

## Proceso de solidificación de aluminio empleando tres diferentes tipos de moldes Aluminum solidification process using three different types of molds

R. E. Ruíz Zurita <sup>a</sup>, J. L. Rodríguez Muñoz <sup>a\*</sup>, J. S. Pacheco Cedeño <sup>a</sup>, J. Zuno Silva <sup>a</sup>, C. E. Borja Soto <sup>a</sup>,  
V. Rodríguez Lugo <sup>b</sup>

<sup>a</sup>Licenciatura en Ingeniería Mecánica, Escuela Superior de Ciudad Sahagún, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Ciudad Sahagún, Carretera Cd. Sahagún-Otumba s/n, Zona Industrial, CP 43998 Hidalgo, México.

<sup>b</sup>Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca-Tulancingo Km 4.5, Pachuca de Soto, Hidalgo 42184, México.

### Resumen

El presente trabajo se enfoca en un estudio experimental del proceso de solidificación de aluminio empleando tres diferentes tipos de moldes (molde de pared gruesa, molde de pared delgada y molde de arena), con el objetivo de evaluar el comportamiento térmico durante el proceso de solidificación, comparar el tamaño de grano de la microestructura obtenida, detectar la porosidad generada, así como evaluar la dureza del material. Para la medición de temperatura en tiempo real se empleó una tarjeta de adquisición de datos DAQ en cada uno de los tres moldes, mediante el uso de termopares tipos K, los ensayos de dureza se efectuaron con un Durómetro Rockwell modelo 713 SDR, mientras para la detección de porosidades y el tamaño de grano se utilizó un microscopio óptico. Los resultados de las micrografías obtenidas muestran que el tamaño de grano ( $\approx 40\mu\text{m}$ ) y de las porosidades son más pequeñas en la probeta solidificada en el molde metálico de pared gruesa, mientras que la probeta solidificada en el molde de arena presenta un grado mayor de porosidad, así como el tamaño de grano más grande ( $\approx 105\mu\text{m}$ ), lo cual se atribuye principalmente a la velocidad de solidificación, la retención de gases y la permeabilidad del molde. Los moldes de pared gruesa y delgada, al enfriar más rápido y ser menos permeables, reducen estos defectos, logrando una estructura más densa y homogénea. También, se pudo obtener el comportamiento de las temperaturas de cada molde en distintos puntos de estos durante el proceso de solidificación con la finalidad de comprender cómo se distribuye el calor en los moldes mientras el aluminio se solidifica. Con base a los ensayos de dureza, se pudo determinar que los valores de dureza en el molde de arena son un 18% más bajos que los valores de dureza del molde de pared delgada y 9% más bajos en comparación con el molde de pared gruesa.

**Palabras Clave:** Solidificación, moldes, caracterización, térmica, microestructural.

### Abstract

This work focuses on an experimental study of the aluminum solidification process using three different types of molds (thick-walled mold, thin-walled mold, and sand mold), with the objectives of evaluating the thermal behavior during the solidification process, comparing the grain size of the obtained microstructure, detecting the generated porosity, as well as assess the hardness of the material. For real-time temperature measurement, a DAQ data acquisition card was used in each of the three molds, using K-type thermocouples. Hardness tests were carried out with a Rockwell model 713 SDR hardness tester, while an optical microscope was used to detect porosities and grain size. The results of the micrographs obtained show that the grain size ( $\approx 40\mu\text{m}$ ) and porosities are smaller in the specimen solidified in the thick-walled metal mold. In contrast, the specimen solidified in the sand mold has a higher degree of porosity, as well as the largest grain size ( $\approx 105\mu\text{m}$ ), which is mainly attributed to the solidification rate, gas retention, and mold permeability. Thick- and thin-walled molds, by cooling faster and being less permeable, reduce these defects, achieving a denser and more homogeneous structure. Also, the temperature behavior of each mold at different points during the solidification process could be obtained to understand how heat is distributed in the mold while the aluminum solidifies. Based on the hardness tests, it was determined that the hardness values in the sand mold are 18% lower than the hardness values of the thin-walled mold and 9% lower compared to the thick-walled mold.

**Keywords:** Solidification, molds, characterization, thermal, microstructural.

\*Autor para la correspondencia: jose\_rodriguez@uaeh.edu.mx

**Correo electrónico:** ru464457@uaeh.edu.mx (Roberto Enrique Ruiz Zurita), jose\_rodriguez@uaeh.edu.mx (José Luis Rodríguez Muñoz), sergio\_pacheco@uaeh.edu.mx (José Sergio Pacheco Cedeño), Jorge\_zuno@uaeh.edu.mx (Jorge Zuno Silva), carlos\_borja@uaeh.edu.mx (Carlos Ernesto Borja Soto), ventura.rl65@gmail.com (Ventura Rodríguez Lugo).

**Historial del manuscrito:** recibido el 10/04/2025, última versión-revisada recibida el 02/07/2025, aceptado el 25/07/2025, publicado el 15/09/2025. DOI: <https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial2.14918>



## 1. Introducción

La solidificación se define como el proceso en el cual el estado líquido del material pasa a su estado sólido, es decir que este proceso tiene como objetivo obtener un sólido cristalino en base al estado líquido del material. La solidificación es una transformación en la que un líquido que no tiene estructura cristalina pasa a un sólido con estructura cristalina. Dentro de los procesos que incluyen la solidificación están los procesos de colada, ya sea en moldes, lingoteras o por colada continua (Díaz, 2016).

En la solidificación de un material existe una etapa llamada nucleación (formación de núcleos en el metal líquido), el cual puede ser homogénea o heterogénea (Díaz, 2016). Güemes Gordo y Martín Piris (2012) destacan que la nucleación homogénea se considera en primer lugar porque es el caso más simple de nucleación. La nucleación homogénea tiene lugar en el líquido fundido cuando el metal proporciona por sí mismo los átomos que se requieren para formar los núcleos. Cuando un metal líquido puro se enfría lo suficiente por debajo de su temperatura de equilibrio de solidificación, se crean numerosos núcleos homogéneos mediante el movimiento lento de los átomos que se unen entre sí. La nucleación homogénea suele requerir de un nivel alto de subenfriamiento que puede llegar a ser de varios cientos de grados centígrados para algunos metales. Güemes Gordo y Martín Piris (2012) también señalan que la nucleación heterogénea es la que tiene lugar en un líquido sobre la superficie del recipiente que lo contiene, las impurezas insolubles u otros materiales estructurales disminuyen la energía libre necesaria para formar un núcleo estable. Dado que en las operaciones de fundición industrial no se producen grandes subenfriamientos, y que normalmente varían entre 0.1 y 10°C, la nucleación es heterogénea y no homogénea. Para que ocurra la nucleación heterogénea, el agente de nucleación sólido (impureza sólida o recipiente) debe ser mojado por el metal líquido. También el líquido debe solidificarse fácilmente en el agente de nucleación.

A nivel industrial existen diferentes tipos de moldes para el proceso de solidificación, tal es el caso del molde de arena, molde permanente, moldes de inversión, moldes de yeso y moldes de inyección 3D, los cuales tienen un papel importante para crear una forma específica con el material fundido al enfriarse. En el proceso de fundición en moldes de arena, los moldes son obtenidos por la compactación de arena sílice, la cual es previamente mezclada con un aglutinante. La cavidad del molde es generada por una pieza denominada “modelo”, la cual es previamente diseñada y tiene dimensiones aproximadas a la pieza que se desea obtener en el molde. El modelo debe ser diseñado tomando en cuenta factores tales como la contracción volumétrica del material, ángulos en la superficie (ángulos de salida) que permitan una fácil extracción del modelo y evitar que parte de la arena se derrumbe (Borja-Soto et al., 2020). En este sentido, Uruchi (2014) realizó la fabricación de una pieza de aluminio utilizando un molde en arena verde, así como la fundición y colada del aluminio. Este método permite analizar como el metal cambia de forma, conservando sus propiedades físicas y mecánicas, además de asegurar que la pieza final sea una réplica fiel del molde. Borja-Soto et al. (2023) fabricaron una polea de Zamak con dos ranuras en V tipo B haciendo uso de la fundición en un molde

de arena para posteriormente maquetarlo en un torno. Por su parte, Oviedo y Vinuesa (2012) llevaron a cabo el diseño y fabricación de un molde permanente con el objetivo de producir mancuernas de aluminio. Para ello, utilizaron el análisis de elementos finitos (FEM), lo que les permitió predecir con precisión el comportamiento del material durante el proceso de solidificación y los cambios térmicos que experimentarían. Al comparar los resultados de la simulación con pruebas reales, encontraron una alta coincidencia, lo que confirma que esta metodología es una herramienta efectiva para el estudio y optimización de moldes permanentes. González y Rico (2013) analizaron el proceso de enfriamiento en una aleación de zinc y aluminio (Zn-10Al) antes y después de recubrirlo con acero SAE 1020 mediante inmersión en caliente. Para ello, se estudiaron muestras de la aleación con microscopía electrónica de barrido (MEB) y espectroscopia de energía dispersiva (EDS), evaluando su estructura y composición química, concluyendo que la disolución del hierro en el baño líquido, tras la inmersión del acero, evita la formación de compuestos Zn-Fe en la interfaz entre el acero y el recubrimiento. Esto significa que la presencia de hierro disuelto juega un papel clave en la estructura microscópica del recubrimiento y, en consecuencia, en sus propiedades finales. Ruiz Marín, 2017 diseñó e implementó un equipo para realizar recubrimientos por inmersión. Básicamente, el proceso consiste en sumergir y luego extraer el material que se quiere recubrir dentro de un solvente, controlando cuidadosamente la velocidad, obteniéndose el grosor y la textura deseados. Velasco Santes et al., 1998 realizaron un estudio sobre la solidificación de una aleación de aluminio utilizada en construcción y fabricación de componentes automotrices. El sistema fue instrumentado para registrar la evolución térmica del material y los resultados mostraron que la aleación solidificó de manera unidireccional. Además, se realizó el modelado del flujo de calor en la placa, lo cual les permitió determinar que los coeficientes de transferencia de calor entre el lingote y la placa dependen de los mecanismos y la cinética de solidificación del aluminio.

Fuentes Orozco, 2019 analizó cómo la solidificación de lingotes de aluminio de alta pureza y aleaciones de aluminio-cobre fundidos de manera artesanal, se relacionan con sus propiedades de dureza. Así mismo, buscó identificar las diferencias de dureza entre lingotes de distintas composiciones químicas, pero colocados bajo las mismas condiciones térmicas. Este estudio confirmó que las propiedades mecánicas, especialmente la dureza, dependen mucho del proceso de solidificación de aluminio durante el proceso de colada. Además, se pudo determinar que la cantidad de soluto en las muestras influye directamente en la estructura del material, actuando como un afinador de grano y generando diferencias notables en la dureza. Por otra parte, los autores pudieron comprobar que las temperaturas más altas y los sobrecalentamientos hacen que los granos crezcan más, lo que resulta en una menor dureza. En resumen, los resultados mostraron que pequeños cambios en el proceso y en la composición del material pueden marcar una gran diferencia en el rendimiento y las propiedades finales de las piezas analizadas. Méndez, Delvasto, & Quintero Sayago, 2007 diseñaron moldes cerámicos para realizar ensayos de solidificación direccional de aleaciones de aluminio, teniendo

como objetivo asegurar un buen aislamiento térmico. Así mismo, investigaron seis mezclas de arena de sílice, bentonita, caolín y feldespato, seleccionando la mezcla con 60% sílice, 16% bentonita, 16% caolín y 8% feldespato por su resistencia y facilidad de manejo. Además, realizaron un proceso de secado y sinterizado en seis etapas térmicas. Por último, validaron la efectividad de los moldes mediante el vaciado de una aleación de aluminio, demostrando que cumplen con los requisitos del proceso.

Como se describió en la literatura, el proceso de solidificación ocurre cuando el metal fundido se enfría y pasa a estado sólido. Para el caso del aluminio, el proceso comienza a partir de una temperatura aproximada de 660°C, durante este cambio, los átomos de aluminio se reorganizan y forman una estructura cristalina, dando lugar a pequeños granos metálicos, por lo cual, es importante conocer el efecto que produce el método de solidificación sobre su microestructura y en sus propiedades mecánicas, específicamente en la dureza del material. Por tal motivo, el presente trabajo tiene como objetivo estudiar de manera experimental el proceso de solidificación del aluminio en tres distintos tipos de moldes: 1) Molde metálico de pared gruesa, que debido a la conductividad térmica del acero y la masa del molde podría presentar la mayor velocidad de solidificación, 2) Molde metálico de pared delgada, este podría tener un valor intermedio en la velocidad de solidificación y 3) Molde de arena, que debido a la conductividad térmica de la arena presentaría la velocidad de solidificación más baja de los tres moldes, esto con la finalidad de evaluar el efecto de la velocidad de solidificación, ya que esta puede influir en la microestructura final de la probeta y por consiguiente en sus propiedades mecánicas (dureza).

## 2. Métodos y Materiales

### 2.1 Fundición del metal

En la Figura 1, se muestra el horno utilizado para el proceso de fundición del aluminio, el cual cuenta con un ventilador de tiro forzado, tanque de gas LP, quemador, válvulas y mangueras que permiten el flujo y control del combustible, un crisol de acero con capacidad de 5 kg, así como una tapa para liberar los gases de combustión y evitar la pérdida de calor.



Figura 1. Horno de fundición a Gas LP. Fuente: Elaboración propia.

### 2.2 Moldes para solidificación de aluminio

Para el vaciado y la solidificación de las probetas de aluminio, se utilizaron tres tipos de molde: molde metálico de pared gruesa, molde metálico de pared delgada y molde de arena, con los cuales se obtuvieron diferente velocidad de solidificación.

#### 2.2.1 Molde de pared gruesa

En la Figura 2 se muestra la representación del molde de pared gruesa, el cual está fabricado en acero AISI-1018. El molde es cilíndrico y bipartido con diámetro exterior de 10 cm y altura de 14.5. La cavidad para generar la probeta de aluminio es un cilindro de 3.5 cm de diámetro y altura de 12 cm, con estas dimensiones del molde y la cavidad, el espesor del molde es de 3.25 cm.

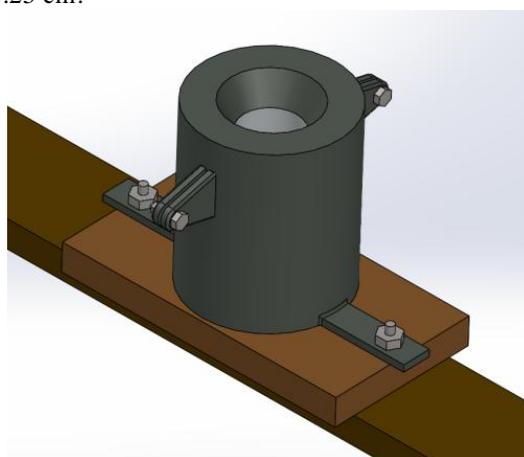


Figura 2. Molde de pared gruesa. Fuente: Elaboración propia.

#### 2.2.2 Molde de pared delgada

En la Figura 3 se observa una representación del molde de pared delgada, fabricado con un tubo de acero ASTM-A36 de diámetro interno de 3.6 cm, 12 cm de altura y espesor de pared de 0.30 cm.

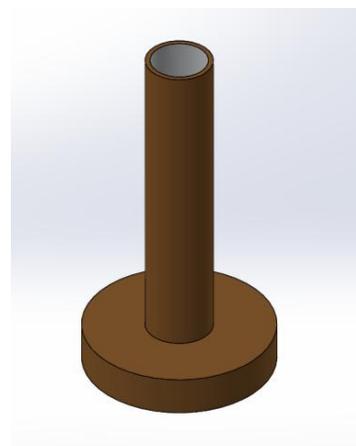


Figura 3. Molde de pared delgada. Fuente: Elaboración propia.

### 2.2.3 Molde de arena

En la Figura 4 se observa la representación del molde de arena. La caja de molde está hecha de madera de 2 cm de espesor y forma cuadradas, cuyos lados miden 24 cm cada uno y tiene una altura de 7.5 cm. La cavidad del molde es cilíndrica para una probeta con dimensiones de 3.6 cm de diámetro y 12 cm de altura.

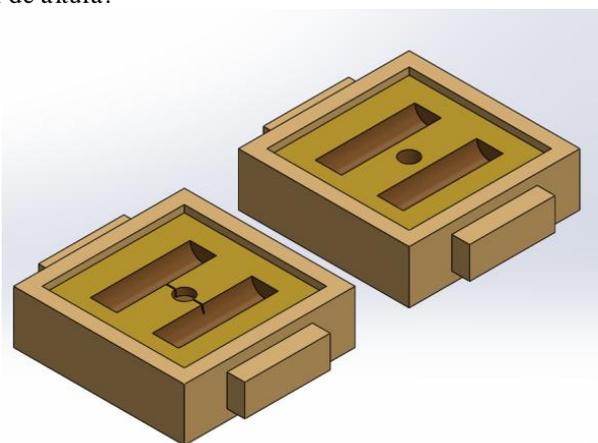


Figura 4. Molde de arena. Fuente: Elaboración propia.

ambiente que se presenta durante el proceso de solidificación,  $T_2$  para medir la temperatura externa del molde,  $T_3$  para medir la temperatura interna del molde, mientras,  $T_4$  y  $T_5$  se utilizaron para medir la temperatura en la cara de la pieza, así como el centro de la pieza de aluminio durante la solidificación, respectivamente.

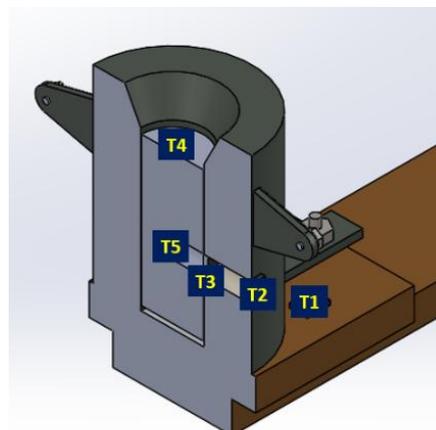


Figura 6. Vista general de la ubicación de los termopares en el molde pared gruesa. Fuente: Elaboración propia.

### 2.3.2 Instrumentación del molde de pared delgada.

Para el molde de pared delgada también se utilizaron cinco termopares durante el proceso de solidificación y se colocaron como se muestra en la Figura 7. Donde  $T_1$  es empleado para medir la temperatura ambiente,  $T_2$  usado para medir la temperatura externa del molde,  $T_3$  mide la temperatura interna del molde de pared delgada,  $T_4$  se emplea para medir la temperatura en la cara de la pieza de aluminio solidificada mientras  $T_5$  permite medir la temperatura en el centro de la pieza de aluminio.

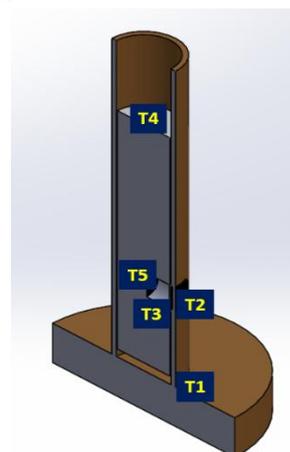


Figura 7. Ubicación general de los termopares en el molde de pared delgada. Fuente: Elaboración propia.

### 2.3.3. Instrumentación del molde de arena.

La ubicación de los termopares para medir la temperatura en el molde de arena durante el proceso de solidificación se muestra en la Figura 8.  $T_1$  es el termopar usado para medir la temperatura en la parte exterior del molde,  $T_2$  el termopar

### 2.3 Adquisición de datos térmicos

Para obtener la historia térmica del proceso de solidificación, se utilizó una tarjeta de adquisición de datos DAQ de National Instruments, modelo NI 9213 con 16 canales diferenciales, a una velocidad de adquisición de 10 datos/s.

En la Figura 5 se muestra el esquema de conexión de la tarjeta DAQ, termopares y el molde para la adquisición de datos térmicos. En donde, el equipo de cómputo recibe los datos procesados por la DAQ, cuya información térmica proviene de los termopares instalados en el molde y, que permite analizar la evolución durante el proceso de enfriamiento y la solidificación del aluminio dentro del molde.



Figura 5. Esquema de adquisición de datos para los valores de las temperaturas en los moldes de solidificación. Fuente: Elaboración propia.

### 2.3.1 Instrumentación del molde de pared gruesa.

Para el molde de pared gruesa, se colocaron cinco termopares como se muestra en la Figura 6, donde,  $T_1$  mide la temperatura

utilizado para medir la temperatura interna del molde,  $T_3$  el termopar usado para medir la temperatura en la cara de la pieza de aluminio solidificada en el molde, mientras  $T_4$  representa la ubicación del termopar para medir la temperatura en el centro de la cavidad del molde.

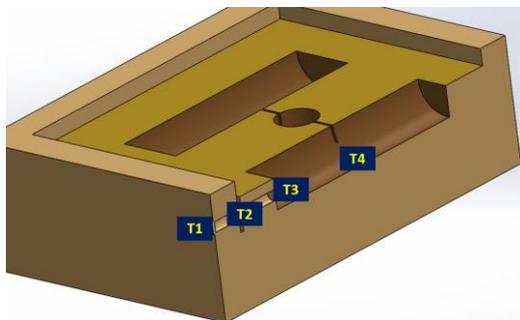


Figura 8. Ubicación general de los termopares en el molde de arena. Fuente: Elaboración propia.

### 2.4 Caracterización microestructural

Las probetas obtenidas de los tres moldes fueron seccionadas transversalmente para obtener las muestras para caracterizar la microestructura, así como para realizar el ensayo de dureza. En la Figura 9 se muestra la zona de donde se obtuvieron las muestras.

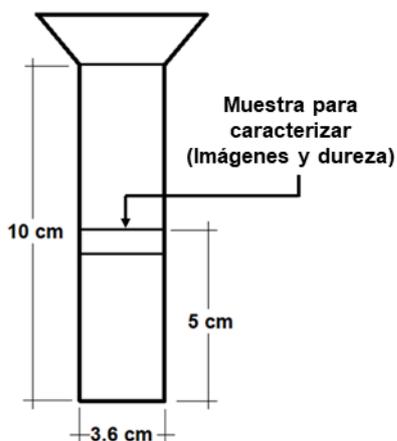


Figura 9. Esquema del seccionamiento de las probetas obtenidas para la caracterización de la superficie. Fuente: Elaboración propia.

Para revelar la microestructura de las muestras obtenidas, fueron preparadas metalográficamente mediante desbaste con papel abrasivo de SiC (#80 - #2000), seguido del pulido con alúmina de  $0.3 \mu\text{m}$  en una pulidora manual marca Presi modelo Minitech 233. Después de la preparación metalográfica de las tres muestras, se adquirieron imágenes de la microestructura con un microscopio óptico marca Nikon modelo Eclipse MA 100.

### 2.5 Ensayo de dureza

La dureza de las muestras de cada una de las probetas solidificadas en los distintos moldes, se obtuvo del promedio de nueve mediciones distribuidas (Figura 10) sobre la superficie de la muestra mediante un durómetro marca HAYTOM, SL

modelo 713 SDR. Para el ensayo de dureza, se utilizó la escala Rockwell B con penetrador de esfera de acero de  $1/16''$  de diámetro y carga de 100 kg.

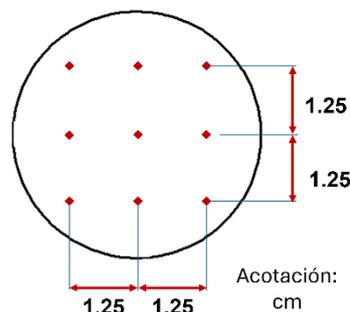


Figura 10. Distribución de los ensayos de dureza. Fuente: Elaboración propia.

## 3 Resultados

### 3.1 Comportamiento térmico durante el proceso de solidificación en molde de pared gruesa.

En la Figura 11 se muestra la evolución térmica de la probeta y el molde de pared gruesa, y como se puede observar, la temperatura en el centro de la probeta ( $T_5$ ) alcanza un valor máximo de  $782.62 \text{ }^\circ\text{C}$ . Después de esta temperatura, se observa una disminución rápida en la temperatura debido a que el calor fluye a través del molde. También puede observarse que el comportamiento térmico en la superficie de la probeta ( $T_4$ ) muestra una temperatura máxima de  $320.48 \text{ }^\circ\text{C}$ , esta diferencia significativa en temperatura entre la superficie y el centro de la probeta se debe a la masa térmica del molde y que se traduce en la solidificación instantánea del aluminio que entra en contacto con la pared del molde y que se debe a la capacidad de absorción de calor. Por otra parte, la temperatura en el molde metálico de pared gruesa ( $T_2$  y  $T_3$ ) no se incrementa por arriba de  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ , este comportamiento refleja la eficiencia del molde para absorber el calor del aluminio fundido y su disipación al medio ambiente. De acuerdo con los datos térmicos que se muestran en la Figura 11 y considerando una temperatura de  $540 \text{ }^\circ\text{C}$ , en la cual el aluminio ya se ha solidificado, la velocidad de solidificación con el molde de pared gruesa es de  $28.31 \text{ }^\circ\text{C/s}$ .

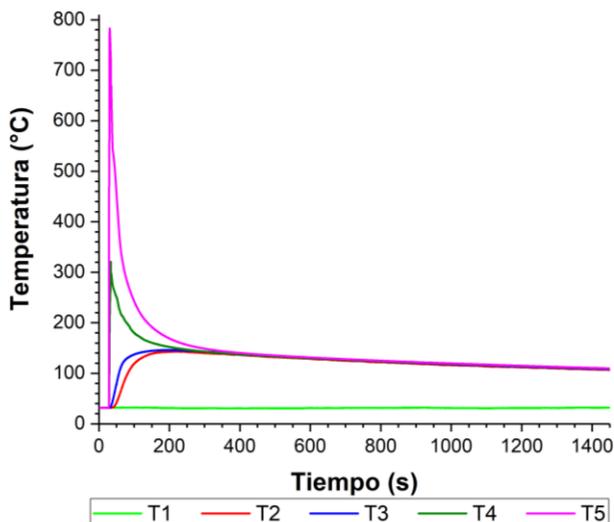


Figura 11. Comportamiento de las temperaturas en el molde de pared gruesa. Fuente: Elaboración propia.

### 3.2 Comportamiento térmico durante el proceso de solidificación en molde de pared delgada.

En la Figura 12 se muestra la historia térmica durante el proceso de solidificación en el molde de pared delgada. Y como se puede observar, la temperatura alcanzada en el centro de la probeta (T<sub>2</sub>) fue de 767.03 °C, la cual tardó 110 segundos para llegar a los 540 °C y considerar que está completamente solidificada. Con estos datos, la velocidad de solidificación en el molde metálico de pared delgada fue de 2.03 °C/s y que, al compararla con la velocidad del molde metálico de pared gruesa, esta se redujo un 92.83%, lo cual puede verse reflejado en la microestructura y en la dureza. Por otro lado, la temperatura en la superficie de la probeta (T<sub>3</sub>) alcanzó un máximo de 636.54 °C, la cual descendió rápidamente debido al contacto con la pared del molde y de esta manera iniciar la solidificación. Sin embargo, en este molde la temperatura en la superficie de la probeta es 316 °C mayor con respecto a la observada en el molde de pared gruesa, y esto se puede atribuir a que el molde de pared delgada tiene menos masa lo que se traduce en una menor capacidad de absorción y por consecuencia una velocidad de solidificación menor debido a que por la mínima diferencia de temperatura entre la pared del molde y la probeta, el flujo de calor se ralentiza.

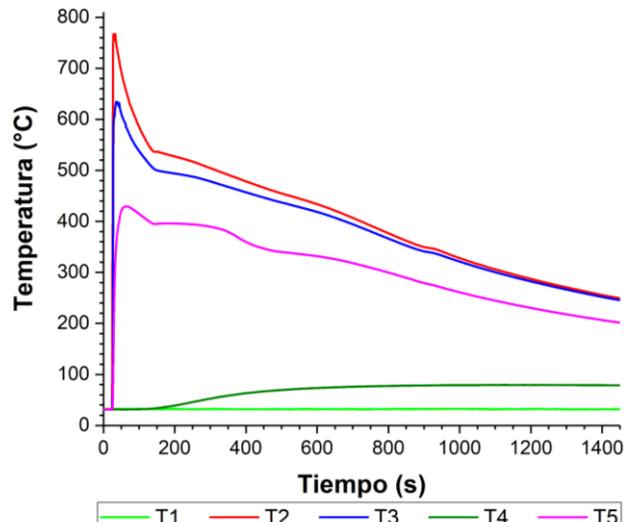


Figura 12. Comportamiento de temperaturas en el molde de pared delgada. Fuente: Elaboración propia.

### 3.3 Comportamiento térmico durante el proceso de solidificación en molde de arena.

Los perfiles de temperatura en el molde de arena se muestran en la Figura 15. Como se puede observar, la temperatura en la parte exterior (T<sub>4</sub>) del molde de arena se mantiene relativamente constante, lo que indica que el material del molde (arena y madera) actúa como un aislante térmico eficiente. Así mismo, podemos decir que la madera y la arena tienen baja conductividad térmica, lo que evita que el calor del metal fundido dentro del molde se transfiera rápidamente al exterior. Por tal razón, se observa que el comportamiento térmico en el centro (T<sub>1</sub>) y en la superficie de la probeta (T<sub>2</sub>) de aluminio solidificada en el molde de arena experimentó un rápido calentamiento alcanzando 779.19 °C y 623.16 °C respectivamente. Sin embargo, debido a la baja conductividad térmica de la arena, el enfriamiento es lento y la velocidad de solidificación bajo estas condiciones es de 0.71 °C/s. Con esta velocidad de solidificación y baja capacidad de enfriamiento del molde, la microestructura y dureza inevitablemente se verán afectadas, además de la formación de defectos como porosidades y el crecimiento de grano.

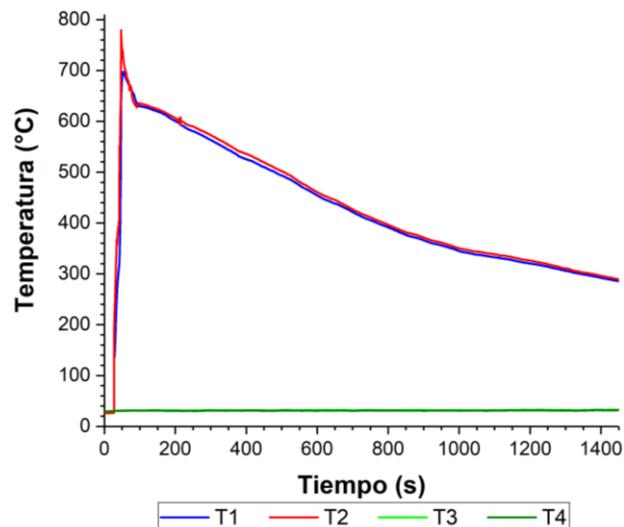


Figura 13. Comportamiento de las temperaturas en el molde de arena.  
Fuente: Elaboración propia.

### 3.4 Ensayo de dureza

En la Figura 14 se muestran los valores de dureza obtenidos en las probetas de aluminio solidificadas en los tres tipos de molde, como se puede observar, la probeta con mayor dureza (83.09 HRB) es la del molde metálico de pared gruesa, la cual se obtuvo a una velocidad de solidificación de 28.31 °C/s, seguida por la probeta solidificada en el molde metálico de pared delgada con una dureza de 73.67 HRB lo cual representa una reducción del 11.34% en la dureza con una reducción del 92.83% en la velocidad de solidificación, y finalmente la dureza más baja se presentó en la probeta solidificada en el molde de arena con 67.81 HRB, lo cual representa una reducción del 18.39% con respecto a la probeta solidificada en el molde metálico de pared gruesa.

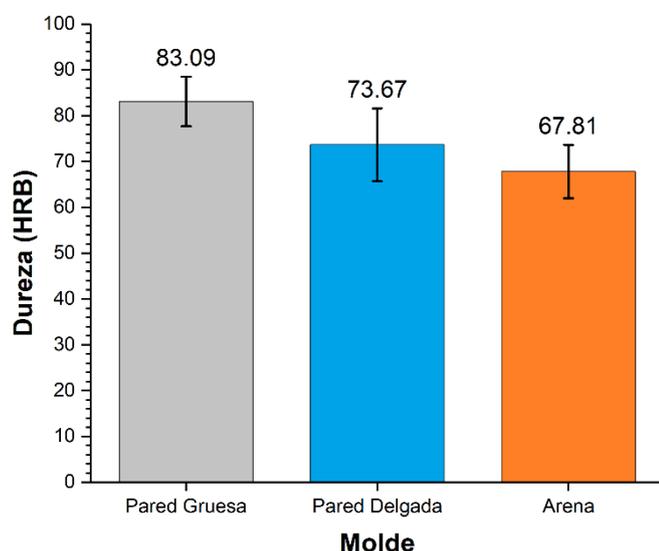


Figura 14. Resultados del ensayo de dureza. Fuente: Elaboración propia.

### 3.5 Caracterización metalográfica

Como se pudo observar en la Figura 14, la velocidad de solidificación es un factor importante en la dureza, ya que esta aumenta conforme la velocidad de solidificación también se incrementa, y esto se relaciona directamente con la microestructura obtenida posterior a la solidificación.

En la Figura 15 se muestran las microestructuras de las probetas solidificadas con los tres tipos de molde. La probeta obtenida en el molde metálico de pared gruesa a velocidad de solidificación de 28.31 °C/s muestra una microestructura (Figura 15a) con tamaño de grano promedio de 45 μm, así como la presencia de porosidades con un tamaño no mayor a 100 μm. Mientras que la Figura 15b se muestra la microestructura de la probeta solidificada a 2.03 °C/s en el molde metálico de pared delgada muestra un tamaño de grano promedio de 85 μm lo cual representa un incremento en el tamaño de grano del 88.89%, de igual forma, las porosidades aumentan su tamaño un 100% (hasta 200 μm), y finalmente la microestructura (Figura 15c) de la probeta solidificada a 0.71 °C/s en el molde de arena, muestra que el tamaño de grano ha crecido significativamente (177.78

%) con respecto a la probeta solidificada en el molde metálico de pared gruesa alcanzando un tamaño de grano promedio de 125 μm, además de que el número de porosidades y su tamaño también aumentan.

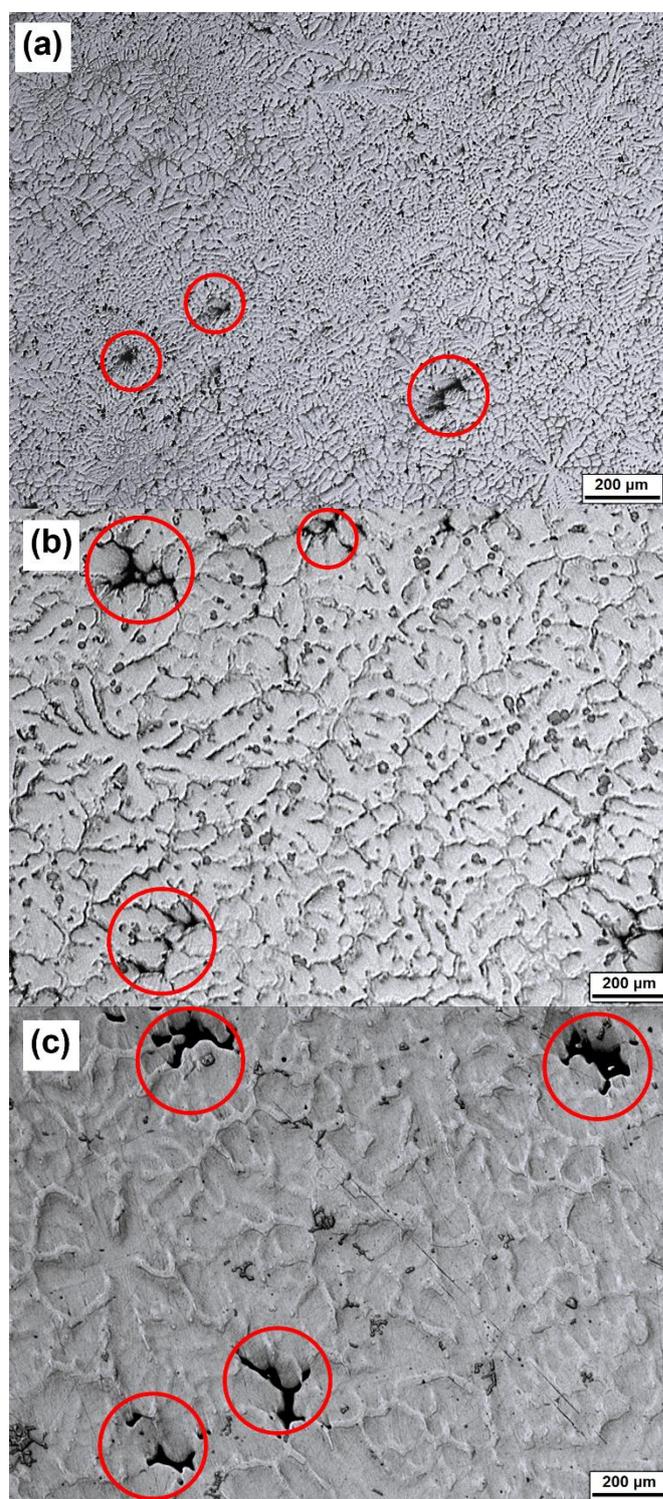


Figura 15. Caracterización metalográfica del aluminio: a) Molde metálico de pared gruesa, b) Molde metálico de pared delgada y c) Molde de arena.  
Fuente: Elaboración propia.

## 4 Conclusiones

El presente trabajo analizó el efecto del proceso de solidificación de aluminio empleando tres distintos tipos de

moldes sobre la dureza y la presencia de porosidades, así como evaluar el comportamiento térmico en las tres condiciones de solidificación. Los resultados de análisis microestructural revelan que la velocidad de solidificación juega un papel importante en la aparición de defectos como las porosidades, las cuales pueden generar fragilidad en las piezas obtenidas, en este sentido, el proceso de solidificación en arena fue el proceso que generó mayor cantidad de porosidad aparente en las piezas, lo cual se atribuye a la humedad contenida en el molde que al momento del vaciado, se evapora generando gases que quedan atrapados en la pieza solidificada, que, en comparación con los moldes de pared gruesa y delgada, al enfriar más rápido y ser menos permeables, reducen estos defectos, logrando una estructura más densa y homogénea.

También, se pudo observar que el control de la velocidad de solidificación es importante para evitar la aparición de defectos tales como grietas o porosidad, así de esta manera garantizar piezas de mejor calidad y resistencia. Para tener el control del proceso de solidificación, es importante conocer cuál es su comportamiento térmico durante este proceso, por tal razón, la instrumentación con termopares y la adquisición de la historia térmica durante el proceso de solidificación ha revelado como los moldes metálicos permiten una mayor velocidad de solidificación y por consiguiente un tamaño de grano pequeño, así como una menor cantidad de porosidades. Además, los resultados de dureza muestran una relación directa entre la velocidad de solidificación, microestructura y la dureza, en la cual se observó que la pieza solidificada en el molde de arena es un 7.95% menos dura en comparación con la pieza solidificada en el molde metálico de pared delgada, así mismo, son 18.38% menos dura que la pieza solidificada en el molde de pared gruesa. Estos resultados muestran la relación directa entre la velocidad de solidificación, la microestructura, los defectos que se presentan y la dureza, esta última es directamente proporcional a la resistencia mecánica, por lo que también se relaciona con las propiedades mecánicas finales de la pieza.

## Agradecimientos

A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por el apoyo brindado para el desarrollo del presente trabajo.

## Referencias

- Delgado, G. D. V. (2016). Solidificación dinámica de metales y aleaciones Tesis presentada en opción al título de Ingeniero en Metalurgia y Materiales.
- Gordo, A. G., & Piris, N. M. (2012). Ciencia de materiales para ingenieros. Pearson Educación. [https://dlwqtxts1x7le7.cloudfront.net/59633373/Ciencia\\_de\\_materiales\\_para\\_ingenieros20190609-117704-1rcyscf.pdf?1738385375=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DCiencia\\_de\\_materiales\\_para\\_ingenieros.pdf&Expires=1741856474&Signature=BRlhuRIDmvQJLjQL~h-rqRT-](https://dlwqtxts1x7le7.cloudfront.net/59633373/Ciencia_de_materiales_para_ingenieros20190609-117704-1rcyscf.pdf?1738385375=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DCiencia_de_materiales_para_ingenieros.pdf&Expires=1741856474&Signature=BRlhuRIDmvQJLjQL~h-rqRT-)
- alXzJpqVIP2jE9qA7R4IF6mxjLMk3Ybc45PbncEzPyOablwL95SWLBJrgUv-ew04Bj8IIBAZ-coujat0eE9bs8HzA4BVyF0BLx5Li3hXWdaqBWC90g2DxX8CYy0XcM1miNETt0d3ULEaNX3OmLDyt2LqnJqTXDDVfKnePS1ATvRwWD1~~xGkVqWLXBkXBPhVQICADu08~bz6Xwi-3K8eqbjlOdzfhxg2LKaMydBeKhhmLAw4fhGuOiCWRMZ7ALsR20-9ZxpoMUhInkp5WPH7ZaT1aTk~V31-CXpp5bCwBLFLMNHTzeZJKJpPsw\_\_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA
- Borja-Soto, C., Montiel-Hernández, J., Jiménez de la Paz, V., & Luqueño de la Rosa, D. (2020). Proceso de fundición en molde de arena: diseño, simulación e impresión 3D. *Ingenio y Conciencia. Boletín Científico de la Escuela Superior Ciudad Sahagún*, 7(14), 47–51. <https://doi.org/10.29057/escs.v7i14.5555>
- Oviedo Fierro, F., & Vinuesa Lozada, A. (2012). Diseño y construcción de un molde permanente utilizando el software Vulcan [Tesis de maestría, Escuela Politécnica Nacional]. Escuela Politécnica Nacional. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/7791>
- Uruchi, V. C. (2014). Conformado de una pieza de aluminio: moldeo en arena verde, fundición y colada. *Revista Tecnológica*, 10(16), 6. [http://www.revistasbolivianas.ciencia.bo/pdf/rtfv10n16/v10n16\\_a03.pdf](http://www.revistasbolivianas.ciencia.bo/pdf/rtfv10n16/v10n16_a03.pdf)
- Soto, C. E. B., Hernández-Rojas, R. G., Silva, J. Z., Sánchez, Y. M., Hernández, J. F. M., & 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>
- Cosíos Espinosa, D. F. (2019). Estudio del proceso de fundición de aleaciones no ferrosas en moldes de yeso. <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/46303>
- Reoyo Benito, M. (2023). Diseño, fabricación y validación de modelos por impresión 3D para su uso en procesos de fundición. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/61470>
- Santos, E., Yenque, J., Rojas, O., & Rosales, V. (2001). Acerca del ensayo de dureza. *Industrial Data*, 2(4), 73-80. [https://dlwqtxts1x7le7.cloudfront.net/61320903/Dureza20191124-125042-sul0px-libre.pdf?1574638972=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DDureza.pdf&Expires=1741858514&Signature=XBpTx5COTke7sFDGcO-W7KwS7wsFdgHL0RYLkofXF~JUAMygnleR3zXx9hcfLL5I6gfmD3KsLvBzQwZPa3HA0T9kE8ZLD--zwQdkGyJAB-KtmjG~ef3djFOv-NFCo~xT2L~VU2cqjqCotbRFqUlhyEnSoK1Dd3AcKcUEikbrVRhDwO3q4c1JL7NmLALsg0atyCk7whC11vxinh47YQ7N96VxYVH9JSDNjLpxBZhqRxY-ZEteceHU3dzPJ~3Wc95xHp8gQO0alGWizjay3nOrLfrj4y3xIS8wOA9laDTxp7dGfRC-75xvUqrQ2oNp86NfBqyh1Oby~gTDJjyWQ\\_\\_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA](https://dlwqtxts1x7le7.cloudfront.net/61320903/Dureza20191124-125042-sul0px-libre.pdf?1574638972=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DDureza.pdf&Expires=1741858514&Signature=XBpTx5COTke7sFDGcO-W7KwS7wsFdgHL0RYLkofXF~JUAMygnleR3zXx9hcfLL5I6gfmD3KsLvBzQwZPa3HA0T9kE8ZLD--zwQdkGyJAB-KtmjG~ef3djFOv-NFCo~xT2L~VU2cqjqCotbRFqUlhyEnSoK1Dd3AcKcUEikbrVRhDwO3q4c1JL7NmLALsg0atyCk7whC11vxinh47YQ7N96VxYVH9JSDNjLpxBZhqRxY-ZEteceHU3dzPJ~3Wc95xHp8gQO0alGWizjay3nOrLfrj4y3xIS8wOA9laDTxp7dGfRC-75xvUqrQ2oNp86NfBqyh1Oby~gTDJjyWQ__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA)
- Tipula García, E. Y. (2024). Ensayo de dureza Rockwell.
- González, G., & Rico, Y. (2013). Cambios microestructurales y químicos de la aleación Zn-10Al depositadas por inmersión en caliente sobre un acero SAE 1020. *Acta Microscopica*, 22(1), 118-125. <https://acta-microscopica.org/acta/article/view/278>
- Ruiz Marín, L. M. (2017). Diseño e implementación de un dispositivo de control para realizar el proceso de recubrimiento por inmersión (Bachelor's thesis, Escuela de Ingenierías). <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/4031>
- Velasco Santes, E., Cano, S., Talamantes, J., Colás Ortíz, R., Valtierra, S., & Mojica, J. F. (1998). Solidificación de una aleación empleada en la industria automotriz. *Ingenierías*, 1(1), 31-35. <http://eprints.uanl.mx/9951/>
- Fuentes Orozco, M. A. (2019). Determinación de la relación entre las estructuras de solidificación de lingotes de aluminio de alta pureza y aleaciones aluminio-cobre fundidos artesanalmente y sus propiedades de dureza (Doctoral dissertation, Universidad de San Carlos de Guatemala). <http://www.repositorio.usac.edu.gt/12639/>
- Méndez, L., Delvasto, P., & Quintero Sayago, O. (2007). Diseño y fabricación de moldes para solidificación direccional en aleaciones de aluminio. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 27(2), 73-82. [https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S02559522007000200002&script=sci\\_arttext](https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S02559522007000200002&script=sci_arttext)