Parámetros de solidificación y enfriamiento en molde de arena de un acero bajo aleado

Solidification and cooling parameters in a sand mold for a low-alloy steel

Ariana Rodríguez Suárez* aroguez@ismm.edu.cu (1)
https://orcid.org/0000-0001-5898-2818

Antonio José Antonio.josejost@gmail.com (2)
https://orcid.org/0009-0006-1509-1293

Elís Efraín Guzmán Romero eeguzman@ismm.edu.cu (1)
https://orcid.org/0000-0003-4906-8009

Sebastião Massanga Kioxi sebastiaomassangakioxi@hotmail.com (2)
https://orcid.org/0009-0008-1440-431X

(1) Universidad de Moa, Moa, Cuba (2) Instituto Superior Politécnico de Soyo, Zaire, Angola

* Autor para la correspondencia

Resumen: El estudio tuvo como objetivo determinar los parámetros de solidificación y enfriamiento de un acero baja aleado al manganeso AISI 1552 (55Г) en molde de arena. Se empleó el método de elementos finitos para caracterizar la distribución de temperaturas y la evolución de la fracción sólida durante la solidificación. Tras la fundición y el maquinado, las piezas se examinaron mediante líquidos penetrantes, lo que evidenció agrietamiento en todo el cuerpo de las piezas y la presencia de porosidades. La simulación numérica mostró que la distribución de temperaturas permanece prácticamente constante entre 1,49 y 3,96 segundos, y que, a partir de los 36 segundos, cuando la temperatura alcanza 1164 °C, se inicia una disminución térmica desde el canal de alimentación hacia las zonas de menor espesor. La solidificación se completó aproximadamente a las seis horas de iniciado el enfriamiento. Estos resultados permiten relacionar las condiciones térmicas del proceso con la aparición de defectos, particularmente grietas y porosidades, en las piezas fundidas.

Como citar: Rodríguez Suárez, A., José, A., Guzmán Romero, E.E., & Massanga Kioxi, Z. (2026). Parámetros de solidificación y enfriamiento en molde de arena de un acero bajo aleado. *Ciencia & Futuro*, *16*, e163023. https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistacyf/article/view/3023

Palabras claves: aleaciones, análisis numérico, fundiciones, industria metalúrgica

Abstract: The study aimed to determine the solidification and cooling parameters of a low-alloy manganese steel AISI 1552 (55Г) in a sand mold. The finite element method was used to characterize the temperature distribution and the evolution of the solid fraction during solidification. After casting and machining, the parts were examined by liquid penetrant testing, which revealed cracking throughout the entire body of the parts as well as the presence of porosity. The numerical simulation showed that the temperature distribution remains practically constant between 1.49 and 3.96 seconds, and that after 36 seconds, when the temperature reaches approximately 1164 °C, a thermal decrease begins from the feeding channel toward the thinner zones. Solidification was completed approximately six hours after the onset of cooling. These results make it possible to relate the thermal conditions of the process to the appearance of defects, particularly cracks and porosity, in the cast parts.

Keywords: alloys, numerical analysis, castings, metallurgical industry

1. Introducción

La producción por fundición es la base fundamental en la elaboración de producto en la construcción de maquinarias. A pesar del desarrollo que se observa en la producción de los llamados métodos especiales de producción de piezas fundidas, tales como: fundición en coquilla, a presión, en cáscara, la forma más empleada para obtener una pieza fundida es por el método de moldes de arena-arcilla y esta parece ser la tendencia predominante (Sánchez-Carrión *et al.,* 2022; Borja-Soto *et al.,* 2023; Granado *et al.,* 2026).

El proceso de fundición de piezas requiere, fundamentalmente, dos elementos: el metal en estado líquido y un molde o matriz en el que dicho metal se deposita para solidificarse y adquirir la geometría deseada (Aristizábal *et al.,* 2009; Aguirre-Breffe *et al.,* 2019; Viada-Estevez & Fernández-Columbie, 2020; Mir-Labrada *et al.,* 2022; Mir-Labrada *et al.,* 2023). Por esta razón, al analizar el proceso es necesario referirse a estos dos elementos, sus materiales, duración y su producción, al metal líquido y a las técnicas de fusión utilizadas, tipo de hornos y mecanismos de preparación y desgasificación.

Dentro de los parámetros fundamentales del proceso de fundición se encuentra el calentamiento del metal. Según Stefanescu *et al.* (2016) y Mehta *et al.* (2018, 2021), la selección de la unidad de fusión depende del material que se va a fundir, su calidad y el volumen de producción requerido. Cada tipo de horno debe proporcionar la energía suficiente para alcanzar tanto la temperatura de fusión como la temperatura adecuada de vaciado. La energía calorífica requerida es la suma de: 1) el calor para elevar la temperatura hasta el punto de fusión, 2) calor de fusión para convertir el metal sólido a líquido y 3) el calor necesario elevar al metal fundido a la temperatura de vaciado.

Una vez calentado el metal fundido y alcanzada la temperatura de vaciado requerida -la mínima necesaria para producir una pieza sana-, el material está listo para verterse en el molde (Pina et al., 2015; Santana-Reyes *et al*., 2022). La introducción del metal fundido en el molde, así como su flujo por el sistema de vaciado y la cavidad, constituye una etapa crítica del proceso: para que el llenado tenga éxito, el metal debe fluir por todas las regiones antes de solidificarse. Los factores que afectan esta operación son la temperatura, la velocidad de vaciado y la turbulencia generada durante el llenado.

Según Ingle y Narkhede (2018) el agrietamiento en estado caliente está asociado al proceso de solidificación de las aleaciones donde se pueden producir grietas de origen térmico como consecuencia de contracciones en el metal solidificado o pastoso, así como, cuando se trata de evitar la contracción mediante moldes apropiados o machos. Estas discurren a lo largo de las cristalitas primarias solidificadas y pueden adoptar formas ramificadas. Las aleaciones con un gran intervalo de solidificación y pequeño contenido en componentes de bajo punto de fusión (eutéctico) tienen la máxima tendencia a la formación (poca capacidad de curación).

La contracción es uno de los principales defectos que pueden presentarse durante la solidificación de los materiales, especialmente en los procesos de fundición. Este fenómeno ocurre porque, generalmente, los materiales poseen una mayor densidad en estado sólido que en estado líquido (Dyja *et al.*, 2015; Borsato *et al.,* 2018; Prado-Lázaro *et al.,* 2022; Fernández Columbie *et al.,* 2024; Ramos Cardona *et al.,* 2025; Vijaykumar & Reddy, 2025).

En la tendencia a la formación de grietas térmicas, la contracción depende de la composición de la aleación, las condiciones de solidificación y el procedimiento de

colada. Las dimensiones debidas a la contracción que aparecen en la práctica deben tenerse en cuenta al fabricar el modelo y el molde. Si encuentra obstáculo hasta el punto de que las fuerzas que surgen sobrepasan a los valores de resistencia y elasticidad del material fundido, aparecen grietas por contracción. Un vaciado prematuro del molde puede contrarrestar estos defectos. La restricción del molde durante la contracción de estado sólido también puede conducir a problemas más localizados tales como desgarramiento o agrietamiento en caliente de la pieza colada (Dyja *et al.,* 2015).

El trabajo tiene como objetivo determinar los parámetros de solidificación y enfriamiento en molde de arena de un acero bajo aleado al manganeso.

2. Materiales y métodos

2.1. Composición química de la aleación

El análisis químico de la aleación se realizó en un espectrómetro de masa cuántico, ESPECTROLAB 230, con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón (Tabla 1).

Tabla 1. Composición química de la aleación (% en masa)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Fe
GOST 55 Г - AISI 1552	0,52	0,48	1,52	0,001	0,027	0,295	0,21	Balance

Según su composición química es un acero bajo aleado, clasificado por las Normas GOST como acero 55 Г y por la AISI como 1552, por los tenores de carbono y manganeso, donde este último es un elemento fuertemente gammagéno. El incremento en el contenido de manganeso se debe a que esta aleación se emplea en la fabricación de rodillos expuestos a condiciones de fricción, y el manganeso le confiere dureza bajo dichas condiciones. Uno de los principales aportes de este elemento es su capacidad de desoxidante y protección en contra de otros como el azufre y oxígeno, además de que ayuda a mejorar la templabilidad del material.

Con estas particularidades, este material reúne los requisitos para construir los rodillos del transportador. Al estar en contacto por presión, este elemento garantiza la dureza para la pieza. Se considera dentro del par tribológico llanta-rodillo, el elemento fusible.

2.2. Ensayos por líquidos penetrantes

Para detectar las discontinuidades superficiales que pudieran encontrarse en las superficies de los rodillos se empleó un juego de líquidos penetrantes de la marca ARDROX, para luz visible, removible con solvente. Se escogió un lote de rodillos (Figura 1) obtenido previamente del proceso de fundición y sometidos al ensayo. Este procedimiento fue ejecutado luego del proceso de maquinado superficial.



Figura 1. Rodillos maquinados luego de un tratamiento de recocido.

Los ensayos fueron ejecutados en la superficie de los rodillos luego de ser eliminadas de los mismos vestigios de suciedades dejadas del proceso de fundición. El proceso fue ejecutado en un tiempo de 15 minutos.

2.3. Simulación por el método de elementos finitos

En el estudio del proceso de fundición del acero 55 Г se estableció un modelo tridimensional, mostrado en la figura 2, con el fin de determinar la distribución de temperaturas y la fracción de sólido. Esta simplificación reproduce las características del objeto real, en el que las transformaciones que ocurren en estado sólido influyen sobre la dilatación térmica y el comportamiento plástico del material, afectando de este modo a los esfuerzos residuales.

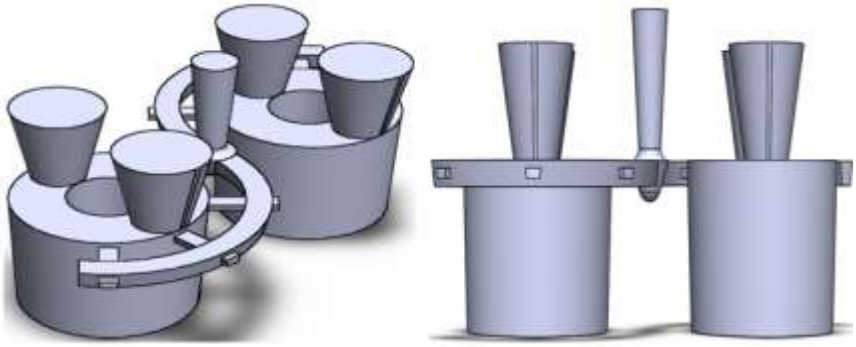


Figura 2. Modelo 3D para el proceso de fundición del rodillo.

Para la modelización con el método de los elementos finitos se empleó el *software* ProCast. El programa facilitó la simulación de los tratamientos de temperaturas al construir, a partir de los datos, un modelo numérico (malla y cargas).

2.3.1. Mallado del modelo

El tamaño de malla generada (número de nodos y elementos) dependió de la geometría y las cotas del modelo, el tamaño del elemento, la tolerancia y el control de la malla y las especificaciones de contacto. La figura 3 se corresponde con el mallado.



Figura 3. Mallado del modelo.

Se generó una malla tetraédrica con un tamaño de elemento de 4 mm de arista sobre una geometría de 10 mm. Como malla adaptativa se emplearon diez celdas de 0,2 mm en la dirección del eje *Z* (paralelo al haz) y para el resto se emplearon elementos de 2 mm de altura. Esta región, más densamente discretizada, fue desplazándose en *Z*, desde las proximidades de la superficie hasta los 1,5 mm de profundidad. El mallado se estructuró con 284 788 mallas.

2.3.2. Condiciones de frontera

Se definieron las restricciones considerando la temperatura y las condiciones de movimiento de la pieza. Estas se limitaron mediante la supresión de los desplazamientos en las direcciones X, transversal a la longitud del molde; Y, saliente del plano de los canales de alimentación; y Z, paralela a la longitud del tragadero. No se restringió el giro, condición conocida como embridar la pieza. La Figura 4 muestra las condiciones de frontera aplicadas.



Figura 4. Condiciones de frontera.

En cuanto a las condiciones de frontera, se consideró una velocidad de vertido de 0,1 m/s. Mediante el *software*, el sistema de colada se dividió en cuatro partes: dos de ellas corresponden a los canales de alimentación con el tragadero, las mazarotas y las piezas, todas ellas dispuestas en su conjunto dentro del molde. Para cada parte de la colada se definió su temperatura inicial: para el molde, la temperatura ambiente (32 °C en el taller), mientras que el metal se encontraba a 1 550 °C en la olla. Se especificó un llenado por gravedad, con un tiempo de llenado del molde de aproximadamente 14 segundos y un enfriamiento al aire.

3.1. Resultados y discusión

3.2. Resultados de los líquidos penetrantes

Se analizó un lote de rodillos fundidos con el fin de evaluar su calidad. La figura 5 presenta los resultados correspondientes a los defectos identificados.

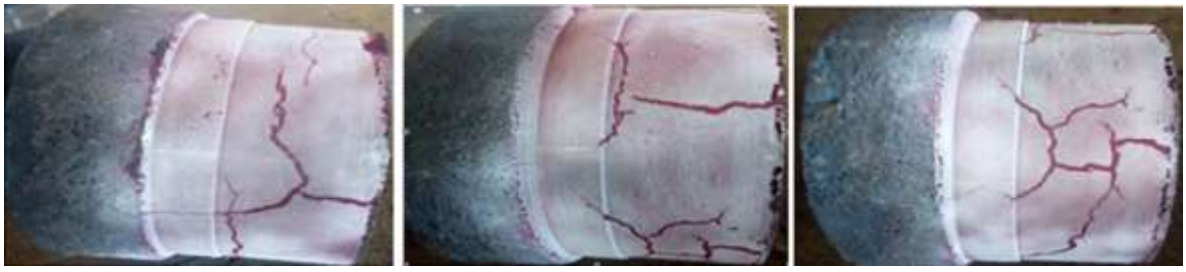


Figura 5. Defecto tipo grieta.

El defecto identificado en los rodillos corresponde a grietas. Desde la perspectiva de la solidificación del metal, estas pueden originarse por causas térmicas, como consecuencia de las contracciones que experimenta el metal, ya sea en estado sólido o pastoso, o bien cuando se intenta compensar dicha contracción mediante el uso de

moldes o machos adecuados. Las grietas han progresado a lo largo de las cristalitas primarias ya solidificadas y, en algunos sectores, han adoptado una morfología ramificada. Como resultado de este ensayo, y tal como se muestra en la figura 6, también se identificó otro defecto.



Figura 6. Defecto tipo poros.

La porosidad en piezas coladas constituye uno de los defectos más frecuentes y puede manifestarse mediante poros localizados en uno de los extremos de la pieza, así como por grietas que se originan a partir de ellos. Este se debe principalmente a dos fenómenos. El primero es la porosidad por gas, que ocurre cuando disminuye la capacidad del metal líquido para disolver gases durante la solidificación. Como consecuencia, los gases disueltos se separan de la masa metálica y quedan atrapados en forma de cavidades o poros. El segundo mecanismo es la porosidad por contracción, originada por una alimentación insuficiente de metal líquido para compensar la reducción de volumen que experimenta el material durante la solidificación y el enfriamiento. Esta deficiencia genera cavidades internas que pueden concentrarse en determinadas zonas de la pieza y favorecer la aparición de grietas.

La temperatura de desmoldeo constituye un parámetro relevante para garantizar la calidad de una pieza fundida. Si esta operación se realiza de forma prematura, la pieza, aún caliente, queda expuesta a un enfriamiento brusco por aire, lo que puede generar tensiones internas debido al enfriamiento desigual y, en consecuencia, provocar la aparición de grietas y poros (Pina *et al.,* 2015).

3.3. Distribución de la temperatura durante la solidificación

El flujo del metal fundido dentro de la cavidad del molde y que corresponde al proceso de vertido del líquido, debe estar a la temperatura para que fluya por toda esta cavidad y evitar que el metal líquido solidifique antes de tiempo. En la figura 7 se muestra el comportamiento de la temperatura.

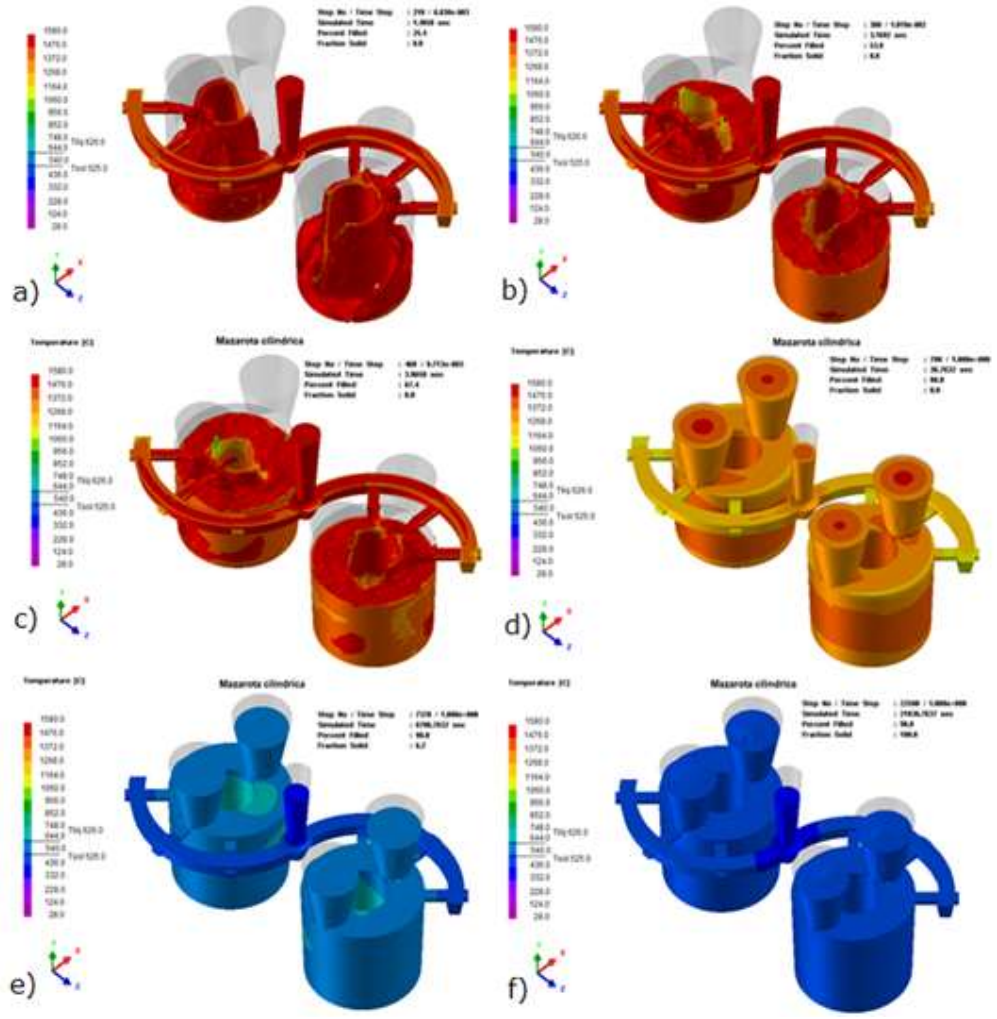


Figura 7. a). Temperatura de llenado. b). Temperatura de llenado. c). Temperatura de llenado. d). Temperatura de solidificación. e). Temperatura de solidificación. f). Pieza solidificada.

Al establecer la distribución de temperaturas durante la solidificación, se determinó que, al tratarse de un proceso isotermo, esta se mantiene prácticamente constante en el intervalo comprendido entre 1,49 y 3,96 segundos. A partir de los 36 s y a 1 164 ^{o}C, la disminución es a partir del canal de alimentación por presentar menor espesor, esto se explica porque el calor latente liberado durante la solidificación compensa la extracción desde el exterior. En la medida que desciende comienza la solidificación en la temperatura que indica la línea del liquidus (1 580 ^{o}C) y se completa al alcanzar la del solidus (ambiente) en un tiempo de 6 horas aproximadamente.

3.3.1. Comportamiento de la fracción del sólido durante el proceso de fundición

Se determinó el comportamiento de la fracción sólida durante el proceso de fundición del acero al manganeso, para lo cual se modificó la viscosidad en función de dicha fracción. Este comportamiento se presenta en la figura 8 se muestra este comportamiento.

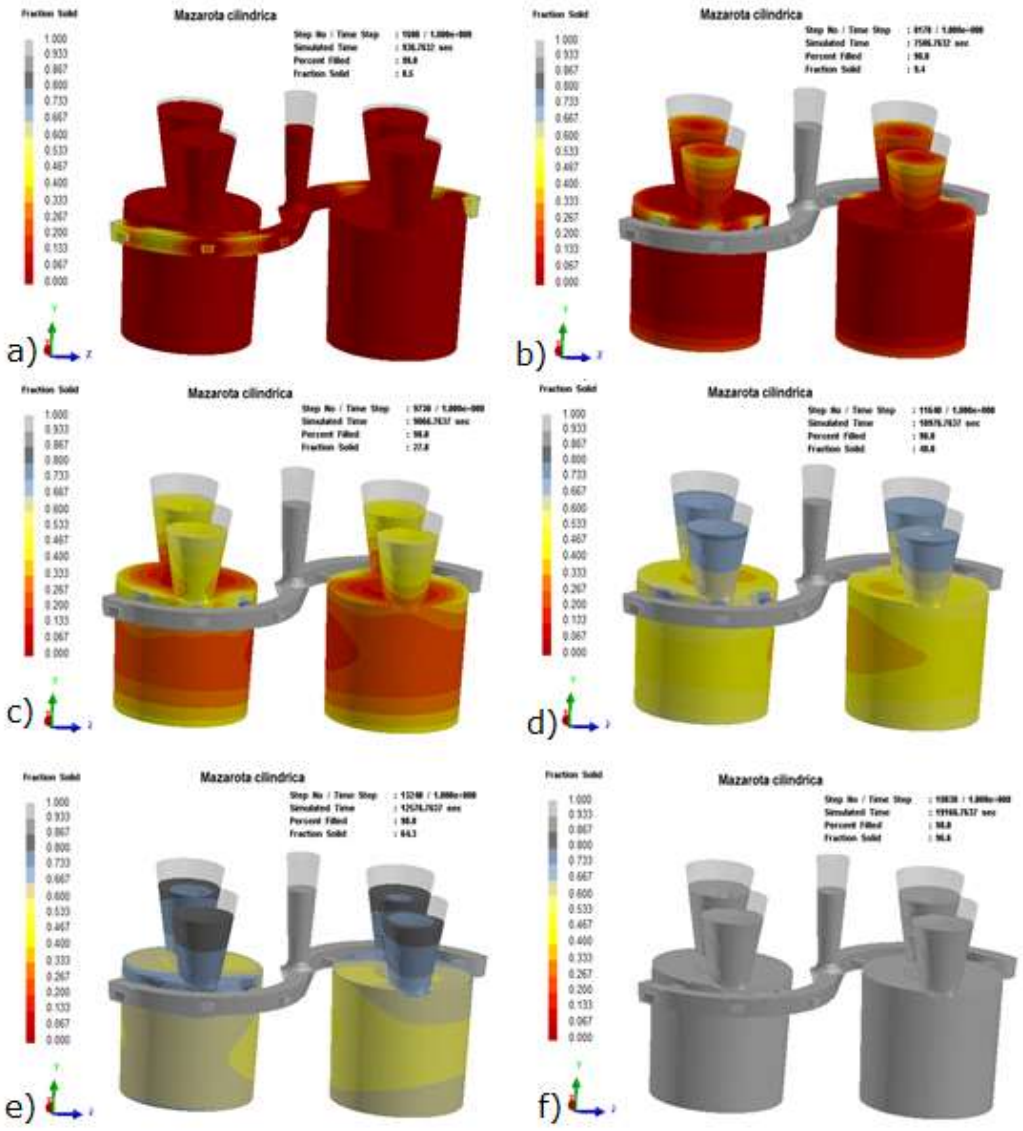


Figura 8. a). Fase líquida. b). Interfase sólido-líquido. c). Inicio de la fase sólida. d). Solidificación en los canales. e). Inicio de la solidificación. f). Final de la solidificación.

En el inicio del vertido del caldo líquido, este fluirá por las cavidades para lograr el llenado (figura 8a), en ese instante, las mazarotas (color rojo oscuro) se encargan del abastecimiento de este caldo por todos los canales. Transcurrido un período de tiempo da inicio la interfase sólido-líquido (8b), donde los espesores pequeños como los canales (gris), inicia la solidificación, pero en las mazarotas (amarillo) y el tragadero (rojo), aún queda una parte del líquido que está solidificando.

En este momento ocurre un crecimiento planar por el movimiento de la interface sólido-líquido o frente de solidificación liso o plano hacia el líquido, por nucleación heterogénea, donde al no existir subenfriamiento la temperatura del líquido más allá del frente de solidificación es mayor que la de solidificación, reportado por Borsato *et al.* (2016).

Las figuras 7c, 7d y 7e muestran una etapa donde se inicia la solidificación, en ese momento del proceso, existe en los rodillos una estructura definida, al estar solidificado, en ellos, independientemente que en una parte del molde exista a líquido (amarillo), como en la mazarota y el tragadero, sin embargo, el color obtenido (amarillo pálido) es producto del descenso de la temperatura hasta que se logra la solidez en el molde (figura 7d), obteniéndose la convergencia a la ecuación de movimiento en los tres ejes x, y, z.

Durante la solidificación de la fracción sólida se transita por tres etapas, una primera en la que el metal se encuentra líquido, dándose un contacto completo y la transferencia de calor por conducción. La siguiente ocurrió al comenzar la solidificación, en donde la superficie de la pieza comienza a solidificarse, teniendo un contacto intermitente por la formación de una película de aire discontinua. En ese momento, el calor fue transmitido por conducción sólida en las zonas de contacto, y por conducción y radiación en el aire; finalmente, el material ya solidificado continúa contrayéndose, dando origen a la formación de una película de aire en la interfase, criterio que coincide con (Dardati *et al.,* 2009; Rodríguez-Suárez *et al.,* 2018).

4. Conclusiones

Se determinó que, en los rodillos fundidos de acero 55Г, el fenómeno de agrietamiento se presenta en todo el cuerpo de las piezas. Este comportamiento indica que las grietas se originan en la superficie y avanzan progresivamente hacia el interior. Asimismo, se observaron porosidades, presumiblemente asociadas con la presencia de

gases atrapados durante la solidificación o con deficiencias en el sistema de alimentación del molde.

La fundición de los rodillos, al ser un proceso isotérmico, mantiene una distribución de temperaturas prácticamente constante durante la solidificación entre 1,49 y 3,96 segundos. A partir de los 36 segundos, cuando la temperatura alcanza 1 164 °C, se observa una disminución térmica desde el canal de alimentación hacia las zonas de menor espesor.

Según los aspectos considerados a través de los elementos finitos, la solidificación del rodillo inicia desde la temperatura que indica la línea del liquidus (1 580 °C) y se completa al alcanzar la del solidus (ambiente) en un tiempo de 6 horas aproximadamente.

Referencias bibliográficas

Aguirre-Breffe, Y., Fernández-Columbié, T., Rodríguez-González, I., Castillo-Matos, R., & Izaguirre-Bonilla, C. (2019). Microestructura del hierro fundido gris FG 24 sometido a tratamiento térmico. *Minería y Geología*, *35*(1), 100-112. https://www.redalyc.org/journal/2235/223557636014/223557636014.pdf

Aristizábal, R.E., Silva, C.M., Pérez, P.A., Stanek, V., & Katz, S. (2009). 09-104 Studies of a Quenched Cupola Part II: The Behavior of C, Si, Mn and S in the Metallic Charge. *Transactions of the American Foundrymen's Society*, *117*, 693. http://hdl.handle.net/11104/0185082

Borja-Soto, C.E., Hernández-Rojas, R.G., Zuno-Silva, J., Muñoz-Sánchez, Y., Montiel-Hernández, J.F., & Rodríguez Muñoz, J.L. (2023). Manufactura de una polea con dos ranuras en V tipo B de zamak mediante fundición en molde de arena y maquinado en torno. *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de la Escuela Superior Ciudad Sahagún*, *10*(20), 8-11. https://doi.org/10.29057/escs.v10i20.10757

Borsato, T., Berto, F., Ferro, P., & Carollo, C. (2016). Effect of in-mould inoculant composition on microstructure and fatigue behaviour of heavy section ductile iron castings. *Procedia Structural Integrity*, *2*, 3150-3157. https://dx.doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.393

Borsato, T., Ferro, P., & Berto, F. (2018). Novel method for the fatigue strength assessment of heavy sections made by ductile cast iron in presence of solidification defects. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, *41*(8), 1746-1757. https://doi.org/10.1111/ffe.12815

Cano-Figueroa, M.A., Arcos-Gutiérrez, H., Boche-Cano, E.Y., Mercado-Lemus, V.H., & Betancourt-Cantera, J.A. (2026). Evaluación del ciclo de vida de moldes modulares en líneas de fundición industrial. *Revista de Ciencias Tecnológicas*, *9*(3), 1-19. https://recit.uabc.mx/index.php/revista/article/view/472

Dardati, P., Celentano, D., Godoy, L., Chiarella, A., & Schulz, B. (2009). Analysis of ductile cast iron solidification: numerical simulation and experimental validation. International *Journal of Cast Metals Research*, *22*(5), 390-400. https://doi.org/10.1179/174313309X436646

Dyja, R., Gawronska, E., & Sczygiol, N. (2015). The effect of mechanical interactions between the casting and the mold on the conditions of heat dissipation: a numerical model. *Archives of Metallurgy and Materials, 60*(3), 1901-1910. https://doi.org/10.1515/amm-2015-0324

Fernández-Columbié, T., Suárez-Torres, L., & Rodríguez-González, I. (2024). Determinación de componentes metalúrgicos de la aleación HK 40 en dientes de barrido luego del proceso de fundición. *Ingeniería Mecánica*, *27*(1), 35-42. https://www.redalyc.org/journal/2251/225180438005/225180438005.pdf

Granado, J., Morales, M. C., Mollinedo, P.J., & Domínguez, E.R. (2026). Experimental mixture design for molding casting in a ferrous foundry. *Centro Azúcar Journal*, *53*, e1153. http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/886

Ingle, P. & Narkhede, B. (2018). A literature survey of methods to study and analyze the gating system design for its effect on casting quality. *Materials Today: Proceedings, 5*(2), 5421-5429. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.129

Mehta, D., Gohil, A., & Doshi, S. (2018). Innovative Support System for Casting Defect Analysis-A Need of Time. *Materials Today: Proceedings*, *5*(2), 4156-4161. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.677

Mehta, N., Gohil, A.V., Dave, K.G., & Patel, V.B. (2021). Development of casting defect analysis module through integrated approach for small and medium scale industries. *Materials Today: Proceedings*, *38*, 2935-2942. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.244

Mir-Labrada, V.M., García-Hernández, T., Parada-Expósito, A., Arzola-Ruiz, J., Monzon-Yepe, D., & Cuesta-Figueroa, Y. (2023). Diseño y fabricación de un molde metálico para fundición de aluminio. *Ingeniería Mecánica*, *26*(1), 25-32. https://www.redalyc.org/journal/2251/225180425004/225180425004.pdf

Mir-Labrada, V.M., García-Hernández, T., Parada Expósito, A., Saucedo-Zendejo, F.R., Menéndez-Pérez, A., & Diaz Romero, A. (2022). Análisis del sistema de alimentación de un molde permanente para pistón de aluminio fundido. *Ingeniería Mecánica*, *25*(1), 8-16. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8314363

Pina, J.C., Kouznetsova, V.G., & Geers, M.G.D. (2015). Thermo-mechanical analyses of heterogeneous materials with a strongly anisotropic phase: the case of cast iron. *International Journal of Solids and Structures*, *63*, 153-166. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2015.02.048

Prado-Lázaro, J.M., Ramos-Banderas, J.Á., Aguilera-Navarrete, I., Verduzco-Martínez, J.A., & Ochoa-Palacios, R.M. (2022). Microalambres de una aleación Zn22Al4Ag obtenidos mediante el proceso de solidificación rápida por tambor rotativo. *DYNA-Ingeniería e Industria*, *97*(1), 53. https://doi.org/10.6036/10

Ramos Cardona, E., Calderón Ramos, I., Servín Castañeda, R., & Ríos Hurtado, J.C. (2025). Revisión del comportamiento termo fluidodinámico del acero líquido en un molde de colada continua. *Cienciacierta*, *21*(83), 168-185. https://revistas.uadec.mx/CienciaCierta/article/view/263.

Rodríguez-Suárez, A., Fernández-Columbié, T., & Rodríguez-González, I. (2018). Solidificación y microestructura de un acero al manganeso obtenido por fundición. *Minería y Geología*, *34*(4), 494-503. https://www.redalyc.org/journal/2235/223556748009/223556748009.pdf

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

Santana-Reyes, S.A., Calzada-Pompa, I., Morales-Tamayo, Y., Zamora-Hernández, Y.K., & Matos García, E. (2022). Análisis numérico y validación experimental del vertido de metal fundido en molde de arena. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, *31*(3), e08. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=0083449

Stefanescu, D.M., Alonso, G., Larranaga, P., De la Fuente, E., & Suárez, R. (2016). On the crystallization of graphite from liquid iron–carbon–silicon melts. *Acta Materialia*, *107*, 102-126. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.01.047

Viada-Estévez, A., & Fernández–Columbié, T.H. (2020). Comportamiento de la microestructura de uniones de hierro fundido con diferentes materiales de aporte. *Minería y Geología*, *36*(1), 92-105. http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/art7_No1_2020

Vijaykumar, H. K., & Reddy, N.R. (2025). Review on applications of machine learning for defect prediction and optimization in foundry processes. *Manufacturing Technology Today*, *24*(1-2), 1–11. https://doi.org/10.58368/MTT.24.1-2.2025.1-1

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no poseen intereses financieros ni relaciones personales que puedan haber influido en los resultados presentados en este artículo.

Contribución de autoría según taxonomía CRediT

Ariana Rodríguez Suárez: Conceptualización/Investigación/Redacción-borrador original
Antonio José: Investigación/Curación de contenidos y datos/Software
Elís Efraín Guzmán Romero: Metodología/Supervisión/Análisis formal de los datos
Sebastião Massanga Kioxi: Visualización/Redacción – revisión y edición