

Galvanización por inmersión en caliente. Parte 1: modelo no estacionario del perfil de temperatura

Hot - dip galvanizing. Part 1: non stationary model of temperature profile

Armando Rojas-Vargas^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-8927-2023>

Sergio Daniel Cruz-Pupo¹ <https://orcid.org/0000-0003-4132-1479>

May Yudith Serrano-Mulet² <https://orcid.org/0000-0001-9204-2571>

¹Empresa de Servicios Técnicos de Computación, Comunicaciones y Electrónica del Níquel (SERCONI), Cuba

²Centro Universitario Municipal Contra maestre, Universidad de Oriente (UO), Cuba

*Autor para la correspondencia. correo electrónico: arojas@eros.moa.minem.cu

RESUMEN

La galvanización por inmersión en caliente es un método efectivo para la protección de los materiales ferrosos de la corrosión. El proceso consiste en aplicar al material un recubrimiento por inmersión en un baño de cinc fundido a temperaturas entre 440°C y 460°C durante cierto tiempo y el posterior enfriamiento. Este trabajo tuvo el propósito de modelar el perfil de calentamiento de una cuba de galvanización a régimen no estacionario utilizando el método de los nodos y considerando la transferencia de calor por radiación, convección libre y conducción. La cuba posee las dimensiones: 7100 x 1600 x 1350 mm (largo x ancho x profundidad) y la generación de calor se produce por resistencias eléctricas. A través de un proceso iterativo, asumiendo $\Delta x = \Delta y = 0,178\text{m}$ y un intervalo de tiempo $\Delta t = 0,011\text{h}$, se estimó el gradiente de temperatura en 420 puntos de la cuba (x; y) en función del tiempo y los coeficientes de transferencia de calor, cumpliendo con requisitos técnicos previstos. Los resultados permitieron incrementar el conocimiento sobre el perfil de calentamiento de la cuba para la

posterior automatización del proceso, la correspondencia entre el tiempo de operación establecido y el predicho por el modelo fue satisfactoria. Se estimó que el intervalo de temperatura entre 526°C a 538°C en la fuente de calor es probablemente el más conveniente para finalizar la operación de calentamiento.

Palabras clave: galvanización por inmersión; modelación; perfil de calentamiento.

ABSTRACT

The hot-dip galvanizing is an effective method for protecting ferrous materials against the corrosion. This technique consists of applying a deposit by immersing the parts in a molten zinc bath, at temperatures between 440°C and 460°C for a certain amount of time and their subsequent cooling. This work had the purpose of modeling the heating profile of a galvanizing cell at a non-stationary regime using the node method and considering heat transfer by radiation, free convection and conduction. The cell has the dimensions: 7100 x 1600 x 1350 mm (length x width x depth) and the heat generation takes place by electric resistances. Through an iterative process, assuming $\Delta x = \Delta y = 0,178\text{m}$ and a time interval $\Delta t = 0,011\text{h}$, the temperature gradient at 420 points of the cell (x; y) was estimated as a function of time and the heat transfer coefficients, satisfying the expected technical requirements. The results allowed increasing the knowledge about the cell heating for the subsequent process automation, the correspondence between the established operating time and that predicted by the model was satisfactory. The temperature range between 526°C to 538°C at the heat source was estimated to be probably the most convenient to end the heating operation.

Keywords: hot-dip galvanizing; modeling; heating profile.

Recibido: 18/09/2020

Aceptado: 10/01/2021

Introducción

El proceso de galvanización en caliente consiste en la inmersión de hilos de acero o hierro en un baño de cinc fundido, con el propósito de cubrirlos con una capa protectora resistente a la corrosión. Esta barrera impide que la humedad, los cloruros y sulfuros ataquen el acero. Las etapas fundamentales son: recocido de los rollos de alambre en el horno de recocido, donde se eliminan las grasas adheridas y disminuyen las resistencias mecánicas; enfriamiento de los hilos; decapado en ácido, para eliminar los óxidos superficiales; lavado con agua, para separar los residuos de ácido y sales por arrastre; precalentamiento; galvanización; enfriamiento de la capa de recubrimiento y ovillado.

Este trabajo centra su atención en la cuba de galvanización. Las variables fundamentales son: velocidad de calentamiento, temperatura en las esquinas y centro de la cuba, tiempo de inmersión, velocidad de entrada y salida, y composición del material ferroso.^(1,2,3,4)

La operación a bajas temperaturas ($T < 445$ °C) ocasiona menor fluidez del baño, menor escurrimiento y piezas más rugosas; pero si las temperaturas son muy altas ($T > 460$ °C), provocan menor vida útil de la cuba por desgaste, mayor formación de dross, ceniza y de un recubrimiento áspero. El tiempo de inmersión determina el espesor de la capa; la velocidad de inmersión debe ser lo más rápida posible sin que se ocasionen salpicaduras para lograr el espesor más uniforme; la velocidad de salida está relacionada con el consumo de cinc, y debe ser lenta para evitar la producción de gotas y grumos de recubrimientos.

Se denomina dross a los cristales de Fe - Zn insolubles, de apariencia arenosa, que se depositan en el fondo de la cuba con un 3% o más de hierro, las cenizas se producen por formación de óxido de cinc. Para disminuir estos efectos, se debe mantener una temperatura uniforme, evitar olas y agitación en el baño.

Un incremento de la temperatura del baño de 450°C a 480°C, afecta la morfología de las capas galvanizadas, las cuales adquieren apariencia de grietas en la estructura de las capas. Por otra parte, una cantidad inapropiada de silicio, fósforo, aluminio y azufre en el acero tiene un efecto adverso en el espesor y la composición de la capa, afectando las propiedades mecánicas del acero galvanizado.^(3,5,6,7,8,9)

El baño de cinc fundido está compuesto por: cinc (98,9%), plomo (1%), hierro (0,03%), aluminio (0,002%), cadmio (0,02%), trazas de otros metales como Sn y Cu, los cuales favorecen el proceso.^(3,4)

A partir de simulaciones numéricas, se ha analizado el efecto de los parámetros físicos, químicos y cinéticos del proceso, sobre la reducción del consumo de cinc, de energía y en la obtención de un producto con el mínimo de defectos en la superficie. Se ha realizado la modelación de la temperatura, la composición de los componentes en el baño de cinc, la velocidad de formación y ubicación del dross, utilizando las ecuaciones diferenciales parciales de Navier-Stokes, de continuidad para fluido no isotérmico, de transferencia de masa y calor, utilizando el método de volumen finito, el cual discretiza dichas ecuaciones por integración sobre un volumen de control. En pruebas industriales con monitoreo continuo, se han validado las simulaciones confirmando su importancia para el análisis de este complejo proceso.^(10,11,12,13)

El propósito de este trabajo consistió en modelar el perfil de temperatura durante el calentamiento de una cuba de galvanización en régimen no estacionario utilizando el método de los nodos, para la posterior automatización del proceso.

Materiales y métodos

Materiales

La cuba de galvanización que se considera como modelo para determinar el perfil de temperatura, es un tanque de base rectangular de acero, espesor de 50mm, con las dimensiones 7100 x 1600 x 1350 mm (largo x ancho x profundidad), aislada térmicamente por un muro de ladrillos refractarios. En dicho muro se encuentran instaladas las resistencias eléctricas en forma de cintas, cuya potencia eléctrica máxima de operación es de 290 kW, y sin hacer contacto directo con la cuba, transfieren el calor por conducción térmica para fundir el cinc y el plomo que se encuentra en su interior.

La cuba tiene tres elementos termosensibles para medir y controlar la temperatura, dos colocados en el espacio existente entre las resistencias eléctricas y las paredes laterales de la cuba y otro en el interior del baño de cinc fundido.

Métodos

El calentamiento de la cuba se realiza por medio de las resistencias eléctricas, fijas a una pared de refractarios (T_{p1}). El calor se transfiere por radiación y convección libre a la pared exterior de la cuba (T_{p2} , L_1 : 230mm, zona a-b); por conducción térmica a través de la pared interior (T_{p3} , L_2 : 280mm, zona b-c); y también por conducción térmica a través del baño por todo el perímetro (L_3 , zona c-L). Las temperaturas (T_{p4}) y (T_{p5}) se refieren al interior de la cuba, (figura 1 a).

La temperatura inicial de la cuba es de 25°C a 30°C. Después de cargada con las pastillas de cinc, se conecta el sistema eléctrico que da energía a las resistencias. En las zonas de calentamiento está concebido incrementar la temperatura en tres etapas:

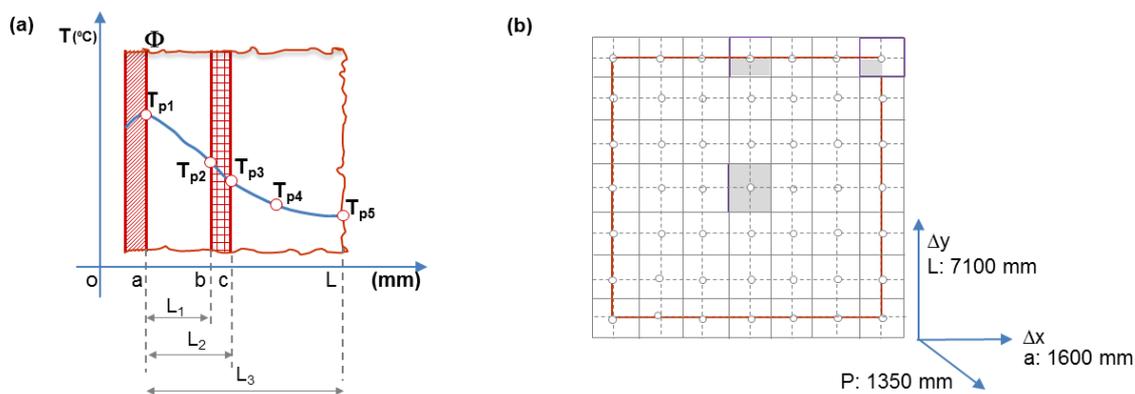


Fig. 1- Representación de la cuba de galvanización (a) Diagrama del perfil de calentamiento
(b) Rejillas y nodos de la cuba

Etapa 1. Incrementar la temperatura a razón de 10°C/h desde 25°C hasta 120°C y esperar 48h. Cuando no se ha realizado trabajo de mantenimiento en la pared de refractarios, el valor de 120°C no se toma en cuenta y se continúa calentando a razón de 10°C/h hasta 300°C, a esta temperatura se deben esperar 96h para igualar las tensiones internas que se producen entre las paredes de la cuba.

Etapa 2. Incrementar la temperatura a una velocidad de calentamiento de 20°C/h desde 300° hasta 420°C y esperar 48h a esta temperatura.

Etapa 3. Incrementar la temperatura desde 420° hasta 660°C como máximo, a una velocidad de calentamiento de 20°C/h siempre y cuando la temperatura del cinc no alcance los 460°C. En este caso, queda lista la cuba para la operación.

Se deben considerar los requisitos siguientes:

- La temperatura en todas las paredes de la cuba debe ser aproximadamente igual.
- La temperatura en las zonas de calentamiento ubicadas en el exterior de las paredes de la cuba no puede sobrepasar los 660°C.
- El gradiente de temperatura permisible entre las zonas de calentamiento exteriores de la cuba y el baño de cinc es de 200°C como máximo.

Se utilizó el método de los nodos, el cual consiste en representar la cuba en rejillas, identificar los nodos característicos y plantear las ecuaciones según el mecanismo de transferencia de calor considerado, (figura 1 b).

Las propiedades físicas de los materiales (cinc y aire), en cuanto a la densidad (ρ , kg/m³), calor específico (C_p , J/kg°C) y conductividad térmica (k , W/m°C) se obtuvieron de la literatura ^(14,15) y con el software de estadística Statgraphics Plus 5.1 se ajustaron funciones polinomiales.

Expresiones matemáticas del perfil de temperatura

Se consideró $\Delta x = \Delta y = 0,178\text{m}$, se despreció la transferencia de calor por conducción a través de la pared de la cuba de galvanizado ($\Delta x = \Delta y \gg \delta$) y se plantearon los nodos: (a) esquinas exteriores, (b) laterales exteriores y (c) interior de la cuba, (Figura 2).

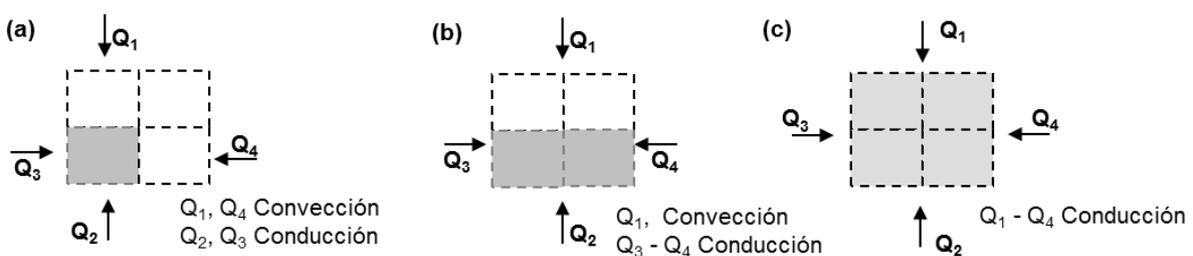


Fig. 2- Representación de los nodos: (a) esquinas exteriores, (b) laterales exteriores, (c) interiores de la cuba

El balance de calor no estacionario se representa por la ecuación (1):

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = \Delta x \Delta y P \rho C_p \left(\frac{T^{\Delta t + t} - T}{\Delta t} \right) \quad (1)$$

donde

Q es flujo de calor (W);

Δx y Δy , variación de longitud en la dirección x, y respectivamente (m); P, profundidad de la cuba (m); ρ , densidad del material (kg/m^3); C_p , calor específico ($\text{J/kg}\cdot^\circ\text{C}$); T, temperatura ($^\circ\text{C}$); Δt , intervalo de tiempo (s); ΔT , gradiente de temperatura ($^\circ\text{C}$).

El balance de calor se desarrolló para cada nodo, donde la flecha indica la dirección del flujo de calor que entra al nodo (x; y) desde el nodo opuesto; h, el coeficiente de transferencia de calor por radiación y convección libre ($\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$); k, la conductividad térmica del cinc ($\text{W/m}\cdot\text{K}$).

Nodo: esquinas exteriores de la cuba, (figura 2 a), ecuaciones (2), (3).

$$\frac{T_{aire}-T}{\frac{1}{h\frac{\Delta x}{2}P}} + \frac{T \downarrow -T}{\frac{\Delta y}{k\frac{\Delta x}{2}P}} + \frac{T \leftarrow -T}{\frac{\Delta x}{k\frac{\Delta y}{2}P}} + \frac{T_{aire}-T}{\frac{1}{h\frac{\Delta y}{2}P}} = \Delta x \Delta y P \rho C_p \left(\frac{T^{\Delta T+\Delta t} - T}{\Delta t} \right) \quad (2)$$

$$T^{\Delta T+\Delta t} = T + \frac{1}{2} \cdot \Delta t \cdot \left\{ \frac{h}{\rho C_p} \cdot \left(\frac{\Delta x + \Delta y}{\Delta x \cdot \Delta y} \right) \cdot (T_{aire} - T) + Fo \cdot \left[\frac{1}{\Delta y^2} (T \downarrow - T) + \frac{1}{\Delta x^2} (T \leftarrow - T) \right] \right\} \quad (3)$$

Nodo: laterales exteriores de la cuba, (figura 2 b), ecuaciones (4), (5).

$$\frac{T_{aire}-T}{\frac{1}{h\Delta x P}} + \frac{T \downarrow -T}{\frac{\Delta y}{k\Delta x P}} + \frac{T \leftarrow -T}{\frac{\Delta x}{k\frac{\Delta y}{2}P}} + \frac{T \rightarrow -T}{\frac{\Delta x}{k\frac{\Delta y}{2}P}} = \Delta x \Delta y P \rho C_p \left(\frac{T^{\Delta T+\Delta t} - T}{\Delta t} \right) \quad (4)$$

$$T^{\Delta T+\Delta t} = T + \Delta t \cdot \left\{ \frac{h}{\rho C_p} \cdot \frac{1}{\Delta y} \cdot (T_{aire} - T) + Fo \cdot \left[\frac{1}{\Delta y^2} \cdot (T \downarrow - T) + \frac{1}{2 \cdot \Delta x^2} \cdot (T \rightarrow + T \leftarrow - 2T) \right] \right\} \quad (5)$$

Nodo: interiores de la cuba, (figura 2 c), ecs. (6), (7), (8).

$$\frac{T \uparrow - T}{\frac{\Delta y}{k \Delta x P}} + \frac{T \downarrow - T}{\frac{\Delta y}{k \Delta x P}} + \frac{T \leftarrow - T}{\frac{\Delta x}{k \Delta y P}} + \frac{T \rightarrow - T}{\frac{\Delta x}{k \Delta y P}} = \Delta x \Delta y P \rho C p \left(\frac{T^{\Delta T+t} + T}{\Delta t} \right) \quad (6)$$

$$T^{\Delta T+t} = T + \frac{1}{\rho C p} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x \Delta y} \cdot \left(\frac{T \uparrow - T}{\frac{\Delta y}{k \Delta x}} + \frac{T \downarrow - T}{\frac{\Delta y}{k \Delta x}} + \frac{T \leftarrow - T}{\frac{\Delta x}{k \Delta y}} + \frac{T \rightarrow - T}{\frac{\Delta x}{k \Delta y}} \right) \quad (7)$$

$$T^{\Delta T+t} = T + \frac{k}{\rho C p} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x \Delta y} \cdot \left(\frac{\Delta x}{\Delta y} \cdot (T \uparrow + T \downarrow - 2T) + \frac{\Delta y}{\Delta x} \cdot (T \leftarrow + T \rightarrow - 2T) \right) \quad (8)$$

Tomando Δx igual a Δy , (8) se transforma en la ec. (9).

$$T^{\Delta T+t} = T + F_o \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \cdot (T \uparrow + T \downarrow + T \leftarrow + T \rightarrow - 4T) \quad (9)$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección libre, se calculó a partir del número de Nusselt (Nu), la conductividad térmica del aire (λ , W/m°C) y la longitud característica (L) para una superficie vertical, la altura, ec. (10).

$$\alpha_{cov} = \frac{Nu \cdot \lambda}{L} \quad (10)$$

El Nusselt se calculó en función de los números de Rayleigh (Ra), Prandtl (Pr) y Grashof (Gr), ecs. (11), (12), (13), (14), (15).

$$Nu = 0,15 \cdot Ra^{0,33} \cdot \left(\frac{P_r}{P_{rp}} \right)^{0,25} \quad (\text{Para } Ra > 10^9) \quad (11)$$

$$Ra = P_r \cdot G_r \quad (12)$$

$$P_r = \frac{c p \cdot \mu}{\rho} \quad (13)$$

$$G_r = \frac{g \cdot \beta \Delta T \cdot \rho^2 \cdot L^3}{\mu^2} \quad (14)$$

$$\beta \Delta T = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_2} \quad (15)$$

Donde la densidad del aire a la temperatura del gas es ρ (kg/m³); la viscosidad del aire a la temperatura de la pared, μ (Pa.s); la constante de aceleración de la gravedad, g (9,8 m/s²); el calor específico, C_p (J/kg°C) y el coeficiente de dilatación térmica $\beta\Delta T$.

Por otro lado, el coeficiente de transferencia de calor por radiación, se determinó por las ecs. (16), (17).

$$\alpha_{rad} = \varepsilon_r \cdot \sigma \cdot \frac{(T_{p_1}^4 - T_{p_2}^4)}{(T_{p_1} - T_{p_2})} \quad (16)$$

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2} \quad (17)$$

En este caso el grado reducido de radiación integral es Epsilon- ε_r , para la pared de ladrillo refractario se asumió 0,9 y para el acero, 0,80; la constante de Stefan-Boltzmann, σ , igual a $5,67 \cdot 10^{-8}$ W/m²K⁴ y las temperaturas absolutas (K) reflejadas en la figura 1 a.

El algoritmo se desarrolló en una hoja de cálculo en Excel, se programaron macros para calcular la temperatura en las resistencias eléctricas (T_{p_1}), los coeficientes de transferencia de calor y obtener los datos para la representación gráfica del perfil de temperatura.

Resultados y discusión

Se calculó el perfil de calentamiento de la cuba de galvanizado, considerando $\Delta x = \Delta y = 0,178$ m y $\Delta t = 0,011$ h. De acuerdo a las ecuaciones obtenidas por el método de los nodos y los modelos para la estimación de los coeficientes de transferencia de calor por convección y radiación, se obtuvieron los siguientes resultados expresados por etapas de calentamiento:

Etapa 1 de calentamiento

En la etapa 1, está concebido que la zona de calentamiento, a una temperatura inicial de 25°C a 30°C, incremente a razón de 10°C/h hasta 120°C o 300°C, con un

tiempo de espera de 48h o 96h respectivamente, y además cumpliendo con los requisitos de operación previamente expuestos.

Según las ecuaciones planteadas, a T_{p1} 120°C y 9,5h de operación, en las esquinas y orillas interiores de la cuba ($0 \leq x \leq 0,71$; $y=0,18$), se alcanzó entre 36°C y 40°C (figura 3 a), mientras que en el centro de la cuba ($0 \leq x \leq 0,71$; $y=3,5$), donde las temperaturas son menos calientes, se obtuvo de 31°C a 35°C, (figura 3 b).

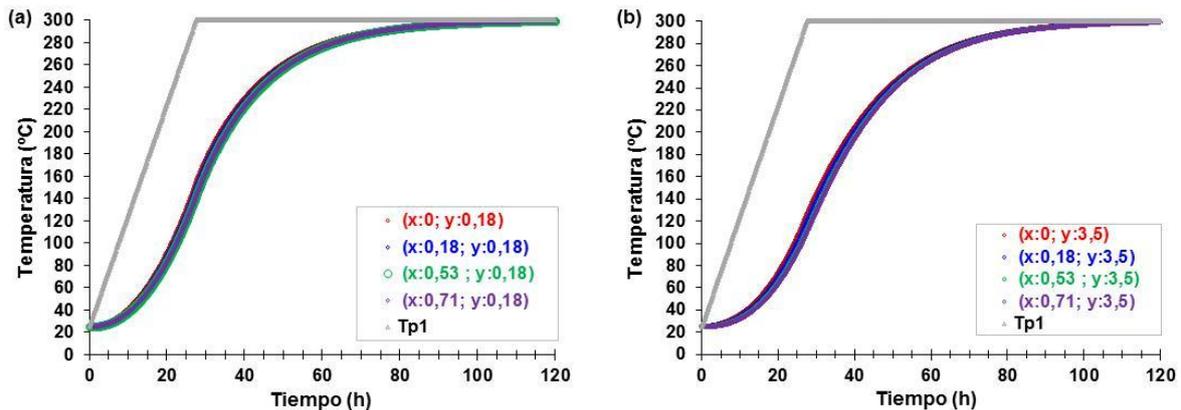


Fig. 3- Perfil de calentamiento de la cuba de galvanización, Etapa 1. Gráficos de dispersión: (a) esquina de la cuba, $y=0,2$; (b) centro de la cuba, $y=3,5$

Se simuló el calentamiento hasta T_{p1} 300°C y a las 120h, se alcanzó en toda la pared y el interior de la cuba $299 \pm 0,11^\circ\text{C}$, resultado que es coherente con el programa de calentamiento, donde a las 120h se espera una temperatura en el cinc de 300°C.

Sin embargo, se debe considerar que de acuerdo al modelo obtenido, al cabo de las 112h, la temperatura en la pared fue de $299 \pm 0,19^\circ\text{C}$ y en el interior de $299 \pm 0,17^\circ\text{C}$, lo cual pudiera incidir en el ahorro de energía.

El calentamiento de la cuba, para el par $(x; y)$ en función del tiempo, siguió una función polinomial de segundo orden hasta las 30h, con un coeficiente de determinación, R^2 , mayor que 99,93 %.

Etapa 2 de calentamiento

En la etapa 2, está concebido incrementar la temperatura a 20°C/h, desde 300°C hasta 420°C (6h) y esperar a esta temperatura 48h.

Al aplicar el algoritmo de cálculo, en las esquinas y orillas interiores de la cuba ($0 \leq x \leq 0,71$; $y=0,18$), a las 48 horas de operación se alcanzó $418,5 \pm 0,1^\circ\text{C}$ (figura 4

a), mientras que en el centro ($0 \leq x \leq 0,71$; $y=3,5$), donde las temperaturas son inferiores, se obtuvo $417,4 \pm 0,19^\circ\text{C}$, valores aproximados a la norma de operación, (figura 4 b).

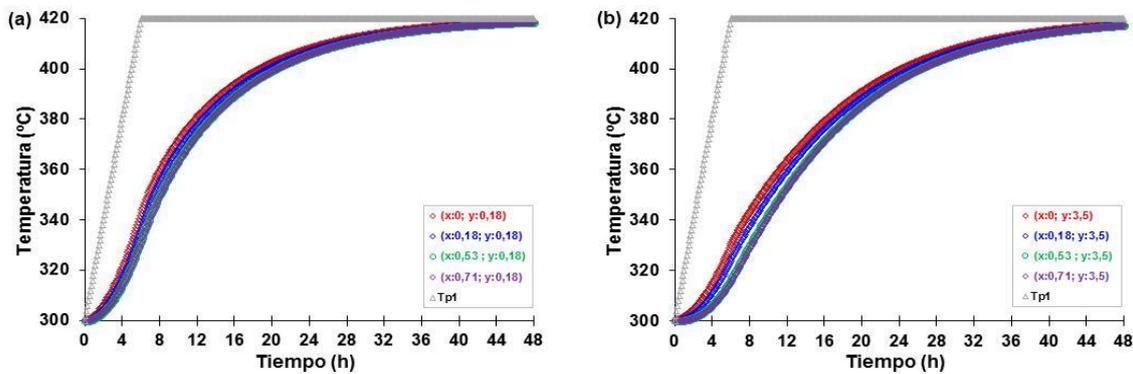


Fig. 4- Perfil de calentamiento de la cuba de galvanización, Etapa 2. Gráficos de dispersión: (a) esquina de la cuba, $y=0,2$; (b) centro de la cuba, $y=3,5$

Etapa 3 de calentamiento

Está determinado para la etapa 3, un incremento de la temperatura en la zona de calentamiento de 420°C a 660°C como máximo, a razón de 20°C/h , siempre y cuando el cinc en el interior de la cuba no alcance los 460°C .

El perfil de calentamiento simulado muestra que a las 5,3h de iniciada la etapa 3, a T_{p1} igual a 526°C y T_{p2} de 471°C , es posible alcanzar la temperatura máxima de 461°C en las esquinas interiores de la cuba ($x: 0,18$; $y: 0,18$) y en los bordes interiores entre 454°C y 461°C ; en cambio, se obtiene en el centro la temperatura mínima de 436°C ($x: 0,71$; $y: 3,5$) poseyendo una diferencia con respecto a la temperatura en la resistencia (T_{p1}) y la pared (T_{p2}) de 90°C y 34°C , respectivamente, (figura 5 b, d).

Así mismo, a las 5,9h, a T_{p1} igual a 538°C y T_{p2} de 480°C , se obtiene en las esquinas las temperaturas superiores, entre 460°C y 471°C ; en cambio, en el centro se obtuvieron las temperaturas inferiores, entre 440°C y 460°C .

Este resultado sugiere que el intervalo de $526 \leq T_{p1} \leq 538^\circ\text{C}$ es el más conveniente para finalizar la operación de calentamiento de la cuba.

En la figura 6 se muestra el perfil de temperatura T_{p1} y T_{p2} , y el coeficiente de transferencia de calor (α). La mayor diferencia de temperatura entre la fuente externa de calor (T_{p1}) y la temperatura mínima en el interior de la cuba se obtuvo en el intervalo de tiempo $27,3 \leq \Delta t \leq 27,8\text{h}$ con $188,3 \leq \Delta T \leq 190,6^\circ\text{C}$.

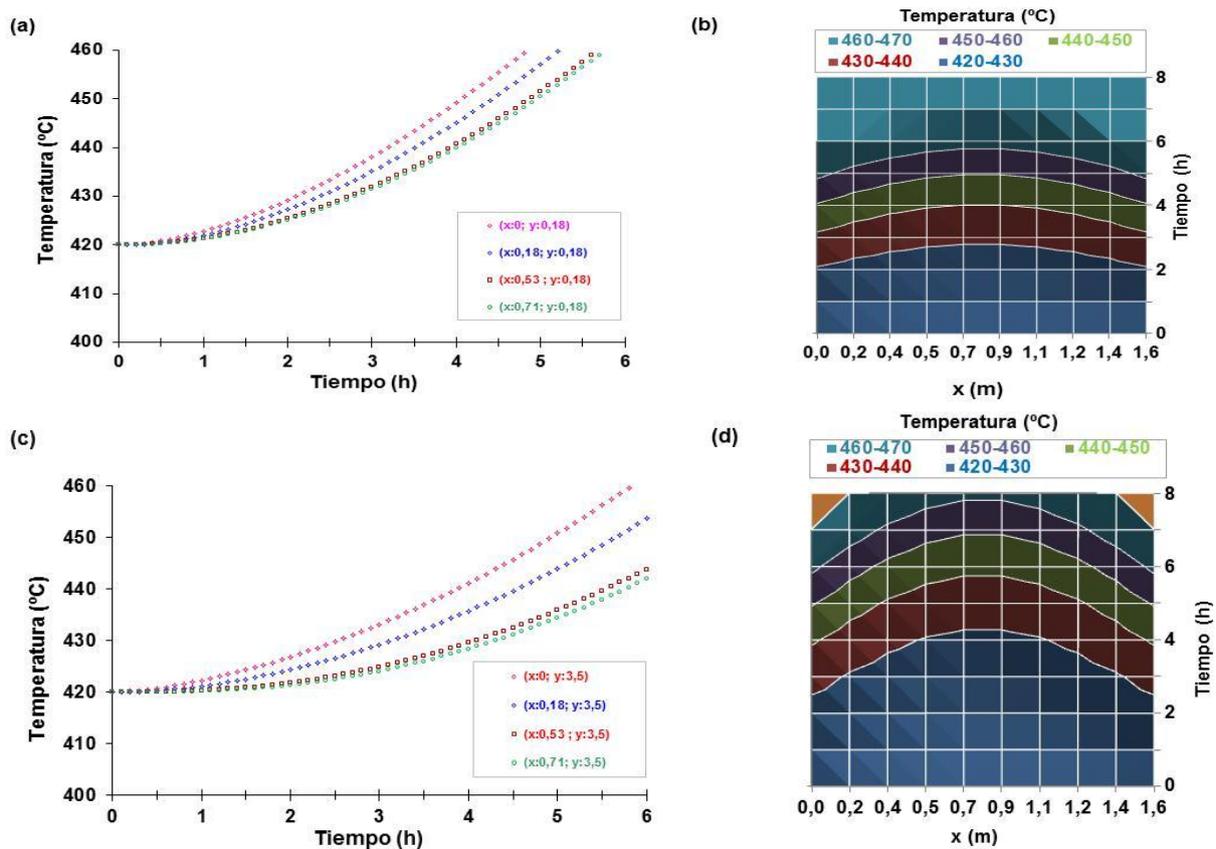


Fig. 5- Perfil de calentamiento de la cuba de galvanización, Etapa 3. Gráficos de dispersión: (a) esquina de la cuba, $y=0,2$; (c) centro de la cuba, $y=3,5$. Gráficos de contorno: (b), (d) esquina y centro de la cuba respectivamente

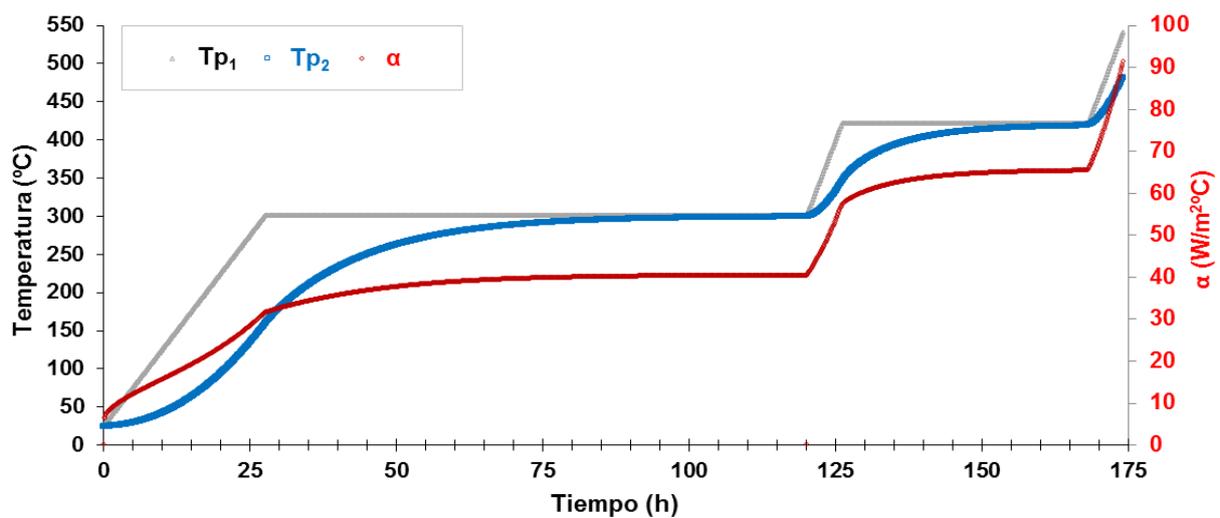


Fig. 6- Temperatura en los refractarios (T_{p1}), en la pared de la cuba (T_{p2}) y el coeficiente de transferencia de calor en función del tiempo

Conclusiones

1. Se modeló el perfil de calentamiento de una cuba de galvanización a régimen no estacionario utilizando el método de los nodos, considerando los mecanismos de transferencia de calor por radiación, convección libre y conducción, obteniendo una correspondencia satisfactoria entre el tiempo de operación establecido y el predicho por el modelo.
2. Se estimó que el intervalo de temperatura entre 526°C a 538°C en la fuente de calor es probablemente el más conveniente para finalizar la operación de calentamiento de la cuba; y el intervalo de tiempo de 27,3h a 27,8h, el crítico en cuanto a alta diferencia de temperatura entre la fuente de calor externa y el interior de la cuba.

Nomenclatura

Cp: Calor específico (J/kg·K)

Fo: Número de Fourier $Fo=k/(\rho \cdot cp)$

h: Coeficiente de transferencia de calor (W/m²·°C)

k: Conductividad térmica (W/m·°C)

T: Temperatura (°C)

x, y, z: Ejes referidos al ancho, largo y profundidad de la cuba, respectivamente

α : Coeficiente de transferencia de calor (W/m²·°C)

δ : Espesor de la cuba (m)

$\Delta X, \Delta Y$: Variación de la longitud según eje (m)

ρ : Densidad (kg/m³).

Referencias bibliográficas

1. DELVASTO, P., CASAL-RAMOS, J. A., GONZÁLEZ-JORDÁN, O., DURÁN-RODRÍGUEZ, N. C., DOMÍNGUEZ, J. R., MONCADA, P. Caracterización de residuos sólidos procedentes de dos procesos distintos de galvanizado en caliente por inmersión. *Revista de Metalurgia*. [en línea]. 2012. **48**(1). 33-34. ISSN: 1988-4222. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.1131>
2. HERRERA, M., GUILLÉN P., MARTÍNEZ, F. Aproximaciones Simbólicas en un Proceso Industrial de Galvanizado. *Revista Científica de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*. [en línea]. 2008. **29**(2). 1-13. ISSN: 1815-5928.
3. RICO-OVIEDO, Y. Estructura y caracterización de los recubrimientos galvanizados por inmersión en caliente, sobre acero. *REDIP. UNEXPO. VRB*. [en línea]. 2012. **2**(4). 368-378. ISSN: 2244-7393, <http://redip.bqto.unexpo.edu.ve>
4. SERÉ, P.R., CULCASI, J.D., ELSNER, C.I., DI SARLK, A.R. Factores que afectan a la estructura de los recubrimientos de cinc obtenidos por inmersión. *Revista de Metalurgia*. [en línea]. 1997. **33**(6). 376-381. ISSN: 1988-4222. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.1997.v33.i6.832>
5. BAKHTIARI, A., TOROGHINEJAD, M.R., ASHRAFIZADEH, F. The effect of zinc bath temperature on the morphology, texture and corrosion behavior of industrially produced hot-dip galvanized coatings. *Metall. Mater. Eng.* 2014. **20**(1). 41-52. ISSN: 2217-8961. <http://dx.doi.org/10.5937/metmateng1401041B>
6. POKORNY, P., KOLISKO, J., BALIK, L., NOVAK, P. Effect of chemical composition of steel on the structure of hot – dip galvanized coating. *METABK*. 2016. **55**(1).115-118. ISSN 0543-5846.
7. TIRON, E., MARTEL, S.C., COSNITA, M. CRISAN, A. The effect on some controlling factors of quality of hot-dip galvanized coatings. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov*. 2017. **10**(59). 141-148. ISSN 2065-2119.
8. PENG BICAO, WANG JIANHUA, SU XUPING, LI ZHI, YIN FUCHENG. Effects of zinc bath temperature on the coatings of hot-dip galvanizing. *Surface and Coatings Technology*. 2008. **202**(9). 1785-1788. ISSN: 0257-8972. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.07.044>
9. ADETUNJI, O.R. Optimizing hot - dip galvanizing operations of steel sheets for better quality. *J. Nat. Sci. Engr. Tech.* 2010. **9**(2):99-105.

10. AJERSCH, F., ILINCA, F. Review of modeling and simulation of galvanizing operations. *Steel Research International*. 2018. **89**(1). ISSN: 1869-344X. <https://doi.org/10.1002/srin.201700074>
11. YUE, Q., ZHANG, C., XU, Y. et al. Performance of flow and heat transfer in a hot-dip round coreless galvanizing bath. *Metall and Materi Trans B*. 2017. **48**(2). 1188-1199. <https://doi.org/10.1007/s11663-016-0870-z>
12. REISS, G., ISHMURZIN, A., MUGRAUER, C. et al. Thermo-chemical fluid flow simulation in hot-dip galvanizing: the evaluation of dross build-up formation. *Metall and Materi Trans B*. 2019. **50**. 834–845. <https://doi.org/10.1007/s11663-018-1496-0>
13. AJERSCG, F., HETU, J.F. Simulation of flow in a Continuous Galvanizing Bath: Part II. Transient Aluminium Distribution Resulting from ingot Addition. *Metall and Materi Trans B*. 35B, 2004. 171-178.
14. MIJEEV, M.A., MIJEEVA, I.M. *Fundamentos de termotransferencia*. Edición en español, Editorial Mir Moscú. 1979. Impreso en Rumania, 1979.
15. PERRY, R. H, GREEN, D.W. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 1999. 7th ed. ISBN 0-07-115448-5. The McGraw-Hill Companies, Inc.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores

Armando Rojas Vargas: diseño y desarrollo, análisis y expresión de los resultados.

Sergio Daniel Cruz Pupo: diseño, desarrollo e implementación del proyecto, revisión de los resultados.

May Yudith Serrano Mulet: revisión crítica.

Los autores aprobaron la versión final para su publicación.