



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

“TRANSFERENCIA DE CALOR DURANTE EL CICLO TERMICO DE UN ACERO TEMPLABLE AL AIRE”

2917740

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE INGENIERA QUIMICA METALURGICA

P R E S E N T A :

OFELIA BARBA MENDEZ



México, D. F.

EXAMENES PROFESIONALES FACULTAD DE QUIMICA

2001



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE I.Q.M. Guillermo F. Salas Banuet
VOCAL Dr. José Bernardo Hernández Morales
SECRETARIO M en C. Alberto Ingalls Cruz
1er. SUP. M. en C. Sergio García Galán
2do. SUP. I.Q.M. Arturo Alejandro Sánchez Santiago

Sitio donde se desarrolló el tema:


Departamento de Ingeniería Metalúrgica. Facultad de Química, Edificio D
Especialidades Térmicas, S.A de C.V.
Fundidores No. 18
Zona Industrial Xhala
Cuautitlán Izcalli Estado. de México.

Asesor:



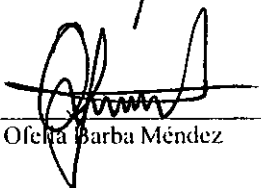
M. en C. Alberto Ingalls Cruz

Supervisor Técnico:



Dr. José Bernardo Hernández Morales

Sustentante:



Ofelia Barba Méndez

AGRADECIMIENTOS

A la memoria de mi padre.

A mi Familia,

**Gracias a todas, las quiero mucho y especialmente
a la Chica Más Hermosa del Universo....**

Alondrita

A los mejores Profesores del mundo:

M. en C. Alberto Ingalls Cruz

y

Dr. José Bernardo Hernández Morales

A mi amigo del alma

I.Q.M. Héctor Eduardo Nápoles Huerta

A mis amigos

Don Gabriel, Fermín, Don Enrique y Pedro, Joel y Agustín, Luz María.

A la Universidad por brindarme la oportunidad de estudiar

CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS.....	3
1. RESUMEN.....	5
2. INTRODUCCION.....	7
3. REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	11
3.1 Tratamiento Térmico del Acero.....	11
3.1.1 Diagramas TTT y CCT.....	13
3.1.2 Baños de sales.....	17
3.2 Transferencia de Calor.....	18
3.2.1 Mecanismos de la Transferencia de Calor.....	18
4. MODELOS MATEMATICOS.....	21
4.1 Evaluación de la condición de frontera de los sistemas de calentamiento y enfriamiento en sales.....	21
4.2 Evaluación de la condición de frontera del sistema de enfriamiento en aire.....	24
5. PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES.....	29
5.1 Medición de la respuesta térmica durante el calentamiento y enfriamiento en sales.....	29
5.2 Medición de la respuesta térmica durante el enfriamiento con aire forzado.....	31

6. PRESENTACION Y ANALISIS DE RESULTADOS.....	35
6.1 Resultados experimentales.....	35
6.1.1 Evaluación de la condición de frontera para el calentamiento con sales.....	35
6.1.2 Evaluación de la condición de frontera para el enfriamiento en sales.....	42
6.1.3 Evaluación de la condición de frontera para el enfriamiento en aire forzado.....	45
6.2 Resultados de la Simulación.....	47
6.2.1 Verificación del modelo matemático.....	47
6.2.2 Validación del modelo matemático.....	48
6.2.3 Simulación del ciclo térmico del acero SAE D2.....	49
7. CONCLUSIONES.....	54
APENDICES.....	55
<i>Apéndice 1. Propiedades termofísicas del acero D2.....</i>	<i>56</i>
<i>Apéndice 2. Metodología del problema inverso de conducción de calor.....</i>	<i>57</i>
<i>Apéndice 3. Listado del Programa.....</i>	<i>59</i>
8. BIBLIOGRAFIA.....	65

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama TTT para un acero SAE 1080.

Figura 2. Esquema ilustrativo del tratamiento térmico de martempering en un diagrama TTT.

Figura 3. Representación de los diagramas CCT (líneas gruesas) y TTT (líneas ligeras) para un acero eutectoide SAE 1080.

Figura 4. Esquema de los procedimientos para calcular la densidad de flujo de calor con *Winprobe* y la distribución de temperaturas con *Conduct*.

Figura 5. Representación esquemática de las probetas de acero inoxidable SAE 304 utilizadas para las mediciones del calentamiento y enfriamiento en sales.

Figura 6. Representación esquemática de las pruebas de calentamiento y enfriamiento en sales.

Figura 7. Representación esquemática de la probeta de acero SAE 1018 utilizada para las mediciones de enfriamiento en aire.

Figura 8. Representación esquemática de las pruebas de enfriamiento en aire.

Figura 9. Respuesta térmica en la probeta de acero SAE 304 para el primer calentamiento en baños de sales.

Figura 10. Densidad de flujo de calor respecto de la temperatura de superficie, para las curvas de calentamiento mostradas en la Figura 9.

Figura 11. Curva típica para la densidad del flujo de calor.

Figura 12. Respuesta térmica en la probeta SAE 304 para el segundo calentamiento en sales.

Figura 13. Densidad de flujo de calor respecto de la temperatura de superficie, para las curvas de calentamiento mostradas en la Figura 12.

Figura 14. Respuesta térmica en la probeta SAE 304 para el enfriamiento en sales.

Figura 15. Densidad de flujo de calor respecto de la temperatura de superficie para las curvas de enfriamiento en baños de sales mostradas en la Figura 14.

Figura 16. Respuesta térmica de la probeta de acero al carbono SAE 1018 durante el enfriamiento con aire.

Figura 17. Verificación del modelo matemático aplicado, mediante los modelos matemáticos correspondientes.

Figura 18. Representación grafica de la validación aplicada a los modelos matemáticos.

Figura 19. Respuesta térmica calculada para un cilindro de acero AISI D2, con un diámetro de 1 pulgada.

Figura 20. Respuesta térmica de la simulación para un cilindro de acero AISI D2, con un diámetro de 4 pulgadas.

Figura 21. Representación gráfica de la transformaciones microestructurales asociadas a las curvas de enfriamiento de las probetas de acero SAE D2. Diámetro de 4 pulgadas y 1 pulgada, a partir de los valores estimados con el modelo matemático.

Figura 22. Representación esquemática del HICP en una dirección de flujo para una placa de espesor $2L$.

I. RESUMEN

Dado que los tratamientos térmicos son de las últimas etapas de los procesos de manufactura de un metal, su inadecuada aplicación causa en la industria de tratamientos térmicos una gran cantidad de rechazos que son muy costosos. En este trabajo se estudia el ciclo térmico de un acero templable al aire, a través de modelos matemáticos de transferencia de calor.

En particular, se estudió el ciclo térmico de temple interrumpido (Martempering) mediante la evaluación de las condiciones de frontera que se establecen a través de los sistemas de calentamiento y enfriamiento, a los cuales es sometida la pieza metálica. Tales sistemas están representados en este caso por: baños de sales fundidas y aire forzado.

Para la determinación de las condiciones a la frontera de estos sistemas, se utilizó un dispositivo que mide la respuesta térmica (valores de temperatura en función del tiempo) de una pieza sujeta a un ciclo térmico. Dicho dispositivo consistió de una barra cilíndrica de acero inoxidable SAE¹ 304 y otra barra de acero SAE 1018, instrumentadas con termopares en su interior.

A partir de la respuesta térmica de las piezas metálicas, se calculó la densidad de flujo de calor mediante el algoritmo representado por *Winprobe*. Este programa de cómputo calcula la densidad de flujo de calor a partir de los datos de temperatura respecto del tiempo, aplicando el método de aproximación numérica conocido como Problema de Conducción Inversa de Calor (HICP por sus siglas en inglés).

¹ SAE (Society for Automotive Engineers)

Para calcular los perfiles de temperatura, se utilizó otro modelo matemático de la transferencia de calor denominado *Conduct*, que calcula la respuesta térmica de las piezas metálicas sujetas a un ciclo térmico bajo las condiciones de frontera de nuestros sistemas.

La simulación se realizó para barras cilíndricas de acero SAE D2, de 1 pulgada de diámetro y de 4 pulgadas de diámetro. Se encontró que para la barra con una pulgada de diámetro no existen diferencias térmicas apreciables entre la superficie y el centro, mientras que, para una la probeta de 4 pulgadas, se encontraron gradientes térmicos entre el centro y su superficie.

2. INTRODUCCION

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar los sistemas de calentamiento y enfriamiento durante el ciclo térmico de un acero templable al aire, para coadyuvar al control de la microestructura final de las piezas de acero y, por lo tanto, a las propiedades mecánicas de aceros de herramienta.

Las transformaciones microestructurales que ocurren durante los tratamientos térmicos dependen básicamente de *la rapidez de calentamiento y de la rapidez de enfriamiento*, así como de la composición química del metal, de la geometría de la pieza y de las temperaturas inicial y final de cada etapa del ciclo térmico. Por lo que, se ha establecido que el cambio en alguna de estas variables afecta a la microestructura final de las piezas.

Dado que el tratamiento térmico es una de la últimas etapas en la operación de manufactura de objetos metálicos, la falta de control producirá el rechazo de las piezas que se manufacturan, a un alto costo. Desafortunadamente, en la industria de tratamientos térmicos, las condiciones de trabajo se establecen en base a prueba y error, siendo esta metodología muy costosa y de resultados mínimos, debido a que este método no proporciona información suficiente sobre los procesos de transformación que tienen lugar dentro la pieza.

Es entonces que, la investigación presente se encuentra dirigida hacia el control de los tratamientos térmicos, con base en los principios fundamentales de la transferencia de calor y de la cinética de transformación de fase de los metales, para pronosticar la evolución microestructural dentro de las piezas metálicas.

Como consecuencia directa de su rapidez de calentamiento y de enfriamiento se establecen diferencias de temperatura entre la superficie y el centro de las piezas metálicas. lo que a su vez determina diferencias microestructurales entre estas posiciones. Los parámetros que nos ayudan a estudiar el medio de enfriamiento o calentamiento son denominadas *Condiciones de Frontera*. Estas condiciones han sido clasificadas en los siguientes tres tipos [1]:

1. *Condición de Frontera de Primer Tipo*. Esta es la Condición de Frontera que se presenta cuando se conoce la distribución de la temperatura en la superficie, esto es:

$$T = f(r,t)$$

donde la temperatura en la superficie (T) es en general, una función de la posición y el tiempo.

2. *Condición de Frontera de Segundo Tipo*. Esta es la Condición de Frontera en la cual el flujo de calor se describe en la superficie, esto es:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = f(r,t)$$

donde $\partial T/\partial n$ es el gradiente térmico sobre la superficie, y $f(r,t)$ describe el flujo de calor normal a la superficie.

3.-*Condición de Frontera del Tercer Tipo*. Esta es la Condición de Frontera en la cual se conoce el valor del coeficiente de transferencia de calor por convección sobre la superficie:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} + hT = hT_{\infty}(r,t)$$

donde, la temperatura de la superficie (T) y la temperatura del fluido (T_{∞}) son una función de la posición y el tiempo.

En nuestro caso particular, para los sistemas de calentamiento y/o enfriamiento, se definen las condiciones de frontera del segundo y del tercer tipo.

Para estimar estas condiciones de frontera, se diseñó un dispositivo que consiste de una barra metálica cilíndrica, instrumentada con un termopar cercano a la superficie, para que por medio de un adquisidor de datos se registren los valores de temperatura y tiempo durante el calentamiento y/o enfriamiento del dispositivo. De estos resultados, la condición de frontera se estimó por medio de la aplicación de la solución del problema inverso de conducción de calor.

Las condiciones de frontera evaluadas en los sistemas, permiten la simulación de estos mismos sistemas de calentamiento y enfriamiento.

Como uno de los materiales de trabajo se seleccionó en el dispositivo experimental al acero inoxidable SAE 304, por no presentar cambios microestructurales durante los ciclos térmicos de calentamiento y enfriamiento en sales.

En cambio, para determinar la condición de frontera durante el enfriamiento en aire se utilizó al acero SAE 1018 porque las propiedades de este metal (en particular la conductividad térmica) facilitan la evaluación de la transferencia de calor durante esta etapa del ciclo térmico. Es oportuno hacer notar que, el parámetro experimental que se obtiene durante esta etapa es la velocidad del aire para cada posición del espacio de enfriamiento.

Una vez conocida la velocidad del aire, es posible la estimación de la densidad de flujo de calor (condición de frontera) a través de la aplicación de los modelos adimensionales de la transferencia de calor por convección de estos sistemas.

Durante la simulación, se consideró al acero SAE D2 para pronosticar su evolución microestructural durante el ciclo térmico, de temple bajo las condiciones de trabajo observadas en la empresa Especialidades Térmicas S.A de C.V.

3. REVISION DE LA LITERATURA

3.1 TRATAMIENTO TERMICO DEL ACERO

Los tratamientos térmicos son ciclos de *calentamiento, transformación y enfriamiento* por medio de los cuales un metal, en estado sólido y con las dimensiones requeridas para su empleo, es transformado microestructuralmente para obtener sus propiedades de servicio.

Cada una de estas etapas debe ser controlada cuidadosamente para una correcta aplicación del tratamiento térmico. Puesto que durante el *calentamiento y el enfriamiento* de una pieza metálica se presentan diferencias de temperaturas entre su centro geométrico y su superficie, como consecuencia se generan esfuerzos internos, ya sea de compresión o de tensión, y asociado a estos esfuerzos se presenta la distorsión de las piezas y posiblemente la fractura. Por lo tanto, *es importante el control de la rapidez de calentamiento y de su rapidez de enfriamiento.*

Los tratamientos térmicos más usados en los aceros son: el recocido, el templado, el normalizado, el revenido, el patenting, el austempering y el martempering [2].

Así es que en este trabajo se estudia al tratamiento térmico de temple interrumpido martempering, y consiste en los siguientes pasos[3]:

- 1) Se calienta el acero hasta la temperatura de austenización, y se mantiene en esta temperatura hasta completar la transformación a austenita.
- 2) Se enfría la pieza de acero hasta una temperatura ligeramente mayor que la de inicio de la transformación martensítica (M_s) y se mantiene a esta temperatura hasta homogeneizar la temperatura de la pieza.

3) Se enfría la pieza con una rapidez moderada, por debajo de la temperatura de inicio de la transformación martensítica (M_s).

Con este tratamiento la formación de martensita se produce casi de manera uniforme en toda la pieza, evitando así la aparición de grandes tensiones residuales. Esto es debido a que el último enfriamiento es relativamente lento y las secciones gruesas y delgadas se transforman casi al mismo tiempo[3].

En general, los aceros aleados son más aptos para temple interrumpido que los aceros al carbono. Cualquier acero que sea templable en aceite puede ser tratado por este método. Los aceros que se usan comúnmente para su total endurecimiento, mediante este tratamiento son los: SAE 1090, 4130, 4140, 4150, 4340, 4640, 5140, 6140, 8640, 8740, 8745, y en general todos los aceros de herramienta[4].

El éxito del temple interrumpido depende de un control estricto del proceso, que incluye la protección la superficie de las piezas durante el austenizado, ya que el óxido formado sobre la superficie del acero durante su calentamiento actuará como una barrera para el transporte de la energía.

3.1.1 Diagramas TTT y CCT

En general, el diagrama de fases Fe_3C sólo se debe considerar como una fuente para la obtención de las temperaturas de austenización de los aceros, puesto que los tratamientos térmicos son diseñados específicamente para producir microestructuras fuera del equilibrio.

Para comprender el proceso de temple de un acero, es esencial que se conozcan las transformaciones de fase de un acero durante el templado en términos de los gráficos de transformación isotérmica (TTT) y/o los gráficos de enfriamiento continuo (CCT) [5].

La representación gráfica de la transformación isotérmica de la austenita, para el acero SAE 1080, se muestra en la Figura 1. Este es un ejemplo típico del gráfico conocido como diagrama TTT.

El tratamiento térmico de martempering sobre un diagrama TTT se muestra en la Figura 2. En este proceso, el acero se enfría dentro de un baño de sales a una temperatura superior a la de inicio de la transformación martensítica, M_s , y se mantiene allí hasta que el centro de la pieza alcance la temperatura del baño. Posteriormente, esta pieza se lleva a un segundo enfriamiento hasta la temperatura ambiente. A partir de los diagramas TTT se selecciona la temperatura del baño de sales durante el martempering, y se estima el tiempo en el que un acero debe permanecer en el baño de sales para obtener las transformaciones indicadas.

Sin embargo, muchos de los tratamientos térmicos desarrollados sobre aceros, son llevados a cabo por un enfriamiento continuo más que por un proceso isotérmico. Como resultado de esto, se han desarrollado diagramas que representan la transformación de la austenita durante un enfriamiento continuo, conocidos como diagramas de enfriamiento continuo (CCT).

La Figura 3 muestra el diagrama CCT para un acero eutectoide (SAE 1080) sobrepuesto en el diagrama TTT.

Como podemos notar la diferencia entre ambos indica que las transformaciones durante el enfriamiento continuo comienzan posteriormente a la transformación isotérmica, así como las temperaturas de inicio de transformación son menores durante el enfriamiento continuo que durante la transformación isotérmica.

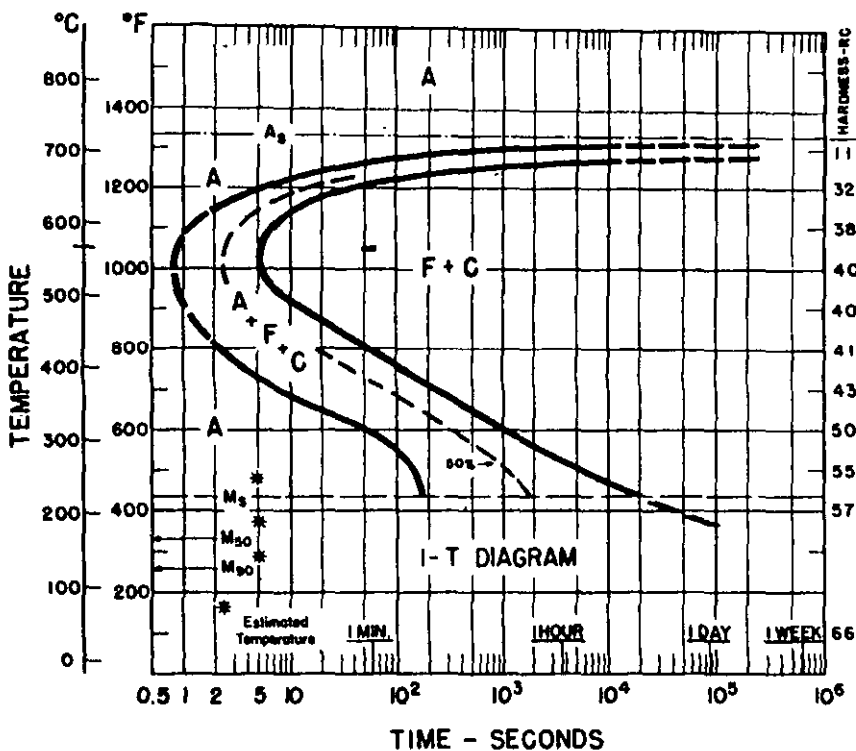


Figura 1. Diagrama TTT para un acero SAE 1080 [6].

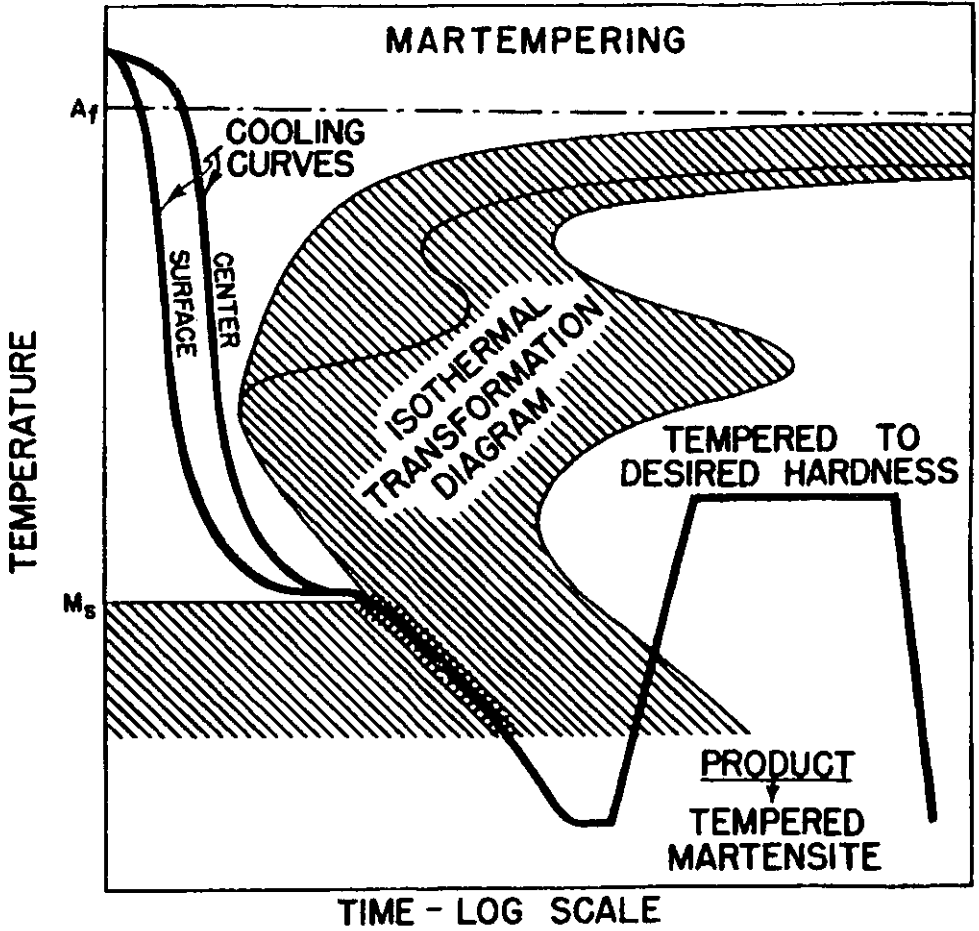


Figura 2. Esquema ilustrativo del tratamiento térmico de martempering en un diagrama TTT [6].

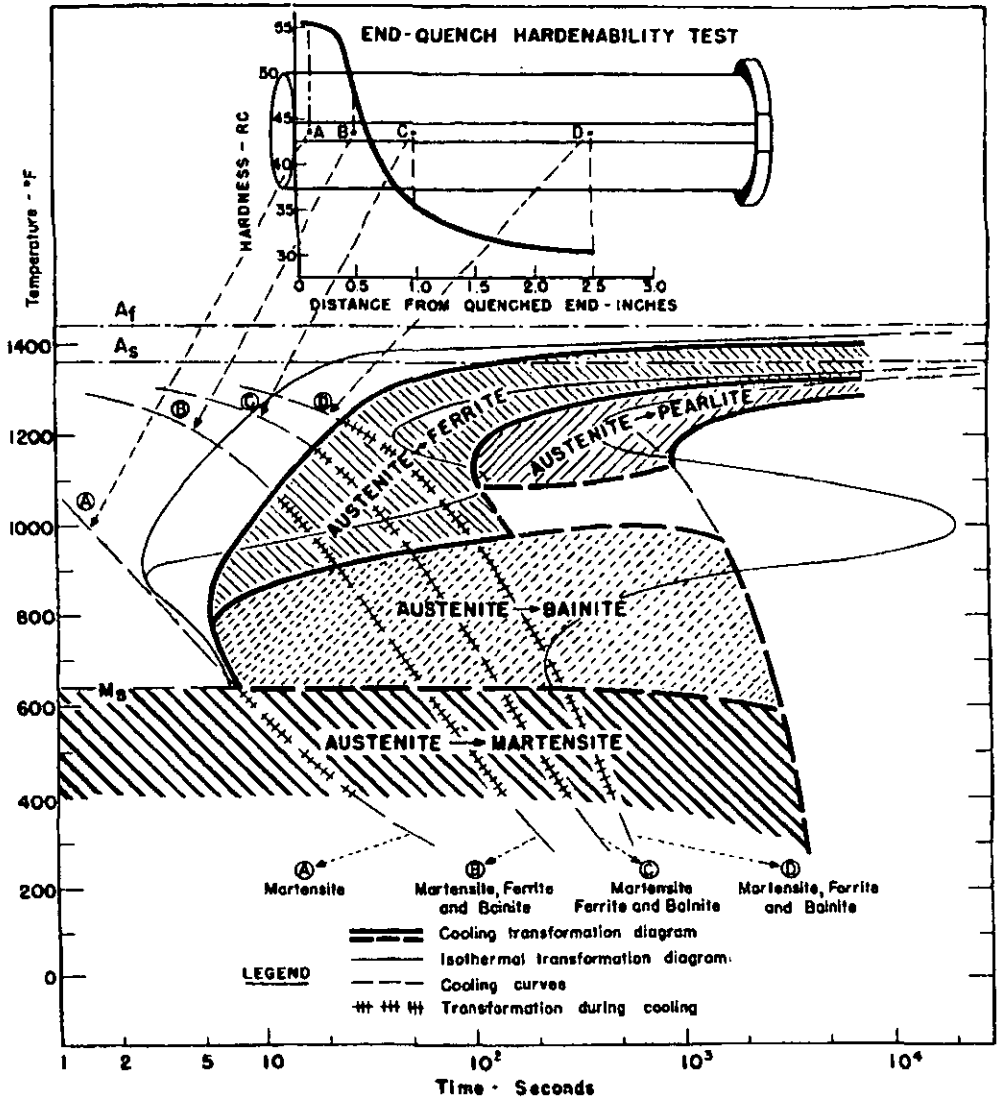


Figura 3. Representación de los diagramas CCT (líneas gruesas) y TTT (líneas ligeras) para un acero eutectoide SAE 1080[7].

3.1.2 Baños de Sales Fundidas

Los baños de sales fundidas han sido usados extensivamente en la industria de tratamientos térmicos, en la práctica de los tratamientos térmicos para aceros de herramienta. Durante el templado, las piezas son austenizadas en un baño de alta temperatura (1040 °C), después se enfrían en un baño de temperatura inferior (640 °C) y al final son enfriados hasta temperatura ambiente.

Las sales utilizadas para los tratamientos de martempering son las llamadas *sales neutras*, es decir, estas sales no deben presentar ninguna afinidad química con el acero, no deben oxidar ni corroer las piezas, ni aún en el caso de que las mismas sólo puedan estar parcialmente sumergidas en el baño. Dichas sales están compuestas de cloruros alcalinos y alcalinotérreos, en mezclas binarias o ternarias[8].

Entre las ventajas que ofrece el uso de las sales fundidas se encuentran las siguientes:

- El amplio rango de temperaturas de operación, el cuál varía entre 150 °C y 1100 °C. Así, pueden ser usadas para los diversos procesos de temple interrumpido.
- La mayoría del calor extraído durante el calentamiento y/o enfriamiento en sales se realiza a una rapidez uniforme. Consecuentemente el enfriamiento en baños de sales causa menos distorsión y produce una mayor uniformidad en la dureza obtenida.
- La rapidez de transferencia de calor en baños de sales es mayor que en los otros sistemas de calentamiento; por lo que, se facilita una mayor productividad.
- Las sales tienen una excelente estabilidad química y térmica.
- Las sales son no inflamables.
- Las sales son fácilmente lavadas con agua y recuperadas para ser reusadas, si así se desea.

3.2 TRANSFERENCIA DE CALOR

La transferencia de calor es el transporte de energía de un punto a otro del sistema debido a la diferencia de temperaturas. El calentamiento y el enfriamiento son manifestaciones de este fenómeno, el cual es utilizado en las actividades industriales de los tratamientos térmicos. Por lo que es necesario un entendimiento de los *mecanismos de transferencia de calor* para comprender los sistemas de calentamiento y de enfriamiento.

Asimismo, la diferencia de temperaturas que origina la transferencia de calor también establece la rapidez de la transferencia de la energía térmica, durante el calentamiento y el enfriamiento.

3.2.1 Mecanismos de Transferencia de calor

Los mecanismos de transferencia de calor empleados en este trabajo son descritos a continuación:

1. Transferencia de calor por conducción

Cuando el calor es transferido entre moléculas adyacentes, el proceso es llamado conducción. Este es el mecanismo típico de transferencia de calor en los sólidos.

La Ley de Fourier representa el modelo matemático de la conducción y establece que el flujo de calor es proporcional al gradiente de temperatura:

$$\frac{Q}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Donde:

Q/A = Densidad de flujo de calor (W/m^2)

dT/dx = gradiente de temperatura (K/m)

k = conductividad térmica (W/mK)

Este mecanismo de transferencia de calor permite la distribución de la energía durante el calentamiento y/o enfriamiento en el interior de las piezas metálicas.

2. Transferencia de calor por convección

El fenómeno de transferencia de calor por convección es un proceso de transporte de energía entre una superficie y un fluido (líquido o gaseoso), y se lleva a cabo como consecuencia del movimiento del fluido. El flujo de calor que se intercambia entre una superficie y un fluido debido a la diferencia de temperaturas se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{Q}{A} = -h(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

Donde:

h = Coeficiente promedio de transferencia de calor por convección (W/m²K)

T_s = Temperatura de la superficie (K)

T_∞ = Temperatura del fluido (K)

Q/A = Densidad de flujo de calor (W/m²)

La ecuación (2) se conoce como la ley de enfriamiento de Newton y a través de ésta se define al coeficiente de transferencia de calor por convección, h .

En la siguiente tabla se enlistan algunos valores del coeficiente de transferencia para algunos fluidos[9].

MEDIO DE ENFRIAMIENTO	$h, \text{W/m}^2 \text{ h K}$
Aceite, sin agitación	272
Accite, con moderada agitación	476
Accite, con buena agitación	681
Aceite, con agitación violenta	965
Agua, sin agitación	1362
Agua con fuerte agitación	2044
Salmuera, sin agitación	2725
Salmuera, con agitación violenta	6813

4. MODELOS MATEMÁTICOS

4.1 Evaluación de la condición de frontera de los sistemas de calentamiento y enfriamiento en sales.

Como un primer paso para la caracterización térmica del sistema, se desarrolló un modelo matemático que permite el pronóstico de la respuesta térmica para piezas metálicas en la etapa del calentamiento y enfriamiento en sales.

Durante el calentamiento y/o enfriamiento de las piezas cilíndricas, el mecanismo de transferencia de calor es conducción; por lo que, el modelo matemático se origina a partir de la ecuación general de conducción, expresada en coordenadas cilíndricas de la siguiente manera:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

A través del modelo de transferencia de energía se determinará el perfil de temperaturas en la pieza metálica como función del tiempo y la posición, bajo las siguientes consideraciones:

- Coordenadas cilíndricas.
- Flujo unidireccional radial (r).
- Estado inestable.
- Sin generación de calor.
- Propiedades termofísicas variables con respecto a la temperatura.

Con todas estas consideraciones, la ecuación (3) se simplifica a:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

Para resolver esta ecuación en forma particular es necesario la evaluación de la condición de frontera que caracteriza al sistema. La condición de frontera para el sistema se define a través del flujo de calor (Q) mediante la siguiente ecuación:

$$Q = -hA[T_f - T(t)] \quad (5)$$

Sin embargo, medir directamente las condiciones de frontera del sistema es realmente difícil, debido a que el coeficiente de transferencia de calor depende de diversas propiedades del fluido y de la superficie; así como de la configuración dinámica del sistema. Por lo que, se aplicó una técnica alterna para estimar las condiciones de frontera, denominada Problema Inverso de Conducción de Calor (IHCP)² cuya metodología se describe en el Apéndice 2.

A través de la aplicación de la metodología del IHCP se obtienen los valores del flujo de calor, a partir de las mediciones de temperatura.

Una vez que contamos con la condición de frontera del sistema, se calculó el perfil de temperaturas de una pieza cilíndrica sujeta al mismo ciclo térmico, mediante el modelo matemático que resuelve la ecuación de conducción de calor usando el método de diferencias finitas implícito, mediante el programa de cómputo denominado *Conduct*.

El siguiente esquema muestra los procedimientos a seguir para la determinación de los perfiles de temperatura a partir de datos de tiempo y temperatura experimentales.

² IHCP (Inverse Heat Conduction Problem)

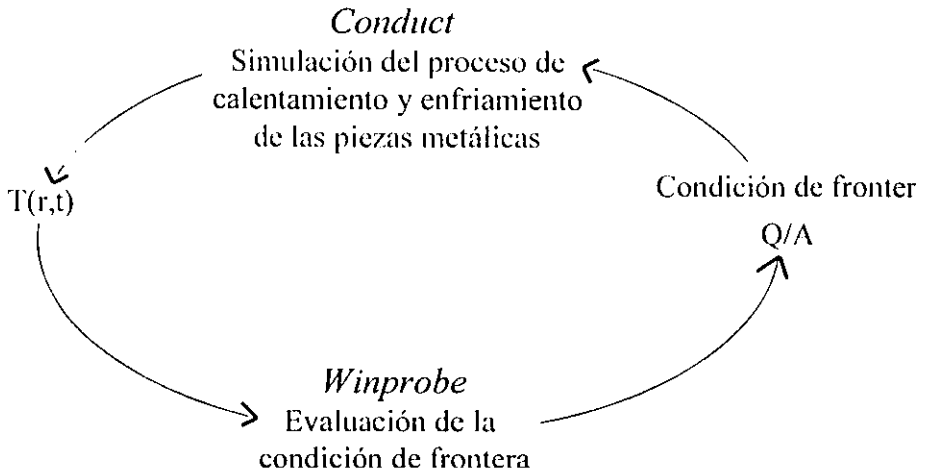


Figura 4. Esquema de los procedimientos para calcular la densidad de flujo de calor con *Winprobe* [10] y la distribución de temperaturas con *Conduct*.

4.2 Evaluación de la condición de frontera del sistema de enfriamiento en aire.

Para determinar la condición a la frontera (h) de este sistema se han propuesto una serie de correlaciones empíricas para el cálculo del número de Nusselt para cilindros sólidos enfriados mediante un flujo transversal. Las correlaciones propuestas por Churchill y Bernstein son las siguientes [11]:

Para $Re < 10^4$

$$Nu_f = 0.3 + \frac{0.62 Re^{1/2} Pr^{1/3}}{\phi(Pr)} \quad (6)$$

Para $2 \times 10^4 < Re < 4 \times 10^5$

$$\bar{Nu}_f = 0.3 + \frac{0.62 Re^{1/2} Pr^{1/3}}{\phi(Pr)} \left[1 + \left(\frac{Re}{282,000} \right)^{1/2} \right] \quad (7)$$

Para $4 \times 10^5 < Re < 5 \times 10^6$

$$Nu_f = 0.3 + \frac{0.62 Re^{1/2} Pr^{1/3}}{\phi(Pr)} \left[1 + \left(\frac{Re}{282,000} \right)^{5/8} \right]^{4/5} \quad (8)$$

Donde:

$$\phi(Pr) = \left[1 + (0.4 / Pr)^{2/3} \right]^{1/4} \quad (9)$$

$$Nu = \frac{hD}{k_f} \quad (10)$$

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (11)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (12)$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (13)$$

Nu = Número de Nusselt

Re = Número de Reynolds

Pr = Número de Prandtl

D = Diámetro (m)

K_f = Conductividad térmica del fluido (W/mK)

ρ = Densidad (kg/m³)

v = Velocidad del Fluido (m/s)

μ = Viscosidad (kg/m s)

ν = Viscosidad cinemática (m²/s)

α = Difusividad térmica (m²/s)

Es así que, en términos de variables adimensionales, la respuesta térmica de los cilindros enfriados en aire, se describe como:

$$\frac{d\theta_m}{d\tau} = -\frac{C}{2} Nu_{ov} \theta_m \quad (14)$$

Con la condición inicial

$$\theta_m(0) = 1 \quad (15)$$

Donde

$$\theta_m = \frac{T_m - T_f}{T(0) - T_f} \quad (16)$$

$$\tau = \frac{\alpha_s t}{R^2} \quad (17)$$

$$\bar{Nu}_{ov} = \frac{\bar{U}(2R)}{k_s} \quad (18)$$

Resolviendo la ecuación diferencial (14), podemos obtener dos importantes conceptos:

1) La respuesta de la temperatura media adimensional en el interior del cilindro.

$$\theta_m(\tau) = \exp\left(-\frac{C}{2} \bar{Nu}_{ov} \tau\right) \quad (19)$$

2) La respuesta de la temperatura adimensional en la superficie

$$\theta_v(\tau) = \theta_m(\tau) \left(1 - \frac{Nu}{Nu_s}\right) \quad (20)$$

Donde:

$$\bar{Nu}_{ov} = \frac{1}{\bar{Nu}_s} + \frac{1}{(k_f/k_s) \bar{Nu}_f} \quad (21)$$

y:

$$Nu_s = a + \frac{b}{\tau} \quad (22)$$

Para cilindros de longitud infinita: a = 33.4442 y b = 5.1322.

Para aplicar las ecuaciones 14 a la 22 (modelo matemático del enfriamiento con aire) se elaboró el programa de cómputo cuyo listado se encuentra en el Apéndice 3.

Es así que durante la simulación del enfriamiento de estas piezas se requiere del valor de la velocidad del aire para calcular el número de Reynolds y después del mismo Nusselt (Nu_f).

Sin embargo, la velocidad del aire debe ser determinada experimentalmente para cada sistema. Por lo que, a continuación se describe la metodología de la estimación de la velocidad del fluido a partir de mediciones de carácter térmico

El modelo matemático para las piezas cilíndricas que se enfrían en aire bajo régimen newtoniano se basa en la siguiente ecuación:

$$V\rho C_p \frac{dT(t)}{dt} = -h A_l [T_f - T(t)] \quad (23)$$

Cuya solución es:

$$T(t) = T_f + (T_0 - T_f) \exp(-bt) \quad (24)$$

donde:

$$b = \frac{h A_l}{V\rho C_p} \quad (25)$$

h = Coeficiente promedio de transferencia de calor por convección (W/m²K)

V = Volumen (m³)

ρ = densidad (kg/m³)

C_p = Capacidad calorífica (W/kg K)

A_l = Área lateral (m²)

Por lo que, si valores experimentales de temperatura en función del tiempo se ajustan correctamente mediante una regresión exponencial, a la siguiente ecuación:

$$y = y_0 + a \exp(-bt) \quad (26)$$

Una vez que se conoce el valor de h , a partir de las correlaciones de Churchill y Bernstein se obtiene el valor del número de Reynolds, y posteriormente, se obtiene de éste último el valor de la velocidad del fluido.

5. PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES

Las etapas del presente trabajo para el estudio del ciclo térmico de temple, desde el punto de vista de transferencia de calor, se enlistan a continuación:

1. Medición de la respuesta térmica del acero durante el calentamiento y el enfriamiento en sales.
2. Medición de la respuesta térmica durante el enfriamiento con aire forzado.
3. Estimación de la velocidad del aire (enfriamiento Newtoniano).
4. Estimación de los flujos de calor (condiciones de frontera) durante el calentamiento y el enfriamiento en sales y durante el enfriamiento con aire.
5. Simulación del tratamiento térmico de un acero de herramienta usando las condiciones de frontera calculadas para los sistemas de calentamiento y enfriamiento bajo estudio.

5.2 Medición de la respuesta Térmica durante el calentamiento y enfriamiento en sales.

Para la medición de la respuesta térmica durante el calentamiento y el enfriamiento en baños de sales, se utilizó una probeta de acero inoxidable SAE 304 con un diámetro de 25.4 mm y 63.5 mm de longitud instrumentada con dos termopares (ver Figura 5). Uno de los termopares está localizado en el centro geométrico, con la finalidad de validar los cálculos de la simulación, mientras que el otro termopar se encuentra a 1mm de distancia a partir de la superficie de la probeta, para evaluar la condición de frontera del sistema.

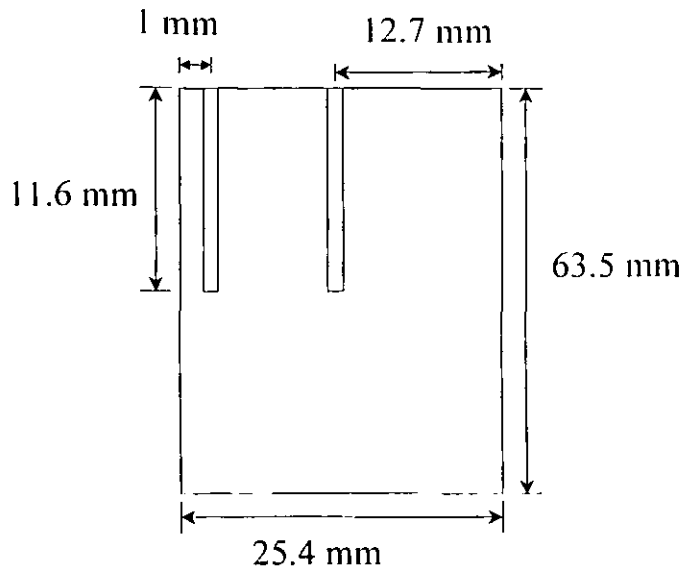


Figura 5. Representación esquemática de las probetas de acero inoxidable SAE 304 utilizadas para las mediciones del calentamiento y enfriamiento en sales.

Para los experimentos que se realizaron tanto en la planta como en el laboratorio, la probeta se conectó al mediante el termopar al adquisidor de datos y se introduce en un baño de sales fundidas de baja temperatura, y se mantuvo allí hasta alcanzar la temperatura del baño (aproximadamente 640 °C), después la probeta se introdujo a un segundo calentamiento en baño de sales de alta temperatura y se mantuvo allí hasta que la probeta alcanzó la temperatura del baño (aproximadamente 1040 °C), y finalmente la probeta se introdujo nuevamente al baño de sales de baja temperatura y se mantuvo en éste, hasta alcanzar la temperatura del baño (640 °C). Los termopares se conectaron al adquisidor de

señales (Keithley's Smartlink, Model KNM-TC42), el cual a su vez se conecto a una computadora (Ver Figura 6). Este adquiredor de señales permite hasta 15 lecturas por segundo.

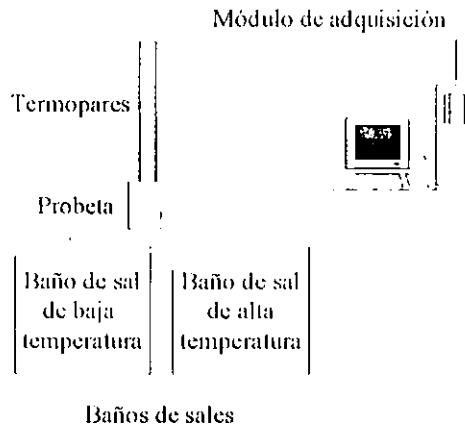


Figura 6. Representación esquemática del las pruebas de calentamiento y enfriamiento en sales.

5.2 Medición de la respuesta Térmica durante el enfriamiento en aire forzado.

Para la parte experimental del enfriamiento en aire, se instrumentó una probeta de acero SAE 1018, con un sólo termopar en el centro geométrico (ver Figura 7). La probeta tiene 12.6 mm de diámetro y 152.2 mm de longitud.

Los experimentos se realizaron en la planta y consistieron en calentar la probeta a 65 °C y después enfriarla con aire proveniente de un ventilador, hasta temperatura

ambiente. Las probetas se colocaron a las distintas posiciones con respecto del ventilador, que se muestran en la Figura 8, con la finalidad de evaluar la región de influencia del aire.

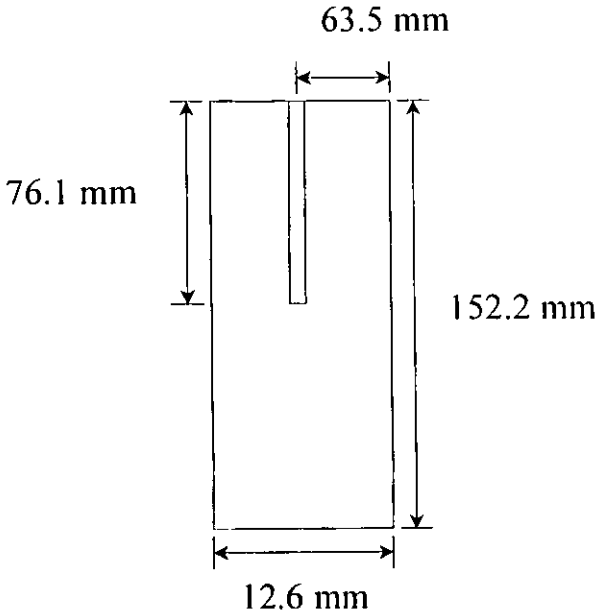


Figura 7. Representación esquemática de la probeta de acero SAE 1080 utilizada para las mediciones de enfriamiento en aire.

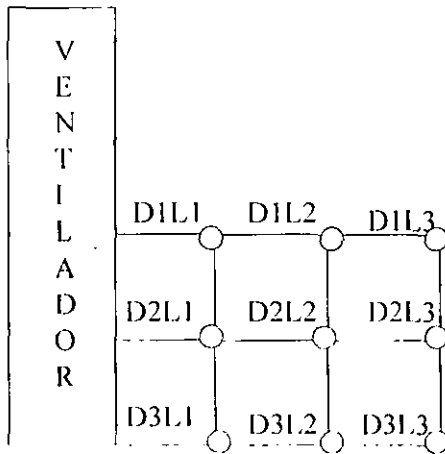


Figura 8. Representación esquemática de las pruebas de enfriamiento en aire en la planta.

Las distancias a las que se colocaron las probetas (D y L), con respecto al ventilador son:

LONGITUD RADIAL A PARTIR DEL CENTRO DEL VENTILADOR (D)	LONGITUD AXIAL A PARTIR DEL VENTILADOR (L)
D1. 0 pulgadas	L1. 14 pulgadas
D2. 5 pulgadas	L2. 20 pulgadas
D3. 10 pulgadas	L3. 50 pulgadas

Se colocó la probeta instrumentada en cada una de las posiciones descritas en la figura 8 para determinar la velocidad aire, ya que con este valor y usando las correlaciones empíricas del número de Nusselt (ecuaciones 18 a la 22) se calculó la condición de frontera correspondiente.

La velocidad del aire se determinó mediante la regresión exponencial de los datos de tiempo y temperatura experimentales. Si consideramos que el enfriamiento es newtoniano, entonces, el perfil de temperaturas se deacuerdo con la metodología descrita en la sección 4.2.

6. PRESENTACION Y ANALISIS DE RESULTADOS

6.1 Resultados Experimentales

Los resultados experimentales se clasifican principalmente en cuatro grupos:

1. Calentamiento en sales desde 30 °C hasta 640 °C.
2. Calentamiento en sales desde 640 °C hasta 1040 °C.
3. Enfriamiento en sales desde 1040 °C a 640 °C.
4. Enfriamiento en aire de 640 °C hasta 30 °C.

6.1.1 Evaluación de la condición de frontera para el calentamiento en sales

Para el cálculo de las condiciones a la frontera (Q/A y/o h), los datos de tiempo y temperatura experimentales que se procesaron a través de Winprobe se muestran en las siguientes gráficas.

A partir de los datos de tiempo y temperatura proporcionados por la Figura 9 se obtuvo la densidad de flujo de calor que se muestra en la Figura 10. La curva típica de la densidad de flujo de calor en función de la temperatura superficial se muestra en la Figura 11, en esta figura la densidad de flujo de calor alcanza un valor máximo y a partir de ese punto, el flujo comienza a descender hasta un valor igual a cero. Sin embargo, los resultados experimentales del sistema de calentamiento son diferentes debido a la formación de una capa sólida de sal sobre la superficie de la probeta, estableciendo así una barrera adicional al flujo de calor. Posteriormente, al ir aumentando la temperatura, la sal que se solidificó alrededor de la probeta alcanza su punto de fusión y vuelve a fundirse

eliminando así la barrera a la transferencia de calor, de tal manera que, ahora las condiciones de transferencia de calor cambian, retomando la forma final de la curva típica.

La Figura 12 muestra curvas de calentamiento entre 600 °C y 1040 °C, para el cálculo de la densidad de flujo de calor en función de la temperatura superficial que se muestra en la Figura 13.

Se observa que, una de las curvas presenta la forma típica de la curva de flujo de calor, mientras que la otra se sigue comportando de manera similar que las de la Figura 11.

La curva típica corresponde a la probeta con temperatura inicial superior a la temperatura de fusión de la sal, con esto se elimina la formación de una capa de sal.

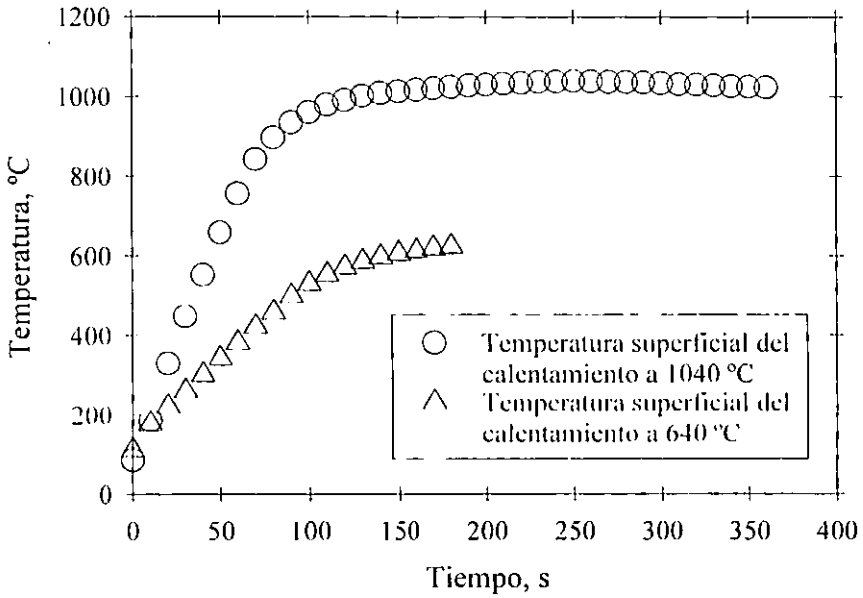


Figura 9. Respuesta térmica en la probeta de acero SAE 304 para el primer calentamiento en baños de sales.

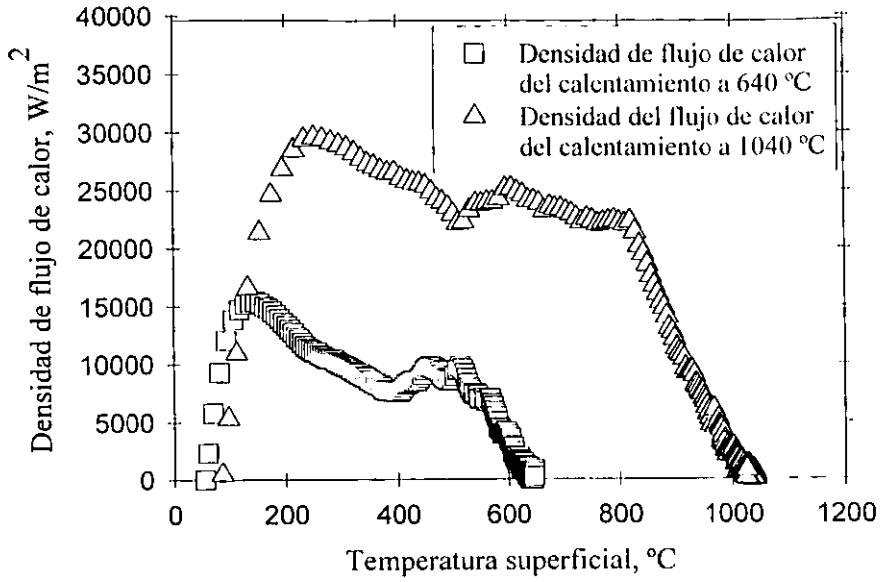


Figura 10. Densidad de flujo de calor respecto de la temperatura de superficie, para las curvas de calentamiento mostradas en la Figura 9.

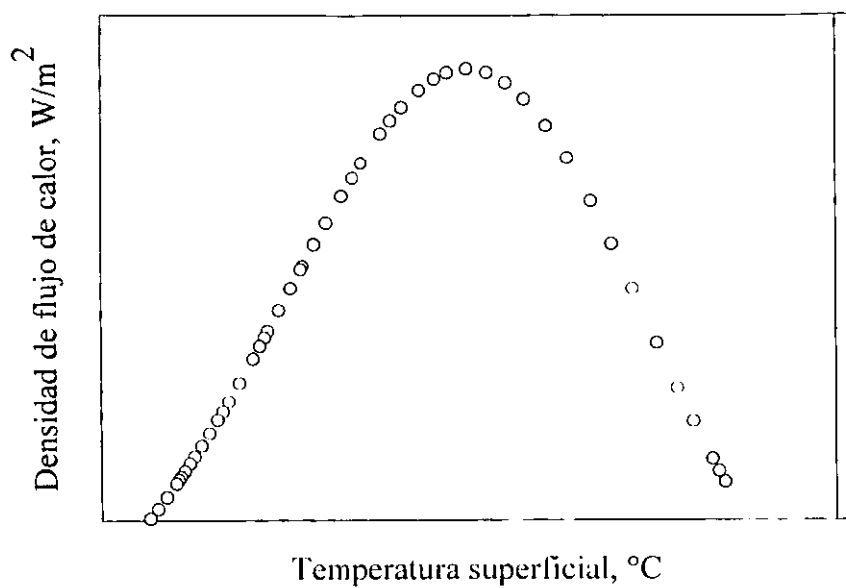


Figura 11. Curva típica para la densidad del flujo de calor.

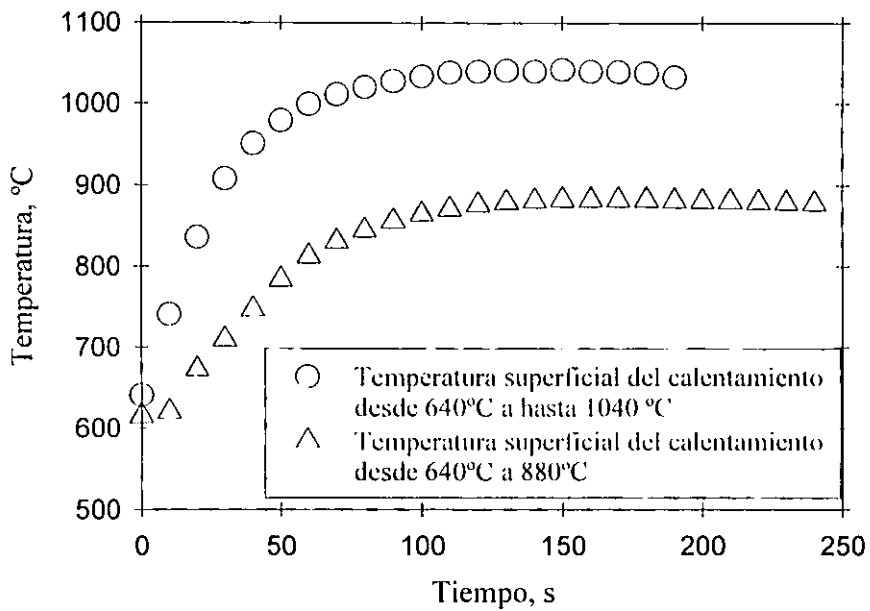


Figura 12. Respuesta térmica en la probeta SAE 304 para el segundo calentamiento en sales.

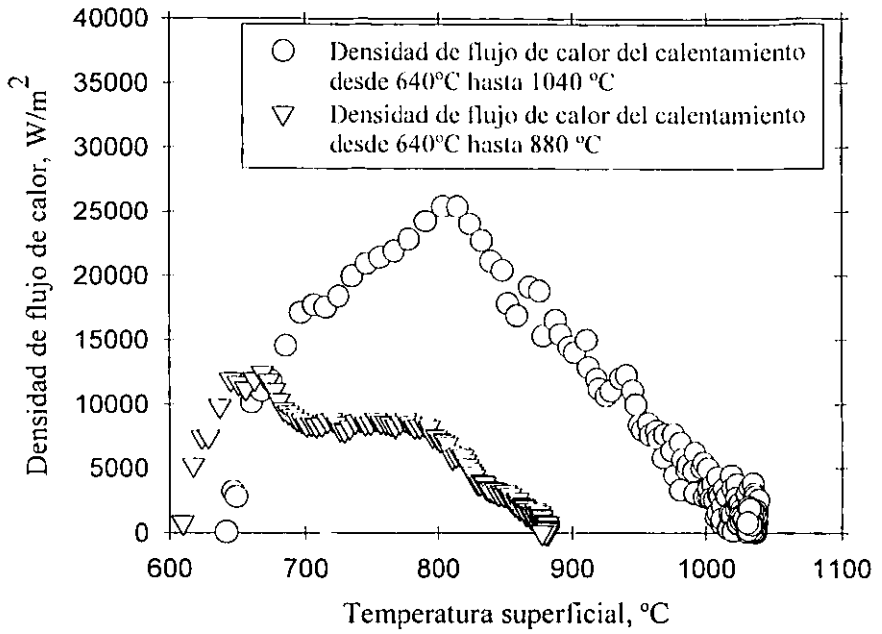


Figura 13. Densidad de flujo de calor respecto de la temperatura de superficie, para las curvas de calentamiento mostradas en la Figura 12.

6.1.2 Evaluación de la condición de frontera para el enfriamiento en sales

La Figura 14 muestra curvas de enfriamiento experimentales entre 1040 °C y 640 °C, en baños de sales. A partir de esta información se calcula la densidad de flujo de calor en función de la temperatura superficial, que se muestra en la Figura 15 para la probeta de acero SAE 304. Este caso se trata de enfriamiento, el flujo de calor se extrae de la pieza del acero y disminuye su temperatura; por lo que, la gráfica se debe de revisar de derecha a izquierda.

Las curvas obtenidas se comportan de manera similar a la curva típica, es decir, alcanzan un flujo de calor máximo y después caen gradualmente, hasta llegar cero.

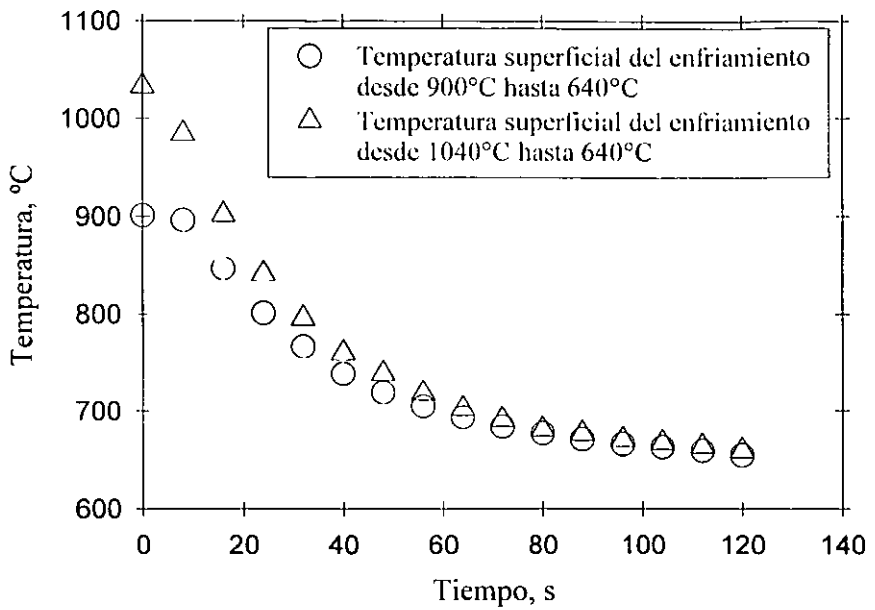


Figura 14. Respuesta térmica en la probeta de acero SAE 304 para el enfriamiento en sales.

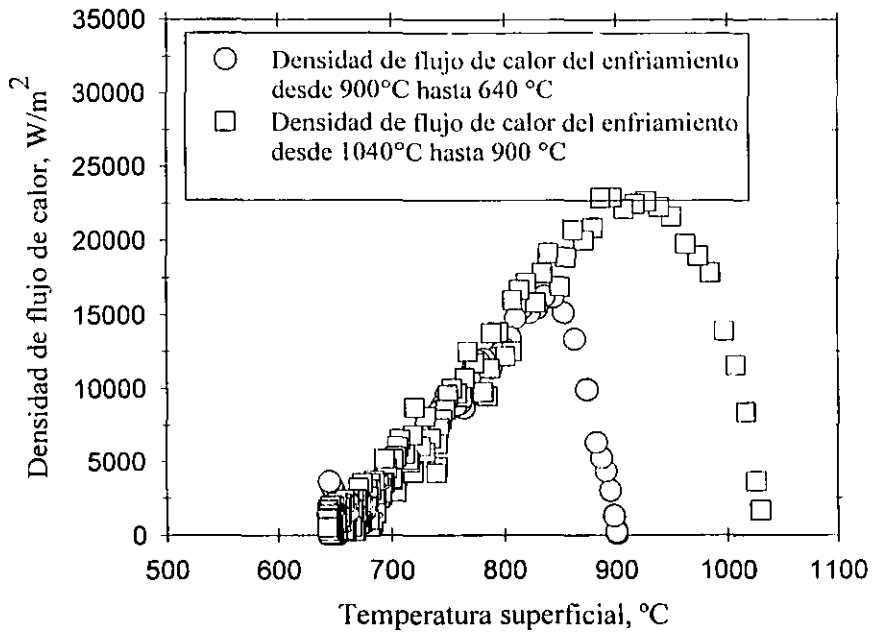


Figura 15. Densidad de flujo de calor respecto de la temperatura de superficie para las curvas de enfriamiento en baños de sales mostradas en la Figura 14.

6.1.3 Evaluación de la Condición de Frontera para el enfriamiento en aire forzado

La Figura 16 muestra los resultados de la respuesta térmica del enfriamiento con aire de la probeta de acero SAE 1018, en las distintas posiciones distintas posiciones del ventilador. La gráfica muestra todas las curvas obtenidas del enfriamiento, en donde se distinguen dos conjuntos de curvas, que presentan diferentes coeficientes promedio de transferencia de calor por convección en aire forzado. El conjunto de curvas que corresponde a las posiciones D3L3, D2L3 y D1L3 presenta un coeficiente promedio de transferencia de calor de $0.051 \text{ W/m}^2\text{°C}$, representado por la curva D1L3 mientras que el conjunto de curvas que representan las posiciones D1L1, D2L1, D3L1, D1L2, D2L2 y D3L2 presentan un coeficiente promedio de transferencia de calor de $0.086 \text{ W/m}^2\text{°C}$, representado por la curva D2L1.

$h \text{ (W/m}^2\text{°C)}$	POSICIONES
0.051	D3L1, D2L3, D1L3
0.086	D1L1, D2L1, D3L1, D1L2, D2L2, D3L2

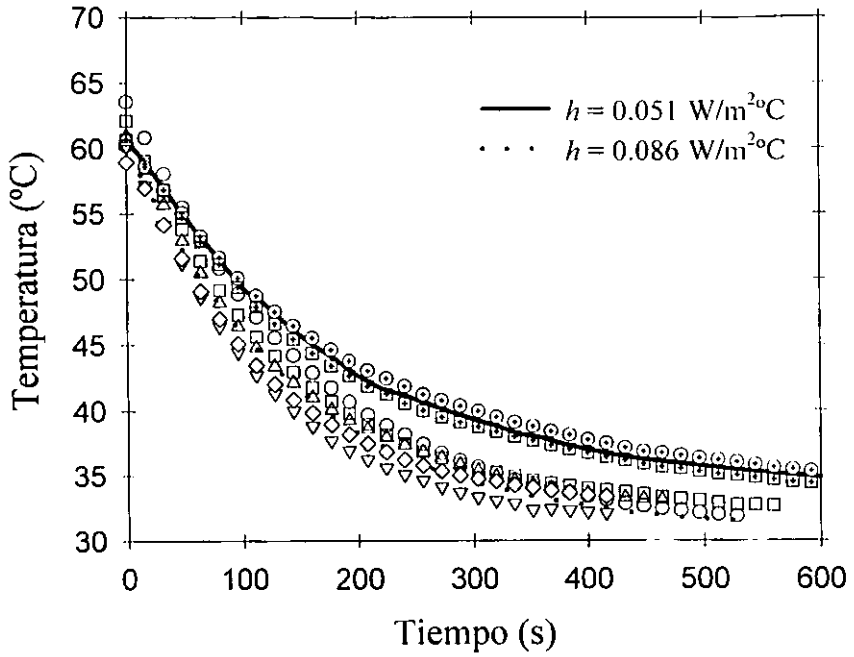


Figura 16. Respuesta térmica de la probeta de acero al carbono durante el enfriamiento con aire.

6.2 RESULTADOS DE LA SIMULACION

6.2.1 Verificación del Modelo

La verificación del modelo tiene como objetivo comprobar que las operaciones matemáticas y lógicas que realizan los modelos matemáticos son correctas. Como prueba de esta situación se tiene la Figura 17, donde se muestra la densidad de flujo de calor introducido a la pieza de acero, es correctamente distribuido en su interior, de tal manera que el valor de este corresponde exactamente al calor calculado por el modelo matemático.

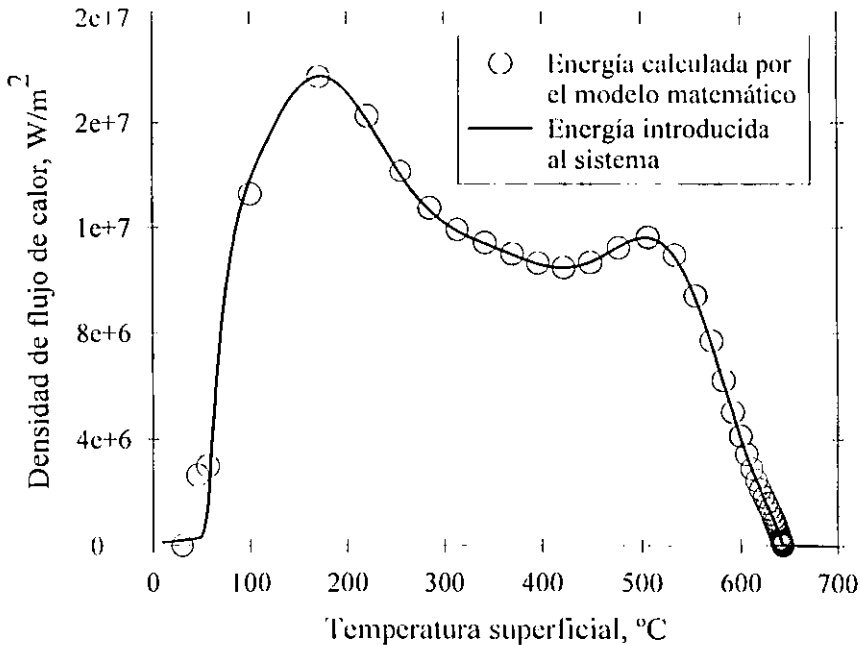


Figura 17. Verificación del modelo matemático aplicado, mediante los modelos matemáticos correspondientes.

6.2.2 Validación del Modelo

El modelo fue validado comparando el pronóstico de los perfiles de temperatura medidos experimentalmente, observándose una perfecta coincidencia en los valores, como se muestra en la Figura 18.

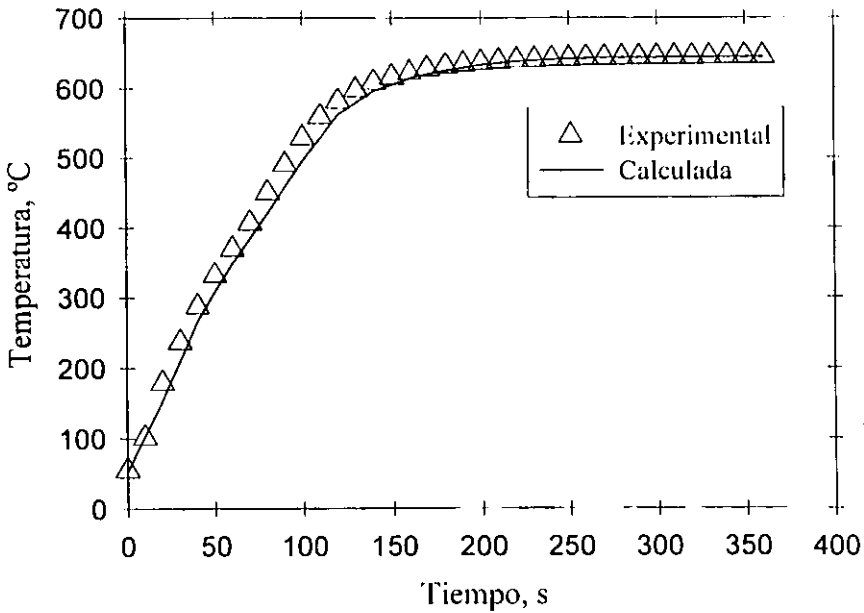


Figura 18. Representación gráfica de la validación aplicada a los modelos matemáticos.

6.2.3 Pronóstico de la simulación del temple interrumpido sobre el que se aplico al acero SAE D2.

El acero para el cual se realizó la simulación, se conoce como SAE D2, cuya composición química se muestra en el Apéndice 1.

Las dimensiones de la barra, deben de tener un radio y una altura que aseguren el flujo únicamente en dirección radial.

Como una regla práctica existe una relación entre las áreas radial y axial tal que:

$$\frac{A_{lateral}}{A_{axial}} = \frac{2\pi r h}{2\pi r^2} = \frac{h}{r}$$

Es así, si la razón h/r es mayor o igual a 10, entonces el flujo de calor se considera unidireccional en la dirección radial. Esto es, la magnitud del flujo a través de la dirección radial es mucho mayor que la magnitud del flujo axial, y por lo tanto éste último es despreciable.

Por lo que, las dimensiones propuestas para la simulación se muestran a continuación:

PROBETAS	RADIO	ALTURA
Tipo 1	0.0127 m (0.5 pulgadas)	0.127 m (10 pulgadas)
Tipo 2	0.0508 m (2 pulgadas)	0.508 m (20 pulgadas)

Con estos resultados del proceso de simulación, en las Figuras 19 y 20 se representan los perfiles de temperatura para las probetas de acero SAE D2, para una probeta de 1 pulgada de diámetro y otra probeta de 4 pulgadas de diámetro.

La simulación del ciclo térmico cumple con las siguientes condiciones:

Temperatura inicial	30 °C
Temperatura final del primer calentamiento	640 °C
Temperatura final del segundo calentamiento	1040 °C
Temperatura final del primer enfriamiento	640 °C
Temperatura final	30 °C
Velocidad del aire	30 m/s

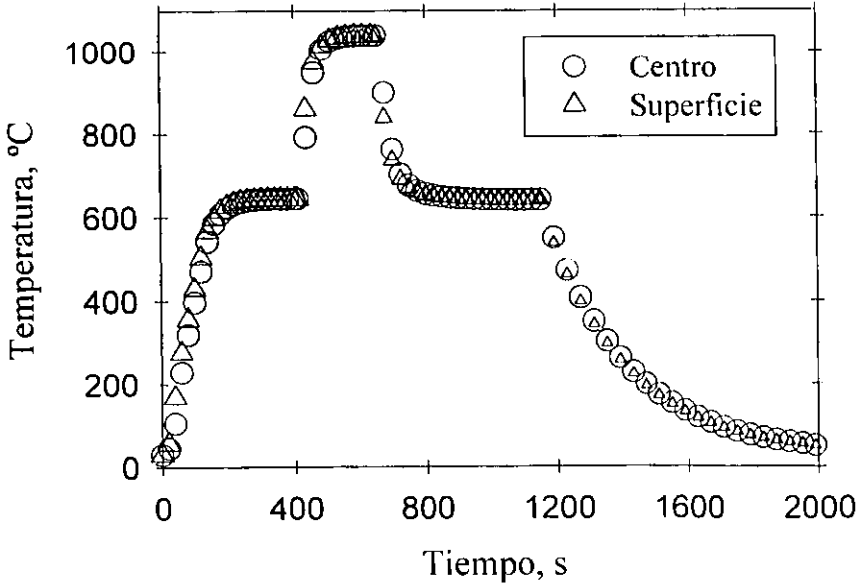


Figura 19. Respuesta térmica de la simulación para un cilindro de acero AISI D2, con un diámetro de 1 pulgada.

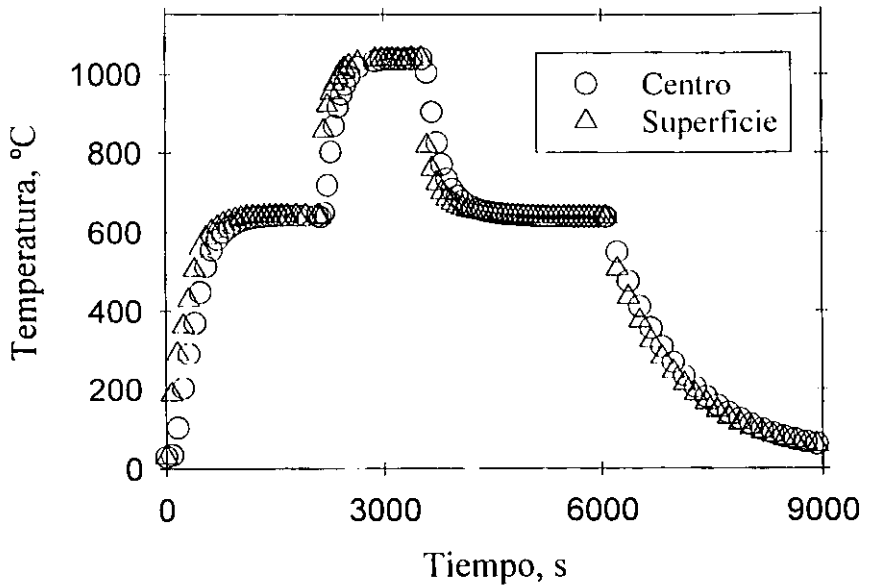


Figura 20. Respuesta térmica de la simulación para un cilindro de acero AISI D2, con un diámetro de 4 pulgadas.

Las Figuras 19 y 20 muestran el perfil de temperaturas, en el centro y en la superficie de los cilindros metálicos.

En el caso de la simulación de la probeta tipo 1, prácticamente no existieron diferencias de temperatura entre su superficie y su centro; por lo que, la transformación microestructural se realizará homogéneamente en toda la pieza.

Sin embargo, para la simulación con la probeta tipo 2 se obtuvieron diferencias de temperatura entre su centro y su superficie. Por esta razón, para esta probeta, se esperarían diferencias microestructurales entre su interior y su superficie.

Al graficar las curvas de enfriamiento, obtenidas mediante la simulación, en el diagrama TTT correspondiente al acero SAE D2, se observan las microestructuras producidas en su centro y su superficie por el enfriamiento. Tal gráfica se muestra en la Figura 21.

Así, se observa que para este caso, a pesar de los gradientes térmicos internos, ambas posiciones presentarían prácticamente martensita como microestructura final.

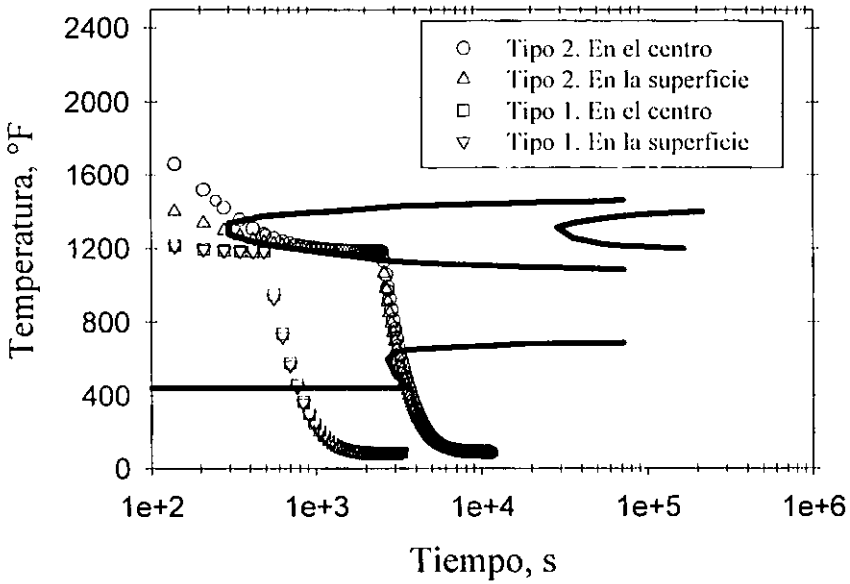


Figura 21. Representación gráfica de la transformaciones microestructurales asociadas a las curvas de enfriamiento de las probetas de acero SAE D2. Diámetro de 4 pulgadas y 1 pulgada, a partir de los valores estimados con el modelo matemático.

7. CONCLUSIONES

- 1.- La metodología aplicada a través de este trabajo permite evaluar las condiciones de frontera (expresada como densidad de flujo de calor) de los sistemas de calentamiento y enfriamiento.
- 2.- Los modelos matemáticos usados para la evaluación de la condición de frontera y para simular la distribución de temperaturas en piezas de acero permiten pronosticar apropiadamente el ciclo térmico de temple.
- 3.- A través del pronóstico de la distribución de temperaturas y usando la información gráfica disponible sobre las transformaciones de fase de los aceros (Diagramas TTT o CCT) es posible determinar la microestructura en una pieza de acero después del enfriamiento.
- 4.- Los resultados de este trabajo muestran que la aplicación de los principios de la ingeniería microestructural (fenómenos de transporte y transformaciones de fase) permiten una mayor comprensión del sistema de trabajo y como consecuencia un mejor control del procesamiento térmico de los aceros.

APENDICES

APENDICE 1.- PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DEL ACERO D2.

**APENDICE 2.- METODOLOGIA DEL PROBLEMA INVERSO DE
CONDUCCION DE CALOR (IHCP).**

APENDICE 3.- LISTADO DEL PROGRAMA

APÉNDICE 1.- PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DEL ACERO D2

COMPOSICIÓN QUÍMICA				
C _{máx}	Si _{máx}	Mn _{máx}	Cr	Ni
0.08	1	2	18-20	8-12

DENSIDAD PROMEDIO
7.8 kg/m ³

CAPACIDAD CALORÍFICA (kJ/kg K)	
$0.43895 + 1.98 \times 10^{-4} T$	$T < 773$
$0.13793 + 5.9 \times 10^{-4} T$	$773 \leq T < 873$
$0.87125 - 2.5 \times 10^{-4} T$	$373 \leq T < 973$
$0.55520 - 7.75 \times 10^{-5} T$	$973 \leq T$

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (W/mk)	
$10.717 + 0.014955 T$	$T \leq 780$
$12.076 + 0.013213 T$	$780 \leq T \leq 1672$
$217.12 - 0.1094 T$	$1672 \leq T \leq 1727$
$8 + 0.0115 T$	$1727 \leq T$

APENDICE 2. METODOLOGIA DEL PROBLEMA INVERSO DE CONDUCCION DE CALOR (IHCP)

La metodología de IHCP consiste resolver las ecuaciones diferenciales parciales que describen la evolución de los campos térmicos del sólido, asumiendo que el flujo de transferencia de calor es unidireccional.

En la Figura 23 se ilustra el problema del IHCP, para una placa de espesor $2L$ que está inicialmente a una temperatura T_0 . Para $t > 0$, se aplica una densidad de flujo de calor desconocido $q(t)$ en la frontera en $x = L$, mientras que la frontera en $x = 0$ es simétrica con respecto al gradiente térmico. Para estimar la función $q(t)$, las mediciones de temperatura se hacen en la posición x_f . Se asume que no hay información disponible con respecto a la forma de $q(t)$ y por lo tanto, un gran número de componentes de $q(t)$ son necesarios para estimarla.

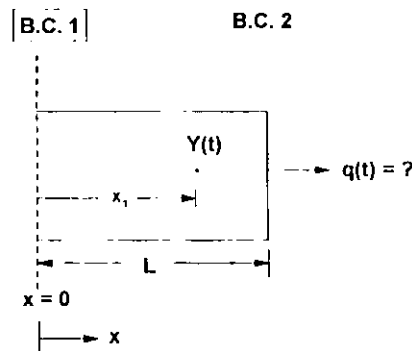


Figura 22. Representación esquemática del IHCP en una dirección de flujo para una placa de espesor $2L$. En $x = 0$ se tiene simetría y en $x = l$ una densidad de flujo de calor desconocida[12].

En el algoritmo de este método, el flujo de calor superficial se estima, asumiendo temporalmente que el flujo de calor en tiempos futuros t , son constantes. Así el flujo de calor desconocido en la superficie se obtiene de las temperaturas medidas experimentalmente, incluyendo varios tiempos futuros.

Este procedimiento tiene la desventaja de ser extremadamente sensible a los errores de medición. Debido a la inestabilidad en la solución introducida por las condiciones a la frontera y a la posición del termopar.

Sin embargo, este método ha sido de gran utilidad en la estimación de las condiciones a la frontera donde sólo es posible la medición de temperaturas.

APENDICE 3.- LISTADO DEL PROGRAMA

```
program Transporte_Convectivo;

{$N+}
{$I-}      { Flags an I/O error }
{$R+}      { Enable range checking }

uses crt;

const
  IOerr : boolean = false; { Flags an I/O error }
  a=33.4442; (* para un cilindro *)
  b =5.1322; (* para un cilindro *)
  c=2.0; (* para un cilindro de longitud infinita *)

var
  outfile : text;
  temp_adim1, temp_adim2, temp_media, temp_pared: real;
  temp_film, temp0: real;
  temp_inicial, temp_fluido: real;
  nusselt_f, nusselt_s, nusselt_ov: real;
  reynolds, tao: real;
  prandtl, f_prandtl: real;
  k_solido, ro_solido, cp_solido, alfa: real;
  k_fluido, ro_fluido, viscosidad: real;
  radio, diametro: real;
  velocidad: real;
  tiempo_delta_t: real;
  n. contador: integer;

function power(base:real; exponente:real): real;
begin
  if (base<=0.0) then power:=0.0
  else
    if (exponente=0.0) then power:=1.0;
    if (base > 0.0) and (exponente <> 0.0) then
      power:=exp(exponente*ln(base));
end;

procedure IOCheck;
{ Check for an I/O error and display a message if needed. }
const
  Bell = #7; { The ASCII bell character. }
type
  Prompt = string[80];
var
```

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA


```

IOcode : integer;

procedure Error(Msg : Prompt);
begin
  Writeln;
  Writeln(Bell, Msg);
  Writeln;
end; { procedure Error }

begin { procedure IOCheck }
  IOcode := IOresult;
  IOerr := IOcode < 0;
  if IOerr then
    case IOcode of
      $01 : Error('El archivo no existe.');
```

\$02 : Error('El archivo no puede ser abierto para lectura.');

\$03 : Error('El archivo no puede ser abierto para escritura.');

\$04 : Error('El archivo no puede ser abierto.');

\$10 : Error('Error en el formato num,rico.');

\$22 : Error('La asignaci3n sobre archivos estandard no est permitida.');

\$91 : Error('B\squeda despu,s del final de archivo.');

\$99 : Error('Inesperado final de archivo.');

\$F0 : Error('Error de escritura en el disco.');

\$F1 : Error('El disco esta lleno.');

\$F3 : Error('Demasiados archivos. Revise FILES=20 en CONFIG.SYS.');

```

    else
      begin
        Writeln;
        Writeln(Bell);
        Writeln('ERROR NO IDENTIFICADO: ', IOcode, '. Vease el manual.');
```

Writeln;

```

      end;
    end; { case }
end; { procedure IOCheck }

procedure outputfile(var outfile: text);
var
  filename: string[255];
  ch1: char;
begin
  clrscr;
  repeat
    ch1:= 'Y';
    writeln;
    write(' Cu l ser el nombre del <Archivo de Salida> ? ');
    readln(filename);
    assign(outfile, filename);
```

```

reset(outfile);
if IOresult = 0 then { The file already exists. }
begin
  close(outfile);
  writeln;
  write('El archivo ya existe. ');
  write(" Ser re-escrito (y/n) ? ");
  ch1:= readkey;
  ch1:= upcase(ch1);
  writeln(ch1);
end;
if ch1 = 'Y' then
begin
  rewrite(outfile);
  IOcheck;
end;
until((Ch1 = 'Y') and not(IOerr));
assign(outfile, filename);
rewrite(outfile);
end; { procedure outputfile }

```

```

procedure entrada_datos;
begin
  clrscr;
  textcolor(3);
  writeln(' Este programa NO realiza "conversion de unidades" ');
  textcolor(2);
  gotoxy(35,3);
  writeln;
  write(" Cu l es el di metro del cilindro, m ? ");
  readln(diametro);
  writeln;
  write(" Cu l es la temperatura inicial del cilindro, oC ? ");
  readln(temp_inicial);
  writeln;
  write(" Cu l es la velocidad del fluido (aire), m/s ? ");
  readln(velocidad);
  writeln;
  write(" Cu l es la temperatura del fluido (aire), oC ? ");
  readln(temp_fluido);
  writeln;
  write(" Cu ntos valores de tiempo desea calcular ? ");
  readln(n);
  writeln;
  write(" Cu l es el incremento de tiempo, s ? ");
  readln(delta_t);
end;

```

```

procedure evaluacion_propiedades;
begin
  temp_film:=(temp_inicial+temp_fluido)/2;
  (* AIRE (1 atm y de 100 K a 2500 K) *)
  temp0:=temp_film+273.15; (* K *)
  ro_fluido:=0.1567+0.2275*exp(-0.136*temp0)+1.6417*exp(-0.0022*temp0); (* kg/m3
  *)
  viscosidad:=(3.7687e-05*temp0)/(579.9252+temp0))+1.7941e-08*temp0; (* kg/m/s *)
  k_fluido:=3.5992e-05+(8.8082e-05*temp0)+(2.5502e-08*sqr(temp0))
  -(1.5243e-10*power(temp0,3))+(1.8437e-13*power(temp0,4))
  -(1.0235e-16*power(temp0,5))+(2.7153e-20*power(temp0,6))
  -(2.7180e-24*power(temp0,7)); (* W/m/oC *)
  prandtl:=-0.8131-(4.1229e-04*temp0)-(1.4392e-07*sqr(temp0))
  +(1.7686e-09*power(temp0,3))-(2.3759e-12*power(temp0,4))
  +(1.4038e-15*power(temp0,5))-(3.9617e-19*power(temp0,6))
  +(4.3673e-23*power(temp0,7));
  (* ACERO INOXIDABLE (AISI 304) *)
  (* densidad kg/m3 *)
  temp0:=temp_film+273.15; (* K *)
  ro_solido:=8000.0;
  (* conductividad, W/m/oC *)
  if (temp0<780.0) then
    k_solido:=10.717+0.014955*temp0;
  if (temp0>=780.0) and (temp0<1672.0) then
    k_solido:=12.076+0.013213*temp0;
  if (temp0> 1672.0) and (temp0<1727.0) then
    k_solido:=-217.12-0.1094*temp0;
  if (temp0>=1727.0) then
    k_solido:=8+0.0115*temp0;
    (* capacidad calorifica, kJ/kg/oC *)
  if (temp0<773.0) then
    cp_solido:=0.43895+1.98e-04*temp0;
  if (temp0>=773.0) and (temp0<873.0) then
    cp_solido:=0.13793+5.9e-04*temp0;
  if (temp0>=873.0) and (temp0<973.0) then
    cp_solido:=0.87125-2.5e-04*temp0;
  if (temp0>=973.0) then
    cp_solido:=0.55520+7.75e-05*temp0;
end;

```

```

procedure calculo_nf;

```

```

begin
  f_prandtl:=-power((1+power((0.4/prandtl),(2.0/3.0))),(1.0/4.0));
  reynolds:=(ro_fluido*velocidad*diametro)/viscosidad;
  if reynolds <=20000 then
    nusselt_f:=0.3+(0.62*sqr(reynolds)*exp((1.0/3.0)*ln(prandtl)))/f_prandtl)

```

```

else
  if (reynolds<20000) and (reynolds<400000) then
nusselt_f:=(0.3+(0.62*sqrt(reynolds)*exp((1.0/3.0)*ln(Prandtl))/f_prandtl))*(1+sqrt(reynol
ds/28000))
  else
    nusselt_f:=(0.3+(0.62*sqrt(reynolds)
      *exp((1.0/3.0)*ln(Prandtl))/f_prandtl)
      *exp(1.25*ln(1+exp(0.625*ln(reynolds/282000))));
end:

```

```

procedure calculo_ns_nov;
begin
  radio:= diametro/2;
  alfa:= k_solido/(1000.0*ro_solido*cp_solido); (* m2/s *)
  tao:= tiempo*alfa/(radio*radio);
  nusselt_s:= sqrt(a+(b/tao));
  nusselt_ov:= 1/((1/nusselt_s)+(1/((k_fluido/k_solido)*nusselt_f)));
end:

```

```

procedure calculo_temperaturas;
begin
  temp_adim1:=exp(-(c/2)*nusselt_ov*tao);
  temp_media:=(temp_adim1*(temp_inicial-temp_fluido))+temp_fluido;
  temp_adim2:=temp_adim1*(1-(nusselt_ov/nusselt_s));
  temp_pared:=temp_adim2*(temp_inicial-temp_fluido)+temp_fluido;
  textecolor(7);
end:

```

```

begin {programa}
  tiempo:= 0.0;
  temp_media:= 0.0;
  temp_pared:= 0.0;
  entrada_datos;
  outputfile(outfile);
  writeln(outfile, "");
  write(outfile, 'Di metro del Cilindro (m)= ');
  writeln(outfile, diametro:9:6);
  write(outfile, 'Temperatura Inicial del Cilindro (oC)= ');
  writeln(outfile, temp_inicial:7:2);
  write(outfile, 'Velocidad del Aire (m/s)= ');
  writeln(outfile, velocidad:7:2);
  write(outfile, 'Temperatura del Aire (oC)= ');
  writeln(outfile, temp_fluido:7:2);
  evaluacion_propiedades;
  write(outfile, 'temperatura "film" (oC)= ');
  writeln(outfile, temp_film:7:2);

```

```

writeln(outfile, "");
write(outfile, 'Densidad del Aire (kg/m3) - ');
writeln(outfile, ro_fluido:10:7);
write(outfile, 'Viscosidad del Aire (kg/m/s)= ');
writeln(outfile, viscosidad:10:7);
write(outfile, 'Conductividad Térmica del Aire (W/m/°C)= ');
writeln(outfile, k_fluido:10:7);
write(outfile, 'Número de Prandtl para el Aire= ');
writeln(outfile, prandtl:5:2);
write(outfile, 'Densidad del Acero AISI 304 (kg/m3) = ');
writeln(outfile, ro_solido:8:2);
write(outfile, 'Conductividad Térmica del Acero AISI 304 (W/m/°C)= ');
writeln(outfile, k_solido:7:2);
write(outfile, 'Capacidad Calorífica del Acero AISI 304 (kJ/kg/°C) = ');
writeln(outfile, cp_solido:10:7);
calculo_nf;
writeln(outfile, "");
write(outfile, 'Función de Prandtl= ');
writeln(outfile, f_prandtl:5:2);
write(outfile, 'Número de Reynolds= ');
writeln(outfile, reynolds:10:2);
write(outfile, 'Número de Nusselt (externo) = ');
writeln(outfile, nusselt_f:10:2);
writeln(outfile, "");
writeln(outfile, "");
writeln(outfile, ' tiempo (s)', ' ', 'tao', ' ', 'Nu_(interno)', ' ',
    'Nu ("overall)", ' ', 'temp. media (°C)', ' ',
    'temp. pared (°C)');
writeln(outfile, tiempo:10:2, tao:7:2,
    temp_inicial:7:2, ' ', temp_inicial:7:2);
for contador:=1 to n do
begin {for}
    tiempo:=tiempo+delta_t;
    calculo_ns_nov;
    calculo_temperaturas;
    writeln(outfile, tiempo:10:2, tao:7:2, nusselt_s:10:2, ' ',
        nusselt_ov:10:2, ' ', temp_media:10:2,
        ' ', temp_pared:10:2);
end; {for}
close(outfile);
end.

```

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Necati Özişik. *Heat Conduction*. John Wiley & Sons. 2nd Edition. U.S.A., 1993.
- [2] Apraiz Barreiro J. *Tratamientos Térmicos de los aceros*. Dossat-Plaza de Santa Ana. 8va Edición. Madrid, 1974.
- [3] Howard E. Boyer and Philip R. Cary. *Quenching and control of Distortion*. ASM International. 2nd Edition. Ohio 1998.
- [4] Weeks J. *Metallurgia*. Editorial Reverté. Madrid. 1980.
- [5] G.E. Totten, C.E. Bates and N.A. Clinton. *Handbook of Quenchants and Quenching Technology*. ASM International, U.S.A., 1993.
- [6] G.F. Vander Voort. *Atlas of Time Temperature Diagrams for Iron and Steels*. ASM International. U.S.A., 1991.
- [7] G. Krauss. *Steels: Heat Treatment and Processing Principles*. ASM International. 2nd. Edition. U.S.A., 1990.
- [8] G.P. Dubal, *Recent Advances in Quenching Applications of Salt Bath*. Conference Proceedings on Quenching and Distortion Control. Edited by George E. Totten, 1992.
- [9] G.H. Geiger and D.R. Poirer. *Transport Phenomena in Metallurgy*. Addison-Wesley Publishing. U.S.A., 1973.
- [10] J.S. Téllez M. *Tesis: Desarrollo de un dispositivo para caracterizar la extracción de calor en baños de temple*. México D.F., 2000.
- [11] B.Liscis, S.Svaicang T. Flicin, *Workshop Designed System for Quenching Intensity Evaluation and Calculation of Heat Transfer Data*. Proceedings of the First International Conference on Quenching and Control of Distortion. U.S.A., 1992.

[12] B. Hernández-Morales, J.K. Brimacombe and E.B. Hawbolt. *Characterization of the Boundary Condition in Heat Treatment Operations Using an Inverse Heat Conduction Algorithm*. Proceedings of the ASME Heat Transfer Division, 1995.