

# Comparación de la Curva de Enfriamiento del Estaño (Sn) Mediante el Método Experimental y de Simulación Numérica

Daniel Flores Sánchez<sup>1</sup>, Esiquio Martin Gutiérrez Armenta<sup>2</sup>, Javier Norberto Gutiérrez Villegas<sup>3</sup>



## Acerca de los autores...

<sup>1</sup> Universidad Autónoma Metropolitana, México, metalurgia\_uam@hotmail.com

<sup>2</sup> Instituto Politécnico Nacional, México, esiqv11@hotmail.com

<sup>3</sup> Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, México, javiernorberto@hotmail.com

## Resumen

**E**n este artículo se muestran los resultados de la curva de enfriamiento del estaño (del latín *stannum*), con símbolo Sn en la tabla periódica de elementos, obtenida mediante el método experimental, cuyo resultado fue comparado mediante simulación numérica, utilizando el software ANSYS®. Los resultados obtenidos mediante ambos métodos, nos permitió observar y comprobar que su velocidad de enfriamiento y de sobrecalentamiento es similar.

Una de las finalidades de la comparación de resultados numéricos y experimentales de diferentes tipos de materiales puros, y en particular el caso del estaño, se debe a la necesidad de contrastar los márgenes de error que existen entre cada uno de estos métodos. Mediante este tipo de modelación y de simulaciones, es factible obtener resultados con materiales puros; de igual forma, se puede aplicar a más materiales con el propósito de generar diagramas de fases, tanto binarios como ternarios.

La simulación numérica aplicada a este tipo de casos, contribuye a apoyar con investigación a las empresas dedicadas al ramo de la fundición de aleaciones tanto ferrosas como no ferrosas.

**Palabras clave:** ANSYS, Aleación, Solidificación, Fundición.

## Abstract

*This article shows the results of the cooling curve of tin (from Latin stannum), with symbol Sn in the periodic table of elements, obtained by the experimental method, whose result was compared by numerical simulation, using the ANSYS® software. The results obtained by both methods, allowed us to observe and verify that its cooling and overheating speed is similar.*

*One of the purposes of the comparison of numerical and experimental results of different types of pure materials, and in particular the case of tin, is due to the need to contrast the margins of error that exist between each of these methods. Through this type of modeling and simulations it is possible to obtain results with pure materials; similarly, it can be applied to more materials with the purpose of generating binary and ternary phase diagrams.*

*The numerical simulation applied to this type of case, contributes to support with research the companies dedicated to the field of the casting of ferrous and non-ferrous alloys.*

**Keywords:** ANSYS, Alloy, Solidification, Foundry.

## Introducción

En la actualidad, todo lo que nos rodea ha sido elaborado con algún material que inicialmente se encontraba en la tierra, en algunos casos como un mineral. El acero, por ejemplo, que es una aleación de hierro con una cierta cantidad de carbono, es la base principal de los cimientos en las pequeñas y grandes construcciones, pero al ser muy versátil, nos permite darle infinidad de usos y aplicaciones, debido a que existen diferentes tipos de acero, según el o los elementos aleantes que contenga.

Otro material igual de importante es el cobre, utilizado tanto en tuberías de gas como de agua. Sin embargo, el uso que se le puede dar está en relación con las necesidades de aplicación, por ejemplo, las aleaciones con base cobre, tienen como resultado el latón (Cu-Zn), el cual es ampliamente utilizado en la fabricación de monedas y en las perillas de las puertas.



Pero, antes de que todo ello pueda ser aprovechado como producto final, es necesario efectuar una serie de procedimientos que involucra el proceso de fundición, y este proceso lleva a la obtención de los ya conocidos diagramas de fase, que son representaciones gráficas de cada etapa que existe en un sistema de materiales a diferentes temperaturas, presiones y composiciones.

Estos diagramas, utilizados por ingenieros y científicos, han sido construidos para poder entender mejor el comportamiento de muchos materiales [1]. Para el caso de los metales puros, se tiene que cristalizan a temperaturas constantes, y se pueden representar por medio de una línea horizontal recta entre el comienzo y el final de los puntos de cristalización en las curvas de enfriamiento [2]; sin embargo, para el caso de las aleaciones, éstas no solidifican a temperaturas constantes, sino en un rango de temperaturas dado.

Se ha encontrado que mediante procesos de simulación numérica, se pueden predecir propiedades mecánicas excelentes, esto mediante parámetros de velocidades de enfriamiento aplicados durante los procesos de fundición. Todos los parámetros aplicados tanto a metales puros como a aleaciones, juegan un papel importante en la evolución y comportamiento de la microestructura final del material, así como en las propiedades mecánicas resultantes [3].

## Metodología de Desarrollo

### *Experimental*

Para poder construir la curva de enfriamiento del Sn, se llevan a cabo los siguientes pasos:

- Pesar convenientemente 100g de Sn.
- Colocar el Sn dentro de un crisol de grafito y posteriormente colocarlo en el interior de una mufla (ver Figura 1) con la finalidad de llevar el material a su punto de fusión, 232 °C.



*Figura 1*

Colocación del Sn dentro de la mufla.

Una vez que el Sn pasa a estado líquido, con precaución debe ser retirado el crisol de la mufla y colocarse en un lugar que no represente algún riesgo. Posteriormente, se tomarán las lecturas de temperatura (Figura 2), con ayuda de un termopar, cada dos segundos. Para obtener datos confiables, se debe tener cuidado en que el termopar no toque las paredes ni el fondo del crisol.



*Figura 2*

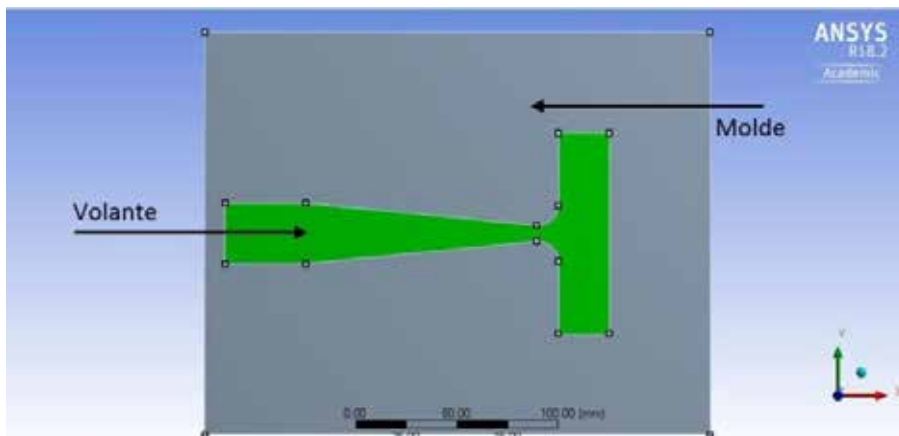
Lecturas de temperatura tomadas con ayuda de un termopar.

### **Simulación numérica**

Para el caso de la simulación numérica, se consideran las siguientes condiciones iniciales:

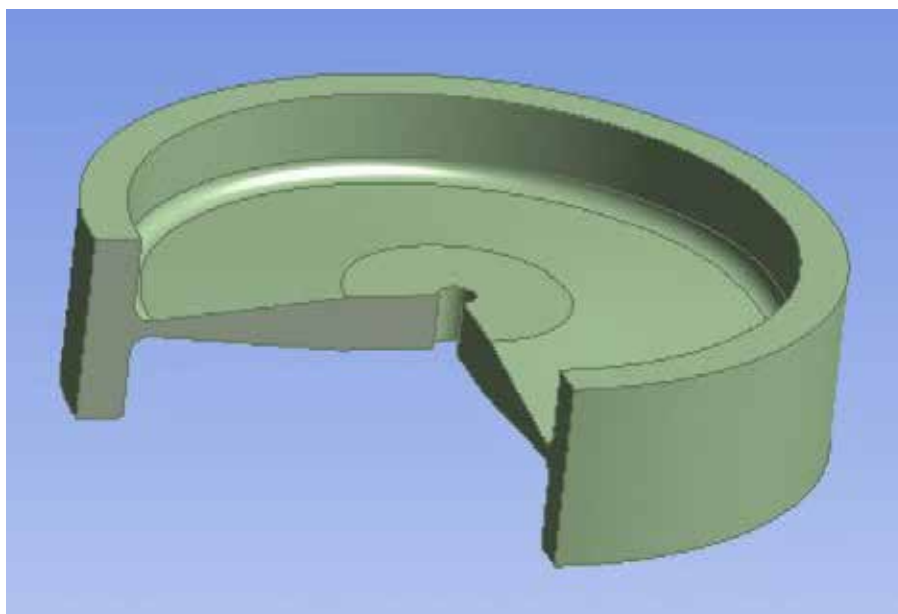
- El Sn se encuentra en estado líquido y dentro del molde de arena a 600 °C
- El molde inicialmente se encuentra a temperatura ambiente de 30 °C

Mediante estas condiciones, se lleva a cabo la simulación numérica en el programa ANSYS Academic, con el que se obtendrá la curva de enfriamiento del Sn. Las Figuras 3 y 4, ejemplifican la geometría, en 2D y 3D, obtenida después de la solidificación del material.



*Figura 3*

Vista en 2D del molde en conjunto con la pieza a simular [4].



*Figura 4*

Vista en 3D del molde en conjunto con la pieza a simular [4].

Especificaciones de las propiedades de la arena y del Sn.

**TABLA 1**  
**PROPIEDADES DE LA ARENA [5].**

<b>Arena</b>	
Conductividad Térmica	0.53 W/m-°C
Densidad	1600 kg/m³
Calor Específico	774.4 J/kg-°C

**TABLA 2**  
**PROPIEDADES DEL SN. [6]**

<b>Estaño</b>	
Punto de Fusión	232 °C
Densidad	7365 kg/m³
Calor Específico Sólido, C <sub>s</sub>	230 J/kg-°C
Calor Específico Líquido, C <sub>l</sub>	260 J/kg-°C
Calor Latente, L	70000 J/Kg

Para que el programa ANSYS pueda determinar la curva de enfriamiento del material, es necesario calcular las entalpías sólida, líquida y por arriba de la línea *liquidus*. Para ello, se hace uso de las siguientes ecuaciones.

$$H_s = \rho C_s (T_s - T_0) \quad (1)$$

$$H_L = H_s + \rho C^* (T_L - T_s) \quad (2)$$

$$H_+ = H_L + \rho C_L (T - T_L) \quad (3)$$

Una vez obtenidos los resultados de las entalpias, se procede a graficar una curva de entalpia vs temperatura, la cual será agregada las propiedades del Sn en el programa ANSYS.

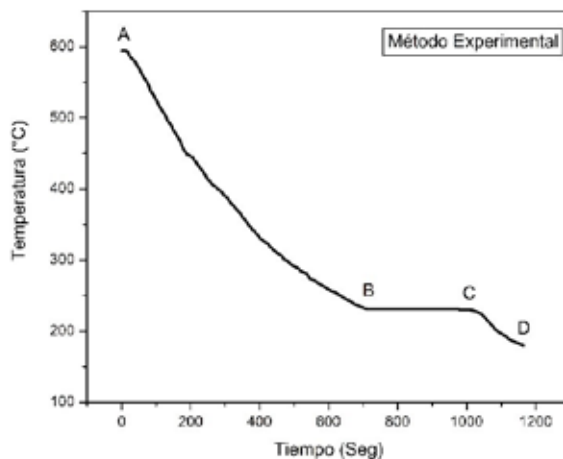
**TABLA 2**  
**DATOS UTILIZADOS PARA OBTENER LA GRÁFICA ENTALPIA VS TEMPERATURA**

Temperatura (°C)	Entalpia (J/m³)	Ecuación
0	0	-
231	3.9130E8	(1)
233	9.1045E8	(2)
600	1.6132E9	(3)

## Resultados y Análisis

### Método experimental

En la Figura 5 se muestra la curva de enfriamiento del Sn obtenida mediante el método experimental. En esta parte del método, se debe tomar en cuenta que al momento de tomar los datos con el termopar, no se consideró una atmosfera en especial y tampoco un molde recubierto con arena o algún otro material, simplemente se utilizó un crisol de grafito.



*Figura 5*

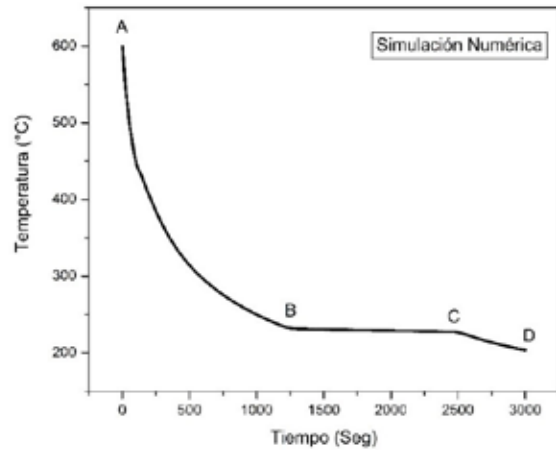
Curva de enfriamiento del Sn, por el método experimental.

El punto A representa el sobrecalentamiento del material, es decir, que se encuentra en estado líquido. Conforme pasa el tiempo, la temperatura desciende hasta el punto de llegar a una constante de aproximadamente 230 °C, lo cual se observa en los puntos B y C, donde se lleva a cabo la solidificación del material mediante una transformación isotérmica. Posteriormente, del punto C al D, se observa nuevamente un descenso de temperatura, lo que indica el final de la meseta térmica obtenida en el intervalo de los puntos B y C.

El tiempo total del proceso de solidificación del Sn para este método fue de aproximadamente 1,200 segundos y se llevó a cabo desde el punto A al D.

**Método de simulación numérica**

En la Figura 6 se presenta la curva de enfriamiento del Sn obtenida mediante el método de simulación numérica. A diferencia del método experimental, aquí se consideró que el molde se encuentra recubierto de arena y no simplemente un contenedor de grafito.

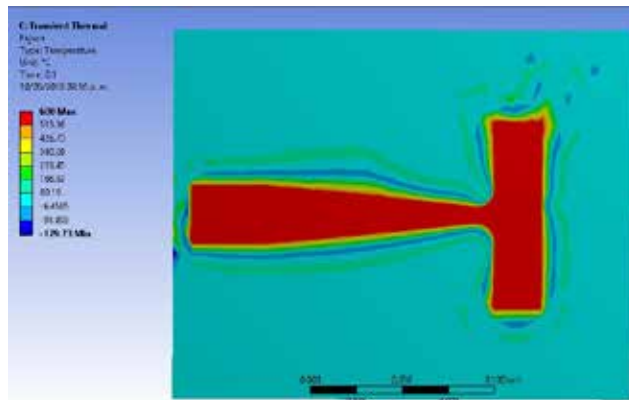


*Figura 6*

Curva de enfriamiento del Sn, obtenida mediante simulación numérica.

Al igual que en la Figura 5, en ésta, se observa el sobrecalentamiento del Sn, punto A, el cual posteriormente con el paso del tiempo empieza a descender hasta el momento de iniciar la meseta térmica por medio de una transformación isotérmica, puntos B y C. Posteriormente, de los puntos C y D, se lleva a cabo nuevamente un descenso de temperatura terminando en la solidificación total del Sn.

En la Figura 7, se observa el sobrecalentamiento del Sn, el cual se encuentra dentro del molde de arena, mientras que en la Figura 8, se observa el inicio de la formación de la meseta térmica.



*Figura 7*

Representación del sobrecalentamiento del Sn a una temperatura máxima de 600 °C.

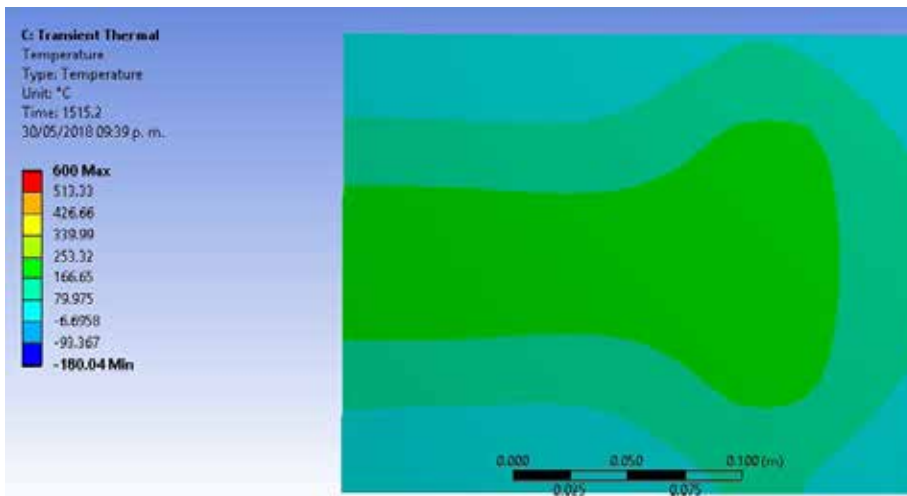


Figura 8

Inicio de la formación de la meseta térmica a una temperatura aproximada de 230 °C.

## Comparación de ambos métodos

En Figura 9 se puede observar de manera comparativa la formación y obtención de las curvas de enfriamiento del Sn utilizando los dos métodos anteriores. Sin embargo, es notable la prolongación de la meseta térmica obtenida mediante la simulación numérica; esta prolongación puede ser debida a las condiciones de frontera que fueron agregadas al programa ANSYS, ya que se consideró que el enfriamiento del Sn tendría que ser llevado a cabo dentro de un molde de arena, y que el estaño fundido ya se encontraba dentro del molde.

Con respecto a la meseta térmica obtenida mediante el método experimental, se tiene que la prolongación es muy corta en comparación con la obtenida con el otro método. Esto puede ocurrir por las condiciones de enfriamiento del Sn, ya que únicamente se utilizó un recipiente de grafito y además no se consideró alguna atmosfera en específico.

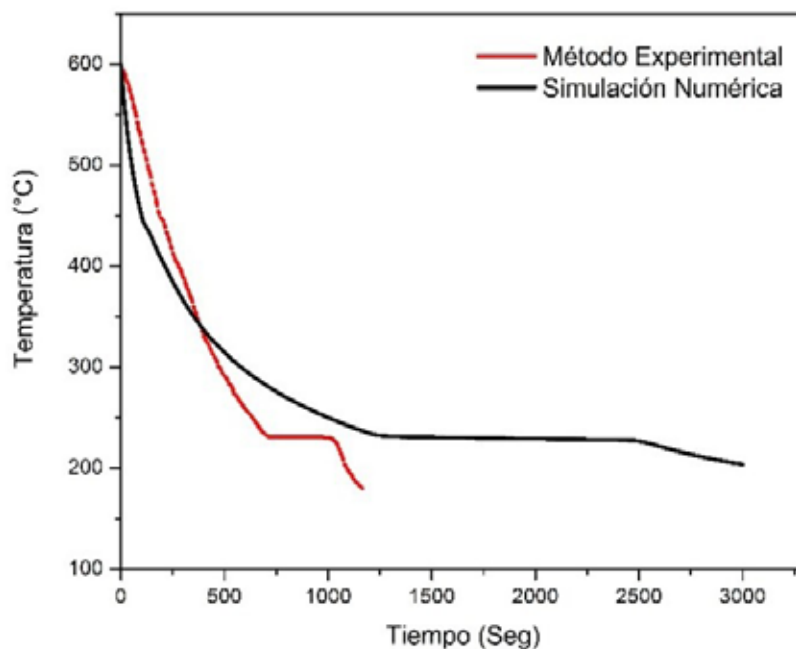


Figura 9

Comparación de las curvas de enfriamiento obtenidas mediante ambos métodos.



Con respecto a los tiempos de enfriamiento obtenidos por ambos métodos, se observa que, por el método de simulación, el tiempo total de enfriamiento del Sn es de casi el doble, a diferencia del tiempo obtenido mediante el método experimental. Como se mencionó anteriormente, una de las causas probables son las condiciones de enfriamiento que fueron utilizadas en cada uno de los métodos.

Sin embargo, independientemente del método utilizado, se observa, que la aparición de la meseta térmica se encuentra aproximadamente a 230 °C y que del sobrecalentamiento al enfriamiento, se sigue casi la misma tendencia de descenso de temperatura en ambos métodos.

## Conclusiones

Como se pudo observar, en las curvas de enfriamiento del Sn obtenidas tanto por el método experimental como por el método de simulación numérica, la transformación isotérmica se da en los 230 °C, aproximadamente, lo cual indica que la formación de la meseta térmica se presenta alrededor de esa temperatura, por lo que, aun cuando se experimentó de manera diferente en cada uno de los casos, se consiguió el resultado esperado.

Este tipo de diagramas resultan ser de mucha utilidad, ya que entendiendo el principio de enfriamiento de un material, como lo fue en este caso el Sn, podría emplearse para la realización de una aleación como tal, en la cual se obtendría un diagrama de fases binario, y así sucesivamente emplearse para la realización de aleaciones con más elementos.

### Referencias

- [1] William F. Smith, & Hashemi, J. (2011). *Foundations of materials science and engineering*. McGraw-Hill.
- [2] Tisza, M. (Ed.). (2001). *Physical metallurgy for engineers*. ASM International.
- [3] Bleckmann, M., Gleinig, J., Hufenbach, J., Wendrock, H., Giebeler, L., Zeisig, J., & Kühn, U. (2015). Effect of cooling rate on the microstructure and properties of FeCrVC. *Journal of Alloys and Compounds*, 634, 200-207.
- [4] ANSYS, Inc. (2010). Appendix A, *Advanced Heat Transfer Topics*. ANSYS Mechanical Heat Transfer. ANSYS, Inc, p. 16.
- [5] Dinwiddie, R. and Mannello, R. (2005). *Thermal conductivity* 26. Lancaster, Pa.: DEStech Publications, p. 237.
- [6] Chowdhury, A. K. (2007). *Advanced Manufacturing Technologies: Proceedings of International Conference on Advanced Manufacturing Technologies at CMERI, Durgapur during 29-30th November 2007*. Allied Publishers.

