

Modelo matemático de la transferencia de calor para predecir el perfil de durezas en probetas Jominy^(*)

E. López*, J.B. Hernández*, G. Solorio**, H.J. Vergara***, O. Vázquez* y P. Garnica***

Resumen

En el presente trabajo se estimó el coeficiente de transferencia de calor en la superficie que se encuentra en contacto con el chorro de agua en la probeta Jominy mediante la solución del problema inverso de conducción de calor. Con el objetivo de predecir los perfiles térmicos y las fracciones de fase transformadas se formuló un modelo matemático con el método de diferencias finitas y se codificó en el software comercial Microsoft Visual Basic v. 6. Los perfiles térmicos y las fracciones de fase calculadas se utilizaron para predecir el perfil de durezas en una probeta Jominy de acero AISI 4140 mediante el uso de correlaciones empíricas.

Palabras clave

Ensayo Jominy; Simulación numérica; Problema inverso de conducción de calor; AISI 4140; Método de diferencias finitas.

Mathematical model of heat transfer to predict distribution of hardness through the Jominy bar

Abstract

The heat transfer coefficient was estimated at the bottom surface at Jominy bar end quench specimen by solution of the heat inverse conduction problem. A mathematical model based on the finite-difference method was developed to predict thermal paths and volume fraction of transformed phases. The mathematical model was codified in the commercial package Microsoft Visual Basic v. 6. The calculated thermal path and final phase distribution were used to evaluate the hardness distribution along the AISI 4140 Jominy bar.

Keywords

Jominy test; Numerical simulation; Inverse heat conduction problem; AISI 4140; Finite difference method.

1. INTRODUCCIÓN

El ensayo Jominy es una prueba estándar de laboratorio que ha sido ampliamente utilizada para determinar la templeabilidad de los aceros. La prueba consiste en austenizar una probeta cilíndrica de dimensiones estándar del acero bajo estudio y enfriar con un chorro de agua una de las caras planas durante un tiempo predeterminado^[1]. Cuantitativamente, la información que proporciona es el perfil de durezas desarrollado a lo largo de la probeta, el cual es función de la rapidez de enfriamiento que se experimenta durante la prueba. Esta información ha sido utilizada para predecir las propiedades mecánicas de componentes metálicos^[2] y simular la evolución microestructural en procesos

de temple^[3]. Adicionalmente se han desarrollado modelos difusivos del tipo Avrami los cuales se han utilizado para la predicción de diagramas CCT^[4] y diagramas TTT^[5], además de simular el temple de componentes metálicos^[6].

El principal problema en la modelación matemática radica en que se desconoce el comportamiento de la transferencia de calor en las fronteras de la probeta, y principalmente en la superficie que está en contacto con el chorro de agua ya que es por esta frontera donde se extrae la mayor cantidad de calor. Para solucionar esto, se ha recurrido a la solución del problema inverso de conducción de calor (IHCP por sus siglas en inglés), el cual consiste en estimar la condición a la frontera mediante el conocimiento de la historia térmica en uno o varios puntos cercanos a dicha frontera. Para solucionar

(*) Trabajo recibido el día 22 de mayo de 2012 y aceptado en su forma final el día 24 de octubre de 2012.

* Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F., México, E-mail:edgar0902@comunidad.unam.mx

** Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México.

*** Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia, México.

el IHCP se han utilizado el método del gradiente conjugado^[7], el método de Beck^[8] y el método de regularización iterativa^[9].

Tradicionalmente se ha estimado el coeficiente de transferencia de calor en aceros que no presentan transformación de fase en el intervalo de temperaturas del ensayo, y se ha aplicado este coeficiente a la simulación del ensayo en probetas de acero con transformación de fase^[10]; además este coeficiente se ha utilizado para simular el enfriamiento de componentes metálicos en donde se han reportado buenas aproximaciones entre los resultados estimados y los medidos experimentalmente^[6].

En este trabajo se estimó el coeficiente de transferencia de calor de la superficie en contacto con el chorro de agua de la probeta Jominy mediante el método de Beck^[8] para un acero que no presenta transformaciones de fase (AISI 304), en el intervalo de temperatura de trabajo. Se realizaron cálculos matemáticos para verificar si el coeficiente de transferencia de calor estimado puede ser utilizado para predecir la respuesta térmica de una probeta Jominy fabricada con un acero que presenta transformaciones de fase (AISI 4140). Se formuló un modelo matemático de la transferencia de calor y de la respuesta microestructural con el método de diferencias finitas y se programó en el software Microsoft Visual Basic; la información proporcionada por el modelo se utilizó para predecir, con la ayuda de ecuaciones empíricas, el perfil de durezas en una probeta Jominy de acero AISI 4140. Con este procedimiento, se obtiene una mejor predicción del perfil de durezas en comparación con el método de análisis del factor de temple propuesto por Zehtab^[11].

2. MODELO MATEMÁTICO

2.1. Formulación de la transferencia de calor

Utilizando un sistema de coordenadas cilíndricas en dos dimensiones se establece que la extracción de calor de la probeta Jominy se da en la dirección axial y radial. La ecuación (1) es la formulación matemática de la transferencia de calor en el sistema (probeta Jominy), en donde se incluye el término q que es la generación de calor por transformación de fase:

$$\rho C_p(T) \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = - \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(-k(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left(-k(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + q \quad (1)$$

donde:

ρ : Densidad; kg/m³

C_p : Capacidad calorífica; J/kg °C

K : Conductividad térmica; W/mK

Para la solución de la ecuación (1) se hacen las siguientes suposiciones:

- Problema acoplado de transferencia de calor y transformación de fase.
- El material es isotrópico y homogéneo.
- La transformación de austenita a bainita sigue la misma cinética que la transformación de austenita a perlita.
- Se asume una temperatura inicial homogénea.

El término de calor, q , se determina a partir de la ecuación (2):

$$q = \rho \Delta H \frac{\Delta F}{\Delta t} \quad (2)$$

donde:

ΔF : Fracción transformada

ΔH : Calor latente; J/kg

Las condiciones inicial y de frontera son:

Condición inicial. Se asume que al tiempo cero la temperatura es homogénea en toda la probeta (Ec. (3)):

$$T(r, z, 0) = T_0 \quad 0 \leq r \leq r_0 \quad 0 \leq z \leq L \quad (3)$$

Condición de frontera 1. En el eje de simetría de la probeta no existe transferencia de calor, por lo que se considera una frontera aislada (Ec. (4)):

$$- \frac{k(T) \partial T}{\partial r} \Big|_{0,z,t} = 0 \quad 0 \leq z \leq L, \quad t > 0 \quad (4)$$

Condición de frontera 2. El calor que llega por conducción a la superficie lateral de la probeta se transfiere a los alrededores por radiación y convección natural representadas por un coeficiente de transferencia de calor global ($h_r(T)$) (Ec. (5)):

$$- \frac{k(T) \partial T}{\partial r} \Big|_{r_0,z,t} = - h_r(T) [T_\infty - T(r_0, z, t)] \quad 0 \leq z \leq L, \quad t > 0 \quad (5)$$

Condición de frontera 3. El calor que llega por conducción a la superficie que está en contacto con

el chorro de agua de la probeta se transfiere a los alrededores por radiación y convección forzada representadas por un coeficiente de transferencia de calor global ($h(T)$) (Ec. (6)):

$$-\frac{k(T)\partial T}{\partial t} \Big|_{r,0,t} = -h(T)[T_{\infty} - T(r, 0, t)] \quad 0 \leq r \leq r_o, \quad t > 0 \quad (6)$$

Condición de frontera 4. El calor que llega por conducción a la superficie superior de la probeta se transfiere a los alrededores por radiación y convección natural representadas por un coeficiente de transferencia de calor global ($h_z(T)$) (Ec. (7)):

$$-\frac{k(T)\partial T}{\partial t} \Big|_{r,L,t} = -h_z(T)[T_{\infty} - T(r, L, t)] \quad 0 \leq r \leq r_o, \quad t > 0 \quad (7)$$

La principal dificultad en la modelación matemática de un problema térmico, es que se desconocen la mayoría, si no todas, de las condiciones a la frontera, por lo que necesitan ser estimadas o calculadas. De las condiciones a la frontera planteadas para resolver la ecuación (1), la condición 3 es la más crítica debido a que por la parte inferior de la probeta Jominy es por donde se extrae la mayor cantidad de calor. Para estimar dicha condición se hace uso de la solución del problema inverso de conducción de calor con el método de Beck^[8], el cual consiste en estimar el flujo de calor y temperatura de superficie a partir de que se conoce la respuesta térmica en algún punto cercano a la superficie, es decir, usando mediciones de temperatura experimentales dentro de la probeta. Para asegurar que la condición a la frontera es estimada correctamente, el método resuelve el problema directo de conducción de calor y compara esta respuesta térmica con la experimental para minimizar el error.

Las condiciones a la frontera 2 y 4 son menos críticas, por lo que pueden ser determinadas mediante correlaciones. Por las temperaturas de trabajo utilizadas en el ensayo Jominy, el coeficiente de transferencia de calor tiene una contribución por convección y otra por radiación (Ec. (8)):

$$h = h_c + h_{rad} \quad (8)$$

El coeficiente de transferencia de calor convectivo se determina a partir del cálculo del número de Nusselt (Ec. (9) y Ec.(10))^[12]:

$$Nu = 0.59 (GrPr)^{0.25} \quad (9)$$

$$Nu = \frac{h_c L}{k_a} \quad (10)$$

donde:

Gr : Número de Grashoff; adimensional

Pr : Número de Prandtl; adimensional

L : Altura de la probeta; m

k_a : Conductividad térmica del aire; W/mK

La contribución por radiación se determina mediante la ecuación (11):

$$h_{rad} = \varepsilon \left[\frac{\sigma (T^4 - T_f^4)}{T - T_f} \right] \quad (11)$$

donde:

ε : Emisividad; adimensional

σ : Constante de Stefan-Boltzmann; W/m²K⁴

T_f : Temperatura del medio; K

2.2. Formulación de las transformaciones de fase

La cinética de transformación de las fases difusionales es descrita por la ecuación de Avrami^[13] (Ec. (12)):

$$F_D = 1 - \exp \left(b(T) \theta_j^{n(T)} \right) \quad (12)$$

donde:

F_D : Fracción transformada

θ_j : Tiempo de transformación isotérmico; s

$b(T)$ y $n(T)$: Parámetros cinéticos del material

Los parámetros se determinan a partir de las ecuaciones (13) y (14) que son función de las temperaturas y tiempos de inicio y fin de transformación del correspondiente diagrama TTT.

$$b(T) = - \frac{\ln(1 - F_i)}{t_i^{n(T)}} \quad (13)$$

$$n(T) = \frac{\ln \left[\frac{\ln(1 - F_i)}{\ln(1 - F_f)} \right]}{\ln \left(\frac{t_i}{t_f} \right)} \quad (14)$$

En estas ecuaciones F_i y F_f son las fracciones transformadas de inicio y fin, con un valor de 0,01 y 0,99 respectivamente, y t_i y t_f son el tiempo para que se inicie y se complete la transformación respectivamente.

Debido a que la ecuación de Avrami describe la cinética de transformación de fase isotérmicamente, para calcular el tiempo de transformación isotérmico primero se calcula un tiempo ficticio (θ'_j) que corresponde al tiempo para alcanzar la fracción transformada previa como si hubiera transformado isotérmicamente a la temperatura nueva (Ec. (15)):

$$\theta'_j = \left[\frac{\ln \left(\frac{1}{1 - F(j-1)} \right)}{b(T)} \right]^{\frac{1}{n(T)}} \quad (15)$$

Con este valor y el paso de tiempo corriente se calcula el tiempo de transformación isotérmico mediante la ecuación (16):

$$\theta_j = \theta'_j + \Delta t \quad (16)$$

Con estas ecuaciones queda descrita la cinética de transformación de las fases difusionales.

Por otro lado, la cinética de transformación de la martensita se describe con la ecuación de Koistinen-Marburger^[14] (Ec. (17)):

$$F_m = (1 - \exp[-\alpha(T_{Ms} - T)])(1 - F_D) \quad (17)$$

donde:

T_{Ms} : Temperatura de inicio de la transformación martensítica; °C

F_D : Fracción de las fases difusionales formadas previa a la transformación martensítica

α : $1.10E-2 \text{ K}^{-1}$

2.3. Predicción de la dureza

Para calcular la dureza a lo largo de la probeta Jominy, se hace uso de la regla de las fases (Ec. (18))^[5]:

$$H_v = X_M H_{VM} + X_B H_{VB} + (X_F + X_P) H_{V(F+P)} \quad (18)$$

donde:

H_V : Dureza Vickers de la mezcla

X_M, X_B, X_F y X_P : Fracciones de martensita, bainita, ferrita y perlita respectivamente

H_{VM} y H_{VB} : Durezas de la martensita y bainita respectivamente

$H_{V(F+P)}$: Dureza de la mezcla de ferrita y perlita

La dureza de cada fase se calcula con la composición química del acero y la rapidez de enfriamiento a 700 °C mediante ecuaciones empíricas (Ecs. (19)-(21)):

$$H_{VM} = 127 + 949C + 27Si + 11Mn + 8Ni + 16Cr + 21 \log Vr \quad (19)$$

$$H_{VB} = -323 + 185C + 330Si + 153Mn + 65Ni + 144Cr + 191Mo + (89 + 53C - 55Si - 22Mn - 10Ni - 20Cr - 33Mo) \log Vr \quad (20)$$

$$H_{V(F+P)} = 42 + 223C + 53Si + 30Mn + 12.6Ni + 7Cr + 19Mo + (10 - 19Si + 4Ni + 8Cr + 130V) \log Vr \quad (21)$$

donde:

Vr : Rapidez de enfriamiento, °C/h a 700 °C

2.4. Procedimiento de solución

Se implementó una solución numérica con el método explícito de diferencias finitas en 2D para resolver el problema acoplado de transferencia de calor y transformación de fase. El método consiste en discretizar el sistema en volúmenes virtuales y realizar un balance de calor en cada uno de ellos para obtener ecuaciones algebraicas que describan el comportamiento de todo el sistema.

Debido a la geometría y simetría, el sistema queda completamente descrito con nueve ecuaciones algebraicas patrón. Con esta discretización del sistema, se programó la solución en el programa de computo Microsoft Visual Basic v. 6. La figura 1 presenta el procedimiento de cálculo.

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El procedimiento experimental está enfocado en la adquisición de la respuesta térmica en diferentes posiciones a lo largo del eje de la probeta Jominy. La adquisición de estas respuestas permitirá en primer lugar estimar el coeficiente de transferencia de calor de la superficie en contacto con el chorro de agua mediante la solución del problema inverso de conducción de calor, y en segundo lugar la validación del modelo matemático.

Se maquinaron probetas Jominy estándar

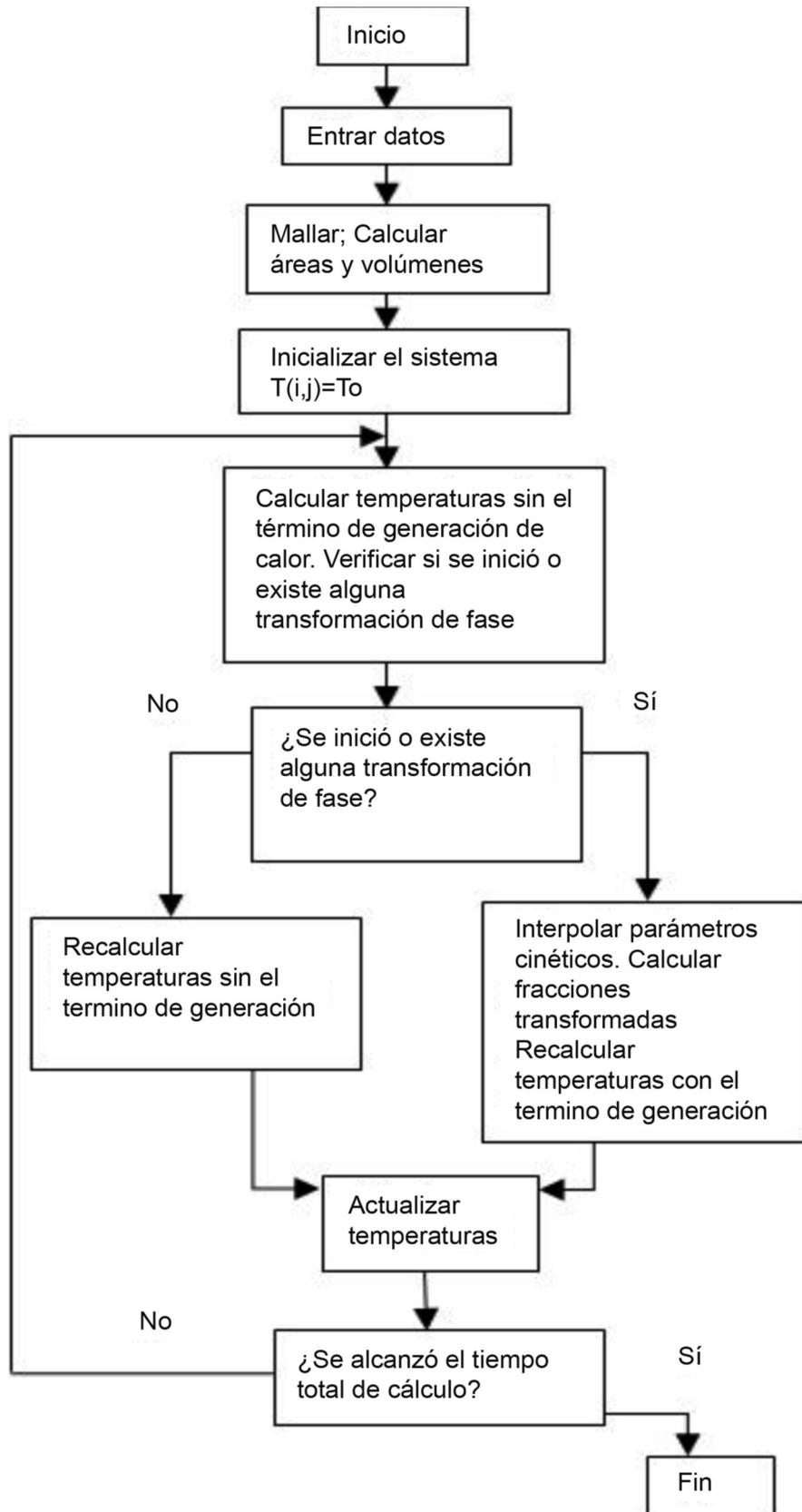


Figura 1. Procedimiento de cálculo para la solución del problema acoplado de transferencia de calor y transformación de fase.

Figure 1. Calculation procedure for solving the problem coupled heat transfer and phase transformation.

Tabla I. Composición química de los aceros de trabajo*Table I. Chemical composition of the steels used in the study*

Acero	% C	% Mn	% P	% S	% Cu	% Cr	% Si	% Mo
AISI 304	0,08	2	0,045	0,03	-	19	1	-
AISI 4140	0,40	0,85	0,02	0,02	0,00	1,05	0,20	0,30

(25,4 mm de diámetro por 101,6 mm de altura), a partir de barras de acero de 1,5 pulgadas de diámetro. Los materiales fueron: acero inoxidable AISI 304 y acero AISI 4140. En total se fabricaron dos probetas del acero AISI 304 y una del acero AISI 4140. La tabla I presenta la composición química de estos aceros. Con el fin de adquirir la respuesta térmica en diferentes posiciones dentro de la probeta Jominy, se maquinaron cuatro barrenos a una profundidad de 12,7 mm sobre el eje de la probeta y se instrumentaron con termopares tipo K con cubierta de inconel de 1/16 de pulgada de diámetro. En la tabla II se muestra la posición de los barrenos.

Cada probeta fue introducida en un horno de resistencia y se calentó hasta alcanzar la temperatura de austenización a la cual fue mantenida durante 15 min para homogeneizar la temperatura, y en su caso, completar la austenización. Posteriormente las probetas fueron retiradas del horno y fueron templadas por un chorro de agua en un dispositivo Jominy durante 10 min. Durante este periodo de enfriamiento, se adquirieron las respuestas térmicas en los puntos donde se encontraban los termopares mediante el adquisidor de datos TempScan 1100 con una rapidez de adquisición de diez mediciones por segundo en cada termopar.

Debido a que el programa que se utilizó para la determinación del flujo de calor está formulado en 1D, se realizó otra prueba con la probeta de acero AISI 304 con una cubierta de acero para minimizar las pérdidas de calor laterales.

Tabla II. Posición de los barrenos en las probetas Jominy*Table II. Position of the holes in the Jominy specimens*

Probeta	Posición barreno 1	Posición barreno 2	Posición barreno 3	Posición barreno 4
AISI 304 (1)	2	15	25	50
AISI 304 (2)	5	12	25	50
AISI 4140	2	10	25	50

Una vez terminada la adquisición de datos, la probeta de acero AISI 4140 fue seccionada transversalmente en la posición de los termopares para determinar la dureza y realizar un análisis de la microestructura.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Con la respuesta térmica obtenida experimentalmente se estimó el flujo de calor en la superficie en contacto con el chorro de agua resolviendo el problema inverso de conducción de calor para las probetas AISI 304(1), AISI 304(2) y AISI 4140. Para las probetas AISI 304(1) y AISI 4140 se estimó la condición de frontera térmica utilizando la historia térmica adquirida con el termopar colocado a 2 mm de la superficie inferior de la probeta cilíndrica y para la probeta AISI 304(2) se utilizó la historia térmica del termopar colocado a 5 mm también de la superficie inferior. Cabe señalar que el programa de cómputo del IHCP utilizado para estimar la condición a la frontera 3 fue diseñado para problemas en 1D, por lo que debe utilizarse la respuesta térmica experimental que se encuentre más cercana a la superficie de la probeta que está en contacto con el chorro de agua. Si se utiliza la respuesta térmica adquirida con un termopar más alejado de la superficie inferior de la probeta, entonces se sobreestimarán las condiciones a la frontera porque sumará las pérdidas de calor laterales. En la figura 2 se presenta el flujo de calor de superficie estimado con el IHCP en función de la temperatura. Se observa que el comportamiento del flujo de calor estimado para las probetas AISI 304(1) y AISI 304(2) es prácticamente el mismo; esto indica que hasta esta posición de 5 mm de la probeta AISI 304(2) el problema de transferencia de calor es unidireccional, es decir, que las pérdidas de calor laterales prácticamente fueron anuladas por el uso de la cubierta lateral en la probeta AISI 304(2). Para la probeta AISI 4140, el flujo de calor estimado aumenta en el intervalo de los 650 a los 300 °C. Este comportamiento se puede deber a que

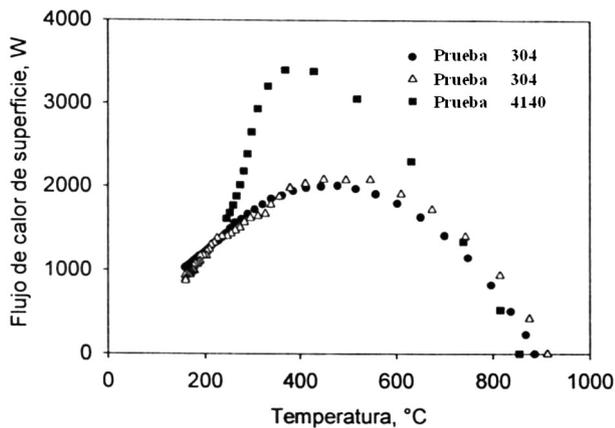


Figura 2. Flujo de calor estimado mediante la solución del problema inverso de conducción de calor.

Figure 2. Heat flow estimated by solving the heat inverse conduction problem.

en la superficie de la probeta lateral se formó mucho más óxido en comparación con las probetas de acero AISI 304, lo que aumentó las pérdidas de calor laterales por radiación, haciendo que la transferencia de calor en la posición de la estimación del flujo de calor fuera en 2D. Adicionalmente la

generación de calor por transformación de fase y el aumento de la conductividad térmica por la composición química de este acero contribuyeron al aumento en magnitud de esta frontera.

En la figura 3 se presenta la respuesta térmica experimental comparada con la respuesta térmica simulada de la probeta AISI 304(1). En la simulación del ensayo Jominy no se consideraron las pérdidas de calor laterales, por lo que se observa una desviación en comparación con los resultados experimentales en posiciones alejadas de la superficie que está en contacto con el chorro de agua, lo que revela que la transferencia de calor se da en 2D. Sin embargo, en la posición de 2 mm las dos respuestas (simulada y experimental) son similares. Esto indica que la transferencia de calor es unidireccional en la zona cercana a la superficie que está en contacto con el chorro de agua porque la extracción de calor es mucho mayor en la dirección axial en comparación con la extracción de calor lateral. En vista de esto, la figura 4 presenta los resultados experimentales de la probeta AISI 304(2), la cual fue ensayada con una cubierta metálica para minimizar las pérdidas de calor lateral, y se comparan con la respuesta térmica simulada sin considerar estas pérdidas. Se observa que

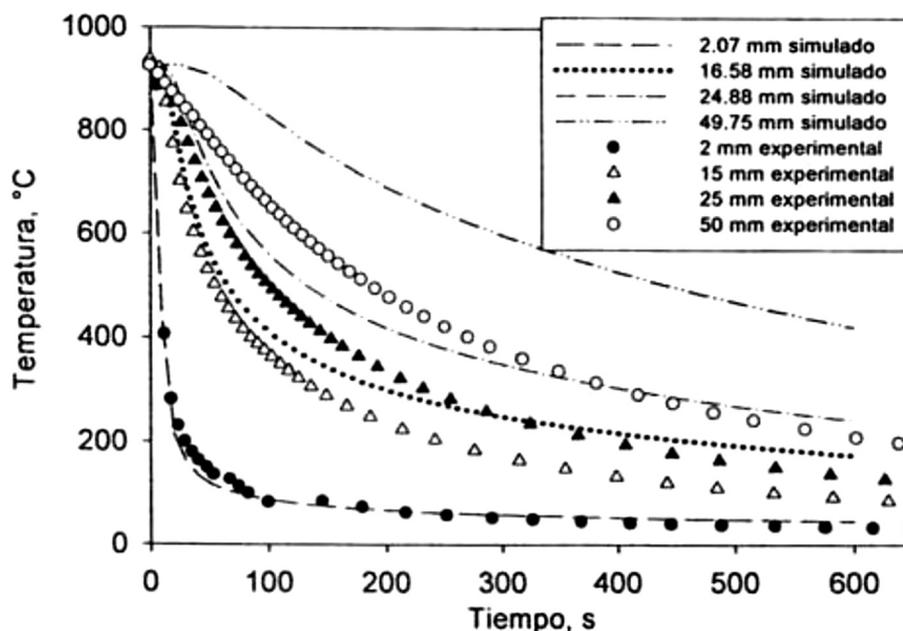


Figura 3. Respuesta térmica simulada y experimental de la probeta 304(1). En la simulación se usó el flujo de calor estimado con la probeta 304(1) y no se consideraron las pérdidas de calor laterales.

Figure 3. Simulated and experimental thermal response of the specimen 304(1). In the simulation the heat flow estimated with the specimen 304(1) was used and the lateral heat loss were not considered.

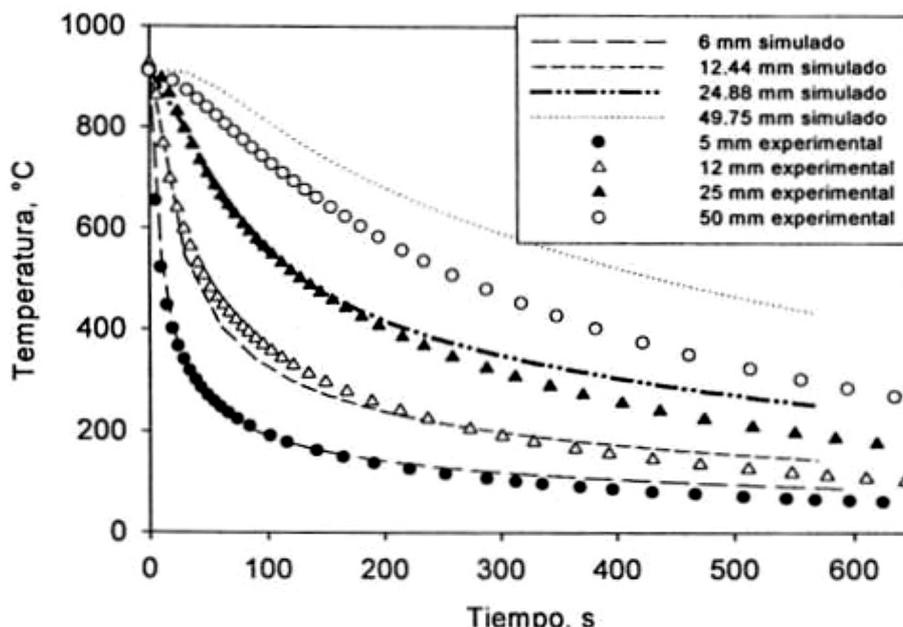


Figura 4. Respuesta térmica simulada y experimental de la probeta AISI 304(2). En la simulación no se consideraron las pérdidas de calor laterales.

Figure 3. Simulated and experimental thermal response of the specimen AISI 304(2). In the lateral heat loss were not considered.

la cubierta lateral efectivamente disminuyó las pérdidas de calor laterales, pero no las eliminó. Con estos resultados se determinó que es necesario considerar las pérdidas de calor laterales, pero debido a que son mucho menos críticas que la frontera que está en contacto con el chorro de agua se calcularon a partir de correlaciones del coeficiente de transferencia de calor convectivo y de radiación encontrado en la literatura^[12].

Los resultados obtenidos considerando las pérdidas de calor lateral se presentan en la figura 5 en donde se observa que los resultados experimentales son similares a los simulados, por lo que el modelo y la estimación de la condición a la frontera mediante la solución del IHCP fueron validados. Una vez que se tiene validada la condición a la frontera estimada a partir de un acero que no transforma, se desea saber si esta condición puede ser utilizada para predecir la respuesta térmica en un acero que sí transforme. Para esto, se realizaron dos simulaciones del ensayo Jominy en probetas de acero AISI 4140; en la primera simulación la condición a la frontera que se utilizó fue la estimada con los datos experimentales de la probeta AISI 304(1), y en la segunda simulación se utilizó la condición a la frontera estimada con la probeta AISI 4140. La primera simulación se presenta en la figura 6 en donde se observa una aproximación aceptable entre la respuesta térmica

simulada y la experimental en todas las posiciones de los termopares. La segunda simulación se presenta en la figura 7 en donde se observa un mejor ajuste entre los resultados simulados y los experimentales. De estas dos figuras se puede señalar que la condición a la frontera estimada con los datos experimentales de un acero que no transforma puede ser utilizada para predecir la respuesta térmica de un acero que sí presenta transformación de fase con una buena aproximación.

Una vez que el modelo matemático fue validado térmicamente, se estimaron las durezas de la probeta Jominy de un acero AISI 4140 mediante la determinación de la rapidez de enfriamiento a 700 °C y de la respuesta microestructural obtenidas del modelo matemático y mediante el uso de la regla de las fases (Ec. (18)) y de ecuaciones empíricas (Ecs. (19)-(21)). La estimación de las durezas se realizó en la misma posición donde se adquirió la respuesta térmica experimentalmente con termopares de la probeta AISI 4140. La figura 8 presenta la banda de templabilidad del acero AISI 4140, los resultados de dureza experimentales en la posición de los termopares y las durezas estimadas con el modelo matemático y de las ecuaciones empíricas. Se observa que ambos resultados de dureza (experimentales y estimados) caen dentro de la banda de templabilidad y que adicionalmente los resultados predichos

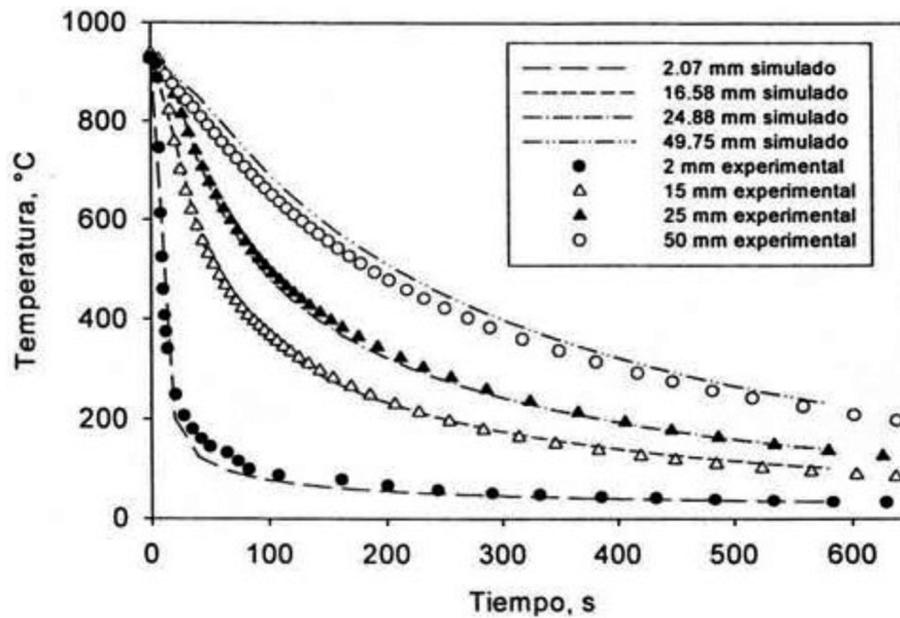


Figura 5. Respuesta térmica simulada y experimental de la probeta AISI 304(1). En la simulación se consideraron las pérdidas de calor laterales.

Figure 5. Simulated and experimental thermal response of the specimen AISI 304(1). In the simulation the lateral heat loss were considered.

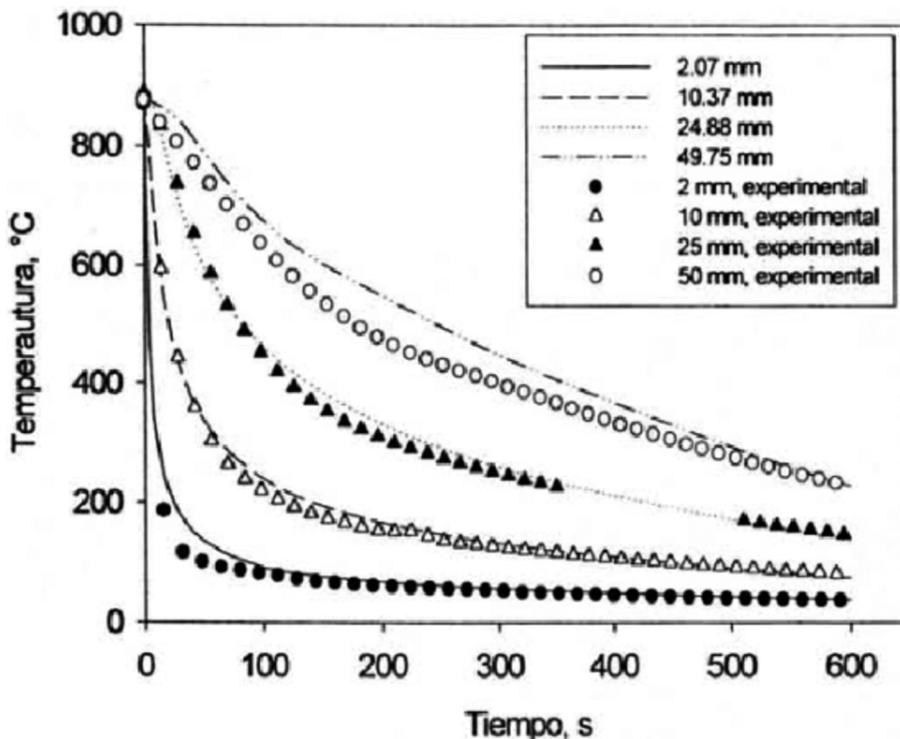


Figura 6. Respuesta térmica simulada y experimental de la probeta AISI 4140, utilizando el coeficiente de transferencia de calor estimado con la probeta AISI 304(1).

Figure 6. Simulated and experimental thermal response of the specimen AISI 4140 using the heat transfer coefficient estimated with the specimen AISI 304(1).

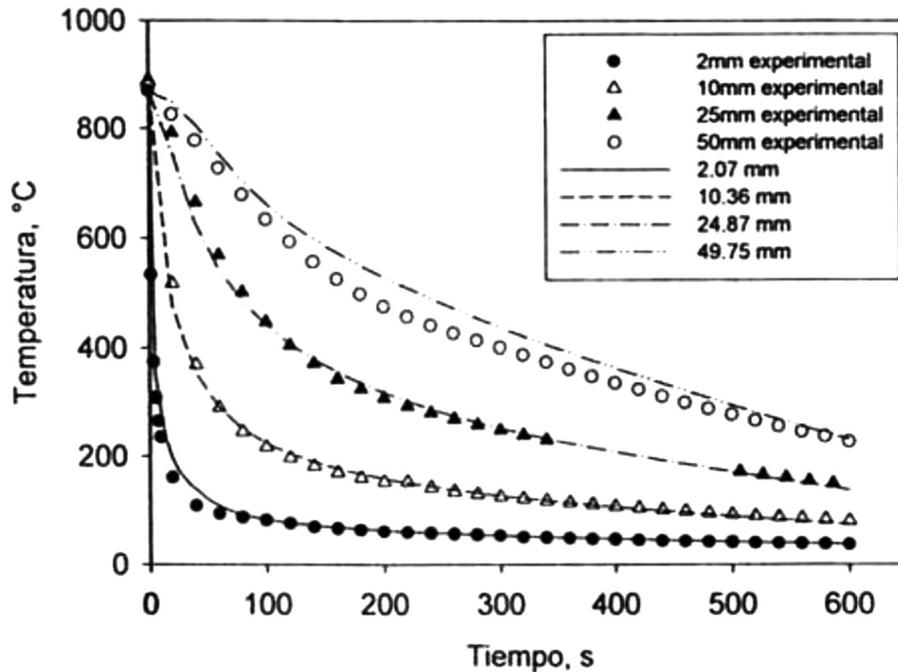


Figura 7. Respuesta térmica simulada y experimental de la probeta AISI 4140. En la simulación se consideraron las pérdidas de calor laterales. El coeficiente de transferencia de calor fue estimado con la misma probeta.

Figure 7. Simulated and experimental thermal response of the specimen AISI 4140. In the simulation the lateral heat loss were considered. The heat transfer coefficient was estimated with the same specimen.

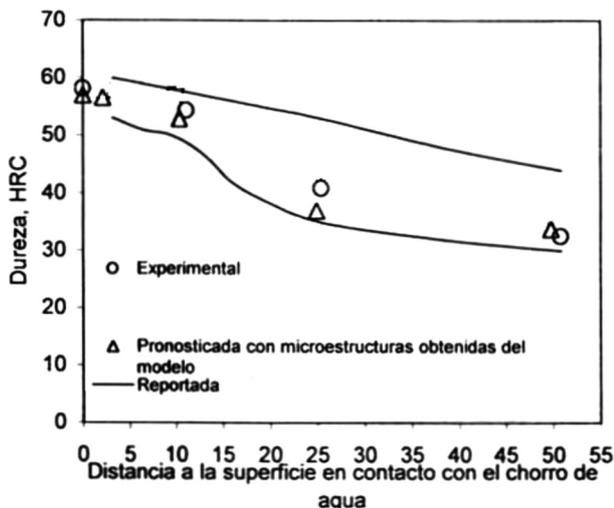


Figura 8. Banda de templabilidad para el acero AISI 4140.

Figure 8. Hardenability band for the AISI 4140 steel.

concuerdan aceptablemente con los medidos experimentalmente.

5. CONCLUSIONES

- Se formuló y validó un modelo matemático del ensayo Jominy el cual puede predecir con una precisión aceptable la respuesta térmica; además, la información proporcionada por el modelo se utilizó para predecir el perfil de durezas a lo largo de la probeta Jominy de un acero AISI 4140. Adicionalmente se estimó el coeficiente de transferencia de calor en la parte que está en contacto con el chorro de agua para probetas fabricadas de acero AISI 304 y AISI 4140.

Del análisis de los resultados se concluye que:

- La transferencia de calor en el ensayo Jominy es bidimensional, con excepción de las zonas cercanas a la superficie que está en contacto con el chorro de agua.
- El flujo de calor en la superficie en contacto con el chorro de agua es dependiente de las propiedades termofísicas del material.

- El uso de la condición a la frontera estimada con un acero que no transforma puede ser utilizada para predecir la respuesta térmica de un acero que sí transforme, pero una mejor predicción requiere que se estime la condición a la frontera con el mismo material.
- La formulación matemática utilizando los parámetros cinéticos de transformación a partir de un diagrama TTT y mediante el uso de correlaciones empíricas predice correctamente el perfil de durezas en la probeta Jominy.

REFERENCIAS

- [1] ASTM A255-10. Standard Tests Methods for Determining Hardenability of Steel. Annual Book of ASTM Standards, 2010.
- [2] B. Smoljan, *J. Mater. Process. Tech.* 175 (2006) 393-397.
- [3] B. Smoljan, S. Smokvina Hanza, N. Tomaši, y D. Iljki, *J. Achiev. Mater. Manufact. Engineer.* 24 (2007) 275-282.
- [4] D. Hömberg, *Acta Mater.* 41 (1996) 4.375-4.385.
- [5] M.V. Li, D.V. Niebuhr, L. Meekisho y D.G. Atteridge, *Metall. Mater. Trans. B* 29B (1998) 661-670.
- [6] M. Eshraghi Kakhki, A. Kermanpur y M.A. Golozar, *Model. Simul. Mater. Sc. Eng.* 17 (2009) 045007.
- [7] S.G. Chen, Cheng-I Weng, y J. Lin, *J. Mater. Process. Tech.* 86 (1999) 257-263.
- [8] B. Hernández-Morales, A. Ingalls-Cruz, J.A. Barrera-Godinez y R. Colás, *Proceedings of the 20th ASM, Heat Treating Society Conference*, St. Louis, MO, 9-12 Octubre 2000, pp. 719-726.
- [9] P. Le Masson, T. Loulou, E. Artioukhine, P. Rogeon, D. Carron, y J.J. Quemener, *Int. J. Therm. Sci.* 41 (2002) 517-527.
- [10] M. Narazaki, M. Kogawara, A. Shirayori y S. Fuchiza, *4th International Conference on Quenching and Control of Distortion*, Beijing, China, Noviembre 2003, pp. 97-104.
- [11] A. Zehtab Yazdi, S.A. Sajjadi, S.M. Zebarjad y S.M. Moosavi Nezhad, *J. Mater. Process. Tech.* 199 (2008) 124-129.
- [12] B.V. Karlekar y R.M. Desmons, *Transferencia de Calor*, Ed. Mc Graw-Hill, 1985.
- [13] E.B. Hawbolt, B. Chau y J.K. Brimacombe, *Metall. Trans. A* 14 (1983) 1.803-1.815.
- [14] P.R. Woodard, S. Chandrasekar y H.T.Y. Yang, *Metall. Mater. Trans. B* 30 (1999) 815-822.