

CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR EMPLEANDO UN MÉTODO INVERSO Y ELEMENTOS FINITOS, EN LA COLADA CONTINUA DE PLANCHONES

Katherine Zorrilla^{1*} y Alfonso Bencomo²

¹ U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales Caracas, Venezuela.

² U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales Caracas, Venezuela.

*katherinevzc@gmail.com

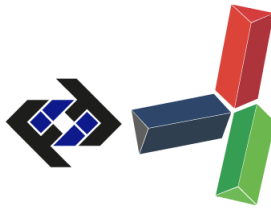
RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se persigue analizar el cálculo del coeficiente de transferencia de calor empleando un método inverso y elementos finitos, en la colada continua de planchones de acero. El método de elementos finitos (MEF) fue empleado para transformar la ecuación de calor unidimensional a un sistema algebraico, que luego fue discretizado temporalmente con un enfoque implícito (Galerkin), convirtiéndolo en un sistema de ecuaciones algebraicas. En este estudio se resuelve un problema directo, con el propósito de determinar el coeficiente de transferencia de calor de la forma empírica y la distribución de temperatura. Además, se estudia el efecto de la variación de la velocidad de colada durante el proceso de colada continua. Por otro lado, se resuelve el problema inverso empleando la estimación no lineal. Se consideraron, las propiedades físicas y de transporte dependientes de la temperatura y composición del acero. Los resultados reportados por Wang y colaboradores fueron empleados como criterio de validación del modelo desarrollado con el método de elementos finitos con enfoque Galerkin. Sin embargo, el modelo matemático resulto ajustarse muy bien, es decir, este método puede ser utilizado sin ningún problema en la solución de problemas de transferencia de calor. Con respecto, al valor ajustado del coeficiente de transferencia de calor adquirido por el método inverso fueron los esperados.

Palabras Clave: Colada Continua, método directo, método inverso, elemento Finito, discretización temporal Galerkin.

ABSTRACT

In this research work we aim to analyze the calculation of the heat transfer coefficient using an inverse method and finite elements, in the continuous casting of steel slab. The finite element method (FEM) was used to transform the one-dimensional heat equation into an algebraic system, which was then temporarily discretized with an implicit approach (Galerkin), converting it into a system of algebraic equations. This study solves a direct problem, with the purpose of determining the coefficient of heat transfer of the empirical form and the distribution of temperature. In addition, the effect of the variation of the casting speed during the continuous casting process is studied. On the other hand, the inverse problem is solved using the non-linear estimation. The physical and transport properties dependent on temperature and steel composition



were considered. The results reported by Wang and collaborators were used as validation criterion of the model developed with the finite element method with a Galerkin approach. However, the mathematical model was very well adjusted, that is to say, this method can be used without any problem in the solution of heat transfer problems. With respect, the adjusted value of the heat transfer coefficient acquired by the reverse method was expected.

Keywords: continuous casting, direct method, inverse method, finite element, temporal discretization Galerkin.

INTRODUCCIÓN

La colada continua convencional es un proceso el cual consiste en verter el metal líquido en un molde de fondo abierto, cuya sección transversal genera un perfil continuo que tiene la forma geométrica del semi-producto que se desea fabricar, es decir, se pueden obtener palanquillas, tochos o planchones. Se dice que, el proceso es continuo porque el producto sale sin interrupciones de la máquina hasta que la cuchara ha vaciado todo el metal líquido que ésta contiene, y a medida que el producto avanza dentro de la máquina de colada éste es enfriado con agua en recirculación de forma directa e indirecta dando lugar al sólido deseado.

Los métodos más comunes para la simulación de la solidificación, son: método de elementos finitos (MEF), diferencias finitas (MDF) y volúmenes de control (MVC).

Para resolver un problema inverso se debe requerir un modelo matemático del problema directo, y que a su vez estén asociados a un cierto conjunto de problemas inversos. Se tiene que, un problema directo de transferencia de calor se basa fundamentalmente en la relación entre la causa y el efecto. En cambio, un problema inverso de transferencia de calor no pueden ser reproducidos por medio de experimentos reales, ya que no es posible invertir la relación causa-efecto en forma física en lugar de hacerlo matemáticamente.

Por lo tanto, la presente investigación tiene como objetivo general analizar el cálculo del coeficiente de transferencia de calor empleando un método inverso y elementos finitos, en la colada continua de planchones de acero

El estudio fue realizado a un acero peritéctico de bajo carbono (0.12 %C), cuya dimensión del planchón es de 245 cm x 32 cm.

Anteriormente, muchos investigadores han estudiado esta área, como: Wang, J, et al.[1], Gonzalez, M.[2], Savage J. y Pritchard W.[3], Alghamdi, A.[4], entre otros.

METODOLOGÍA

En este trabajo de investigación se estableció la dependencia de manera implícita de la temperatura en función del tiempo y distancia durante el proceso de colada continua de un planchón de acero de sección transversal rectangular de 245 cm x 32 cm. Para lograr los objetivos se utilizó el método de elementos finitos (enfoque Galerkin) e inverso de transferencia de calor, cuyo propósito fue elaborar un algoritmo computacional en el programa MATLAB R2014a®, el cual permitió la simulación del proceso de colada continua, así como también la determinación de los campos de temperatura y el coeficiente de transferencia de calor.

La ecuación de transferencia de calor gobernante para un sistema de colada continua

unidimensional en estado inestable, viene dada por[1]:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right) + S \quad (1)$$

La expresión para la función de conductividad y capacidad calorífica para aceros al carbono y de baja aleación que fue aplicada en la codificación del presente algoritmo, fueron[5]:

$$k(T) = k_{\alpha} \cdot f_{\alpha} + k_{\delta} \cdot f_{\delta} + k_{\gamma} \cdot f_{\gamma} + k_l \cdot f_l \quad (2)$$

$$C_p(T) = C_{p\alpha} \cdot f_{\alpha} + C_{p\delta} \cdot f_{\delta} + C_{p\gamma} \cdot f_{\gamma} + C_{p_l} \cdot f_l \quad (3)$$

Con el fin de resolver la ecuación de transferencia de calor (ver Ecuación 1), se planteó la condición inicial y de borde del problema en estudio; además, se consideró el flujo de agua en cada ciclo de enfriamiento secundario y la radiación térmica, para simular la remoción de calor.

Al principio de la colada continua, en el tiempo $t = 0$ seg, la superficie líquida en la parte superior del molde es el límite superior del dominio de cálculo. La temperatura de colada (T_{cast}) es asumida como la temperatura del líquido a la entrada. Es decir[6],

$$T(x, y, t)|_{t=0} = T_{cast} \quad (4)$$

Además, existen dos zonas en la máquina de colada continua en estudio; por lo que, las condiciones de borde se desglosan de la siguiente manera:

a) Zona de molde

El flujo de calor promedio en función del tiempo de colada, es decir[7]:

$$q = A - B \sqrt{\frac{y}{v_{cast}}} \quad (5)$$

b) Zona de enfriamiento secundario

El coeficiente de transferencia de calor entre el agua spray y la superficie del planchón fue calculado a través de la siguiente fórmula[8,9]:

$$h_{spray} = \frac{1570 \times w^{0.55} \times [1 - 0.0075 \times (T_{spray} - 273.15)]}{\alpha} \quad (6)$$

El coeficiente de transferencia de calor Newtoniana que se utilizó para calcular la transferencia de calor radiactivo entre el planchón y entorno, fue[8]:

$$h_{rad} = \varepsilon \times \sigma \times (T_{surface}^2 + T_{ambiente}^2) \times (T_{surface} + T_{ambiente}) \quad (7)$$

Por otra parte, para este trabajo de investigación se seleccionó el método de discretización espacial formulado a través del balance de elementos finitos; con el propósito de discretizar la ecuación gobernante. Como el estudio de la transferencia de calor corresponde a un problema unidimensional, esto conlleva a la implementación de elementos de geometría simple, en este caso fueron elementos del tipo lineal-cuadrática de n nodos.

Se tiene que la ecuación matricial a resolver utilizando el enfoque Galerkin, está dada por la ecuación siguiente (ver Ecuación 8), la cual es[10]:

$$C \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + K \cdot T - F = 0 \quad (8)$$

Para resolver la ecuación matricial descrita anteriormente (ver Ecuación 8), se empleó un esquema implícito, descrito como[11]:

$$\left(\frac{1}{\Delta t} [C] + \beta [K] \right) \{T\}^{n+1} = \left(\frac{1}{\Delta t} [C] - (1 - \beta) [K] \right) \{T\}^n + (1 - \beta) \{F\}^n + \beta \{F\}^{n+1} \quad (9)$$

Para el estudio de este problema se tomó en consideración que:

Si $\beta = 2/3 \rightarrow$ Enfoque Galerkin, entonces

$$\left(\frac{1}{\Delta t} [C] + \frac{2}{3} [K] \right) \{T\}^{n+1} = \left(\frac{1}{\Delta t} [C] - \frac{1}{3} [K] \right) \{T\}^n + \frac{1}{3} \{F\}^n + \frac{2}{3} \{F\}^{n+1} \quad (10)$$

Se consideró un criterio de convergencia de la temperatura, el cual es definido de la siguiente manera[12]:

$$Error_T(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (T^{n+1} - T^n)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (T^n)^2}} \times 100 \leq \epsilon \quad (11)$$

donde: $\epsilon \leq 1\%$.

Con el fin de resolver el problema inverso de transferencia de calor en colada continua, el método de estimación no lineal fue adoptado por Beck, J. [13]. La clave del método de estimación no lineal es minimizar $\varphi(h)$, expresado de la siguiente manera[6]:

$$\varphi(h) = \sum_{i=1}^N (T_i^c - T_i^m)^2 \quad (12)$$

donde: T_i^c representa el valor calculado de la temperatura del planchón [K] y T_i^m es el valor medido de la temperatura del planchón. Aquí T_i representa la temperatura superficial en el centro del planchón en la salida de la zona 4, 5, 6, 7 y 8. h es el coeficiente de transferencia de calor; N es el número de posiciones medidas.

Usando la expansión de polinomio de Taylor para minimizar $\varphi(h)$, se obtiene[6,13]:

$$\Delta h_{l+1} = \frac{\sum_{i=1}^N (T_i^m - T_i^c) \times \phi_l}{\sum_{i=1}^N (\phi_l)^2} \quad (13)$$

Donde:

$$\phi_l = \frac{\partial T_i^c(h_l)}{\partial h} = -\frac{q''}{h^2} \quad (14); \quad h_{l+1} = h_{l+1} - h_l \quad (15)$$

Δh_{l+1} es el valor ajustado de coeficiente de transferencia de calor entre la interacción (l+1) y (l). h_{l+1} y h_l representa el valor del coeficiente de transferencia de calor en la iteración (l+1) y (l), respectivamente.

Por último, se consideró un criterio de convergencia, el cual es definido de la siguiente manera[13]:

$$\frac{\Delta h_{l+1}}{h_l} < \delta \quad (16)$$

donde: $\delta < 0,01$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El algoritmo computacional fue realizado en el programa MATLAB R2014a®, se logró predecir el comportamiento del proceso de colada continua ante unas condiciones de trabajo específicas fijadas por el usuario. El dominio computacional fue de un total de 588.327 nodos sobre la mitad del espesor del planchón.

El método directo es usado para determinar la distribución de temperatura dentro del cuerpo sólido cuando ciertas condiciones son dadas, por ejemplo las condiciones de borde, el flujo de calor es una función dependiente del tiempo[14]. En la figura (ver Figura 1), se observa las curvas correspondientes a la temperatura superficial del planchón utilizando el método de elemento finito (FEM) unidimensional con enfoque Galerkin y el método de algoritmo evolutivo (Wang, Z. et al. [6]); la curva empleando FEM mostró una buena correspondencia, tanto en la zona de molde como en la zona de enfriamiento secundario, a pesar que en esta última zona existe cierta discrepancia en las temperaturas superficiales. Esto es motivado a que los investigadores Wang, Z. et al. [6] no especificaron muy bien las propiedades físicas que emplearon o que ambos métodos son de teorías básicas diferentes, ya que Wang y colaboradores

utilizó el algoritmo evolutivo el cual opera de forma simultánea con varias soluciones y no de manera secuencial, además trabajan con cierta información genética (código binario) siendo más sofisticado su resolución; en cambio, FEM permite obtener una solución numérica aproximada de las ecuaciones diferenciales parciales (en forma débil) asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas de manera secuencial; lo que implicó una discrepancia en los resultados. Se requiere de mayor información para dar a conocer las causas de estas discrepancias, y esto va más allá de los objetivos de este trabajo de investigación. Sin embargo, varios investigadores reportaron comportamientos similares en una curva de enfriamiento a medida que avanza en un proceso de colada continua[6,15,16,17].

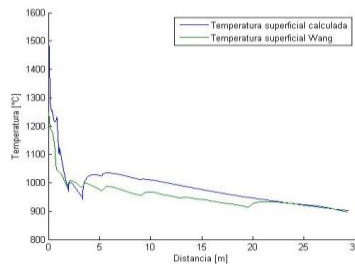


Figura 1. Temperatura superficial calculada y medida del planchón con una velocidad de colada de 0,65 m/min, para una aleación de acero peritético de dimensiones 245 cm x 32 cm.

Por otra parte, el planchón al salir de la zona curva, este pasa por una zona recta que sigue perteneciendo a la zona de enfriamiento secundario, donde la distribución de temperatura fue plasmada en la siguiente figura (ver Figura 2). Se exhibe cuando el planchón está totalmente solidificado, el cual es a una distancia de aproximadamente 26 m. La zona de enfriamiento secundario está acorde con lo encontrado en la literatura[18], además, se evidencia con mayor claridad las isoterms obtenidas en los perfiles de temperatura.

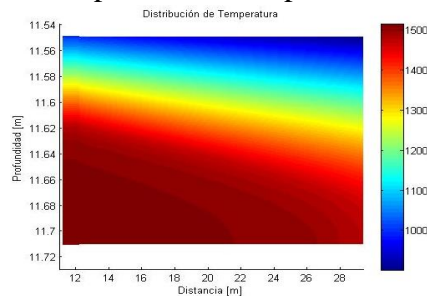


Figura 2. Mapa de colores de la distribución de temperatura en la zona de enfriamiento secundario (zona recta) con una velocidad de colada de 0,65 m/min, para una aleación de acero peritético de dimensiones 245 cm x 32 cm.

Una de las variables que tiene un efecto durante el proceso de colada continua, es la velocidad de colada, lo que nos puede generar una modificación en el espesor solidificado. En la figura 3 (ver Figura 3), se evidencia que al final de la longitud metalúrgica la temperatura superficial es mayor a mayores velocidades de colada, lo que genera una menor extracción de calor en la zona y en el resto de la longitud porque el tiempo de residencia del metal es menor lo que se traduce en un

enfriamiento más lento. Ocurre todo lo contrario a menores velocidades de colada. Si la velocidad de colada es menor, esto implicó un mayor crecimiento del espesor solidificado. Varios investigadores como Yanez, R. et al., Ma, J. et al. establecen un comportamiento similar en una curva de enfriamiento a medida que avanza en la máquina de colada continua[17,18].

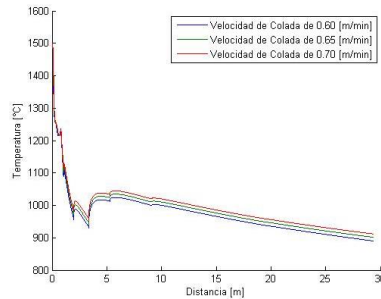


Figura 3. Temperatura superficial calculada del planchón con diferentes velocidades de colada, para una aleación de acero peritético de dimensiones 245 cm x 32 cm.

En cambio, el flujo de calor no puede ser determinado de manera experimental, sino la temperatura en el sólido y ésta puede ser monitoreada por sensores. Por lo que, se requiere aplicar el método inverso, su objetivo es estimar el flujo de calor a partir del conocimiento de la temperatura.

En la tabla (ver Tabla 1), se aplicó la estimación no lineal en la zona 4 a la 8, ya que no se logró obtener el coeficiente de transferencia de calor entre la zona 1 y 3, esto es debido a la dificultad de realizar las mediciones en esas zonas; por lo que el valor del coeficiente en esas zonas son sustituidas por los valores arrojados al usar la fórmula empírica. Al comparar los coeficientes de transferencia de calor se percibió que hay una diferencia con el investigador Wang, J. et al[6]. Y se debe a que la extracción de calor en la zona de enfriamiento secundario depende principalmente del enfriamiento por la acción directa del agua, ya que este mecanismo es el que extrae la mayor cantidad de calor y éste se determina por la ecuación 6, la cual es función del flujo de agua y ésta depende del tipo de boquilla (diámetro), ángulo de dispersión, número de spray, volumen de agua[19,20,21,22], los cuales no fueron especificados por los investigadores Wang, J. et al[6]. Otro aspecto, se debe a la diferencia de métodos aplicados. En la zona de enfriamiento secundario se debe tomar en cuenta el contacto con rodillos, radiación y enfriamiento por spray[22], lo que afecta de manera directa el coeficiente de transferencia de calor en cada zona.

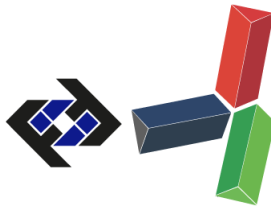


Tabla 1. Comparación de los coeficientes de transferencia de calor usando el método inverso.

Número de Zona	Estimación del Coeficiente de Transferencia de calor (h) [W/m ² .K]	
	Método inverso (Wang)	Método inverso calculado
1		
2		
3		
4	117,2	116,58
5	83,4	104,39
6	58,0	99,81
7	50,3	89,18
8	49,8	79,32

CONCLUSIONES

La comparación de los resultados obtenidos por el MEF y el algoritmo evolutivo (distribución de temperatura y coeficiente de transferencia de calor), ha comprobado la confiabilidad del MEF.

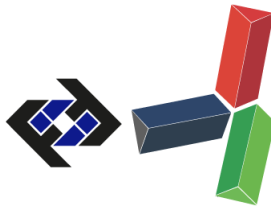
La distribución de temperatura a lo largo de la longitud metalúrgica es la esperada, y en la zona de enfriamiento secundario, se observó el crecimiento del espesor solidificado hasta que el planchón se solidificó completamente (longitud de 26 m).

La evaluación del efecto de la velocidad de colada permitió establecer que a menor velocidad de colada, la temperatura superficial disminuía, debido a que el tiempo de permanencia del planchón era mayor.

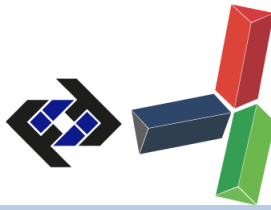
El coeficiente de transferencia de calor arrojado por el método inverso es mayor en comparación al determinado por los investigadores Wang et al[1]., y se debe a que ellos no especificaron los tipos de boquillas de su máquina de colada continuas, así como también de las propiedades físicas que utilizaron.

REFERENCIAS

- [1] Z. Wang, M. Yao, X. Wang, X. Zhang, L. Yang, H. Lu, and X. Wang. (2014) Materials Processing Technology, Vol 214 "Inverse problem-coupled heat transfer model for steel continuous casting" p 44-49.
- [2] M. González. (2002) "Modelo inverso de estimación del coeficiente de transferencia de calor acero-molde, en el proceso de colada continua de planchones". Universidad de Buenos Aires, Argentina. Tesis especial de grado.
- [3] J. Savage and W. Pritchard. (1954) Journal of the Iron and Steel Institute, Vol. 178 "The problem of rupture of the billet in the continuous casting of steel". P 269- 277.
- [4] A. Alghamdi. (2010) Engineering Science. Vol 21 "Inverse estimation of boundary heat flux for heat conduction model" p 73.
- [5] L. Chunsheng and T. Brian. (2004). Metallurgical and materials transactions, Vol 35B "Thermomechanical Finite-element model of shell behavior in continuous casting of steel". p 1151-1172.



- [6] Tecnología Industrial BCT1. (2009) Tema 9: Metales ferrosos. <https://sites.google.com/site/tecnologiaindustrialbct1cj/tema-9>
- [7] J. Enríquez, E. Tremps, S. De Elío, and D. Fernández. (2015) Colada del acero. http://oa.upm.es/1669/1/MONO_TREMPES_2009_01.pdf
- [8] F. Incropera and D. De Witt. (1999). “Fundamentos de Transferencia de Calor”. Prentice Hall, México.
- [9] T. Nozaki, J. Matsuno, K. Murata, H. Ooi, and M. Kodama. (1978). Transaction ISIJ. Vol 18 “A secondary cooling pattern for preventing surface cracks of continuous slab”. p 330-338.
- [10] J. García and J. Maheut. (2015) “Modelado y resolución de problemas de organización industrial mediante programación matemática lineal”. <https://personales.Upv.es/jpgarcia/LinkedDocuments/modeladomatematico.pdf>
- [11] R. Cook, D. Malkus, and M. Plesha. (1989) “Concepts and applications of Finite element analysis” John Wiley & Sons Ltd, Inglaterra, 3era edition.
- [12] J. Álvarez, E. Puchi, and A. Bencomo. (2015) Steel research Vol 11 “Element-free galerkin formulation by moving least squares for internal energy balance in a continuous casting process. p. 1403-1418.
- [13] S. Rao. (2005) “The finite element method in engineering”. El Sevier, Estados Unidos de América, 4ta edition.
- [14] J. Bergheau and R. Fortunier. (2004) “Finite element simulation of heat transfer”. John Wiley & Sons Ltd, Inglaterra, 1era edition.
- [15] Fundación Artística de Bronce-Fademesa. (2011) “Galería de fotos”. <http://www.Fademesa.com/galerias-fotos/fundicion-moldes.php>.
- [16] M. Alizadeh, S. Jahromi, and S. Nasihatkon. (2010) ISIJ International. Vol 50 “Applying finite point method in solidification modeling during continuous casting process”. p 411-417.
- [17] J. Ma, Z. Xie, Y. Ci, and G. Jia. (2009). Materials Science and Technology, Vol 25 “Simulation and application of dynamic heat transfer model for improvement of continuous casting process” p 636-639.
- [18] R. Myers. (2003) “The Basics of Chemistry”. Greenwood Press, Estados Unidos de América.
- [19] A. Ramírez, R. Aguilar, M. Palomar, M. Romero, and D. Nuñez. (2010) International Journal of Minerals. Vol 17 “Simulation of heat transfer in steel billets during continuous casting”. p 403-416.
- [20] A. Ramírez, A. Mosqueda, V. Sauce, R. Morales, A. Ramos, and G. Solórzano. (2006) Revista de Metalurgia. Vol 42 “Desarrollo de simuladores para procesos industriales. parte ii (colada continua)”. P 209-215.
- [21] Z. Peng, Y. and Yang L. Bao, Y. and Chen, X. Xie, and F. Zhang. (2014) International Journal of Minerals. Vol 21 “Effects of calculation approaches for thermal conductivity on the simulation accuracy of billet continuous casting”. p 1825.
- [22] J. Ha, J. Cho, B. Lee, and M. Ha. (2001). Journal of Materials Processing Technology. Vol 113. “Numerical analysis of secondary cooling bulging in the continuous casting of slabs”. p 257-261.



TERMINOLOGÍA

SIMBOLO		SIMBOLO	
ρ [kg/m ³]	Densidad del acero	h_{rad} [W/(m ² .K)]	Coefficiente de transferencia de calor radiactivo. Se realizó la conversión de h_{rad} a [W/(cm ² .K)].
c [J/(kg.K)]	Calor específico del acero	C	Matriz de capacitancia.
T [K]	Temperatura instantánea del planchón.	K	Matriz de conductividad o de rigidez.
t [s]	Tiempo.	F	Vector de cargas.
λ [W/(J.m)]	Conductividad térmica.	T	Vector de temperatura.
x e y [m]	Representa la dirección a lo largo del ancho y espesor del planchón.	T^{n+1}	Temperatura en la siguiente iteración [K].
S [W/m ³]	Fuente de energía térmica.	T^n	Temperatura en el instante anterior [K].
T _{cast} [K]	Temperatura de colada, que es medida en el tundish.	V _{cast} [cm/seg]=	Velocidad de colada.
q [cal/(cm ² .seg)]	Flujo de calor del molde. Se realizó la conversión de q a [W/cm ²].	w [L/(m ² .s)]=	Flujo de agua spray de enfriamiento.
A y B	Coefficientes experimentales para el flujo de calor en el molde; los cuales equivalen a 64 y 16/3, respectivamente.	T _{spray} [K]=	Temperatura de agua spray de enfriamiento.
y [cm]	Distancia de menisco.	α =	Máquina dependiente del factor de calibración= 4.
h_{spray} [W/(m ² .K)]	Coefficiente de transferencia de calor en enfriamiento spray. Se realizó la conversión de h_{spray} a [W/(cm ² .K)].	σ [W(m ² .K ⁴)]	Constante de Stefan-Boltzman = 5,6684x10 ⁻⁸
ϵ	Emisividad de la superficie del planchón.	T _{surface} [K]	Temperatura de la superficie del planchón.
T _{ambiente} [K]	Temperatura ambiente.		