

Análisis de sensibilidad de los parámetros que afectan al espesor de la capa solidificada en el proceso de colada continua de aceros

Sensitivity analysis of parameters affecting the thickness of the solidified layer in the continuous casting process of steels

Edgar López-Martínez^{1*}, Octavio Vázquez-Gómez^{2,3}, Gaspar R. León-Gil⁴

¹ Campus Tehuantepec, Universidad del Istmo, ² Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, ³ División de Estudios de Postgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Morelia, ⁴ Campus Tehuantepec, Universidad del Istmo
¹ lopeze@sandunga.unistmo.edu.mx, ^{2,3} ovazquezgo@conacyt.mx, ⁴ leon.gil.gaspar@gmail.com

Resumen– Se realizó un análisis de sensibilidad del efecto del flujo de calor, la temperatura y velocidad de colada en la estimación del espesor de la capa solidificada en el proceso de colada continua. Debido a las dificultades experimentales para la determinación de este espesor, se formuló un modelo matemático de la transferencia de calor durante la solidificación, el cual consistió en una formulación Lagrangiana en 2D en estado inestable. Para simplificar la solución, se utilizó el concepto de conductividad térmica efectiva en la fase líquida, con lo que esta fase fue modelada como si se tratara de un sólido. La solución del modelo se llevó a cabo numéricamente con el método de diferencias finitas implícito de dirección alternante. El modelo fue verificado y validado mediante la comparación de una solución analítica y con resultados experimentales obtenidos de la literatura respectivamente. Se observó que a diferentes temperaturas de colada es posible obtener un espesor de la capa solidificada similar a la salida del molde.

Palabras claves– Flujo de calor, método de diferencias finitas implícito de dirección alternante, solidificación.

Abstract– A sensitivity analysis of the effect of the heat flow, casting temperature and casting rate in estimating the thickness of the solidified layer in the continuous casting was performed. Due to experimental difficulties for determining this thickness, a mathematical model of heat transfer during solidification, which consisted of a Lagrangian formulation in unstable state 2D was formulated. To simplify the solution, the concept of effective thermal conductivity was used in the liquid phase, so this phase was modeled as if it were a solid. With the alternating direction implicit method, the solution was obtained. The model was verified and validated by comparing the analytical solution and experimental results from the literature respectively. It was observed that with different casting temperatures, it is possible obtain a solidified layer similar to the mold outlet.

Keywords– Heat flow, finite difference alternating direction implicit method, solidification.

Tipo de Artículo: Original

Fecha de Recepción: 4 de julio de 2017

Fecha de Aceptación: 25 de septiembre de 2017

1. Introducción

Durante su proceso de fabricación, la mayoría de los componentes metalúrgicos-mecánicos pasan por una fase de solidificación, aun aquellos componentes fabricados por procesos de conformado mecánico. Se sabe que el comportamiento durante la fabricación o en servicio de estos componentes muchas veces está influenciado por el proceso de solidificación. Características como tamaño de grano, porosidades, segregación, esfuerzos residuales, distorsión y demás, se

pueden generar y/o ser controlados durante esta etapa. En particular, en el proceso de colada continua, la solidificación se presenta en las paredes del molde (figura 1), produciéndose una capa solidificada. En el análisis del proceso de colada continua es importante examinar cómo afectan las variables del proceso en el espesor de la capa solidificada, ya que si ésta no presenta un espesor mínimo, podría llegar a romperse, llevando a un paro del proceso con las subsiguientes pérdidas económicas [1]. Las variables más importantes

para controlar el espesor de esta capa son el flujo de calor entre la capa solidificada y el molde, la temperatura de colada y la velocidad de colada. Modificando estas variables, por ejemplo maximizando el flujo de calor, y minimizando la temperatura y velocidad de colada, se podría asegurar un espesor suficiente de la capa solidificada, pero esto traería consigo la disminución de la productividad. Por esta razón, el objetivo de este trabajo es determinar la influencia del flujo de calor, la temperatura y velocidad de colada en el espesor de la capa solidificada que sale del molde. Para estimar o determinar este espesor, se pueden realizar mediciones directamente en planta [2], variando la temperatura y velocidad de colada y midiendo el perfil de temperaturas en el molde, pero esto resulta muy poco viable debido al número de pruebas que se necesitan realizar, a las dificultades en el diseño experimental para determinar el espesor y a las dificultades técnicas y económicas. Debido a que no es posible realizar mediciones en laboratorio que representen al proceso, y que un modelo físico no es posible, la otra forma de estudiar el comportamiento es mediante la formulación de un modelo matemático [3-5].

Los modelos matemáticos son una poderosa herramienta en el análisis, diseño y optimización de procesos metalúrgicos. Estos procesos suelen desarrollarse en un régimen no permanente, en donde las propiedades termofísicas y parámetros del proceso son función de la temperatura y de otras variables. Generalmente los procesos metalúrgicos son descritos por ecuaciones diferenciales parciales, las cuales necesitan ser resueltas con sus respectivas condiciones de frontera para poder analizar el efecto de las variables independientes. A causa de la no linealidad de la formulación matemática de estos procesos, no es posible obtener una solución analítica de las ecuaciones diferenciales, por lo que se vuelve necesario implementar un método numérico de solución. Sin duda se tendrán que realizar mediciones en planta para poder validar el modelo y para obtener las condiciones de frontera, pero una vez que se ha hecho esto, las variables que controlan el proceso pueden ser estudiadas para analizar su efecto sobre el comportamiento de la colada continua.

Uno de los parámetros más importantes a considerar en la modelación matemática del proceso de colada

continua, es la correcta estimación de las condiciones de frontera, en especial la frontera entre la superficie de la capa solidificada y el molde, la cual suele ser caracterizada con la estimación de un coeficiente global de transferencia de calor. Esto se debe a que el acero se contrae durante la solidificación, por lo que hay un contacto entre la capa solidificada y el molde. Con esto, en esta frontera, los mecanismos que gobiernan la transferencia de calor son los de convección y radiación. Existen muchas dificultades para la correcta estimación de este coeficiente, en donde se sabe que no puede ser considerado constante, ya que varía a lo largo del molde [6].

Un análisis de sensibilidad se puede realizar para determinar el efecto de los parámetros del proceso o para determinar el efecto de la adecuada estimación de las propiedades térmicas [7, 8]. En este trabajo se decidió la formulación de un modelo matemático para realizar un análisis de sensibilidad del flujo de calor, temperatura y velocidad de colada en la estimación del espesor de la capa solidificada en la colada continua.

2. Formulación matemática

En el proceso de colada continua, acero líquido fluye a través de un molde de cobre enfriado con agua, en donde debido a la extracción de calor que se presenta, se desarrolla una capa solidificada que crece en espesor en la dirección perpendicular a la superficie del molde (figura 1). Dependiendo del punto de vista, el proceso puede ser analizado en estado estable o inestable. Si en una posición dada se analiza como cambia la temperatura en función del tiempo, se tratará de un problema en estado inestable. Por el contrario, si se analiza como cambia la temperatura en función de la posición en la dirección z , se trata de un problema de estado estable.

2.1 Definición del sistema

La formulación matemática en estado estable, corresponde a una formulación Euleriana, y en estado inestable corresponde a una formulación Lagrangiana. Debido a las dificultades en la obtención de las condiciones a la frontera en estado estable, se decidió utilizar una formulación Lagrangiana en dos dimensiones en el plano xy . La figura 2 muestra el sistema bajo estudio. Este sistema presenta simetría, por

lo que es conveniente modelar solo una cuarta parte del sistema.

Para resolver el problema, se hacen las siguientes suposiciones:

1. La temperatura de colada (temperatura inicial) es uniforme en todo el sistema.
2. Se ignora la conducción de calor en la dirección z , debido a que su magnitud es mucho menor en comparación con la conducción en las direcciones x e y .
3. Se desprecian los efectos de convección en la fase líquida.
4. Las propiedades térmicas son función de la temperatura.
5. El coeficiente de transferencia de calor global es función del tiempo de morada (t_M) en el molde.

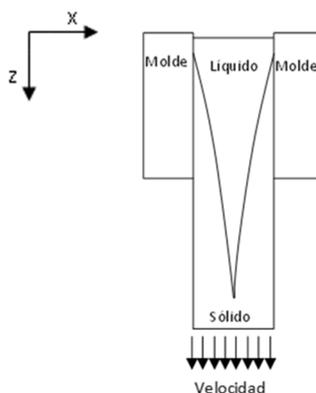


Figura 1. Esquema de la colada continua.

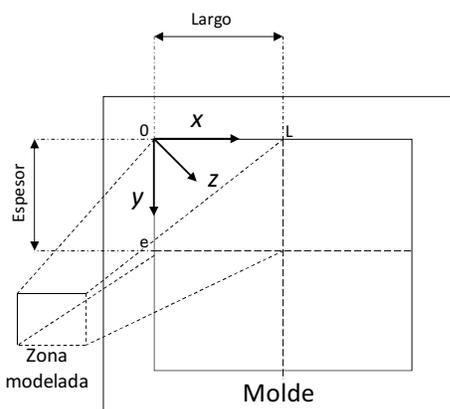


Figura 2. Definición del sistema bajo estudio.

2.2 Balance

Usando el método de la entalpía [9] y bajo las consideraciones dadas, la ecuación (1) define al sistema en estado inestable:

$$\rho \left(\frac{\partial H}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (1)$$

donde ρ es la densidad, k la conductividad térmica, y H la entalpía. Debido a que se desprecian los efectos convectivos en el líquido, la conductividad térmica se puede determinar como una combinación lineal entre las conductividades térmicas del sólido (k_s) y del líquido (k_l):

$$k = (1-g)k_s + gk_l \quad (2)$$

donde g es la fracción de líquido. La entalpía se determina como:

$$H = (1-g)Cp_s(T - T_{ref}) + gCp_l(T - T_{ref}) + gH_L \quad (3)$$

donde k_s , k_l , Cp_s y Cp_l son las conductividades térmicas y capacidades caloríficas de las fases sólida y líquida respectivamente, H_L es el calor latente de solidificación y T_{ref} es una temperatura de referencia.

Las condiciones de frontera e inicial son:

Condición de frontera 1: En $x = 0$, el flujo de calor por conducción que llega a la frontera es el que se transfiere por convección para cualquier posición y :

$$-k \frac{\partial T(0, y, t)}{\partial x} = -h_w (T - T_\infty) \quad (4a)$$

donde h_w es el coeficiente de transferencia de calor global entre la superficie de la capa solidificada y el molde.

Condición de frontera 2: En $y=0$ el flujo de calor por conducción que llega a la frontera es el que se transfiere por convección para cualquier posición x :

$$-k \frac{\partial T(x, 0, t)}{\partial y} = -h_N (T - T_\infty) \quad (4b)$$

donde h_N es el coeficiente de transferencia de calor global entre la superficie de la capa solidificada y el molde ($h_w=h_N$).

Condición de frontera 3: En $x=L$ no existe transferencia de calor a través de la frontera debido a la

simetría del sistema (frontera aislada) para cualquier posición y :

$$-k \frac{\partial T(L, y, t)}{\partial x} = 0 \quad (4c)$$

Condición de frontera 4: En $y=e$ (donde e es el espesor, ver figura 2) no existe transferencia de calor a través de la frontera debido a la simetría del sistema (frontera aislada) para cualquier posición x :

$$-k \frac{\partial T(x, e, t)}{\partial y} = 0 \quad (4d)$$

Condición inicial: La temperatura inicial del sistema es uniforme para cualquier posición (temperatura de colada):

$$T(x, y, 0) = T_0 \quad (4e)$$

Con esto, la formulación matemática queda totalmente definida.

3. Solución

Se obtuvieron dos soluciones de la ecuación (1), 1) una solución numérica y 2) una solución analítica, con ciertas suposiciones, para verificar la consistencia de la primera solución.

3.1 Solución numérica

La ecuación (1) no se puede resolver analíticamente, por lo que se requiere de un método numérico. El método que se seleccionó es el de diferencias finitas implícito de dirección alternante [10]. Este método consiste en discretizar el sistema y realizar un balance de energía dentro de un volumen de control. En la mitad de un tiempo dado, el balance se realiza explícitamente en una dirección e implícitamente en la otra, y en la siguiente mitad de tiempo los balances se realizan ahora explícitamente los que primeramente se realizaron implícitamente y viceversa. La figura 3 muestra la discretización del sistema, en donde se puede apreciar que se necesitan nueve ecuaciones de diferencias finitas diferentes para la descripción completa del sistema.

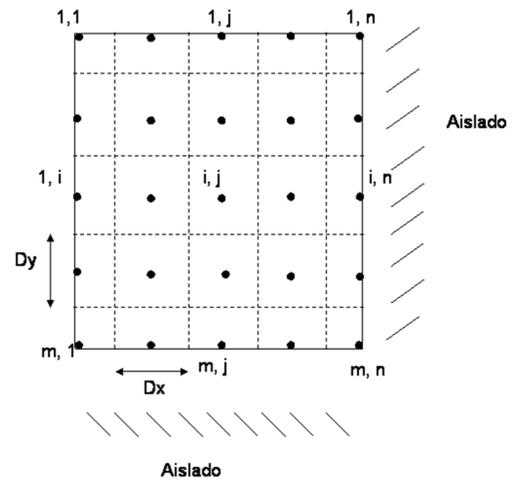


Figura 3. Discretización del sistema.

La obtención de las ecuaciones se realiza por medio de un balance de energía en cada volumen de control del sistema. Para los nodos internos (i, j) , realizando balances explícitos en la dirección y e implícitos en la dirección x , el balance total queda como:

$$\begin{aligned} & -k_N \frac{(T_{i,j}^p - T_N^p) A_N}{\Delta y} - k_S \frac{(T_{i,j}^p - T_S^p) A_S}{\Delta y} \\ & -k_W \frac{(T_{i,j}^{p+1/2} - T_W^{p+1/2}) A_W}{\Delta x} - k_E \frac{(T_{i,j}^{p+1/2} - T_E^{p+1/2}) A_E}{\Delta x} \quad (5) \\ & = \rho V_{i,j} \frac{(H_{i,j}^{p+1/2} - H_{i,j}^p)}{\Delta t/2} \end{aligned}$$

reordenando, se tiene:

$$\begin{aligned} & H_{i,j}^{p+1/2} + \left(\frac{k_{EP} A_E \Delta t}{2V_{i,j} \rho \Delta x} + \frac{k_{WP} A_W \Delta t}{2V_{i,j} \rho \Delta x} \right) T_{i,j}^{p+1/2} \\ & - \frac{k_{EP} A_E \Delta t}{2V_{i,j} \rho \Delta x} T_E^{p+1/2} - \frac{k_{WP} A_W \Delta t}{2V_{i,j} \rho \Delta x} T_W^{p+1/2} \quad (6) \\ & = H_{i,j}^p - \left(\frac{k_{SP} A_S \Delta t}{2V_{i,j} \rho \Delta y} + \frac{k_{NP} A_N \Delta t}{2V_{i,j} \rho \Delta y} \right) T_{i,j}^p \\ & + \frac{k_{SP} A_S \Delta t}{2V_{i,j} \rho \Delta y} T_S^p + \frac{k_{NP} A_N \Delta t}{2V_{i,j} \rho \Delta y} T_N^p \end{aligned}$$

Para un tiempo dado (p) , el valor del lado derecho de la ecuación (6) es conocido, y del lado izquierdo solo se desconoce las entalpías y temperaturas a la mitad del

tiempo siguiente ($p+1/2$), por lo que al realizar todos los balances en los volúmenes de control y reordenando, estas ecuaciones se pueden presentar en la forma compacta:

$$[A]\{B_{i,j}^{p+1/2}\} = \{d_{i,j}\} \quad (7)$$

donde la matriz $[A]$ contiene los coeficientes que multiplican al vector de variables desconocidas $\{B_{i,j}^{p+1/2}\}$, y el vector $\{d_{i,j}\}$ representa a los términos conocidos del lado derecho del sistema de ecuaciones. En total se obtiene un sistema de $m*n$ ecuaciones simultáneas, donde m y n son el número de nodos en las direcciones y y x respectivamente.

3.2 Solución analítica

Como ya se mencionó, la ecuación (1) no puede resolverse analíticamente; sin embargo, para verificar la solución numérica, se requiere de una solución analítica. Para poder obtener una solución analítica, se asumen ciertas simplificaciones, las cuales consisten en:

1. Aislar la frontera norte para convertir el problema de 2D a 1D.
2. Aumentar el largo del molde lo suficientemente como para que el centro del molde no cambie de temperatura durante el proceso, es decir, convertir al sistema en un sistema semi-infinito.
3. Asumir que la condición a la frontera entre el molde y la capa solidificada es del tipo Dirichlet tomando el valor de la temperatura del molde (T_{sup}).
4. Las propiedades termofísicas no son función de la temperatura.

Con estas suposiciones, la ecuación (1) puede ser resuelta analíticamente, obteniendo la solución para un sólido semi-infinito:

$$\frac{(T - T_{sup})}{(T_0 - T_{sup})} = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \quad (8)$$

Con esta solución de la ecuación (1) se puede calcular el perfil térmico en cualquier posición en cualquier tiempo dentro del sistema.

4. Verificación

Para poder verificar la solución numérica, se obtuvieron resultados con suposiciones similares a la solución analítica, las cuales consistieron en:

1. Se aisló la frontera norte, es decir el coeficiente de transferencia de calor global, h_N , se igualó a cero, con lo que la condición de frontera 2 quedó como:

$$-k \frac{\partial T(x,0,t)}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

2. El coeficiente de transferencia de calor global en el oeste, h_W , se le dio un valor muy “grande” con el propósito de hacer que durante la simulación, la temperatura de la superficie de la capa solidificada baje casi inmediatamente hasta la temperatura del molde.

3. Las propiedades termofísicas fueron asumidas para tomar un valor constante a lo largo de todo el proceso.

4. Se aseguró que la temperatura del centro se mantuviera a la temperatura de colada, la cual es una condición necesaria para que se pueda tratar de un sólido semi-infinito.

La figura 4 muestra la respuesta térmica obtenida numéricamente con las simplificaciones antes mencionadas y se compara con la solución analítica obtenida con la ecuación (8). Se observa que las dos soluciones son semejantes, con lo que se puede decir que la solución numérica es consistente y por lo tanto queda verificada.

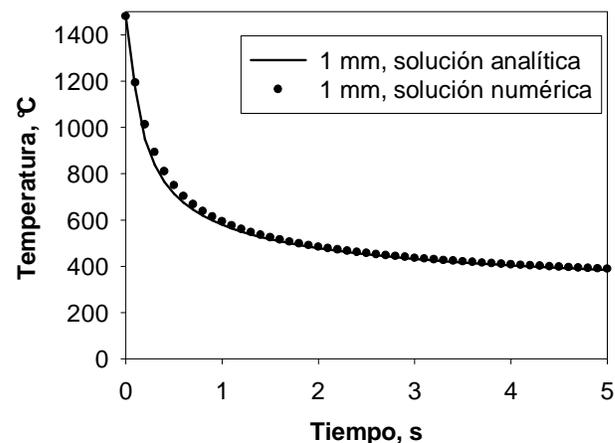


Figura 4. Comparación de las respuestas térmicas obtenidas mediante solución analítica y solución numérica. Las respuestas térmicas corresponden a una posición de 1 mm desde la superficie del molde.

5. Validación

Aunque el modelo ha sido verificado, aún no se sabe si las simplificaciones que se hicieron para su construcción son lo suficientemente fuertes como para que los resultados se alejen de la realidad. La manera de saberlo es comparar directamente los resultados numéricos con resultados experimentales obtenidos en planta. La figura 5 muestra mediciones del espesor de la capa solidificada obtenidas experimentalmente en la zona del molde [11], junto con los resultados simulados para el espesor y la temperatura de la superficie de la capa solidificada. Los parámetros utilizados para la simulación se presentan en la tabla 1. La simulación se llevó a cabo como si se tratase de un problema unidimensional como en el caso de la verificación. Se puede observar que los resultados experimentales concuerdan aceptablemente con los simulados, por lo que se puede decir que el modelo fue validado.

6. Análisis de sensibilidad

Se llevó a cabo un análisis de sensibilidad con el fin de examinar la influencia de algunas variables del proceso de colada continua. Las variables que se analizaron fueron 1) flujo de calor, 2) temperatura de colada y 3) velocidad de colada. El análisis del flujo de calor se realizó con el fin de examinar la influencia de los mecanismos de transferencia de calor por convección y radiación entre la superficie de la capa solidificada y el molde, debido a que una inadecuada estimación de esta condición de frontera puede subestimar o sobre estimar este espesor [12], además porque la caracterización de la transferencia de calor en esta zona, lleva a la estimación de un coeficiente de transferencia de calor global, en donde se sabe que no siempre es posible obtener una buena estimación de este para una misma máquina de colada [11].

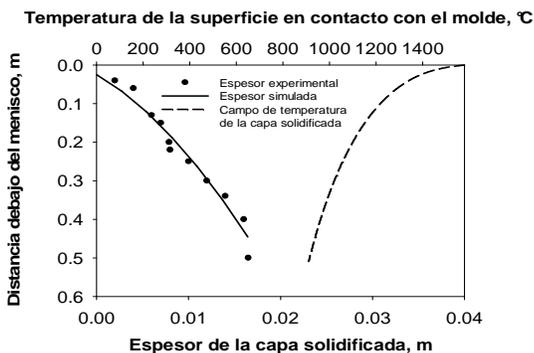


Figura 5. Espesor de la capa solidificada experimental

(símbolos, [11]) y simulada (línea sólida), y campo térmico simulado de la superficie en contacto con el molde (línea discontinua).

Con el modelo matemático verificado y validado, se determinó el espesor de la capa solidificada y el campo de temperaturas en la superficie de ésta capa que está en contacto con el molde. La simulación se llevó a cabo en dos dimensiones con los parámetros que se enlistan en la tabla 2. El resultado de esta simulación se le denomina escenario medio.

La figura 6 muestra el espesor de la capa solidificada y el campo de temperatura de la superficie en contacto con el molde para el escenario medio. La temperatura de superficie en contacto con el molde se refiere a la posición cuando $y = \text{espesor}$ y $x = 0$ (figura 2). En este mismo punto es donde se determina el espesor de la capa solidificada para evitar los efectos de las esquinas. En la figura 7 se muestra el campo térmico que se obtiene a la salida del molde. Las isoterma que están a una temperatura de 1495°C (temperatura solidus) indican el espesor de la capa solidificada con una magnitud de aproximadamente 0.02 metros. En el resto de la figura donde no se presentan isoterma, se encuentra la zona bifásica (sólido + líquido) y la zona líquida.

Tabla 1. Parámetros utilizados en la simulación de la colada continua para la validación del modelo matemático

Dimensiones del molde	
Esesor	0.0635
Largo	0.5450
Velocidad de colada, m/s	0.0165
Temperatura de colada, °C	1580
Temperatura del medio, °C	227
Longitud del molde, m	0.51
Coeficientes de transferencia de calor global, $\text{W/m}^2\text{C}$	
h_w	1510
h_N	0
Numero de nodos	
en x	200
en y	3
Densidad, Kg/m^3	7400
Temperatura solidus, °C	1399
Temperatura liquidus, °C	1460
Capacidad calorífica, $\text{J/Kg}^{\circ}\text{C}$	681.7
Conductividad térmica $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$	$15.91+11.51(10^{-2})T$

Tabla 2. Parámetros utilizados en la simulación de la colada continua de un acero de bajo carbono (escenario medio)

Dimensiones del molde,	
Espesor, m	0.07
Largo, m	0.07
Velocidad de colada, m/s	0.0254
Temperatura de colada, °C	1580
Temperatura del medio, °C	227
Longitud del molde, m	0.51
Coeficiente de transferencia de calor global, W/m ² °C,s	
h _w	1694.52-16.15T _M
h _N	1694.52-16.15T _M
Número de nodos	
en x	20
en y	10
Densidad, kg/m ³	7400
Temperatura solidus, °C	1495
Temperatura liquidus, °C	1525
Capacidad calorífica, J/kg°C	681.7
Conductividad térmica W/m°C	15.91+11.51(10 ⁻²)T

Para realizar el análisis de sensibilidad del efecto del flujo de calor, se estimó el espesor de la capa solidificada para el caso en el que el valor del coeficiente global de transferencia de calor se disminuye a la mitad y para el caso en el que aumenta un 50% su valor con respecto al escenario medio. El efecto de aumentar o disminuir el coeficiente de transferencia de calor global se muestra en las figuras 8, 9 y 10. De la figura 8, se observa que cuando el coeficiente de transferencia de calor global disminuye a la mitad del valor del escenario medio, la formación de la capa solidificada tarda más en empezar a formarse, porque la eficiencia de extracción de calor por convección y radiación disminuye. Las figuras 9 y 10 presentan el campo térmico a la salida del molde para los casos en que el coeficiente de transferencia de calor global es aumentado y disminuido con respecto al escenario medio respectivamente. Se observa un mayor espesor de capa solidificada cuando el coeficiente es de mayor magnitud. Adicionalmente se observa que cuando aumenta el coeficiente de transferencia de calor global, aumenta el gradiente de temperatura entre la superficie de la capa solidificada que está en contacto con el molde y la superficie de la capa solidificada que está en contacto con el líquido. Visto de otra forma, cuando el coeficiente de transferencia de calor global disminuye, la capa solidificada a la salida del molde, presentara un menor gradiente térmico. De estos

resultados se vislumbra que el mecanismo controlante es el de transferencia de calor por convección y radiación.

Temperatura de la superficie en contacto con el molde, °C

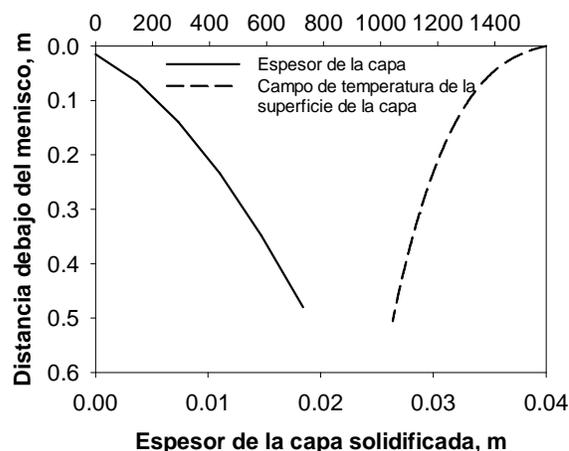


Figura 6. Espesor de la capa solidificada y campo de temperatura de la superficie en contacto con el molde del escenario medio. La temperatura de superficie en contacto con el molde se refiere a la posición cuando $y = \text{espesor}$ y $x = 0$ (figura 2).

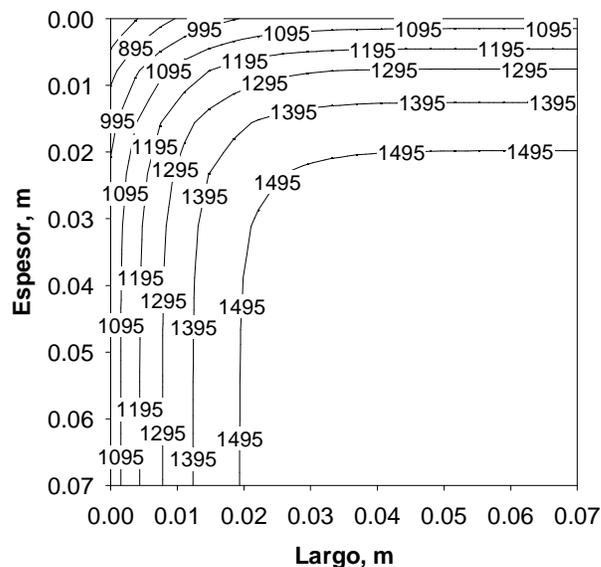


Figura 7. Campo térmico a la salida del molde del escenario medio.

Temperatura de la superficie en contacto con el molde, °C

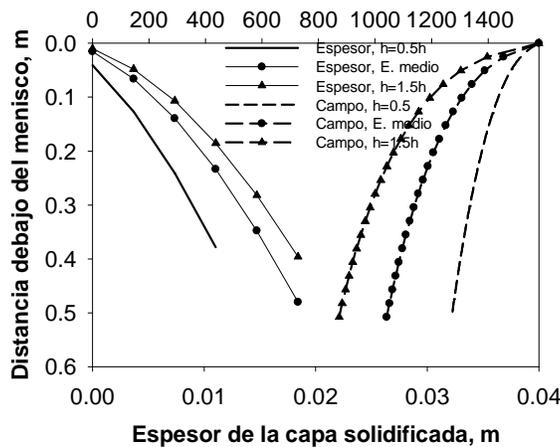


Figura 8. Temperatura de superficie y espesor de la capa solidificada cuando h fue aumentado y disminuido en un 50% con respecto al escenario medio.

En el caso del análisis de la velocidad de colada, se analizó una velocidad más alta y otra velocidad más baja en comparación con el escenario medio (figura 11). Se puede observar que cuando la velocidad de colada es lenta, el tiempo de morada en el molde de colada continua se incrementa; esto lleva a que el espesor de la capa solidificada en la salida sea de mayor magnitud en comparación con velocidades de colada rápidas. Cuando se manejan velocidades de colada altas, no se permite que el metal esté suficientemente tiempo en una zona para la extracción de calor provocando que la temperatura no disminuya tan rápido como a velocidades lentas.

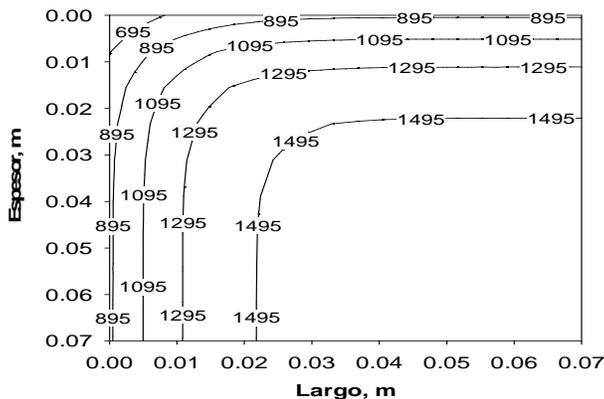


Figura 9. Campo térmico a la salida del molde cuando $h=1.5h$.

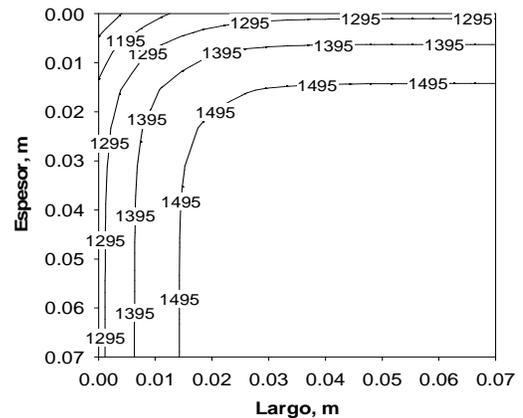


Figura 10. Campo térmico a la salida del molde cuando $h=0.5h$.

Si la temperatura de colada está muy cercana a la temperatura líquida, se obtendrá un espesor de capa solidificada de mayor magnitud; lo anterior se debe a que no hay que extraer calor sensible extra, lo que hace que la solidificación empieza casi inmediatamente (figura 12). Mientras más alta se la temperatura de colada en comparación con la temperatura de *liquidus*, más calor sensible tendrá el sistema, por lo que antes de que comience a solidificar el metal, tendrá que extraerse ese calor; a causa de esto el comienzo de la solidificación de la capa se retrasa, provocando (como en los casos anteriores), que el flujo de calor que llega a la superficie sea más grande que el que se transfiere por convección y radiación. En la figura 12 también se observa que a la temperatura de 1580°C se obtiene el mismo espesor que a temperaturas superiores, por lo que no es necesario un sobrecalentamiento mayor para obtener un espesor de capa solidificada dada; aunque tampoco se debería de tener un sobrecalentamiento menor porque esto causaría un crecimiento excesivo.

Temperatura de la superficie en contacto con el molde, °C

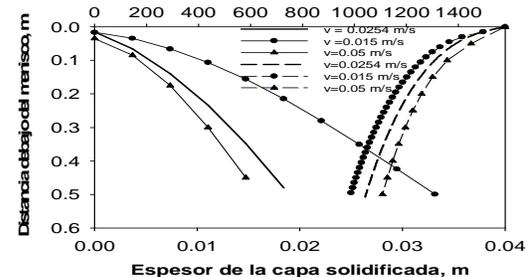


Figura 11. Temperatura de superficie y espesor de la capa solidificada para diferentes valores de velocidad de colada. La temperatura de colada para todos los casos es de 1580°C.

Temperatura de la superficie en contacto con el molde, °C

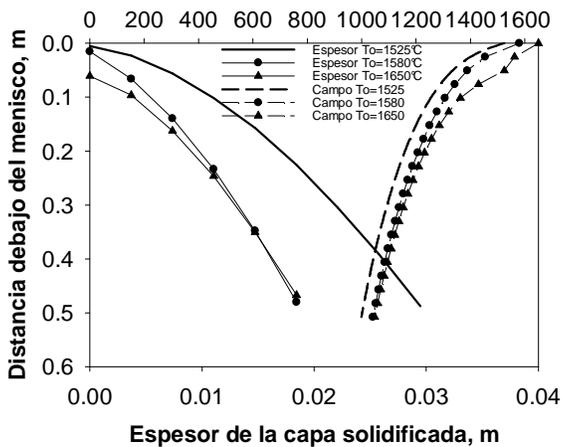


Figura 12. Temperatura de superficie y espesor de la capa solidificada para diferentes valores de temperatura de colada. La velocidad de colada para todos los casos fue de 0.0254 m/s.

Cuando la temperatura de colada es de 1650°C, el campo de temperatura de la superficie de la capa solidificada que está en contacto con el molde, presenta un comportamiento diferente en comparación con temperaturas de colada inferiores. Esto se debe a que a esta temperatura se tiene una mayor cantidad de calor sensible, con lo que, bajo estas condiciones de enfriamiento, se presenta un retraso en la extracción de calor que provoca que la temperatura sea mayor en esta zona del molde.

7. Conclusiones

Se analizó el efecto del flujo de calor, la temperatura y velocidad de colada en el espesor de la capa solidificada en la colada continua. Para esto, se formuló y se implementó un modelo matemático que puede predecir el espesor de esta capa.

Del análisis de los resultados se concluye:

1. Un conocimiento preciso de la condición de frontera es necesario para una adecuada predicción.
2. La temperatura y la velocidad de colada determinan el espesor de la capa solidificada durante la colada continua. Si la velocidad es alta, la capa solidificada que se producirá no tendrá el suficiente espesor como para cumplir con los requerimientos de resistencia mecánica.
3. Igual que la velocidad, también es necesaria una temperatura de colada adecuada para obtener un espesor

de capa solidificada. Aunque se observó que a temperaturas mayores de colada se puede obtener un mismo espesor que con temperaturas menores, es preferible la temperatura más baja posible para minimizar los gastos de energía.

8. Referencias

- [1] S. Mazudar y S. K. Ray. "Solidification control in continuous casting of steel." *Sadhana*, vol. 26, pp. 179-198, 2001.
- [2] J. K. Brimacombe. "Design of continuous casting machines based on a heat-flow analysis: state-of-the-art review." *Canadian Metallurgical Quarterly*, vol. 15, pp. 163-175, 1976.
- [3] A. Ramírez, R. Morales, A. Ramos y G. Solorio. "Desarrollo de simuladores para procesos industriales. Parte I. (Colada continua)." *Revista de Metalurgia*, vol. 42, pp. 203-208, 2006.
- [4] B. A. Pereira, J. A. de Castro, A. J. da Silva y J. A. R. Durán. "Modelado del Proceso Convencional de Colada Continua de Aceros Libres de Interticios." *Información Tecnológica*, vol. 21, pp. 3-12, 2010.
- [5] L. Sowa y A. Bokota. "Numerical model of thermal and flow phenomena the process growing of the cc slab." *Archives of Metallurgy and Materials*, vol. 56, pp. 359-366, 2011.
- [6] Z. Malinowski, T. Telejko y B. Hadala. "Influence of the Heat transfer boundary conditions on the temperature field of the continuous casting ingot." *Archives of Metallurgy and Materials*, vol. 57, pp. 325-331, 2012.
- [7] R. Manojlovic. "Mathematical modeling of solidification process of continuous casting steel slabs." *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, vol. 48, pp. 419-427, 2013.
- [8] K. Milkowska-Piszczek, J. Falkus y P. Drozd. "The influence of enthalpy and specific heat on the distribution of temperature in the continuous steel casting process." *Acta metallurgica Slovaca – Conference*, vol. 4, pp. 82-89, 2014.
- [9] C. R. Swaminatha y V. R. Soller. "A General Enthalpy Method for Modeling Solidification Processes." *Metallurgical Transactions B*, vol. 23B, 1992.
- [10] B. G. Thomas, I. V. Samarasekera y J. K. Brimacombe. "Comparison of Numerical Modeling Techniques for Complex, Two-Dimensional, Transient Heat-Conduction Problems." *Metallurgical Transactions B*, vol. 15B, pp. 307-318, 1984.
- [11] J. E. Lait, J. K. Brimacombe y F. Weinberg. "Mathematical modelling of heat flow in the continuous casting of steel." *Ironmaking and Steelmaking*, vol. 2, pp. 90-97, 1974.
- [12] M. Rywotycki, K. Milkowska-Piszczek y L. Trebacz. "Identification of the Boundary Conditions in the continuous casting of steel." *Archives of Metallurgy and Materials*, vol. 57, pp. 385-393, 2012.