

# PREDICCIÓN DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL ACERO DURANTE SU ENFRIAMIENTO BAJO CONDICIONES DE INTERÉS INDUSTRIAL

Ortiz-Hernández, Milagros Gabriela (1); Minchaca-Mojica, Jesús Isaac (2)

1 [Licenciatura en Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato] | [milagros\_g\_1109@outlook.com]

2 [Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato] | [jminchaca@ugto.mx]

## Resumen

En la industria metalúrgica, uno de los métodos para el enfriamiento en el proceso de producción de acero es utilizar rocíos y nieblas de agua al hacerlos impactar directamente sobre su superficie caliente. En este trabajo se realiza un análisis del sistema de enfriamiento secundario del proceso de fabricación de planchones delgados de acero por colada continua, enfocándose en la evolución térmica de la superficie que está siendo enfriada desde una temperatura inicial de 1200°C. Se hicieron consideraciones tales como: a) la velocidad, ángulos de impacto y tamaño de las gotas generadas por el tipo de boquilla Casterjet ½-6.5-90; b) selección de condiciones de operación industrial; c) la densidad de impacto de agua generada y el área de impacto, entre otras. Con la utilización de ecuaciones fundamentales y un código de resolución numérica implementado en Matlab, se generaron los campos de temperatura para analizar la variación en toda la superficie del acero que está siendo producido, obteniendo resultados que muestran un enfriamiento heterogéneo para ciertas condiciones y que puede acercarse a un enfriamiento homogéneo en otras.

## Abstract

In metallurgical industry, a method used in the cooling of steel in the continuous casting process is the direct impact of sprays and air-mists over the hot surface. In this work an analysis of the secondary cooling system of continuous casting compact strip process is carried out, focusing on the thermal evolution of the strand surface while diminishes its temperature from 1200°C (initial temperature). Considerations such as: a) droplet velocity, impact angles and size of droplets generated by a Casterjet ½-6.5-90 nozzle; b) operating conditions of industrial interest; c) water impact flux, among other were considered in this study. With the use of fundamental equations and ad hoc developed numerical code in Matlab, temperature maps to analyze its variation over the strand surface being produced were generated, obtaining results that show a heterogeneous cooling for some conditions that can become a homogeneous cooling by manipulating the operating conditions.

## Palabras Clave

Atomización; Gota; Enfriamiento de acero; estocástico-determinístico; mapas de temperatura.

## INTRODUCCIÓN

### Antecedentes

La necesidad de encontrar un material con mayor dureza que los ya desarrollados y aprovechando la abundancia del hierro en la Tierra permitió el desarrollo de producción del acero, el cual es una aleación entre hierro, carbono y algunas trazas de silicio, fósforo, azufre y oxígeno, convirtiéndose en el material más importante de la industria de la construcción. [1]

Existe una gran variedad en la forma de identificar y clasificar a los aceros, empezando por a) Aceros aleados, b) Aceros no aleados. Dentro de los aceros no aleados se observa una clasificación respecto al carbono contenido siendo el acero de bajo carbono (0%-0.2%) el objeto de este estudio.

El proceso de colada continua de planchones delgados de acero CSP, es un método utilizado para la producción de acero. Una vez que el acero líquido ha salido por la cuchara del horno donde ocurrió la transformación, deberá tomar formas funcionales que permitan la comercialización del producto. Para ello existen procesos de colada como lo son: colada en lingotera, colada en molde de arena y colada continua; siendo este último el encargado de obtener la mayor producción mundial actual. [1]

Dentro de este método existe un proceso de enfriamiento donde hay rocíos que inicialmente impactan sobre una superficie seca que rápidamente evoluciona a un sistema en el cual las gotas que conforman los rocíos y nieblas impactan sobre una delgada película de líquido que formaron las gotas precedentes [3]. La modelación de estas películas de líquido puede requerir de sub-modelos que realicen distintas consideraciones dependiendo de la aplicación; entre estas consideraciones están: (a) el momentum de las gotas que impactan sobre la película, (b) el espesor de la capa de líquido, (c) la fuerza de gravedad, (d) la tensión superficial, (e) las características de la superficie y, (f) en el caso de enfriamiento por rocíos, el cambio de fase.

Estos fenómenos comúnmente deben ser simulados -considerando la existencia de cientos o miles de gotas- sobre escalas de longitud que son grandes en comparación con los diámetros de las gotas cuyos órdenes de magnitud son menores que el de la película de líquido que está siendo impactada. [2]

En el presente trabajo se implementa un método para el cálculo de la temperatura de una superficie de acero producido por colada continua mientras pasa por la zona de enfriamiento secundario, mediante la utilización de un código desarrollado en MATLAB para la generación de mapas de temperatura considerando ciertas condiciones como; ángulos de impacto y tamaño de las gotas generadas por el tipo de boquilla Casterjet ½-6.5-90; b) selección de condiciones de operación industrial; c) la densidad de impacto de agua generada y el área de impacto, entre otros parámetros hidrodinámicos del rocío.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se tomaron en cuenta las ecuaciones de calor extraído  $Q_d$  Ec. (1), la cantidad de calor que está dado por el calor sensible  $Q_{sd}$  Ec. (2) y calor latente  $Q_{ld}$  Ec. (3) junto con las propiedades de los materiales como lo fueron el agua y acero, siendo estas; Propiedades del agua:  $C_p = 4.1812 \text{ J/Kg}^{\circ}\text{K}$ ,  $\rho = 998 \text{ Kg/m}^3$ ,  $v_f = 9.18 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $\lambda = 2260 \text{ KJ/Kg}$ , Propiedades del acero:  $C_p = 775 \text{ J/kg}^{\circ}\text{K}$ ,  $\rho = 7268 \text{ Kg/m}^3$  respectivamente.

$$Q_d = Q_{sd} + Q_{ld} \quad (1)$$

$$Q_{sd} = m_d C_p (T_{\text{ebullición}} - T_{\text{inicial}}) \quad (2)$$

$$Q_{ld} = m_d \lambda \quad (3)$$

Para llevar a cabo la determinación del calor sensible de la gota de agua, es necesario conocer su masa  $m_d$  Ec. (4) y volumen Ec. (5);

$$m_d = \rho_d V_d \quad (4)$$

$$V_d = (4/3)\pi r^3 \quad (5)$$

La generación de las gotas que impactan desde la boquilla hasta la superficie, se determinan de manera estocástica, considerando las distribuciones experimentales, tomando en cuenta el área de dimensiones  $A = 5.245 \times 10^{-3} \times 5.245 \times 10^{-3} \text{ m}^2$  así como tres condiciones de operación industrial:

1A ( $p_a = 205$  kPa,  $W = 0.5$  L/s), 3A ( $p_a = 320$  kPa,  $W = 0.5$  L/s) y 7A ( $p_a = 205$  kPa,  $W = 0.1$  L/s) y una altura ( $h$ ) de 54mm (espesor del planchón delgado de acero)

Con el valor de la densidad de impacto del agua ( $w$ ) se determina el número de gotas que inciden sobre la superficie en un determinado tiempo.

En el presente trabajo se considera un tamaño de paso de tiempo;  $\Delta t = 9E^{-7}$ s, gracias ello en conjunto con el  $A$  y  $w$  es posible calcular el volumen total de agua Ec. (6); [6]

$$w = \frac{V}{A \cdot \Delta t} \quad (6)$$

Para obtener la temperatura final a la que se encontrará la superficie del acero se toma en cuenta la Ec. (7);

$$Q_{sac} = m_{ac} C_{pac} (T_{final} - T_{inicial}) \quad (7)$$

Con el software MATLAB se generó un código con una malla de 100x100 celdas para lograr el desarrollo de mapas de temperaturas de una superficie de acero con una temperatura inicial de 1200°C hasta llegar a 1180°C, tomando en cuenta que la generación de gotas es estocástica así como los diámetros que estas contienen y los puntos de la superficie sobre los que impactan.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El programa permite obtener la cantidad de gotas aleatorias en un determinado paso de tiempo considerando las condiciones de operación y los parámetros hidrodinámicos de diámetro de gota y densidad de impacto de agua. Con estos datos de calculan los campos de temperatura superficial por cada paso de tiempo, ya que en cada experimento numérico se generó una cantidad suficiente de gotas que equivalen al volumen total que impacta en la superficie para cada condición dada.

En la Imagen 1 se muestran los campos de temperatura correspondientes a la condición 7A ( $p_a = 205$  kPa,  $W = 0.1$  L/s) en los cuales se aprecia que el enfriamiento es heterogéneo, reflejado esto en los notorios gradientes de temperatura en los campos presentados. En esta misma Imagen 1 solo se muestran algunos de los campos generados mientras la temperatura superficial descendía, y en todos se encontró un

comportamiento similar de enfriamiento heterogéneo. Para analizar el efecto del cambio en las condiciones de operación se calcularon los campos de temperatura de la condición 3A ( $p_a = 320$  kPa,  $W = 0.5$  L/s), los cuales se muestran en la Imagen 2. En esta imagen se aprecia un comportamiento más homogéneo en la temperatura superficial lo que se refleja en gradientes de temperatura que son menores comparados con los campos presentados en la Imagen 1. Estos resultados muestran que la tendencia hacia un enfriamiento más homogéneo se favorece principalmente debido al incremento en la presión de aire y esto es porque el tamaño promedio de las gotas que son generadas depende en mayor medida con la presión de aire dentro de la boquilla [5]. La tendencia hacia un enfriamiento homogéneo se pudiera explicar ya que cuando se tiene un menor tamaño promedio de gota en este tipo de sistemas se disminuye la dispersión de tamaños de la población y por lo tanto se favorece la generación de gotas que son más homogéneas en sus diámetros y esto implicaría una homogeneidad en el enfriamiento de la superficie que está siendo impactada por estas gotas.

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo se logró el cálculo de la evolución térmica de la superficie del acero cuando se somete a diferentes condiciones de operación en el enfriamiento secundario. Se analizaron tres de estas condiciones y se encontró que el principal factor para tener un enfriamiento más homogéneo es el incremento en la presión de aire cuando esta sube de 205 kPa a 320 kPa; como segundo factor se encontró el flujo de agua dentro de la boquilla ya que cuando aumenta de 0.1 L/s a 0.5 L/s el enfriamiento también tiende a ser homogéneo pero en menor medida. Lo anterior se debe a que el enfriamiento de la superficie va a depender, entre otros aspectos, del diámetro promedio de las gotas y este a su vez depende principalmente de la presión de aire dentro de la boquilla. Los resultados obtenidos en esta investigación adquieren importancia porque ayudarán a plantear estrategias de enfriamiento de acero que permitan extraer mayor cantidad de calor de manera más homogénea que eviten la

aparición de grietas en el interior y/o exterior del acero, favoreciendo la productividad de la planta.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a mi asesor el Dr. Jesús Isaac Minchaca Mojica por su apoyo, tiempo, orientación, pero principalmente por compartirme sus conocimientos y motivarme en este proyecto. A mis padres y hermanos por siempre darme el apoyo y ayudarme a salir adelante.

## REFERENCIAS

- [1] Sandro U. Cuellar López, Tesis de Licenciatura, Universidad de Guanajuato, 2017, México, 2017.
- [2] Jesús I. Minchaca Mojica, Agustín R. Uribe Ramírez, J. Arturo Alfaro Ayala, Martín Picón Núñez, "Modelación con dinámica de fluidos de las películas de líquido formadas en el enfriamiento de superficies calientes". Encuentro Nacional de la AMIDIQ, Puerto Vallarta, Jalisco, México, Mayo 2014.
- [3] Jesús I. Minchaca Mojica, Agustín R. Uribe Ramírez, J. Arturo Alfaro Ayala, Martín Picón Núñez, "Simulación y estimación de los tiempos de formación de películas líquidas: efecto de las distribuciones de tamaño de las gotas". Encuentro Nacional de la AMIDIQ, Cancún, Quintana Roo, México, Mayo 2015.
- [4] J.I. Minchaca M., Tesis de Doctorado, CINVESTAV-IPN, 2012, México, págs. 134-141.
- [5] J.I. Minchaca M., A.H. Castillejos E., F.A. Acosta G. and S. Murphy. "Fluid Dynamics of Thin Steel Slab Continuous Casting Secondary Cooling Zone Air Mists". In Proc of ILASS, 2010, Cincinnati, OH, USA.
- [6] J. I. Minchaca M., A. R. Uribe R., J. A. Alfaro A., and M. Picón N. "Formation Time of Liquid Films Generated by Water Sprays and Air Mists with Numerical Simulations". In Proc of ILASS, 2014, Portland, OR, USA.

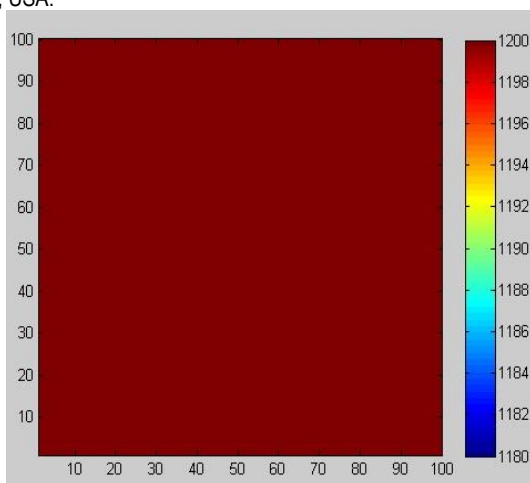


IMAGEN 1: Campos de temperatura de la superficie del acero calculados a distintos tiempos. Condición 7A:  $p_a = 205$  kPa,  $W = 0.1$  L/s...Continuación.

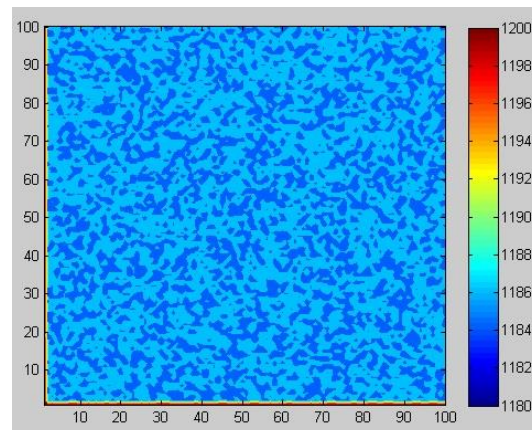
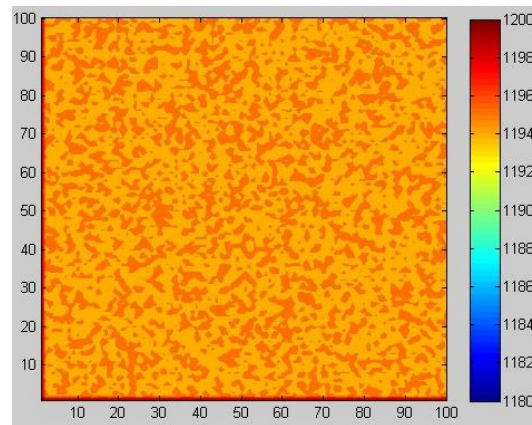
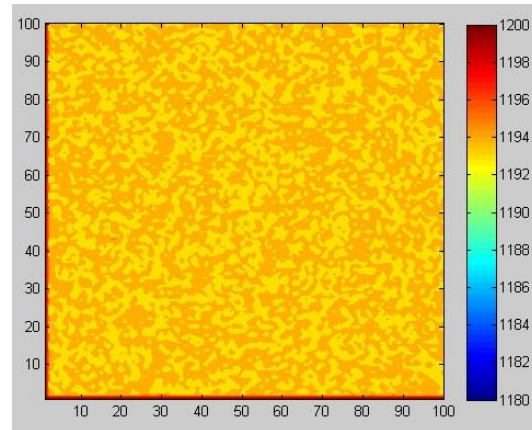
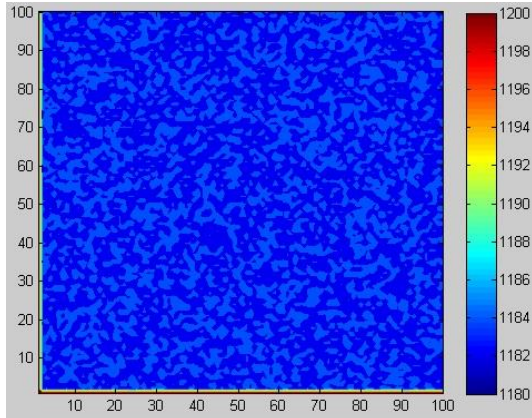
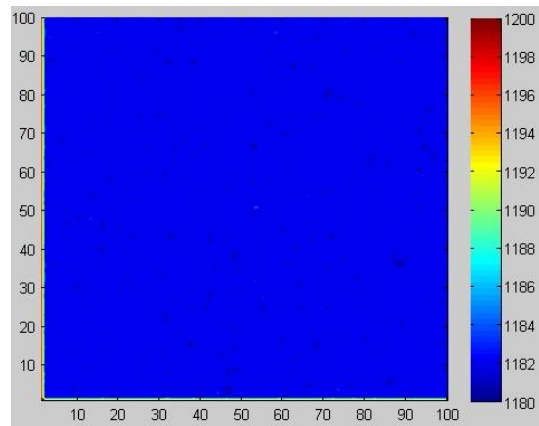
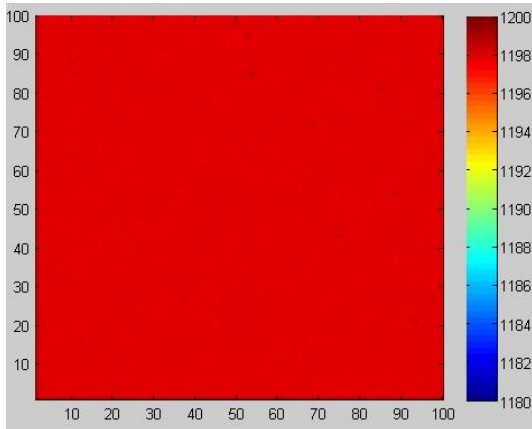
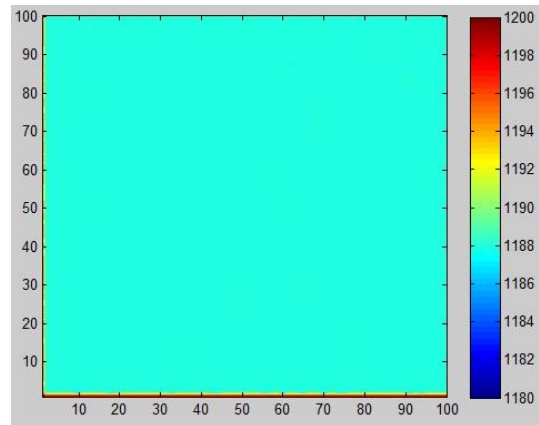
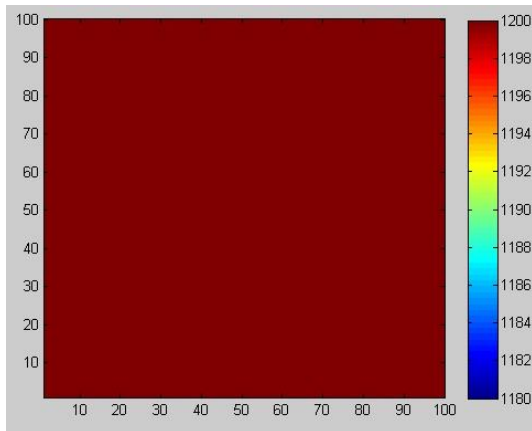
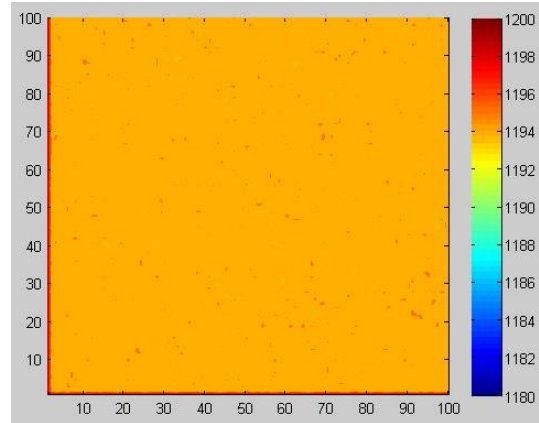


IMAGEN 1: Campos de temperatura de la superficie del acero calculados a distintos tiempos. Condición 7A:  $p_a = 205$  kPa,  $W = 0.1$  L/s...Continuación.





**IMAGEN 1:** Campos de temperatura de la superficie del acero calculados a distintos tiempos. Condición 7A:  $p_a = 205$  kPa,  $W = 0.1$  L/s...*Continuación.*



**IMAGEN 2:** Campos de temperatura de la superficie del acero calculados a distintos tiempos. Condición 3A:  $p_a = 320$  kPa,  $W = 0.5$  L/s... *Continuación.*

**IMAGEN 2:** Campos de temperatura de la superficie del acero calculados a distintos tiempos. Condición 3A:  $p_a = 320$  kPa,  $W = 0.5$  L/s.