

## OPTIMIZACIÓN DE LAS CONDICIONES DE FABRICACIÓN DE CUERPOS DE PRUEBA DE TRACCIÓN DE UNA ALEACIÓN Cu-8%Sn (AS-CAST) ASISTIDA CON SOLIDCast®

Daniel Ramírez<sup>1\*</sup>, Juan Marcelo Rojas<sup>2</sup>, Lizeth Giraldo<sup>3</sup>

1: Ingeniero de Materiales, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia

2: Profesor, Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia

3: Estudiante de Ingeniería de Materiales, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia

\* E-Mail: daugusto.ramirez@udea.edu.co

### RESUMEN

Un factor importante durante la medición de las propiedades mecánicas en tensión de materiales metálicos es obtener componentes de prueba fundidos con el mínimo de defectos. En este sentido es necesario mejorar las condiciones de fabricación de piezas fundidas para obtener mediciones con resultados confiables. En este trabajo se muestra la predicción de defectos y la optimización de parámetros de los modelos de fundición propuestos por la norma ASTM B208-14 mediante la simulación de la fundición para una aleación Cu-8%Sn utilizando SOLIDWorks® y SOLIDCast®. Los resultados de la optimización muestran que la temperatura, el tiempo de vaciado y turbulencia del metal líquido varían al ser comparados con los diseños propuestos. La temperatura del metal líquido es homogénea en el volumen de la pieza, siempre por encima de la temperatura de líquidos durante el llenado del molde. Las líneas de flujo evidencian una reducción en la turbulencia del metal líquido, disminuyendo la posibilidad de oxidación y atrapamiento de gases. Las simulaciones también mostraron que el alimentador compensó las contracciones y sus dimensiones permanecieron constantes, permitiendo la obtención de un mayor número de componentes metálicos. La placa modelo se fabricó por medio de impresión 3D obteniendo un modelo con alta resistencia mecánica y buen acabado superficial. El moldeo se realizó en arena de sílice aglomerada con resina fenólica, posteriormente se utilizaron líquidos penetrantes en la pieza fundida en estado “as-cast” para verificar la sanidad validando los resultados obtenidos en las simulaciones, evidenciando que el software predice la sanidad de piezas de fundición, ayudando a reducir tiempo de trabajo y costos.

**Palabras clave:** Propiedades mecánicas, simulación de fundición, impresión 3D, “As-cast”, líquidos penetrantes.

### SOLIDCast® AIDED OPTIMIZATION OF MANUFACTURING CONDITIONS OF TENSION TEST SPECIMENS FOR COPPER ALLOY Cu-8%Sn (AS-CAST)

### ABSTRACT

Obtaining molten test bodies with minimum amount of defects is an important factor during the tensile mechanical testing of metallic materials; in this sense it is necessary to improve the

manufacturing conditions of castings to obtain measurements with reliable results. This work shows the prediction of defects and the parameters' optimization of the foundry models proposed by the ASTM B208-14 standard, by simulating the casting for a Cu8% Sn alloy using SOLIDWorks® and SOLIDCast®. The optimization results show that temperature, emptying time and turbulence of the liquid metal vary when compared to the proposed designs. The temperature of the liquid metal is homogeneous in the volume of the piece, always above the temperature of liquids during the filling of the mold. The flow lines show a reduction in the turbulence of the liquid metal, reducing the possibility of oxidation and gas entrapment. The simulations also showed that the feeder compensated the contractions and its dimensions remained constant, allowing to obtain a greater number of test bodies. The model plate was manufactured by means of 3D printing obtaining a model with high mechanical resistance and good surface finish. The molding was carried out in silica sand agglomerated with phenolic resin, later penetrating liquids were used in the melted part in the "as-cast" state to verify the health validating the results obtained in the simulations, evidencing that the software predicts the health of parts foundry, helping to reduce labor time and costs.

**Keywords:** Mechanical properties, foundry simulation, 3D printing, as-cast, penetrating liquids.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las aleaciones de cobre tienen una gran importancia en la fabricación de productos metálicos que necesitan de resistencia a la corrosión, alta conductividad térmica y eléctrica. Estas aleaciones son utilizadas por la industria en la construcción de dispositivos como válvulas, estructuras de bombas hidráulicas, rodamientos, componentes eléctricos y de transferencia de calor [1,2].

Una de las familias más importantes de las aleaciones de cobre es la de los bronce (Cu-Sn), los cuales se clasifican según los principales elementos de aleación. En este caso son aleaciones de cobre, estaño y fósforo caracterizadas por su alta dureza, buena resistencia al desgaste, buena tenacidad, buenas propiedades en aplicaciones de rodamientos y buena resistencia a la corrosión [3].

Muchas industrias de fundición en los países en desarrollo sufren problemas de baja calidad y productividad debido a la manipulación de múltiples parámetros de proceso de fundición. Incluso en un proceso completamente controlado, se observan defectos, lo que dificulta conocer la causa de los defectos de colada [4]. El análisis de defectos de fundición es el proceso que consiste en encontrar la causa de la aparición de defectos y rechazo piezas fundidas para tomar medidas que permitan mejorar el rendimiento [5]. Por esta razón, en el mejor de los casos se utiliza la técnica de simulación de fundición para la predicción de defectos relacionados con la solidificación, como la porosidad por contracción [6].

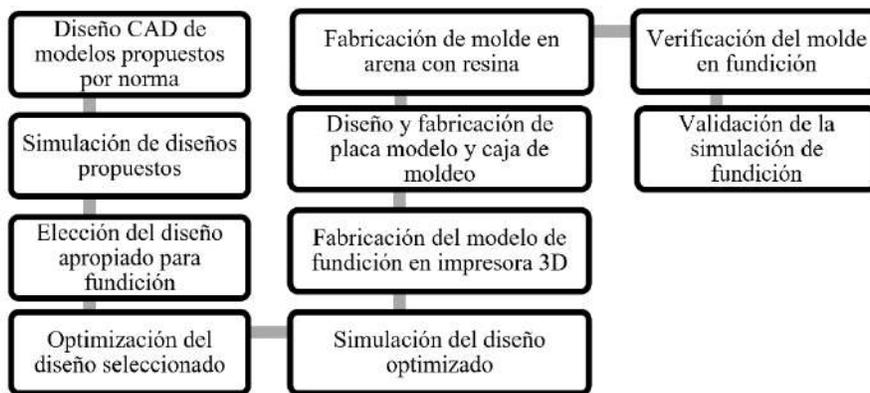
En este trabajo, se establecieron las condiciones de fabricación de cuerpos de prueba para ensayos de tensión de un bronce al estaño Cu8%Sn, realizando la evaluación y la optimización de las geometrías de los modelos de colada proporcionados por la norma ASTM B208-14 haciendo uso de herramientas computacionales, con el fin de garantizar la mínima cantidad de defectos en la pieza fundida que puedan afectar los resultados de la evaluación de sus propiedades mecánicas.

## 2. METODOLOGÍA

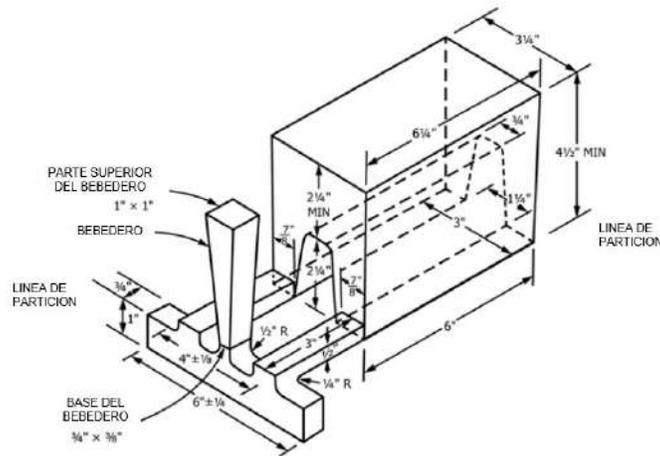
En este trabajo fue utilizado el método de análisis de defectos en piezas fundidas como parámetro principal para lograr la optimización de las condiciones de fabricación de cuerpos de prueba para

este tipo de bronce. La simulación de la fundición determino el tiempo de llenado y la predicción de defectos en lugares específicos después de la solidificación. En la Figura 1 se muestra un diagrama de flujo con la metodología utilizada.

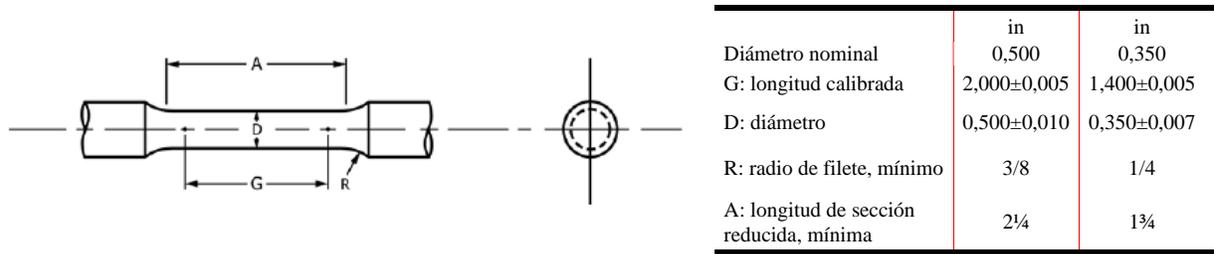
La norma ASTM B208-14 establece los procedimientos para la obtención de los cuerpos de prueba de aleaciones de cobre fundidas en moldes de arena, con base en esta premisa se realiza el análisis de predicción de defectos y posteriormente la evaluación del diseño y optimización de parámetros con el programa SOLIDCast®. Según la norma ASTM B208-14, para las aleaciones estudiadas se determinó que el mejor diseño para fundición en arena es el bloque de doble quilla con ataques inferiores como se muestra en la Figura 2, mientras que en la Figura 3 se muestra la geometría y las dimensiones recomendadas para las probetas de tensión. Se utilizó SOLIDWorks®, SOLIDCast® y FLOWCast® para optimizar tanto la geometría del diseño de colada como los parámetros de fundición para minimizar inconvenientes propios del proceso, como la dificultad en el control de calidad, la baja producción, la baja eficiencia energética, la reducción del consumo de materia prima y el impacto ambiental [7].



**Figura 1.** Metodología utilizada para la optimización.

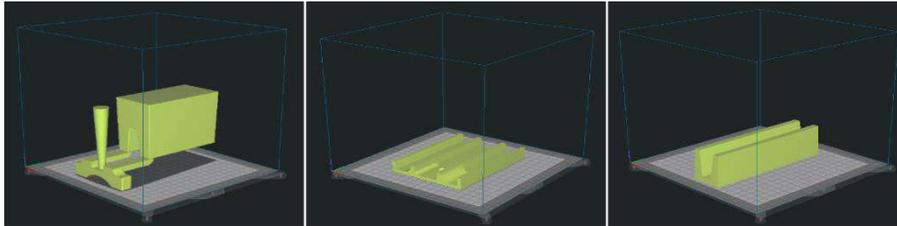


**Figura 2.** Diseño de barra de prueba de doble bloque de quilla con ataques inferiores (versión de bajo peso). Modificado a partir de [7].



**Figura 3.** Geometría y dimensiones de los cuerpos de prueba para ensayos de tensión en bronce [8].

Haciendo uso de la tecnología de prototipado rápido, con impresión 3D se llevó a cabo la fabricación de sólidos con alta precisión dimensional utilizando filamentos de PLA para obtener los prototipos del modelo seleccionado en escala real para ser utilizados en el proceso de moldeo en arena con resina. Para el prototipado fue necesario utilizar algunos parámetros de temperatura, velocidad y resolución, indispensables para la obtención de piezas con acabados superficiales óptimos. En la Figura 4 se puede observar el montaje del modelo y los moldes de los machos.

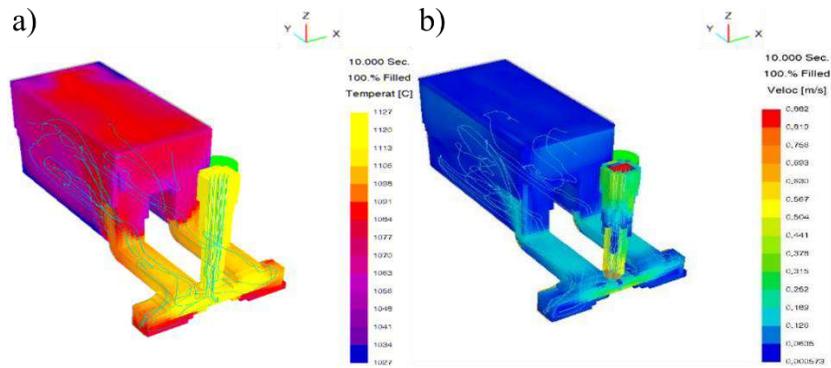


**Figura 4.** Montaje del modelo y los moldes de los machos.

Obtenidos los modelos, se prosiguió con el diseño y fabricación de la placa modelo donde se dispone el modelo en su conjunto de forma que fuera posible moldear en arena, proceso para el cual se hace uso de resina fenólica que al reaccionar le proporciona al molde las propiedades necesarias para la fundición. Posteriormente, la validación de los resultados de la simulación se realiza con la inspección de la pieza de fundición.

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

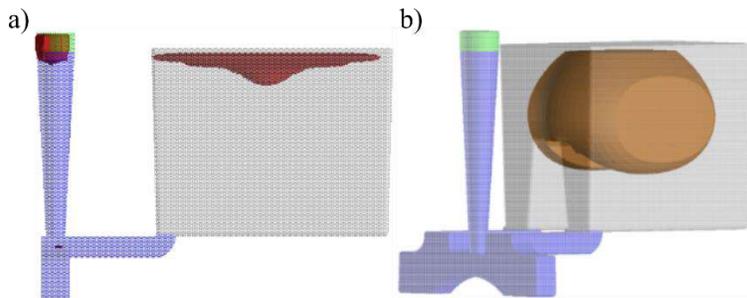
Haciendo uso de FLOWCast®, obtenemos mapas de colores a través del modelo según el parámetro evaluado y además se realiza el análisis del comportamiento térmico y de fluidos que presenta el metal fundido a través de la cavidad del molde durante el tiempo de vaciado y como esto puede afectar la integridad metalúrgica. En la Figura 5 podemos encontrar imágenes de la simulación del llenado del sistema de colada para la aleación Cu-8Sn.



**Figura 5.** Simulación de llenado del sistema de colada para la aleación Cu-8Sn. a) Mapa térmico y b) Mapa de velocidad de fluido.

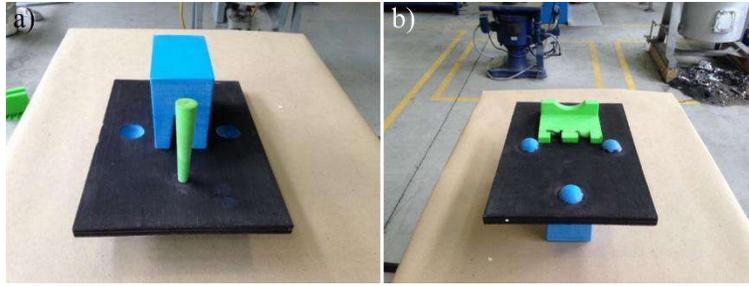
Los resultados de la simulación presentan el mapa de temperaturas (Figura 5a) y el mapa de velocidad del fluido (Figura 5b). La temperatura del metal fundido dentro de la cavidad del molde se encuentra por encima de la temperatura de *liquidus* 1.027 °C, lo que indica que el material inicia la solidificación cuando llena por completo la cavidad, además, promueve que las quillas estén libres de porosidad por contracción al ser compensadas por el alimentador satisfactoriamente. Por otra parte, se puede comprobar que el comportamiento del fluido es más laminar gracias a la optimización del diseño de sistema de colada, siendo 0,693 m/s la máxima velocidad dentro de la cavidad del molde.

A partir de las simulaciones, es posible analizar la predicción de defectos de todo el sistema de colada y de la fracción de sólidos. Así, se pueden determinar los lugares donde posiblemente quedara ubicada la porosidad debida a la contracción como se observa en la Figura 6a, y la última zona en solidificar como se evidencia en la Figura 6b.

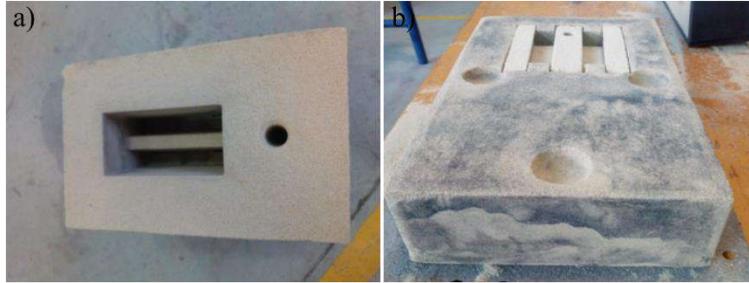


**Figura 6.** Predicción de la porosidad por a) Contracción y b) Fracción de sólidos en la aleación Cu-8Sn.

Una vez determinada la configuración de los parámetros de prototipado, se procedió a realizar la impresión 3D de los modelos. En la Figura 7 se pudo observar la placa modelo terminada. La placa modelo fue fabricada de la mano de las cajas de moldeo para un perfecto ajuste en pro de alcanzar un moldeo eficiente. En la Figura 8 es posible observar el molde en arena terminado el cual presentó una buena resistencia mecánica que lo hace idóneo para el proceso de fundición, esto con el fin de obtener piezas con un buen acabado y una buena tolerancia dimensional, además de una buena permeabilidad para evitar atrapamiento de gases.

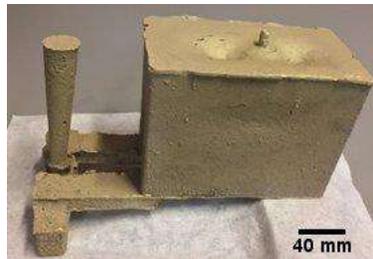


**Figura 7.** Placa modelo. a) Parte superior y b) Parte inferior.



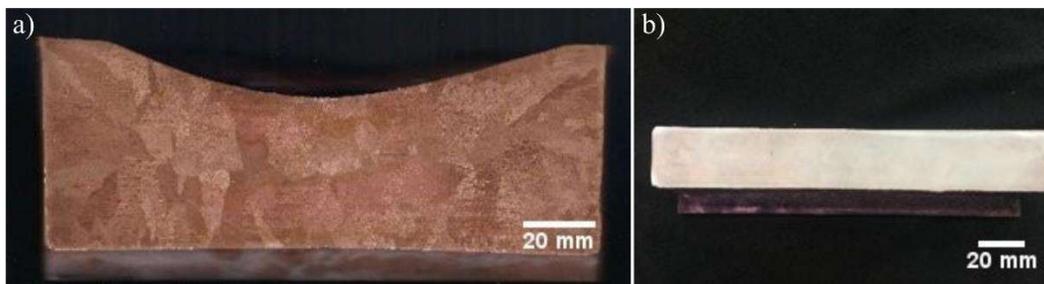
**Figura 8.** Molde terminado. a) Parte superior y b) Parte inferior.

La fundición realizada se muestra en la Figura 9, en la cual se puede observar que la pieza salió en perfectas condiciones y la mayor contracción la sufrió el alimentador como se esperaba. Esto nos lleva a pensar que la simulación contribuyó de manera positiva.



**Figura 9.** Pieza de fundición de Cu-8Sn.

La validación de la simulación de fundición se evidencia en la Figura 10, donde podemos observar que la mayor contracción quedó localizada en la parte superior del alimentador y además evidencia con ayuda de líquidos penetrantes que en las quillas no se presenta ningún tipo de porosidad, lo cual garantiza que los ensayos de tensión pueden arrojar resultados confiables. Con líquidos penetrantes, se pudo observar (Figura 10b) que no hay presencia de marcas sobre la superficie evaluada que revele la existencia de porosidad por contracción, lo cual valida la importancia y la utilidad de la simulación, esperando así probetas aptas para la evaluación de propiedades mecánicas.



**Figura 10.** Validación de simulación de fundición a) Contracción en sección transversal del alimentador y b) Inspección por líquidos penetrantes sección transversal una quilla.

#### 4. CONCLUSIONES

Se evaluaron los diseños de los sistemas de colada propuestos por la norma ASTM B208-14 para la fundición de una aleación de cobre C52100 mediante la simulación de llenado y solidificación del proceso de fundición. Se determinó que el mejor es el diseño de bloque de doble quilla con ataques inferiores (versión de bajo peso).

La simulación de fundición y el prototipado rápido, permitieron predecir la obtención de piezas con geometrías complejas y alta tolerancia dimensional, con buena resistencia mecánica y buen acabado superficial, que permite ampliar el horizonte en los procesos de fundición en arena, optimizando tiempo y costos en la producción de piezas fundidas libres de defectos.

Fue posible validar que las quillas quedaron libres de porosidad como lo predijo la simulación de fundición con ayuda de la inspección por líquidos penetrantes. Esto nos lleva a garantizar que los cuerpos de prueba serán aptos para los ensayos de tensión y que los resultados serán confiables.

#### 5. REFERENCIAS

- [1] W. Reif and G. Weber, “A new grain refiner for copper-zinc alloys containing 25-42 percent zinc,” *Metall*, vol. 41, no. 11, pp. 1131–1137, 1987.
- [2] J. Marcelo, R. Arango, R. D. E. Grão, D. A. S. Ligas, D. O. Sistema, S. Paulo, J. Marcelo, and R. Arango, “Refino De Grão Das Ligas Do Sistema Cobre-Estanho,” 2016.
- [3] K. K. Sareen, *Metal casting: Computer-aided Design and Analysis*, 4th ed. Prentice-Hall India, 2007.
- [4] H. C. Pandit, A. Sata, V. V. Mane, and U. A. Dabade, “Novel Webpublished in technical transactions of 60th Indian Foundry Congress, 2 4th March 2012.” Bangalore, pp. 535–544, 2012.
- [5] U. A. Dabade and R. C. Bhedasgaonkar, “Casting defect analysis using design of experiments (DoE) and computer aided casting simulation technique,” *Procedia CIRP*, vol. 7, pp. 616, 2013.
- [6] C. M. Choudhari, K. J. Padalkar, K. K. Dhumal, B. E. Narkhede, and S. K. Mahajan, “Defect free casting by using simulation software,” *Appl. Mech. Mater.*, vol. 313, no. March 2013, 2013.
- [7] C. M. Choudhari, B. E. Narkhede, and S. K. Mahajan, “Casting Design and Simulation of Cover Plate Using AutoCAST-X Software for Defect Minimization with Experimental Validation,” *Procedia Mater. Sci.*, vol. 6, no. Icmpe, pp. 786–797, 2014.
- [8] ASTM, “Standard Practice for Preparing Tension Test Specimens for Copper Alloy Sand , Permanent Mold , Centrifugal , and Continuous Castings 1,” *Astm*, vol. 96, no. Reapproved, pp. 1–9, 2015.