



Ingenius. Revista de Ciencia y  
Tecnología  
ISSN: 1390-650X  
[revistaingenius@ups.edu.ec](mailto:revistaingenius@ups.edu.ec)  
Universidad Politécnica Salesiana  
Ecuador

Arreola Villa, Sixtos A.; Solorio-Díaz, Gildardo; Vergara Hernández, H. J.  
Simulación numérica de un horno tipo empujador para palanquillas con formación de  
óxido

Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología, núm. 13, enero-junio, 2015, pp. 30-37  
Universidad Politécnica Salesiana  
Cuenca, Ecuador

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=505554819005>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

# SIMULACIÓN NUMÉRICA DE UN HORNO TIPO EMPUJADOR PARA PALANQUILLAS CON FORMACIÓN DE ÓXIDO

Sixtos A. Arreola Villa<sup>1,\*</sup>, Gildardo Solorio-Díaz<sup>2</sup> y H. J. Vergara Hernández<sup>3</sup>

## Resumen

El siguiente trabajo muestra un modelo numérico de un horno de recalentamiento tipo empujador, utilizando un programa comercial de dinámica de fluidos (CFD). El modelo acopla las ecuaciones de transferencia de calor, dinámica de fluidos y reacción química en estado no estacionario. Para la simulación de la combustión se utilizó el modelo de transportes de especies Eddy-dissipation; para la dinámica de fluidos de los gases se hizo uso del modelo  $k - \epsilon$  realizable. Se simuló la transferencia de calor considerando los mecanismos de conducción, convección y radiación. El modelo P-1 fue utilizado para simular la radiación que aportan los gases de combustión al calentamiento de la palanquilla. Las historias térmicas simuladas al interior de las palanquillas fueron comparadas con mediciones en planta. El modelo también acopla los modelos de oxidación superficial de la carga (barras de sección cuadrada de acero de 160 mm x 160 mm x 12.7 m). Se caracterizó el historial térmico en estado no estacionario de una palanquilla cuadrada de 16 mm y 12.7 m, durante su desplazamiento en el interior del horno, estas mediciones de temperatura permitieron caracterizar las pérdidas de material por formación de óxidos, en cada tiempo y posición al interior del horno de calentamiento.

**Palabras clave:** horno empujador, modelos de oxidación, desplazamiento de palanquillas.

## Abstract

In this paper shows a numerical model of a pusher type reheating furnace created in commercial fluid dynamics software, considering the heating of the billets at non steady state. In addition, a methodology was used to achieve the sliding of the billets inside the furnace. To simulate the process combustion it was used the transport species model called Eddy-Dissipation, and for the fluid dynamics of gas it was used  $k - \epsilon$  realizable model, also the heat transfer by conduction, convection, and radiation were simulated. To simulate the radiation heat transfer from the gases to the billet, the P-1 model was used. Plant measurements in different areas of the furnace allowed a good validation of the numerical model, and also a model for the oxidation process was used. It was characterized the thermal history in unsteady state of a square billet 16 mm and 12.7 mm in length, during their displacement inside the heating furnace 14.7 x 17.5 m industrial size, these temperature measurements allowed to characterize losses rusting material at each time and position within the heating furnace.

**Keywords:** Pusher furnace, oxide models, displacement billet.

<sup>1,\*</sup>Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica, ingeniero mecánico, estudiante de doctorado en ciencias de la ingeniería mecánica, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Mecánica. Autor para correspondencia : sxtsaav@gmail.com

<sup>2</sup>Doctor en Ciencias con especialidad en Metalurgia y Materiales, profesor investigador titular A, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Posgrado en Ingeniería Mecánica.

<sup>3</sup>Doctor en Ingeniería, Profesor Investigador Titular C, Instituto Tecnológico de Morelia, Maestría en Ciencias en Metalurgia.

Recibido: 07-10-2014, aprobado tras revisión: 24-05-2015

Forma sugerida de citación: Arreola, S.; Solorio, G.; Vergara, H. (2015). "Simulación numérica de un horno tipo empujador para palanquillas con formación de óxido". INGENIUS. N.<sup>o</sup>13, (Enero-Junio). pp. 30-37. ISSN: 1390-650X.

## 1. Introducción

En los últimos años la demanda de los productos de acero ha aumentado de manera significativa, debido al crecimiento de las economías asiáticas, este incremento de la producción exige mejoras en los procesos de fabricación; los procesos de recalentamiento de acero han despertado gran interés, debido a la necesidad de productos con mayor calidad, producirlos les brinda ganancias superiores a las empresas fabricantes, así como su inclusión en mercados con menor competencia y mejor retribuidos económico, como los fabricantes de aceros automotrices [1].

Uno de los problemas principales en los aceros laminados es la formación de óxidos en forma de cascarilla. En la práctica, en los procesos de combustión es común introducir mezclas aire-combustible ricas en oxígeno, para asegurar que la totalidad del potencial energético del combustible es extraído, en los hornos de recalentamiento esta práctica es común, pero produce efectos desfavorables sobre el material de carga, debido a que el oxígeno libre reacciona inevitablemente con las superficies de acero, formando diferentes óxidos durante el proceso de calentamiento; wustita  $\text{FeO}$ , magnetita  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  y hematita  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , en proporciones aproximadas de 95%, 4%, y 1% respectivamente, la formación de la oxidación se atribuye a múltiples factores como son los gases contenidos en la atmósfera oxidante, el tiempo de residencia y la temperatura de la superficie de las palanquillas, lo que causa mermas en la producción por tonelada de aceros laminados, también la conductividad térmica del óxido de acero es muy pequeña comparada con el acero, esto exige inevitablemente mayor potencial energético para el proceso, [2] con el objeto de simplificar el análisis muchos investigadores consideran la formación de wustita al 100% en los hornos de flamas directas [3].

Algunos trabajos publicados abordan la formación de óxidos dentro de los hornos empujadores de recalentamiento de palanquillas, en el año 2001, Anton Jajlic y sus colaboradores [4] proponen un modelo donde se simula el calentamiento de las palanquillas dentro de un horno de vigas galopantes, el modelo se construyó en tres dimensiones, y evalúa los fenómenos de transporte energético considerando los tres mecanismos de transferencia de calor, la conducción, la convección y la radiación. Los modelos existentes simulan el proceso de calentamiento de las palanquillas durante su desplazamiento.

En distintas simulaciones desacopladas, Jajlic utiliza para las ganancias de calor por conducción en una palanquilla el método de diferencias finitas, empleando como valores de frontera la transferencia de calor calculada por los dos mecanismos restantes dentro del horno; también propone tres espesores diferentes de capas de óxido; con valores de 1 mm, 2 mm y 3 mm, ellos plantean una conductividad térmica diferente a la

del acero, alegando que este pequeño espesor ofrece un efecto considerable durante la transferencia de calor, pero no se simula la formación del óxido sobre la superficie del material, debido a la composición de los gases en la atmósfera, dentro del horno de calentamiento, después de la simulación trataron de validar con fotos tomadas desde una cámara termográfica. Ellos concluyen que la capa de óxido tiene efectos considerables en la transferencia de calor, debido a que los cambios son notorios.

En el año 2010, Jung Hyun Jang y sus colaboradores [5] proponen un modelo numérico que predice la transferencia de calor, además de formular también un modelo para la formación de la cascarilla; ellos investigan el efecto de la cascarilla en la transferencia de calor, con propiedades térmicas variables en los materiales sólidos, como son el acero y los tres tipos de óxido que se forman: óxido de hierro, hematita y magnetita, utilizando una expresión parabólica para determinar la cantidad de cascarilla formada, en función únicamente de la temperatura y considerando únicamente la wustita como elemento químico en la cascarilla.

Ellos aportan una serie de conclusiones; su modelo predice la formación de óxido o cascarilla, con un espesor al terminar el proceso de calentamiento, de 1.75 mm respectivamente, y apuntan que la transferencia de calor no es afectada, debido a que compararon las temperaturas cuando no se considera formación de cascarilla, con otro modelo que si toma en cuenta su formación, descubriendo que el efecto sobre la temperatura era menor de 10 °C y podría despreciarse en el análisis de transferencia de calor.

En 2013 Man Youg Kim [6] publica su análisis enfocado exclusivamente en un modelo matemático, para predecir el efecto de la formación del óxido de hierro en la superficie de las palanquillas de acero, considerando únicamente la formación de wustita durante el proceso de calentamiento, al interior de una atmósfera caliente, observando la transferencia de calor por radiación únicamente, modelaron la formación de escamas de óxido utilizando una ecuación de formación parabólica propuesta por Paidassi, [7]; en su conclusión menciona que el espesor aumenta considerablemente con la temperatura, este aumento de espesor disminuye considerablemente la resistencia térmica global del material.

En este trabajo se utilizó un programa de CFD para la simulación del horno de recalentamiento de palanquillas tamaño industrial de una empresa siderúrgica, con el fin de predecir y cuantificar la formación de óxidos utilizando una velocidad de formación parabólica, propuesta por Paidassi [7] durante el proceso normal de calentamiento. El horno utiliza como fuente energética un proceso de combustión directa de gas natural que consta de 32 quemadores de diferentes potencias, distribuidos en las distintas zonas

de calentamiento (inferior superior y compensación). Se modeló de forma acoplada (convección radiación y conducción) los fenómenos de transporte en el interior del horno de calentamiento de palanquilla tomando en cuenta el movimiento de la carga. Dicho estudio permite entender de forma clara el efecto de las variables de operación sobre el tiempo de residencia de las palanquillas.

## 2. Modelo numérico

Ecuaciones gobernantes:

### 2.1. Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

### 2.2. Ecuación de momentum

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) &= \frac{\partial p}{\partial x_i} + \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( -\rho \overline{\mu'_i u'_j} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

El cálculo del campo de flujo turbulento en estado estacionario en 3D para el horno de calentamiento de palanquillas utilizó la formulación matemática del modelo turbulento propuesto por Shih Et Al ( $k-\epsilon$  realizable) [8]. Este modelo es derivado de las ecuaciones de Navier Stokes y satisface ciertas restricciones matemáticas sobre los esfuerzos de Reynolds que permiten simular, de mejor manera, flujos que impliquen rotación, capas límites sujetas a fuertes gradientes de presión, separación, y recirculación.

### 2.3. Ecuaciones de turbulencia para el modelo realizable

Para  $k$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_j) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k \\ &+ G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \end{aligned} \quad (3)$$

Para  $\epsilon$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\epsilon$$

$$- \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{v \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon \quad (4)$$

### 2.4. Ecuación de energía

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + p)] &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + \right. \\ \sum_{i=1}^N h_i J_{i,j} + u_i \mu_{eff} \left[ \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \right] \right) + \\ &+ S_{chem} + S_{rad} \end{aligned} \quad (5)$$

Donde las ecuaciones de energía y entalpías se calculan con las siguientes expresiones:

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} \quad (6)$$

$$h = \sum_{i=1}^N Y_i h_i \quad (7)$$

$$h_i = \int_{T_{ref}}^T C_{p,i} dt \quad (8)$$

Para estas ecuaciones la  $T_{ref}$  tiene un valor de 298.15 K,  $S_{chem}$  contiene la transferencia de calor de la reacción por unidad de tiempo y  $S_{rad}$  es transferencia de calor por unidad de tiempo debida a una fuente de radiación.

### 2.5. Ecuación de transporte de especies

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (9)$$

Para la reacción química se utilizó el modelo denominado *Eddy-dissipation* basado en el trabajo de Magnussen y Hjertager [9], ampliamente utilizado en quemadores de velocidades rápidas y la reacción es controlada por la mezcla turbulenta de los flujos de combustible y aire, donde  $S_i$  es la creación de especies por las fases dispersas.

La relación de producción de especies  $i$  para la reacción  $r$  está dada por las siguientes ecuaciones:

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\epsilon}{k} \min_R \left( \frac{Y_R}{v'_{R,r} M_{w,R}} \right) \quad (10)$$

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} AB \rho \frac{\epsilon}{k} \frac{\sum_p p Y_p}{\sum_j v''_{j,r} M_{w,j}} \quad (11)$$

Y la difusión de la masa en un flujo turbulento está dada por la ecuación siguiente:

$$\vec{J}_i = - \left( \rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{S_{Ct}} \right) \nabla Y_i \quad (12)$$

## 2.6. Modelo de radiación

Para los modelos de radiación en la combustión según Baukal, Gershtein y Li [10] es apropiado despreciar el *scattering*, con esta simplificación la ecuación de transferencia por radiación se expresa de la manera siguiente:

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + aI(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} \quad (13)$$

Varios modelos de radiación son susceptibles de ser usados en la simulación de los hornos, Habibi y Merci [11] compararon en una investigación el impacto ocasionado al utilizar el modelo P1 frente al modelo de ordenadas discretas (DO).

Como parte de sus conclusiones ultimaron que no hay grandes diferencias en la predicción de la temperatura en algunas variables del proceso. Por lo anterior, y dado que el modelo P1, es computacionalmente menos costoso, en este trabajo se optó por usar dicho modelo.

El modelo P1 consiste en expandir la intensidad de radiación en series ortogonales armónico esféricas [12]. El método armónicos esféricos provee una aproximación de alto orden al transformar la ecuación de radiación en un sistema de ecuaciones diferenciales parciales.

El resultado final del tratamiento matemático se traduce en la siguiente expresión, que al aplicarle el operador divergente puede representar el término fuente de radiación en la ecuación de energía:

$$q = -\frac{4}{3(a+s)} \nabla \theta_R^4 \quad (14)$$

Los gases presentes en la combustión dentro de los hornos de recalentamiento emiten y absorben radiación, se utilizó el modelo propuesto por Hottel y Sarofin [13] denominado WSGGM y es usado para calcular la absorción o emisión de radiación, este asume que la emisividad total sobre una distancia s puede ser representada por la siguiente expresión.

$$\epsilon = \sum_{i=1}^I a_{\epsilon,i}(T)(1 - e^{k_i p s}) \quad (15)$$

Donde  $a_{\epsilon,i}$  es un factor de emisividad,  $k_i$  es el coeficiente de absorción,  $p$  es la presión parcial para cada especie y  $s$  es la longitud de la ruta. Para  $a_{\epsilon,i}$  se calculó con expresiones en función de la temperatura y el coeficiente de absorción es tomado de la base de datos del programa.

## 2.7. Modelo de oxidación

En el presente trabajo se asume la consideración de Jung Hyun Jang et al. [5] que mencionan que más del 90% del óxido formado es wustita, se consideró únicamente la formación de este elemento, durante el proceso

de calentamiento. En muchas ocasiones la variación de la constante de velocidad para la formación de óxidos, se presenta como una ecuación parabólica.

Dónde  $x$ ,  $t$ , y  $k_p$  son el espesor de la capa de óxido, el tiempo de residencia y la constante parabólica del modelo de oxidación, esta constante varía de forma exponencial con la temperatura [6].

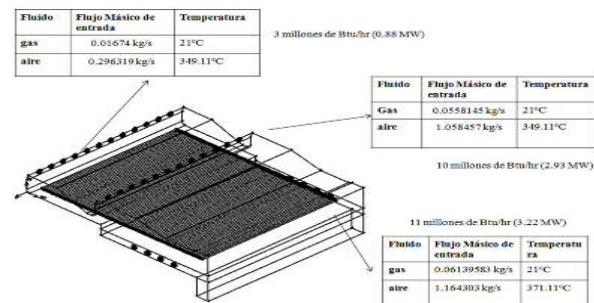
$$k_p = 6.1 \exp^{-169,452/RT} \quad (16)$$

Dónde  $R$  y  $T$  son la constante de gas ideal y la temperatura absoluta en Kelvin.

## 3. Metodología

Se construyó un modelo numérico, donde se contempló los fenómenos de transporte característicos del proceso de calentamiento de palanquillas de acero, cuando se utiliza un horno de flamas directas, como son la transferencia de calor por los tres procesos de transporte (convección, radiación, conducción), momentum, modelos de combustión y modelos de turbulencia, las palanquillas encontraron un valor máximo de temperatura, después de encontrar la solución estacionaria, se inició la solución al proceso no estacionario, inicialmente se introdujo una palanquilla a temperatura ambiente considerada de 30 °C, se midió la temperatura durante el tiempo de residencia de la palanquilla en la primera posición, el tiempo de residencia de las palanquillas en cada posición es de 60 s, cuando pasa ese tiempo de residencia se exporta el perfil de la temperatura a la siguiente posición, este proceso se repite en 95 ocasiones, simulando de esta forma el transporte de las palanquillas en el interior del horno de calentamiento.

El modelo de oxidación es calculado utilizando la ecuación de Paidassi, [7] considerando una velocidad de oxidación parabólica, el espesor de la capa de óxido no fue considerado para la transferencia de calor. En este trabajo el objetivo principal es identificar las zonas de pérdida en el material de carga, en estado no estacionario.



**Figura 1.** Dominio computacional del horno de calentamiento de palanquillas.

En el modelo de simulación se implantaron las condiciones de frontera utilizadas en el horno tamaño

**Tabla 1.** Condiciones de entrada

Quemador inferior (piso, zona de calentamiento)	Aire	Flujo mísico	1.164303 kg/s
	Combustible	Temperatura	644.26 °C
	Combustible	Flujo mísico	0.061139583 kg/s
	Combustible	Temperatura	294.15 °C
Quemador medio (zona de compensación)	Aire	Flujo mísico	1.058457 kg/s
	Combustible	Temperatura	622.04 °C
	Combustible	Flujo mísico	0.05581458 kg/s
	Combustible	Temperatura	294.15 °C
Quemador superior (techo, zona de calentamiento)	Aire	Flujo mísico	1.058457 kg/s
	Combustible	Temperatura	622.04 °C
	Combustible	Flujo mísico	0.05581558 kg/s
	Combustible	Temperatura	284.15 °C

industrial (ver Figura 1), como condición de frontera en la entrada de los quemadores se utilizó la entrada de flujo de aire o de combustible, (ver Tabla 1).

En la Figura 1, se observan los quemadores, estos están dispuestos en la siguiente forma: (a) 12 quemadores de 3 millones de Btu/h, cada uno, en la zona de compensación; (b) 12 quemadores de 10 millones de Btu/h, cada uno, en la zona del techo y (c) 8 quemadores de 11 millones de Btu/h, cada uno, en el piso del horno.

## 4. Discusión y resultados

### 4.1. Validación

Para validar los resultados de la simulación numérica de las reacciones químicas en el horno se compararon; la potencia nominal de todos los quemadores reportados por la planta con los valores calculados con el programa de CFD, (ver Tabla 2), los resultados de la comparación de este parámetro son muy aceptables, el modelo reproduce con fidelidad el proceso de combustión y calentamiento de las palanquillas.

Los resultados obtenidos por la simulación fueron validados, comparando temperaturas reportadas por la planta en 7 diferentes puntos del horno y las temperaturas predichas en esos mismos puntos del modelo numérico (ver Figura 2).

La comparación entre los valores medidos y los obtenidos en la simulación se observa en la Tabla 3, los errores en las comparaciones son aceptables, para una simulación de transferencia de calor, y de un problema ingenieril. Cinco medidores de temperatura son termopares y los medidores 3 y 7 son pirómetros.

**Tabla 2.** Potencia nominal y potencia de simulación.

Quemadores en la planta	Quemadores en la simulación	% Error
244 millones Btu/h	232 millones Btu/h	4.9

**Tabla 3.** Comparación de temperaturas medidas en planta y en la simulación.

Sensor	Medición en planta, °C	Simulación °C	% Error
1	1198	1187	1
2	1185	1107	6.58
3	1158	1027	11.31
4	1177	1327	11.30
5	1067	1037	2.81
6	1098	1167	5.91
7	1024	1067	4

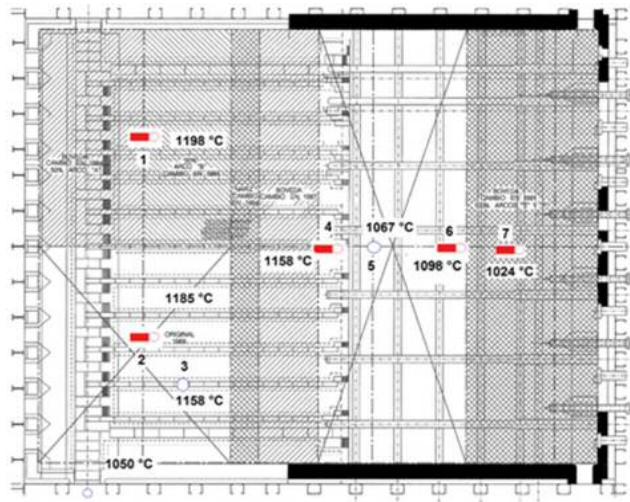
La temperatura adiabática para la combustión del metano tiene un valor de 2093 °C, [11] para una temperatura de entrada en el aire de 25 °C, para el caso del horno de recalentamiento se utiliza aire precalentado, esto provoca que la temperatura máxima de la combustión aumente, debido al ahorro de calor sensible que se pierde en calentar el aire cuando éste es frío, Habini reporta en su trabajo una temperatura máxima aproximada de 2152 °C, muy parecida a la temperatura propia del caso de estudio [11].

### 4.2. Análisis del modelo numérico en estado no estacionario

Las conclusiones presentadas con anterioridad, son resultados del proceso de calentamiento en estado estacionario, considerando que la transferencia de calor y la dinámica de fluidos no cambia en forma considerable, pero el proceso real de la planta depende del tiempo como variable de operación, en este trabajo se usó una metodología que simula el transporte de la palanquilla en tiempo y espacio, esta fue descrita anteriormente.

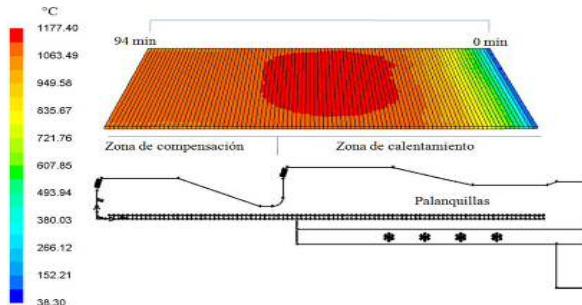
Un calentamiento para la carga cuando está completamente fría simularía un proceso denominado *Bach* o por lotes, también simularía un arranque de proceso, este proceso es poco usado en el recalentamiento del acero.

En la Figura 3, se puede observar el proceso de calentamiento de las palanquillas desde que se intro-



**Figura 2.** Vista de planta del horno tipo empujador de la planta siderúrgica donde se muestra la ubicación de los termopares (1, 2, 4, 6, 7) y pirómetros (3, 5).

ducen frías, hasta que salen del horno, las palanquillas son calentadas durante 94 minutos. Durante el proceso se midió la temperatura y se obtuvieron datos para los valores, máximos, promedios y mínimos totales en toda la palanquilla, (ver Figura 4) la producción de acero recalentado es de 130 ton/h de acero con un tiempo de residencia de 95 minutos.



**Figura 3.** Contorno de temperatura (°C) de las palanquillas en estado no estacionario.

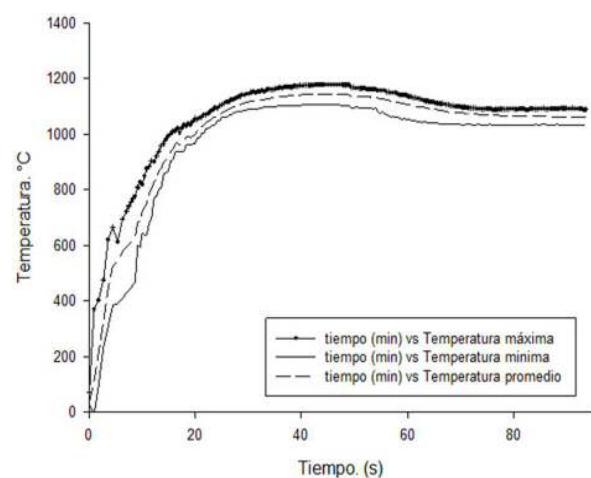
En la Figura 4, se observa que en los primeros minutos de calentamiento se presentan grandes diferencias de temperaturas, que causa una gran cantidad de esfuerzos de origen térmico, estos esfuerzos son disipados con la deformación plástica de las palanquillas. En planta los operadores aseguran que estas deformaciones son visibles en los primeros pasos del calentamiento. En la Figura 4, se observa que al final del calentamiento aun existen diferencias de temperaturas, entre la temperatura máxima y mínima de poco más de 50 grados.

#### 4.3. Análisis de las pérdidas de material por oxidación

En la Figura 5, se observa que en zonas de temperaturas más altas, la constante de velocidad de la reacción

química es mayor; cuando la temperatura se eleva, los procesos químicos generalmente se aceleran. La oxidación es inevitable en el proceso de calentamiento del acero cuando se usan hornos de flamas directas, pero es posible disminuir la generación de cascarilla mejorando el proceso de combustión, limitando el producto oxidante (oxígeno).

En el proceso de calentamiento del horno industrial simulado, como se puede observar en la Figura 2 anterior, las palanquillas se mantienen a temperaturas superiores de 1023 °C por períodos prolongados, esto provoca que el proceso de oxidación sea más agresivo.

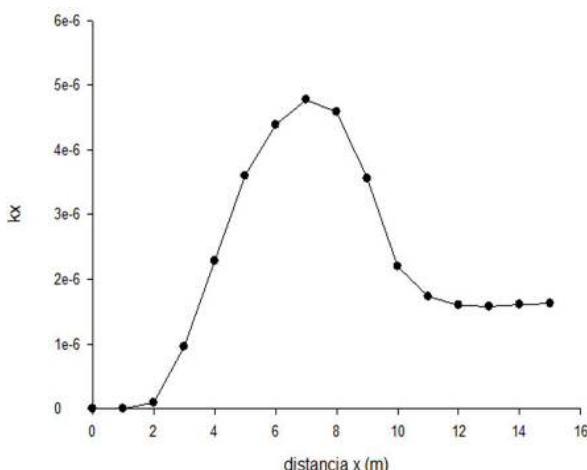


**Figura 4.** Incremento de temperatura en una palanquilla.

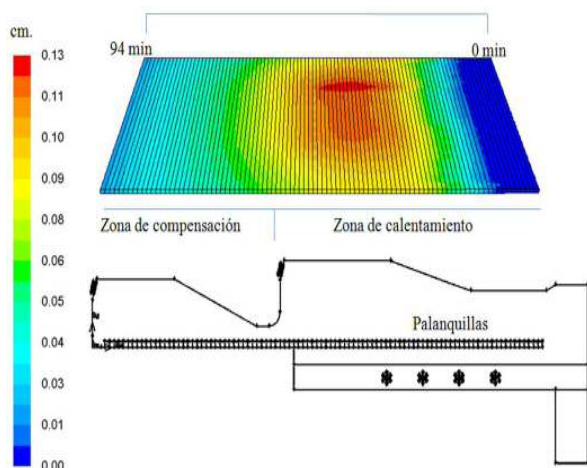
En la Figura 6, se observa la generación de óxidos o cascarilla en las zonas del horno, desde el inicio del proceso cuando la palanquilla se desliza en el interior del horno de calentamiento para determinada posición o tiempo de residencia. Al principio, el espesor de los óxidos crece de manera proporcional a la temperatura;

justo a la mitad del recorrido, la generación de cascarilla es máxima, en esta posición la temperatura es también elevada; después de este punto máximo la producción de cascarilla decrece, debido a que la temperatura también disminuye.

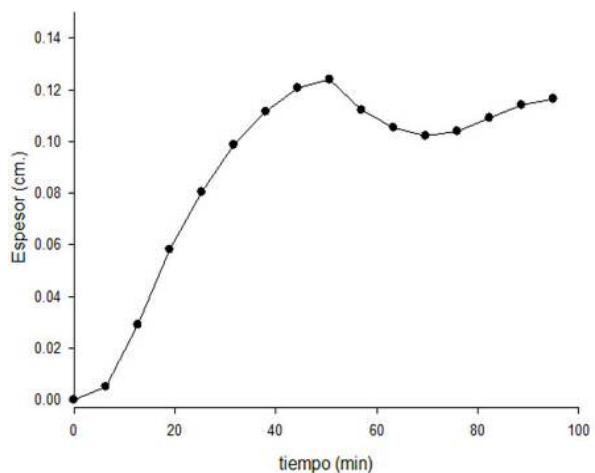
En la Figura 7, se observa de forma gráfica el proceso de generación de cascarilla, aplicando el modelo de Paidassi [7]. Este modelo presenta limitantes, en casos, donde la temperatura aumenta en algún punto del proceso y disminuye en un punto posterior. En el caso de estudio, los resultados de la simulación: una palanquilla desplazándose dentro del horno, considerando una formación uniforme de óxidos no porosos a lo largo de la palanquilla, en la superficie se pierden cerca de 76 kg de material de carga por cada 2530 kg que pesa cada palanquilla, las pérdidas representan poco más del 3% del material de carga. Este cálculo fue basado en volumen de óxido generado por el espesor, no considerando que el óxido de hierro es poroso.



**Figura 5.** Variación de la constante de reacción química durante el recorrido de la palanquilla dentro del horno de calentamiento.



**Figura 6.** Contorno de generación de óxido en las palanquillas en estado no estacionario.



**Figura 7.** Crecimiento de la capa de óxido en función de la temperatura.

## 5. Conclusiones

Se construyó un modelo numérico para obtener los perfiles de temperatura, en las palanquillas, durante el desplazamiento en el interior de un horno de flamas directas tamaño industrial. Los resultados fueron validados con registros y mediciones obtenidas de cinco termopares y dos pirómetros, la medida de los pirómetros arroja un error de 10% aproximado, estos equipos miden la temperatura en la superficie donde son dirigidos. Los termopares se consideran equipos más confiables para la medición de zonas localizadas, los cinco termopares arrojan errores aproximados del 5%.

El modelo de reacción química fue validado, este obtiene diferencias menores de 4% entre la potencia nominal de los quemadores instalados en planta y la potencia de calor obtenida en la simulación.

Los historiales térmicos encontrados fueron validados por los operadores de la planta. Se desarrolló una metodología de transporte de palanquillas sin utilizar mallas dinámicas, las mismas que elevan el costo computacional de forma exagerada.

El modelo de oxidación predice un espesor de cascarilla acumulado de 0.12 cm; en las zonas de temperaturas elevadas la cascarilla aparece en mayor proporción, (zona de calentamiento) se debe mencionar que el proceso de oxidación es una competencia entre una capa protectora de cascarilla y oxidación catastrófica. No se consideró que la cascarilla se desprende, cuando su esfuerzo elástico es rebasado, debido a los esfuerzos térmicos y a las diferencias en las constantes de dilatación térmica.

## Referencias

- [1] D. Kern, *Proceso de transferencia de calor*, 3rd ed. México: McGraw-Hill, 1980.

- [2] M. Torres and R. Colás, “A model for heat conduction through the oxide layer of steel during hot rolling,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 105, no. 3, pp. 258–263, 2000.
- [3] R. Chen and W. Yeun, “Review of the high-temperature oxidation of iron and carbon steels in air or oxygen,” *Oxidation of Metals*, vol. 59, no. 5-6, pp. 433–468, 2003.
- [4] A. Jaklic, B. Glogovac, T. Kolenko, B. Zupancic, and B. Tezak, “A simulation of heat transfer during billet transport,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 22, no. 7, pp. 873–883, 2001.
- [5] J. H. Jang, D. E. Lee, M. Y. Kim, and H. G. Kim, “Investigation of the slab heating characteristics in a reheating furnace with the formation and growth of scale on the slab surface,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, no. 19-20, pp. 4326–4332, 2010.
- [6] M. Kim, “Effect of scale on slab heat transfer in a walking beam type reheating furnace,” *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering*, vol. 7, no. 7, pp. 410–414, 2013.
- [7] J. Paidassi, “The precipitation of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  in scales formed by oxidation of iron at elevated tempera-  
tures,” *Acta Metallurgica*, vol. 3, no. 5, pp. 447–451, 1955.
- [8] T. Shih, W. Liou, A. Shabbir, and Z. Yang, “A new  $k$ -eddy-viscosity model for high reynolds number turbulent flows- model development and validation,” *Computers Fluid*, 1995.
- [9] B. Magnussen and B. Hjertager, “On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion,” *Symposium (International) on Combustion*, vol. 16, no. 1, pp. 719–729, 1977.
- [10] C. Baukal, V. Gershtein, and X. Li, *Computational Fluid Dynamics in Industrial Combustion*. CRC Press, 2001.
- [11] A. Habibi, B. Merci, and G. Heynderickx, “Impact of radiation models in CFD simulations of steam cracking furnaces,” *Computers & Chemical Engineering*, vol. 31, no. 11, pp. 1389–1406, 2007.
- [12] M. Modest, *Radiative Heat Transfer*, ser. Series in Mechanical Engineering. McGraw-Hill, 1993.
- [13] H. Hottel and A. Sarofim, *Radiative transfer*. New York: McGraw Hill, 1967.