puesto que la presencia de discontinuidades geométricas en el seno del

material actúa como concentradores de tensiones ante los esfuerzos que, de acuerdo con [De Soto y Limas \(2017\)](#), son considerables y tiene su causa común en el desfavorable régimen de explotación causado por el trabajo en el campo.

El objetivo de la presente investigación es establecer un modelo de simulación numérica, validado experimentalmente, del vertido de metal fundido en molde de arena teniendo como criterio de análisis los defectos internos en el cuerpo del soporte de los rodamientos de la grada de 4 500 lb.

MATERIALES Y MÉTODOS

Procedimiento empleado en el análisis del vertido de metal fundido

En la [Figura 1](#) es mostrado el procedimiento experimental seguido en el desarrollo del análisis de las características geométricas del cuerpo del soporte de los rodamientos de la grada de 4 500 lb, obtenido mediante el proceso de fundición de metales.

La asignación de servicio de la pieza constituyó el primer paso para el desarrollo del análisis, pues es importante determinar el régimen de explotación y la ubicación dentro del sistema mecánico, de igual manera, la definición de las características geométricas tiene una gran interrelación con el paso anterior. Las dimensiones de la pieza, que se obtiene por el proceso de fundición, se determinaron siguiendo la metodología propuesta por [Navas et al. \(1990\)](#).

El desarrollo del proceso tecnológico de fundición de metales en moldes de arena fue monitoreado en cada uno de sus pasos tecnológicos hasta llegar al vertido del metal fundido; en este último paso se controlaron las variables más importantes: temperatura de precalentamiento del molde, temperatura de vertido y tiempo de vertido del metal fundido. Posteriormente, se simuló numéricamente el proceso de vertido del metal fundido en el molde de arena, atendiendo a la efectiva presencia de las adecuadas condiciones geométricas de la pieza, así como a los datos recopilados durante el vertido del metal, todo lo cual permitió realizar la etapa de pre-proceso constitutiva del análisis por el MEF.

La validación de los resultados obtenidos mediante el ensayo experimental y el análisis numérico constituyó el paso de mayor significación del procedimiento. La consecución de un modelo de análisis por el MEF que responda, adecuadamente, al comportamiento real del vertido del metal fundido a partir del cual sea posible la caracterización geométrica de los defectos como: aire atrapado, uniones frías y espacios del molde con llenado deficiente; permitirá la realización de futuras simulaciones numéricas que permitan mitigar los defectos antes mencionados.



FIGURA 1. Esquema del procedimiento empleado en el análisis del vertido de metal fundido.

Por último, la interpretación de los resultados del proceso de vertido de metal fundido para obtener el cuerpo del soporte de los rodamientos de la grada de 4 500 lb, contribuyó a la toma de decisiones tecnológicas relacionadas con el proceso. En esta etapa se deben mejorar todos los parámetros que intervienen en el proceso, para lo cual se cuenta con el modelo ajustado de simulación numérica por el MEF.

Asignación de servicio de la pieza

La presente investigación se desarrolló en la Empresa Logística de la Agricultura “26 de Julio” del municipio Bayamo, provincia Granma, Cuba. La

grada de 4 500 lb está destinada (Figura 2a), dicha grada se encuentra sometida a un riguroso régimen de explotación debido a las características del terreno (con varios obstáculos y desniveles) donde generalmente se emplea.

El cuerpo del soporte de los rodamientos (Figuras 2b y 2c) tiene una importancia crucial en el correcto desempeño del apero de labranza, debido a que es el encargado de soportar el árbol donde se encuentran montados los discos de la grada. Sin embargo, se ha detectado que la pieza, fabricada en la entidad, ha presentado recurrentes fallas localizadas en la misma zona. La falla estuvo provocada por la presencia de discontinuidades geométricas en el seno del material, asociados al proceso tecnológico de fundición de metales.

Definición de la geometría de la pieza a obtener mediante el proceso de fundición de metales en moldes de arena

La geometría de la pieza, que se obtuvo mediante el proceso de fundición de metales, tiene una configuración en forma de anillo circular (Figura 3a), las principales dimensiones son: 306 mm de ancho, 224 mm de alto y 131 mm de espesor. El diámetro exterior es de 189 mm y el diámetro interior es de 145 mm, la masa de 18,211 kg.

La geometría final de la pieza es mostrada en la Figura 3b, luego de someterla a un maquinado por arranque de virutas para eliminar la sobremedida remanente del proceso de fundición.

Desarrollo del proceso tecnológico de fundición de metales en moldes de arena

Las características del proceso tecnológico de fundición, analizado en esta investigación, constituyen elementos comunes para el proceso del vertido por gravedad del metal fundido. Se partió de la tarea técnica especificada para la obtención del cuerpo del soporte de los rodamientos de la grada de 4 500 lb.

Posteriormente, se moldeó la pieza partiendo de la colocación de la plantilla en la caja y se procedió al llenado con arena. Igualmente, durante esta operación se ubicó el sistema de alimentación del metal fundido, los componentes de evacuación de los gases y los indicadores de llenado (Figura 4a).

Luego, se procedió al apisonado de la arena con todos los componentes del molde y a la extracción de la plantilla (Figura 4b). Finalmente, se aplicó una capa de pintura en la cavidad del molde para lograr un mejor acabado superficial y una fácil extracción de la pieza del molde (Figura 4c).



FIGURA 2. Ubicación del cuerpo del soporte de los rodamientos en la grada 4 500 lb; a) Conjunto de los elementos de la grada, b) Vista superior y c) Vista lateral.

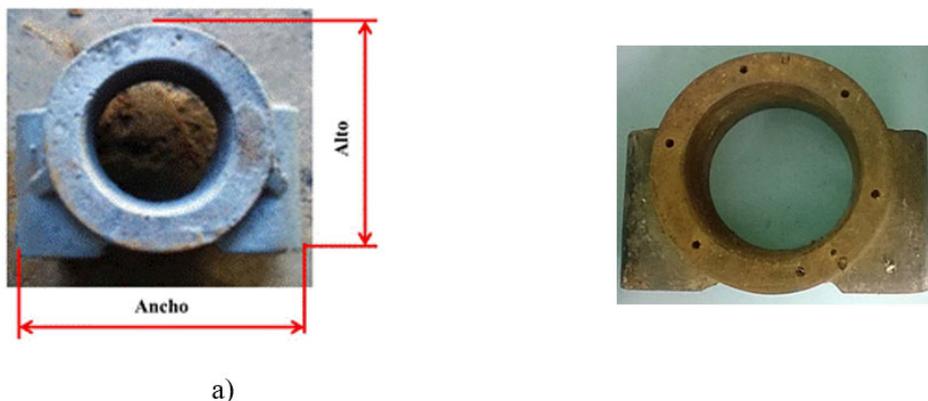


FIGURA 3. Cuerpo del soporte de los rodamientos de la grada 4 500 lb; a) Pieza obtenida de la fundición y b) Pieza terminada después del maquinado por arranque de virutas.

La extracción de la humedad en el molde de arena se logró a partir del flameado total de su geometría, otro fin importante con dicha acción es posibilitar un menor gradiente térmico en el momento del vertido del material fundido. En esta investigación el vertido del metal fundido se realizó de manera inmediata al precalentamiento de las caras del molde que estarán expuestas al metal fundido.

Sin lugar a dudas, el vertido del metal es la acción de mayor responsabilidad e importancia del proceso, pues en ella se sintetizaron todas las etapas anteriores. La temperatura del proceso se registró haciendo uso de un pirómetro láser digital marca UNI-T modelo UT305C (Figura 5a). El proceso consistió en la medición de los valores térmicos en 10 puntos de la superficie del molde expuesta al contacto con el metal fundido, para luego calcular el promedio.

El procedimiento para la medición de la temperatura de enfriamiento de la pieza dentro del molde es mostrado en la Figura 5b, el mismo consistió en la medición térmica de manera puntual desde el centro del área visible del tragadero hasta su borde externo (describiendo una trayectoria espiral del centro hacia afuera), una vez que se llenó el molde completamente de metal.

Propiedades del material de la pieza fundida

A partir de la consulta al personal experto de la fábrica “26 de Julio”, fue posible caracterizar el material, que se obtiene a partir del proceso tecnológico de fundición en alto horno realizado en la entidad, como una fundición gris laminar con matriz ferrítica. El procedimiento de caracterización se llevó a cabo mediante estudios metalográficos, en coordinación con el laboratorio de metalografía de la Universidad de Granma. En la Tabla 1 se muestran las propiedades del material.

Modelo matemático para la simulación numérica del proceso de fundición de la pieza

De acuerdo con Kwon (2021), el flujo del fluido del metal fundido y la transferencia de calor se describen a partir del balance de masa, momento y energía. Estas ecuaciones permitieron, según lo planteado por Mi et al. (2009), caracterizar la relación de la velocidad, la presión, la temperatura y la densidad del fluido del metal fundido en el límite de un volumen en un espacio dado.

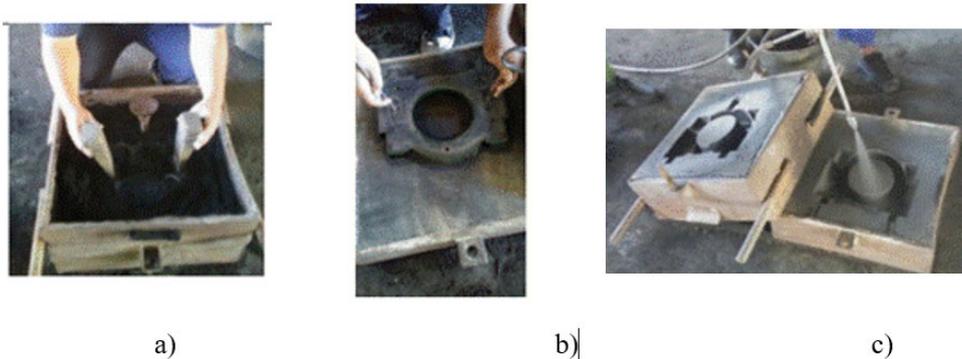


FIGURA 4. Acciones tecnológicas realizadas durante la preparación del molde de arena del cuerpo del soporte de los rodamientos de la grada 4 500 lb; a) Colocación de los elementos del sistema de alimentación; b) Extracción de la plantilla de madera; c) Aplicación de la capa de pintura en la cavidad del molde.



FIGURA 5. Mediciones de la temperatura en el molde; a) Medición de la temperatura durante el secado y precalentamiento del molde y b) Medición de la temperatura de enfriamiento de la pieza dentro del molde.

El balance de masa se describe según la [Ecuación 1](#).

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(u)}{\partial x} + \frac{\partial(pv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

donde:

t - tiempo (s), x - distancia (m), ρ - densidad (kg/m³), U - velocidad (m/s) y T - temperatura (°C).

El balance de momento se describe de acuerdo a la [Ecuación 2](#).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j U_i) = \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial \rho}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) + \rho g_i \quad (2)$$

donde:

μ - velocidad cinemática (m²/s) y g - aceleración de la gravedad (m/s²).

El balance de la energía se determina a partir de la [Ecuación 3](#).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho C_p U_j T) = \frac{\partial \rho}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + Q \quad (3)$$

donde:

C_p - calor específico (J/K), T - temperatura (°C), λ - conductividad térmica (W/(m·°K)) y Q - magnitud de la fuente de calor (°C).

Construcción del modelo CAD para el análisis numérico del proceso de fundición de metales

En la realización del proceso de simulación numérica, se modeló la pieza en un programa CAD, a partir de las especificaciones técnicas del proceso y las exigencias dimensionales de la pieza ([Figura 6a](#)). En el entorno CAD se incorporaron, a la pieza, el canal de alimentación con la ayuda de la herramienta informática Castlron FEEDSystem, desarrollada por [Reyes \(2018\)](#), y los indicadores de llenado, que a su vez cumplen la función de mazarota ([Figura 6b](#)).

En la realización del análisis por el MEF del proceso de fundición se empleó el programa Click2Cast 4.1 Release ([Solidthinking, 2017](#)). Para lograr este objetivo fue necesario importar al sistema CAE la geometría creada en el entorno CAD, mediante un formato de archivo. STL, que permite la interoperabilidad entre los archivos informáticos que utilizan la tecnología CAD.

Los parámetros de simulación se enumeran a continuación (se asumió que los valores térmicos son constantes y actúan en toda la geometría de la pieza):

- El flujo de metal fundido se asumió como un fluido incompresible.
- La temperatura de vertido fue de 1 290,7 °C (Parámetro que se determinó a partir de la realización de mediciones directas realizadas en el horno).
- El molde es de arena verde.
- La temperatura del molde fue de 307,5 °C (Parámetro determinado a partir de la realización de mediciones utilizando el pirómetro digital UNIT modelo UT305C).
- El tiempo de llenado es de 50,7 s (Parámetro determinado a partir de la medición del llenado de metal en el molde).

Generación del mallado del modelo CAD para el análisis numérico del proceso de fundición

La malla tiene como característica principal la de ser una malla mixta, pues se compone de dos tipos fundamentales de elementos: sólidos tetraédricos y

TABLA 1. Propiedades físicas de la fundición gris laminar con matriz ferrítica LG1([Solidthinking, 2017](#))

| Propiedades | Valor | Unidad de medida |
|---|---------------|-------------------|
| Línea de la fase Líquidus | 1 200 | °C |
| Línea de la fase Solidus | 1 100 | °C |
| Conductividad térmica (300 °C-1 300 °C) | 31,5 - 29,43 | W/(m·°K) |
| Densidad (300 °C - 1 300 °C) | 7 279 - 6 833 | kg/m ³ |
| Calor específico (300 °C - 1 300 °C) | 585 - 775 | J/(kg·K) |

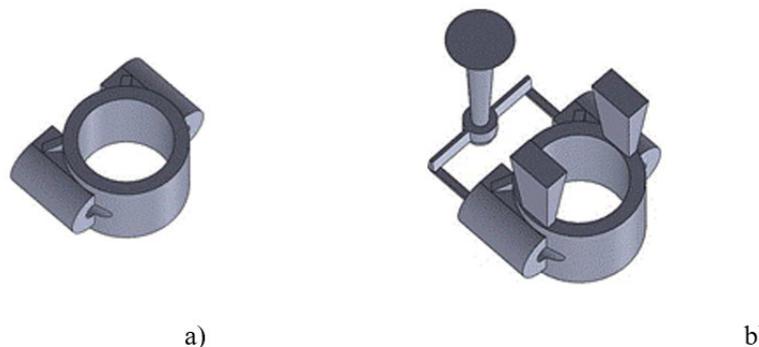


FIGURA 6. Modelo CAD del cuerpo del soporte de los rodamientos de la grada de 4 500 lb; a) Modelo CAD simplificado b) Modelo CAD con el canal de alimentación y los indicadores de llenado.

triangulares, esa característica permite un mejor ajuste a la geometría de la pieza. Las propiedades de la malla son presentadas en la [Tabla 2](#). En la [Figura 7](#) es mostrado el modelo de análisis mallado.

TABLA 2. Propiedades geométricas de la malla

| Características | Valor | Unidad de medida |
|-------------------------|--------|------------------|
| Elementos tetraédricos | 27 512 | --- |
| Elementos triangulares | 10 558 | --- |
| Nodos | 7 380 | --- |
| Tamaño de los elementos | 9 | mm |



FIGURA 7. Modelo de análisis mallado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados de la simulación numérica y de la inspección visual externa

Los resultados de la simulación numérica están dirigidos, principalmente, a la predicción del comportamiento del aire atrapado dentro de la pieza. Se puede observar que existe semejanza, en cuanto a la ubicación del aire atrapado, entre el modelo simulado y la pieza fundida ([Figura 8a](#)).

Se toman medidas del área de los defectos exteriores encontrados en la pieza, una vez retirado el sistema de alimentación y los indicadores de llenado y maquinada la zona frontal hasta retirar 1 mm de la superficie. Los defectos encontrados se clasifican en dos tipos: sopladuras (con geometría alargada) y porosidades (con una geometría circular) ([Figuras 8b](#) y [8c](#)). Estos defectos tienen su origen, principalmente,

en el deficiente llenado, por el metal fundido, y en la insuficiente evacuación de los gases en la cavidad del molde.

La simulación numérica del vertido de metal fundido permite establecer la conveniente colocación de un indicador de llenado/mazarota en la zona mostrada en la [Figura 9](#), lo cual posibilitará la correcta evacuación de los gases por esa parte del molde y consecuentemente favorecerá el llenado adecuado de la pieza.

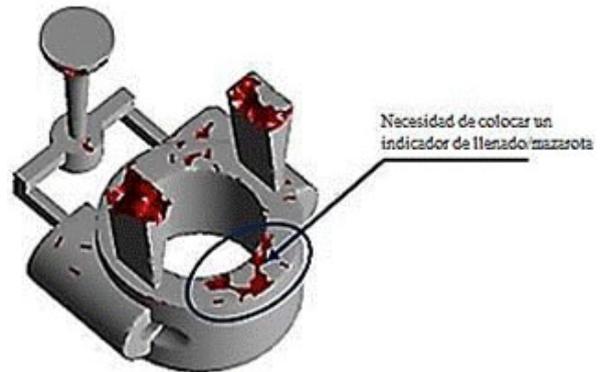


FIGURA 9. Ubicación del aire atrapado en la pieza fundida.

La posibilidad de realizar este tipo de análisis parte de las ventajas que ofrecen los programas de simulación numérica, como lo demuestran en sus investigaciones [Mi et al.\(2009\)](#); [Iqbal et al.\(2012\)](#) y [Sorate et al.\(2017\)](#), al proponer modificaciones totales o parciales en la colocación, las dimensiones y los elementos tecnológicos empleados para el llenado del molde de metal fundido.

En la [Tabla 3](#) se muestran los valores de las dimensiones de los defectos, detectados a partir de la inspección visual externa y de la simulación numérica del proceso de fundición de la pieza. Se aprecia que no existen diferencias significativas en las dimensiones, pues el error relativo entre ellas es inferior al 10%, lo cual se puede considerar adecuado.

La medición de las dimensiones de los defectos externos de la pieza fundida real fueron realizadas a partir de la fotogrametría, con lo que fue posible el

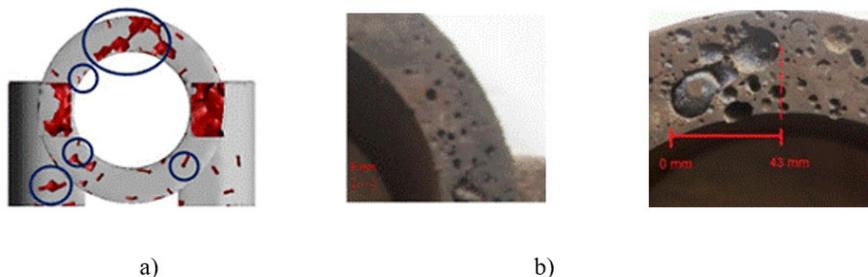


FIGURA 8. Medición del área de los defectos; a) Defectos en el modelo simulado, b) Defectos en la pieza real del tipo porosidad y c) Defectos en la pieza real del tipo sopladura.

tratamiento de imágenes digitales en un ambiente CAD; mientras que en el modelo simulado se realizan las mediciones mediante las herramientas del programa de análisis por el MEF empleado.

Resultados de la simulación numérica y de la inspección visual interna de la pieza obtenida por el proceso de fundición

Un método efectivo, como lo demuestra [Kabnure et al.\(2020\)](#), para determinar los defectos internos de las piezas fundidas es la realización de cortes de secciones en la pieza. En la [Figura 10](#) se observa que en los cortes de secciones, a lo largo del anillo circular, revelaron la existencia de otro tipo de defectos en la pieza analizada: cavidades originadas por las uniones frías, provocada por la diferencia de temperatura entre las capas del metal líquido en los niveles más internos de la geometría de la pieza.

En la [Figura 11](#) se muestra la distribución de los defectos del tipo uniones frías en el modelo de simulación numérica, aunque la mayor parte de las mismas se encuentran ubicadas en los elementos auxiliares del sistema de fundición, ciertamente, existen zonas dentro de la pieza, sobre todo en la zona más alejada de la entrada del sistema de alimentación, donde existe la presencia de este fenómeno. En esa

área ocurre la confluencia de las dos masas de fluido provenientes de cada alimentador.

Se observa, además, que hay plena correspondencia en la ubicación de los defectos entre la pieza real y el modelo de simulación numérica. La diferencia de la temperatura máxima encontrada es de 3,6967 °C, este gradiente térmico presupone la solidificación no homogénea de la pieza. El aumento de la temperatura de precalentamiento en el molde constituye una acción efectiva para disminuir el gradiente térmico entre el metal fundido y la cavidad del molde.

El análisis numérico permite determinar la posición y la magnitud de la interfaz que surge en las zonas donde existe el fenómeno de la unión fría, la cual constituye una importante categoría de defectos internos en piezas, que se obtienen mediante el proceso de fundición de metales. En este sentido [Sorate et al.\(2017\)](#), de igual manera ponderan las ventajas que presenta el análisis numérico en la detección de este tipo de defectos.

El análisis dimensional de los defectos de uniones frías detectadas en el estudio experimental y en la simulación numérica se muestra en la [Tabla 4](#). Es posible afirmar que existe una correspondencia entre los valores analizados, pues en ninguno de los casos el error relativo supera el 10%.

TABLA 3. Análisis comparativo, entre el modelo real y el simulado, de las dimensiones principales de los defectos externos ocasionados por el proceso de fundición en la pieza

| | Porosidad | Sopladura |
|-----------------|------------------------|-------------------------|
| | Área promedio | Área promedio |
| Modelo real | 11,041 mm ² | 479,362 mm ² |
| Modelo simulado | 10,210 mm ² | 457,711 mm ² |
| Error relativo | 7,526% | 4,517% |

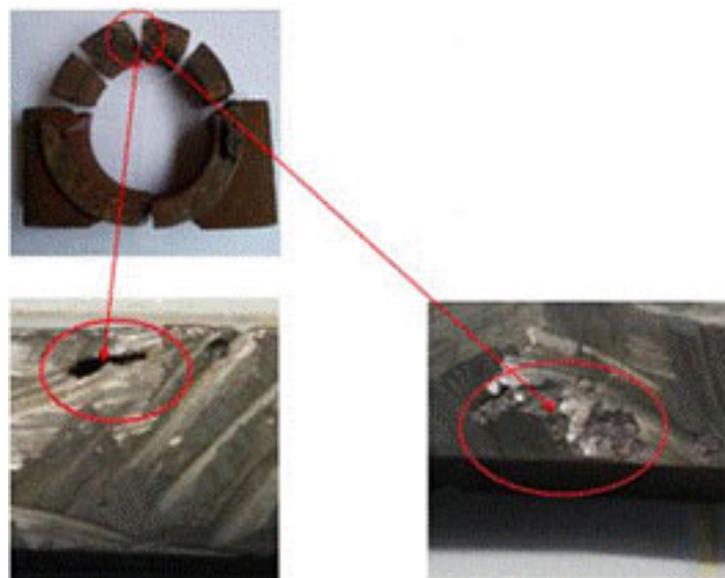


FIGURA 10. Defecto de uniones frías en el interior de la pieza; a) Pieza seccionada, b) y c) Unión fría en la zona más alejada del sistema de alimentación.

La persistencia de estos defectos en el cuerpo del soporte de los rodamientos de la grada 4 500 lb provoca la concentración de tensiones alrededor de los mismos. Teniendo en cuenta el destino de servicio, tan exigente, de la pieza es posible afirmar que su vida útil se encuentra limitada de manera significativa por los defectos asociados al proceso de fundición.

Resultados térmicos de la simulación numérica y de la experimentación

Los resultados de la medición de la temperatura de enfriamiento de la pieza dentro del molde se muestran en la [Tabla 5](#), claramente se evidencia un patrón de decrecimiento de la temperatura a medida que la medición se aleja del centro del área visible del tragadero.

El modelo de simulación numérica de la pieza se muestra en la [Figura 12](#), es posible observar que la zona de mayor valor térmico es la cara exterior del tragadero, con un valor de 1 280 °C.

El error relativo entre el valor térmico obtenido por la simulación y el valor promedio medido en la pieza

real es de 0,594%; esto significa que no existen diferencias significativas entre los resultados del modelo simulado y los de la experimentación real. Por tanto, en este parámetro térmico para la pieza propuesta existe una convergencia en los resultados.

Para validar la precisión de los resultados, en la simulación numérica, se redujo el tamaño de los elementos de la malla a la mitad y se obtuvieron los valores de la temperatura, una vez finalizado el vertido del metal fundido, con un error relativo de 4,72%, lo que indica que los resultados obtenidos son válidos y razonables, pues no sufrieron cambios significativos al reducir el tamaño de los elementos en el mallado.

CONCLUSIONES

La efectiva correspondencia de la ubicación y las dimensiones de los defectos internos, encontrados en el cuerpo del soporte de los rodamientos de la grada de 4 500 lb, permitió establecer la validación entre el modelo de simulación, por el MEF, y el modelo experimental del vertido de metal en el proceso de fundición en moldes de arena.

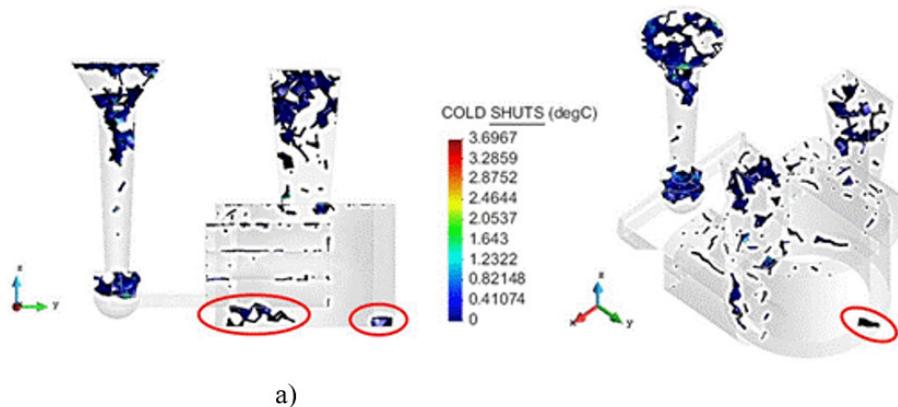


FIGURA 11. Distribución de los defectos de uniones frías en el modelo de simulación numérica; a) Vista lateral y b) Vista isométrica.

TABLA 4. Análisis comparativo entre el modelo real y el simulado de las dimensiones principales de los defectos internos ocasionados por el proceso de fundición en la pieza

| Características | Longitud promedio | Altura promedio | Área promedio |
|-----------------|-------------------|-----------------|---------------------------|
| Modelo real | 44,011 mm | 23,647 mm | 1 040,728 mm ² |
| Modelo simulado | 45,209 mm | 24,169 mm | 1 092,656 mm ² |
| Error relativo | 2,722% | 2,207% | 4,989% |

Tabla 5. Medición de la temperatura de enfriamiento de la pieza dentro del molde.

| Medición | Dato térmico | Unidad de medida |
|----------|--------------|------------------|
| 1 | 1 281,2 | °C |
| 2 | 1 279,7 | °C |
| 3 | 1 273,4 | °C |
| 4 | 1 268,3 | °C |
| 5 | 1 259,6 | °C |
| Promedio | 1 272,4 | °C |

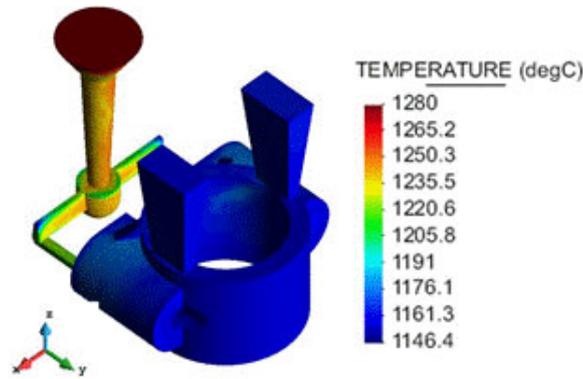


FIGURA 12. Distribución de la temperatura una vez finalizado el vertido del metal fundido.

El procedimiento de inspección utilizado, que vinculó elementos de análisis visual de la pieza obtenida y de simulación por el MEF, permitió determinar que el error relativo del área de los defectos es menor al 10% entre ambos modelos,

Los defectos internos provocados por el proceso de fundición en la pieza fueron clasificados como: sopladura, porosidad y unión fría, los mismos, de acuerdo al análisis por el MEF, se pueden minimizar al realizar modificaciones en la tecnología del proceso.

RECONOCIMIENTOS

Los autores desean agradecer la ayuda y colaboración de la Empresa de Logística Agropecuaria “26 de Julio” Granma, al Grupo de Soluciones Ingenieriles Asistidas por Computadoras (SIAC) de la Universidad de Granma y al ingeniero Erick Corrales Barrios.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULLIN, A.: “Detecting microporosity defects in steel castings by computer modeling of the casting operation in ProCAST”, *Metallurgist*, 57(3): 167-171, 2013, ISSN: 1573-8892, DOI: [10.1007/s11015-013-9707-z](https://doi.org/10.1007/s11015-013-9707-z), Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11015-013-9707-z>.

DE SOTO, J.; LIMAS, P.: *Determinación de las causas que provocan las fallas en los soportes de rodamientos de las gradas de discos producidas por la empresa “Héroes del 26 de Julio”, [en línea]*, Inst. Universidad de Holguín, Holguín, Cuba, 1-10 p., publisher: Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica ..., 2017, Disponible en: <https://eventos.uho.edu.cu/index.php/ccm/cci8/paper/view/1741/786>, [Consulta: 25 de septiembre de 2021].

GROOVER, M.P.: *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems*, Ed. John Wiley & Sons, 4.a ed, ed., Hoboken, USA, 1012 p., 2010, ISBN: 1-119-72201-2.

IQBAL, H.; SHEIKH, A.K.; AL-YOUSEF, A.; YOUNAS, M.: “Mold design optimization for sand casting of complex geometries using advance simulation tools”, *Materials and Manufacturing Processes*, 27(7): 775-785, 2012, ISSN: 1042-6914, DOI: [10.1080/10426914.2011.648250](https://doi.org/10.1080/10426914.2011.648250), Disponible en: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=buh&AN=75908786&site=ehost-live>, [Consulta: 5 de enero de 2022].

JACOB, E.; SASIKUMAR, R.; PRAVEEN, B.; GOPALAKRISHNA, V.: “Intelligent design of feeders for castings by augmenting CAD with genetic algorithms”, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 15(3): 299-305, 2004, ISSN: 1572-8145, DOI: [10.1023/B:JIMS.0000026568.93342.35](https://doi.org/10.1023/B:JIMS.0000026568.93342.35).

KABNURE, B.B.; SHINDE, V.D.; PATIL, D.C.: “Quality and yield improvement of ductile iron casting by simulation technique”, *Materials Today: Proceedings*, 27(1): 111-116, 2020, ISSN: 2214-7853, DOI: doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.022, Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785319332651?via%3Dihub>.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S.R.: *Manufactura, ingeniería y tecnología*, Ed. Pearson Educación, 5.a ed ed., México, 1295 p., 2008, ISBN: 978-970-26-1026-7.

KWON, H.-K.: “Layout Design and Die Casting Using CAE Simulation for Household Appliances”, *Applied Sciences*, 11: 3-11, 2021, DOI: doi.org/10.3390/app112110128, Disponible en: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/21/10128>.

MI, G.-F.; LIU, X.-Y.; WANG, K.-F.; FU, H.-Z.: “Application of numerical simulation technique to casting process of valve block”, *Journal of Iron and Steel Research International*, 16(4): 12-17, 2009, ISSN: 1006-706X, DOI: [doi.org/10.1016/S1006-706X\(09\)60053-4](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(09)60053-4), Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1006706X09600534>.

- MOTOYAMA, Y.; SEKIGUCHI, S.; OKANE, T.; YOSHIDA, M.: "Thermo-elasto-plastic finite element analysis of warping deformation during casting of gray cast iron", *Journal of Materials Processing Technology*, 277: 1-10, 2020, ISSN: 0924-0136, DOI: doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116454, Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013619304273>.
- NAVAS, E.; BATISTA, A.; SUCHKOV, A.: *Métodos de cálculo en fundición*, Inst. Instituto Superior Tecnológico de Holguín «Oscar Lucero Moya», Libro, primera edición, Holguín, Cuba, 251 p., 1990.
- RAJKUMAR, I.; RAJINI, N.: "Metal casting modeling software for small scale enterprises to improve efficacy and accuracy", *Materials Today: Proceedings*, 46(17): 7866-7870, 2021, ISSN: 2214-7853, DOI: doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.542, Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321016837>.
- REYES, M.K.: *Aplicación CAD para la obtención del sistema de alimentación de piezas de hierro fundido en moldes de arena y vertido por gravedad*, Universidad de Holguín, Tesis de Maestría en Diseño y Manufactura Asistidos por Computadora, Holguín, Cuba, 79 p., 2018.
- RODRÍGUEZ, M.T.; PARADA, E.A.; ORDÓÑEZ, U.: "El uso de técnicas de Simulación para la predicción de defectos en piezas fundidas.//The use of simulation techniques for the prediction of defects in casting parts.", *Ingeniería Mecánica*, 7(3): 65-69, 2004, ISSN: 1815-5944, Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/2251/225117945006.pdf>.
- SOLIDTHINKING, I.: *Click2cast" 4.1*, Barcelona, España, 2017.
- SORATE, S.S.; KANASE, P.U.; KAMBLE, B.S.; SAWANT, M.S.: "Effective use of Casting simulation for improving Bearing Housing Casting's Yield", *Int. J. Sci. Res. Sci., Eng. Technol.*, 3(2): 16-27, 2017, ISSN: 2394-4099, Disponible en: <https://www.researchgate.net/profile/Bhushan-Kamble/publication/314586385-Effective-use-of-Casting-simulation-for-improving-Bearing-Housing-Casting's-Yield/links/58c38a2da6fdcce648de666d/Effective-use-of-Casting-simulation-for-improving-Bearing-Housing-Castings-Yield.pdf>.
- STEFANESCU, D.M.: *Casting*, Ed. ASM International, 4.a ed ed., 1136 p., 1998, ISBN: 0-87170-007-7.
- SUÁREZ, L.L.; COELLO, M.N.: "Determinación de ecuación de regresión para evaluar defectos en piezas tipo rueda de acero según geometría de mazarotas y método de simulación", *Revista Cubana de Ingeniería*, 6(1): 37-42, 2015, ISSN: 2223-1781, Disponible en: <http://rci.cujae.edu.cu/index.php/rci/article/view/275/pdf>.
- SUNANDA, A.; JAGANNADHA, R.M.V.: "Simulation for prediction analysis of defects in pulley casted using sand casting process", *Materials Today: Proceedings*, 2021, ISSN: 2214-7853, DOI: doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.734, Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321008312?via%3Dihub>.

Santiago Amaury Santana-Reyes. Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Granma, Provincia Granma, Cuba, e-mail: ssantanar@udg.co.cu

Inahudis Calzada-Pompa. Profesor Instructor, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Granma, Provincia Granma, Cuba, e-mail: icalzadap@udg.co.cu

Yoandrys Morales-Tamayo. Profesor Titular, Coordinación de Investigaciones, Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Ecuador, e-mail: yoandrys.morales@utc.edu.ec

Yusimit Karina Zamora-Hernández. Profesor Auxiliar, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador, e-mail: yamorah@uteq.edu.ec

Elisney Matos García. Especialista en Mantenimiento, Departamento de Comercialización, División de Ventas de Piezas Granma, Provincia Granma, Cuba, e-mail: matoselisney@yahoo.com

AUTHOR CONTRIBUTION: **Conceptualization:** Santiago Amaury Santana-Reyes, Inahudis Calzada-Pompa. **Data curation:** Santiago Amaury Santana-Reyes, Yoandrys Morales-Tamayo, Yusimit Karina Zamora-Hernández, Elisney Matos-García. **Formal analysis:** Santiago Amaury Santana-Reyes, Yoandrys Morales-Tamayo. **Investigation:** Santiago Amaury Santana-Reyes, Inahudis Calzada-Pompa, Yusimit Karina Zamora-Hernández, Elisney Matos-García. **Methodology:** Santiago Amaury Santana-Reyes, Inahudis Calzada-Pompa, Yusimit Karina Zamora-Hernández. **Software:** Santiago Amaury Santana-Reyes, Yoandrys Morales-Tamayo, Yusimit Karina Zamora-Hernández. **Supervision:** Yoandrys Morales-Tamayo. **Validation:** Santiago Amaury Santana-Reyes, Inahudis Calzada-Pompa, Elisney Matos-García. **Roles/Writing, original draft:** Santiago Amaury Santana-Reyes, Inahudis Calzada-Pompa. **Writing, review & edition:** Yoandrys Morales-Tamayo, Yusimit Karina Zamora-Hernández.

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.