

# Determinación del enfriamiento en piezas fundidas mediante la técnica de la simulación

Lázaro Humberto **Suárez-Lisca**  
Ramón **García-Caballero**  
Yaidel **Muñiz-Acosta**  
Alexis **Alonso-Martínez**

Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas  
Departamento Ingeniería Mecánica.  
Carretera a Camajuaní km 5 ½,  
Santa Clara, Villa Clara.  
CUBA.

Tel. (53)42-281630

correo electrónico (email): lazarosl@uclv.edu.cu

Recibido 07-09-2012, aceptado 27-02-2014.

## Resumen

La modelación del enfriamiento de una pieza es un elemento vital para la obtención de piezas fundidas con la calidad requerida. En este caso, la pieza que se toma como material de estudio es un cilindro de laminación, pieza que requiere de una elevada calidad por las condiciones de trabajo en la que desarrolla su trabajo. Este artículo está encaminado a demostrar la importancia del uso de estas técnicas predictivas que tanto aportan a la economía de una empresa. Para llevar a cabo este trabajo, se determinaron los principales elementos de la tecnología de fundición y se realizó una búsqueda sobre los principales datos fisicoquímicos del metal a utilizar, elemento muy complejo por las características del metal.

Como resultado de la evaluación se pudo apreciar el enfriamiento de la pieza con el transcurrir del tiempo, además de poder constatar la importancia de la simulación para piezas con altos requerimientos de calidad y costo.

**Palabras clave:** simulación, enfriamiento, cilindros de laminación.

## Abstract (Modeling of the Cooling of a Piece by Simulation)

The modeling of the cooling of a piece is vital to obtain castings with the required quality. In our case the part is taken as study material is a rolling mill, a piece that requires a high quality working conditions in which its work. This article aims to further demonstrate the importance of using these predictive techniques that both bring to the economy of a company.

To carry out this work, identified the key elements of the casting technology and conducted a search on the main physico-chemical data of the metal used, this very complex element by the characteristics of metal to use.

As a result of the evaluation could be seen the cooling of the piece over time, besides being able to confirm the importance of simulation for parts with high quality and cost requirements.

**Index terms:** simulation, cooling rate, rolling mill.

## 1. Introducción

Los cilindros de laminación son los elementos principales de los trenes de laminación, cuya misión es deformar plásticamente por compresión los materiales a laminar consiguiendo con ello una reducción de la sección de dichos productos [1].

Los cilindros de laminación utilizados en la industria para la conformación del metal están sometidos a condiciones altamente complejas y severas. El desgaste, bajo la forma de la abrasión o adhesión metal contra metal, y los fenómenos de fatiga térmica (laminación en caliente) ocasionan la degradación de los cilindros, especialmente cuando se combinan con la oxidación y la corrosión. Este entorno extremadamente agresivo, junto con la exigencia de una mayor pro-

ductividad con tolerancias más estrictas del producto acabado, obliga a esta industria a desarrollar nuevos materiales constitutivos.

Para combatir estos problemas, una de las técnicas utilizadas en estos casos, en general en todo el mundo, es el empleo de programas de simulación los cuales son muy efectivos en el logro de un producto final en la obtención de piezas por fundición [2], [3]. En la actualidad, toda industria competitiva requiere de la simulación de sus productos o procesos, para predecir o corregir posibles problemas que se pudieran presentar. El campo de aplicación de la simulación por elementos finitos es amplio, pudiendo utilizarse ya sea en las grandes estructuras de la industria metalmeccánica como así también en la verificación de pequeños implantes biomédicos [4].

La aplicación más difundida del método de elementos finitos es en diseño de productos. En este caso se tiene la posibilidad de evaluar de manera virtual los prototipos, permitiendo dejar para la etapa final del desarrollo la construcción y el ensayo, una vez que se ha logrado la configuración ideal [5].

En la industria cubana la simulación no es muy tomada en cuenta por diferentes razones, lo cual conlleva a que haya pérdidas económicas de gran magnitud. Desde hace años varios autores han demostrado la importancia de esta técnica [6]. Por lo que es necesario tomar en cuenta la simulación por elementos finitos y así lograr un trabajo más económico así como un producto con calidad. Por lo que es de máxima prioridad el uso de la técnica de simulación pues permite realizar la optimización en ambiente computacional con mucha velocidad y sin costos de insumos materiales o de energía. Claro que para ello hay que contar con un programa de simulación poderoso, dado que se están representando casos reales en ambiente virtual. Dada la complejidad de esta problemática, se ha estado trabajando en conjunto con la Empresa Planta Mecánica de Villa Clara con el objetivo de aplicar la alternativa de simulación en la producción de piezas fundidas y así garantizar producciones con calidad, lo cual será una gran alternativa económica para la empresa y el país de Cuba.

## 2. Materiales y métodos

Existen tres tipos básicos de herramientas de simulación computarizada: programas empíricos basados en la experiencia y resultados experimentales, programas semiempíricos basados en resultados experimentales además de física básica y programas basados principalmente en principios físicos

que requieren matemáticas complejas además de datos termofísicos aproximados de los materiales.

Para la ejecución de este trabajo se utilizó el software Ansys, este programa tiene un alcance general, es decir, el programa incluye muchas capacidades generales, tales como funciones de preprocesador, soluciones, postprocesador, gráficos, modelado paramétrico y utilidades para que el programa sea fácil de usar.

Este programa utiliza el método de los elementos finitos (MEF) el cual no es más que la transformación de un sistema de ingeniería (con infinitas incógnitas) a un modelo computacional con finitas incógnitas.

### 2.1. Diseño de la tecnología de fundición del cilindro de laminación

Lo primero por determinar es la tecnología de fundición del cilindro, en la tabla 1 se muestran los principales resultados obtenidos.

**Tabla 1.** Resumen de la tecnología de fabricación del cilindro de laminación.

Peso bruto para 4 piezas	3920 kg
Peso bruto para 1 pieza	970 kg
Peso acabado	802 kg
Contracción	1%
Temp. de vertido	1280-1240 °C
Tiempo de vertido	35 s
Tiempo de desmoldeo	86400 s
Tiempo de permanencia	86400 s
Diámetro de la boquilla	45 mm
% de eficiencia tecnológica	83%
Capacidad de la cuchara	6 ton
Pintura para el molde	1.5 dm <sup>3</sup>
Pintura para la coquilla	1.8 dm <sup>3</sup>

*Dimensiones de las cajas (véanse los demás anexos)*

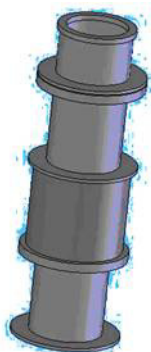
Mezclas del molde	Mezcla de cara		Mezcla sistema de alimentación	
	Denominación	kg	Denominación	kg
	MCE-4	360	MCE-4	150

Para la realización de una modelación tan compleja como es la que se propone se deben tomar algunas consideraciones iniciales:

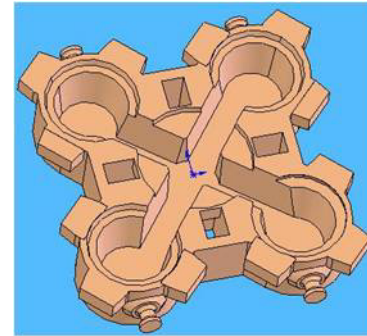
- El flujo de calor es unidireccional, estable y el molde se toma como si fuera semi-infinito. Ello implica que la temperatura exterior del molde es constante.
- El contacto térmico del metal y el molde es perfecto, no dando lugar a resistencia térmica en la interfase metal-molde. Ello significa que la temperatura de la interfase es alcanzada instantáneamente y que permanece constante (choque térmico).
- Las propiedades físicas tanto del metal como las del molde permanecen constantes durante el proceso.
- El fluido es isotrópico y tiene una viscosidad constante.
- El fluido es incompresible (densidad constante).
- El fluido es newtoniano.

Para analizar el modelo se requirió alimentar datos al sistema que afectan directamente el resultado final, tales como geometrías, materiales, temperaturas iniciales, estos se pueden observar en el Anexo I.

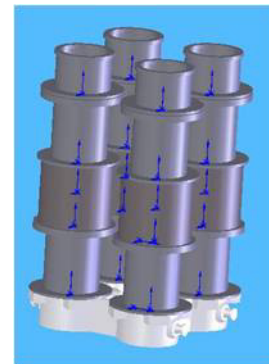
El modelo real se llevó a un ambiente computarizado permitiendo esto tener una idea de las dimensiones reales de cada punto necesario a evaluar en el programa de simulación (véase Fig.1, Fig 2 y Fig. 3).



**Fig. 1.** Dibujo del ensamblaje de las cajas para producir un cilindro.



**Fig. 2.** Base donde se ubican los moldes.



**Fig. 3.** Ensamble final para obtener cuatro cilindros en una sola colada.

### 3. Conclusiones (análisis de los resultados)

Al realizar el análisis del enfriamiento de la pieza se observa que sobre la hora de espera todavía quedan puntos locales con una temperatura mayor que el resto de la geometría y que pueden dar lugar a defectos en el futuro (véase Fig. 4 y Fig. 5), además se puede apreciar el buen trabajo que realiza la coquilla, la cual garantiza al menos en el ambiente virtual que la parte más importante de la pieza enfríe como está establecido.

Teniendo en cuenta un breve y muy superficial análisis económico, algunos datos sobre el costo de fabricación de algunos elementos se muestran en la tabla 2, nos permite apreciar la importancia del uso de la técnica de la simulación dentro de los

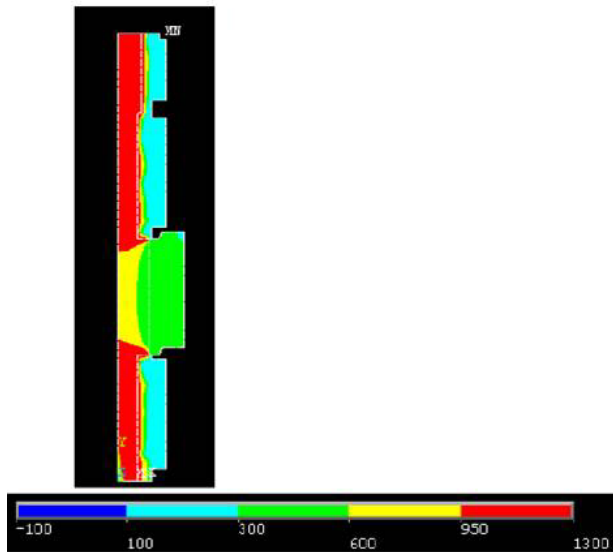


Fig. 4. Resultado de la simulación a los 10 segundos del vertido.

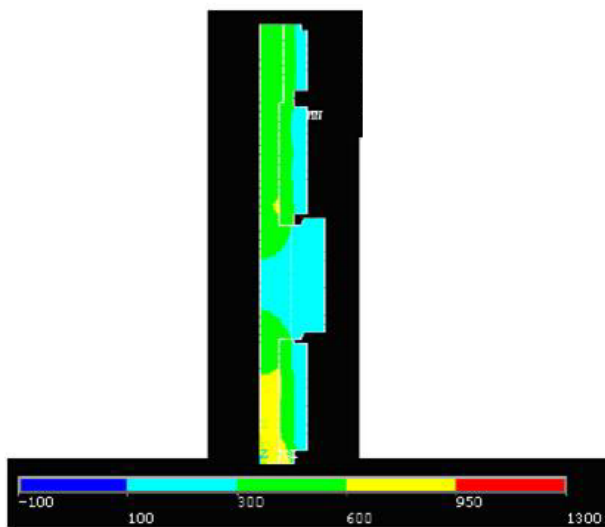


Fig. 5. Resultado de la simulación cuando ha pasado 1 hora.

procesos tecnológicos de fabricación y en especial dentro de la metalurgia para garantizar la máxima calidad del producto y beneficios económicos para la empresa que los ejecute.

## Anexo

I. Datos utilizados en el experimento.

Tabla 2. Valores monetarios de algunos elementos.

Caja para la mazarota	370.40
Caja para los extremos	740.80
Coquilla	100.00
Base	100.00
Precio del ensamble para un cilindro	1211.20
Precio del ensamble para cuatro cilindros	4944.80 (se añade la base)

## Agradecimientos

Para la realización de este trabajo se hizo indispensable la ayuda de técnicos e ingenieros de la producción los cuales aportaron sobre todo su experiencia.

## Referencias

- [1] K. H. Schröder, *Descripción básica de los fundamentos mecánicos de los cilindros de laminación*. 2003. [en línea]. Disponible en [http://www.brchina.com/downloads/spanish/Mein\\_Buch\\_es.pdf](http://www.brchina.com/downloads/spanish/Mein_Buch_es.pdf)
- [2] J. Pons i Sans, *Estudio de la convección térmica en un proceso de fundición de Aluminio por el método de los elementos finitos*. Universitat Politècnica de Catalunya, 2004.
- [3] A. Venkatesan, A., V. M. Gobinath, and A. Rajadurai, "Simulation of casting solidification and its grain structure prediction using FEM," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 168, no. 1, pp. 10-15, septiembre 2005.
- [4] T. R. Vijayaram, S. Sulaiman, A. M. S. Hamouda, and M. H. M. Ahmad, "Numerical simulation of casting solidification in permanent metallic molds," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 178, no. 1,2,3, pp. 29-33, 2006.
- [5] R. D. Pehlke, "Computer Simulation of Solidification Processes- The Evolution of a Technology," *Metallurgical and materials transactions A*, vol. 33, no. 8, 2251–2273, agosto 2002.
- [6] T. Rodríguez Moliner, A. Parada Expósito, and U. Ordóñez, "El uso de técnicas de Simulación para la predicción de defectos en piezas fundidas," *Ingeniería Mecánica*, no. 3, pp. 47-51, septiembre 2004.

### Anexo I. Datos utilizados en el experimento.

#### Datos de la mezcla de arena

Denominación	Composición	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Calor específico (J/kg°C)	Conductividad térmica (J/s m °C)
MCE-4	Arena de cromita (95%) NaOH Silicato de sodio (5%)	1500	830	0.6550

#### Datos del material de la coquilla

Denominación	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Calor específico (J/kg°C)	Conductividad térmica (J/s m °C)
FG-18 (NC)	7200	510	0.6789

#### Datos del material a verter

Temperatura	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Conductividad térmica (J/s m °C)	Entalpía de fusión $f(T)$ J/kg
100	7200	0.5836	
200	7200	0.5051	92110
300	7200	0.4433	147920
400	7200	0.3983	203140
450	7200	0.3820	
500	7200	0.3700	258530
550	7200	0.3622	287840
600	7200	0.3585	320830
650	7200	0.3590	360480
700	7200	0.3638	421820
750	7200	0.3727	485840
800	7200	0.3858	532980
850	7200	0.4031	572750
900	7200	0.4245	608760
950	7200	0.4502	642670
1000	7200	0.4801	675330
1050	7200	0.5141	707570
1100	7200	0.5524	738970
1150	7200	0.5948	1017390
1200	7200	0.6414	1046700
1250	7200	0.6922	1076010
1300	7200	0.7472	1106570
1350	7200	0.8064	1136720