

00522
18



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA

**“TRANSFERENCIA DE CALOR DURANTE EL TEMPLE POR
ROCIADO CON AGUA DE UNA PLACA DE ACERO QUE
SUFRE TRANSFORMACIÓN DE FASE”**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

PRESENTA:

JOSÉ MANUEL VÁZQUEZ CHAVEZ



MÉXICO, D.F.
**EXAMENES PROFESIONALES
FACULTAD DE QUÍMICA**

2003



A



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

PAGINACION DISCONTINUA

Jurado asignado:

Presidente	Prof. José Bernardo Hernández Morales
Vocal	Prof. Sergio García Galán
Secretario	Prof. Arturo Alejandro Sánchez Santiago
1er suplente	Prof. José Guadalupe Ramírez Vieyra
2do. Suplente	Prof. Martín Rivera Toledo

Sitio donde se desarrolló el tema:

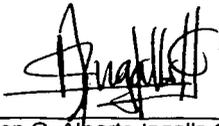
Edificio "D", Facultad de Química, U.N.A.M.

Asesor del Tema:



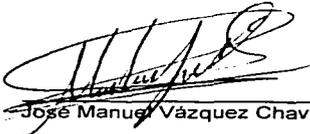
Dr. José Bernardo Hernández Morales

Supervisor Técnico:



M. en C. Alberto Ingalls Cruz

Sustentante:



José Manuel Vázquez Chávez

-He tratado de vivir de acuerdo con sus consejos-dije-. Tal vez no sea yo lo mejor, pero soy lo mejor de mí mismo.

-Debes ser aún mejor. Debes empujarte siempre más allá de tus límites.

-Pero eso sería una locura.... Nadie puede hacer eso.

-Muchas cosas que haces ahora te habrían parecido una locura hace algunos años. Las cosas esas nunca cambiaron, pero sí cambio tu idea de ti mismo; lo que antes era imposible es ahora perfectamente posible, y a lo mejor el que logres cambiarte por completo es sólo cuestión de tiempo.

C. C. (1974)

C

A

Mis padres.

Por todo el apoyo que me han brindado.

D

Agradecimientos

Al Dr. Bernardo Hernández Morales, por ayudarme a lograr la realización de este trabajo.

Al apoyo económico del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) a través del proyecto 34938-U.

A la asistencia del Ing. Rigoberto Nava Sandoval (Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la UNAM) en la medición de la distorsión de las placas.

ÍNDICE

1	Introducción	1
2	Antecedentes	4
2.1	Temple	6
2.2	Temple por rociado	6
2.3	Predicción de microestructura y dureza	12
2.4	Objetivo	16
2.5	Modelo matemático	17
3	Procedimiento Experimental	19
3.1	Metodología	19
3.2	Diseño y construcción de probetas	19
3.3	Sistema de temple	21
3.3.1	Rociado de las placas de acero 1045	23
3.3.2	Adquisición de datos durante el temple	24
3.3.3	Condiciones térmicas de los experimentos	25
3.4	Medición de la deformación	26
3.5	Metalografía y medición de dureza	29
4	Resultados y Discusión	31
4.1	Respuesta térmica experimental de las placas de acero 1045	31
4.2	Microestructura y dureza finales de las placas de las placas de acero 1045	47
4.3	Deformación	52
4.4	Validación de las respuestas térmicas simuladas en DEFORM TM 3D-HT	55

4.5 Simulación de temple de 1000 °C a 23 °C en una placa de acero AISI 1045	62
4.6 Discusión de resultados	64
5 Conclusiones	73
Bibliografía	75
Apéndice A	77
Apéndice B	80

LISTA DE FIGURAS

2.1.- Mecanismos de enfriamiento durante el temple [5].	9
3.1.- Diseño de las probetas.	20
3.2.- Sistema de calentamiento-enfriamiento	22
3.3.- Temple por rociado de las placas de acero 1045	23
3.4.- Sistema de adquisición de datos.	24
3.5.- Posición de los termopares (vista inferior de la placa).	25
3.6.- Colocación de los dispositivos para la medición de la deformación.	27
3.7.- Guía en acrílico para la colocación de balines.	28
3.8.- Guía de posiciones en acrílico.	28
3.9.- Ubicación de los puntos en la superficie donde se midió la deformación.	29
3.10.- Corte realizado a las placas para realizar las metalografías.	30
4.1.- Respuesta térmica (no filtrada) en la posición de los termopares TC1, TC2, TC3 y TC4, para una placa templada desde 800°C con agua a 43°C.	32
4.2.- Respuesta térmica (filtrada) en la posición de los termopares TC1, TC2, TC3 y TC4, de una placa templada desde 800°C con agua a 43°C.	34
4.3.- Respuestas térmicas obtenidas en el temple por rociado con agua sobre placas de acero 1045, con agua a 12 °C.	36

4.4.- Zonas de aplicación de coeficientes de transferencia de calor por convección para la superficie rociada y la no rociada de las placas de acero AISI 1045.	38
4.5.- Comparación de la respuesta térmica en placas de acero AISI 304 (líneas) y AISI 1045 (símbolos) calentadas a 800 °C y templadas por rociado con agua a 43°C.	39
4.6.- Coeficiente de transferencia de calor (h_{tc}) aplicado sobre la zona central de la superficie rociada con agua, h_{c1} , original (círculos) y modificado (triángulos), para la simulación del temple desde 1000 °C con agua a 12°C.	42
4.7.- Coeficiente de transferencia de calor (h_{tc}) para el enfriamiento al aire (zona central), h_{c2} , para la simulación del temple desde 1000 °C con agua a 12°C.	43
4.8.- Coeficiente de transferencia de calor (h_{tc}) aplicado sobre la zona central de la superficie rociada con agua, h_{c1} , original (círculos) y modificado (triángulos), para la simulación del temple desde 1000 °C con agua a 43 °C.	43
4.9.- Coeficiente de transferencia de calor (h_{tc}) para el enfriamiento al aire (zona central), h_{c2} , para la simulación del temple desde 1000 °C con agua a 43°C.	44
4.10.- Coeficiente de transferencia de calor (h_{tc}) aplicado sobre la zona central de la superficie rociada con agua, h_{c1} , original (círculos) y modificado (triángulos), para la simulación del temple desde 900 °C con agua a 23°C.	44

- 4.11.-Coeficiente de transferencia de calor (h_{tc}) para enfriamiento al aire (zona central), h_{c2} , para la simulación del temple desde 900 °C con agua a 23°C. 45
- 4.12.-Coeficiente de transferencia de calor (h_{tc}) aplicado sobre la zona central de la superficie rociada con agua, h_{c1} , original (círculos) y modificado (triángulos), para la simulación del temple desde 800 °C con agua a 12°C. 45
- 4.13.-Coeficiente de transferencia de calor (h_{tc}) para enfriamiento al aire (zona central), h_{c2} , para la simulación del temple desde 800 °C con agua a 12°C. 46
- 4.14.-Microestructura típica para una zona cercana a la superficie rociada. Ataque con Nital No. 2, observada a 300X. 48
- 4.15.-Microestructura típica de una zona cercana a la superficie enfriada al aire, en la zona donde se midió la respuesta térmica de la placa con los termopares TC2 o TC4. 49
- 4.16.-Perfil de dureza (Rockwell C) medido en dos planos: uno que contiene a los termopares TC1 y TC2 (cuadros) y otro que contiene a los termopares TC3 y TC4 (círculos), para una placa templada desde 800°C hasta 43 °C. 50
- 4.17.-Comparación de la geometría de la superficie rociada de una placa templada desde 900 °C, con agua a 23°C, antes y después del temple. 52
- 4.18.-Comparación de las deformaciones finales en placas sometidas a diferentes condiciones de temple. 54

4.19.-Rapidez de enfriamiento experimental (símbolos) y simulada (líneas), en la posición de los termopares TC1 y TC2, para la placa templada desde 1000 °C con agua a 12 °C.	56
4.20.-Cinética de la transformación difusional simulada con DEFORM™3D-HT, en la posición de los termopares TC1 y TC2, para la placa templada desde 1000 °C con agua a 12 °C.	58
4.21.-Rapidez de enfriamiento experimental (símbolos) y simulada (líneas), en la posición de los termopares TC1 y TC2, para la placa templada de 900 °C a 23 °C.	59
4.22.-Rapidez de enfriamiento experimental (símbolos) y simulada (líneas), en la posición de los termopares TC1 y TC2, para la placa templada de 800 °C a 43 °C.	60
4.23.-Respuesta térmica simulada obtenida para una placa de acero AISI 1045, aplicando los coeficientes de transferencia de calor caracterizados con placas de acero AISI 304, en las posiciones mostradas en la Figura 3.5.	63
4.24.-Diagrama CCT para aceros 1039-1046 reportado por Atkins [15].	65

RESUMEN

Se obtuvo la respuesta térmica para placas (de 90 x 170 x 12.7 mm) de acero AISI 1045 templadas por rociado con agua, considerando a la temperatura de inicio de temple y a la temperatura del medio de temple como las variables independientes. Se simuló, con el software DEFORMTM3D-HT, el temple de cada placa, introduciendo como condición de frontera térmica al coeficiente de transferencia de calor caracterizado previamente en placas de acero inoxidable AISI 304 sometidas a condiciones de enfriamiento idénticas.

La validación se realizó para la zona central de las placas, comparando la respuesta térmica (curvas de enfriamiento) experimental con la simulada, considerando a la distribución microestructural y a la dureza estimadas y medidas como factores de evaluación.

Se confrontaron los resultados experimentales y simulados, con las predicciones del diagrama CCT correspondiente reportado en la literatura, comparando la distribución de fases final bajo un criterio de rapidez de enfriamiento a 700 °C.

Se tomó en cuenta la deformación que sufrieron las placas ya templadas, y se les relacionó con las condiciones de enfriamiento a las que se sometieron las mismas. Para esto se midió la planitud de las placas antes y después del temple.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La predicción de la evolución microestructural durante el enfriamiento continuo es un prerrequisito para el cálculo de dureza, esfuerzos residuales y distorsión después del temple. Para tal efecto, primero se deben conocer los fenómenos de transporte (energía y momento) que se llevan a cabo entre los componentes del sistema a estudiar. Para evitar resolver el problema de transporte de momentum y de energía de forma simultánea, se recurre al concepto de *coeficiente de transporte de energía por convección* (*htc*, por sus siglas en inglés), en el que se sintetizan todos los factores que influyen en el intercambio de energía en la frontera entre el componente y el medio de temple.

Debido a que el *htc* es una característica particular de cada sistema, resulta complicado caracterizarlo en un sistema y después aplicarlo a otro. Además de que en el sistema donde se aplique tome en cuenta otras o nuevas variables, por ejemplo la generación de energía debida a transformaciones de fase.

En el presente trabajo se lleva a cabo la validación de la simulación, aplicando el paquete comercial DEFORMTM3D-HT, de la respuesta térmica al temple por rociado con agua en placas de acero AISI 1045. El rociado se aplicó sólo sobre una de las superficies de la placa, mientras que la otra se enfriaba al aire. Las variables independientes que se manejan en este sistema son: la temperatura

de inicio de temple (T_o) y la temperatura del medio de temple (T_f). Las fronteras térmicas que se introducen al simulador (htc en función de la temperatura superficial correspondiente) se caracterizaron en placas de acero inoxidable AISI 304 sometidas a las mismas condiciones de enfriamiento [13].

Así la hipótesis de trabajo es que bajo las mismas condiciones de enfriamiento (temple por rociado, T_o y T_f) las fronteras térmicas caracterizadas en una placa de acero inoxidable AISI 304 son aplicables a una placa de acero AISI 1045, a través de un modelo unidireccional de calor con dos fronteras activas.

Para corroborar esta hipótesis se propone una metodología basada en el análisis de la distribución microestructural y dureza obtenidas después del temple, comparándolas con las estimadas por la simulación del proceso. Además se confrontan a ambas con un diagrama CCT reportado en la literatura para aceros de composición química similar. También se trata de encontrar alguna relación entre las condiciones de extracción de calor y la respuesta térmica con la deformación sufrida por las placas una vez templadas.

Los resultados obtenidos para la zona central de la placa de acero AISI 1045 son buenos, ya que la distribución microestructural arrojada por el simulador es cualitativamente congruente con la que se obtiene experimentalmente, además los perfiles de dureza estimados y medidos son cuantitativamente similares. Además se relaciona a las condiciones de temple y la

respuesta térmica de las placas con las deformaciones que presentan éstas después del temple.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

Los tratamientos térmicos son ciclos de *calentamiento* 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 las propiedades de servicio. Los tratamientos térmicos más usados son: el templeado, el normalizado, el revenido, el patenting, el austempering y el martempering [1].

Los tratamientos térmicos permiten mejorar en gran medida las características mecánicas de un acero de composición determinada. Así algunos tratamientos buscan el aumento del límite elástico, la disminución de la fragilidad o bien el incremento de la dureza, principalmente. De manera general, un tratamiento térmico no modifica la composición química, pero puede aportar modificaciones a la constitución (estado del carbono y forma alotrópica del hierro), microestructura (tamaño de grano y distribución de los constituyentes) y estado mecánico (distribución de esfuerzos internos). En resumen, el propósito es mejorar el acero modificando su constitución y su estructura, evitando destruir el estado de equilibrio mecánico [2].

La guía para el entendimiento y selección de los tratamientos térmicos, donde se pueden mostrar los eventos que ocurren durante una historia térmica

dada, es el diagrama isotérmico Temperatura-Tiempo-Transformación, frecuentemente abreviado diagrama TTT [3]. Este diagrama describe las transformaciones de la austenita bajo condiciones isotérmicas, pero no da una guía de lo que pasaría a los productos de la austenita transformada si ellos son tratados térmicamente. Desafortunadamente pocos tratamientos térmicos comerciales involucran transformaciones isotérmicas. Por lo contrario muchos tratamientos involucran el enfriamiento del acero desde la región austenítica de manera continua; para estos propósitos es necesario un diagrama que indique las estructuras formadas a diferentes rapidezces de enfriamiento. Para ello se recurre al diagrama Temperatura-Tiempo-Transformación de enfriamiento continuo, algunas veces llamado diagrama CCT. Lo que tiene en común estas herramientas es que su punto de partida es la austenización.

La austenización es un tratamiento térmico del acero en el que la pieza se calienta desde la temperatura ambiente hasta la región de la austenita. Este tratamiento se lleva acabo por tres razones. 1) Para obtener austenita como precursor necesario para algún tratamiento térmico; 2) Para homogenizar químicamente al acero, para que las diferencias de concentración generadas durante la solidificación se minimicen; 3) Para obtener un tamaño de grano adecuado. Si la austenización se lleva acabo inapropiadamente, la estructura puede verse afectada en tratamientos posteriores de austenización [3]. Los parámetros que se deben de controlar son temperatura y tiempo de austenización, que influyen directamente en el tamaño de grano, lo cual se va a ver reflejado en la cinética de las transformaciones de fase.

2.1 Temple

El temple es utilizado para aumentar la dureza del acero a costa de perder tenacidad en el material. La operación consiste en calentar la pieza por arriba de su temperatura de austenización, con el fin de obtener una estructura austenítica homogénea, para posteriormente enfriarlo con suficiente rapidez y lograr la transformación de fase de austenita a martensita [2, 3].

La martensita, principal producto del temple, es una solución sobresaturada de carbono en hierro α , cristalizada en el sistema cúbico tetragonal, ferromagnética, de gran dureza (~700 HRB) y con una fragilidad notable. El endurecimiento de la martensita es de orden físico-químico; cada átomo de C, de mayor volumen que el intersticio en el que está colocado, separa a los átomos de hierro vecinos; así la red del hierro es fuertemente distorsionada, y estas perturbaciones bloquean el movimiento de las dislocaciones y endurecen el acero [2].

Una de las variantes del proceso de temple, que ha adquirido cierta importancia en la industria, debido a su versatilidad y funcionalidad, es el temple por rociado.

2.2 Temple por rociado.

El término temple por rociado (spray quenching) se refiere a una amplia variedad de procesos de temple que facilitan la extracción de calor por el impacto de un medio de temple (por ejemplo agua) sobre las superficies del metal caliente

[5]. Algunos de estos procesos tienen diferencias obvias, mientras que otros son similares y difieren sólo en cierto grado.

El temple por rociado se utiliza para optimizar la transferencia de calor sobre una pieza para poder capturar una estructura metaestable con las propiedades físicas requeridas, mientras simultáneamente se desarrolla el nivel y distribución deseada de esfuerzos. Es por esto que la historia térmica del componente se debe controlar de forma precisa durante el temple [5]. En el temple por rociado, la transferencia de calor entre el componente y el medio de temple está directamente relacionado con la rapidez de flujo, la turbulencia y la presión de impacto del medio sobre la superficie caliente. Es posible ajustar todos estos parámetros durante el temple para obtener un perfil de enfriamiento que no se pueda llevar a cabo por otro camino. Comúnmente, el intercambio de energía térmica entre la pieza y el medio de enfriamiento se caracteriza a través del coeficiente de transferencia de calor. El ajuste computarizado de estas variables durante el temple está siendo explorado en diferentes aceros. La capacidad de controlar y variar el coeficiente de transferencia de calor durante el temple por rociado puede producir propiedades que por otro camino serían más caras y requerirían materiales de alta aleación. En la referencia [6], se muestra el desarrollo de un sistema de enfriamiento por rociado incorporado a un sistema de rodillos para placas de acero HSLA de 3760 mm, con el objetivo de mejorar las propiedades mecánicas de los productos rodados con un espesor de 12.7 mm y 25.4 mm.

Los principales factores que modifican la extracción de calor durante el temple por rociado son [7]: 1) la posición de la(s) boquillas, 2) el arreglo de las boquillas con respecto a la pieza de trabajo, 3) la presión y la velocidad del medio de temple, 4) el tamaño de la zona rociada, 5) el flujo del medio de temple empleado y 6) la densidad de impacto de agua.

Por otro lado se requiere de equipo más caro que el que se necesita para el temple por inmersión y el mantenimiento del equipo también es más caro. Reforzando lo mencionado en párrafos anteriores, estas desventajas se contrarrestan por el hecho de que este proceso permite alcanzar propiedades óptimas durante el temple para una aleación dada, y en muchos casos propiedades superiores a las obtenidas por otros procesos de temple. Otro potencial beneficio del temple por rociado es que algunas veces es posible alcanzar las propiedades necesarias a bajo costo utilizando un acero de bajo carbono [5].

La explicación de los mecanismos del enfriamiento durante el temple se desarrolla a continuación, con ayuda de la Figura 2.1, en la cual se relacionan la temperatura de superficie y el coeficiente de transferencia de calor con los mecanismos de transferencia de calor [5].

Una vez que se lleva a cabo la inmersión, la pieza tendrá en su alrededor una capa de vapor, la cual se colapsará como consecuencia del enfriamiento. La

transferencia de calor a través de la capa de vapor es pobre, y la pieza se enfriará lentamente en esta región.

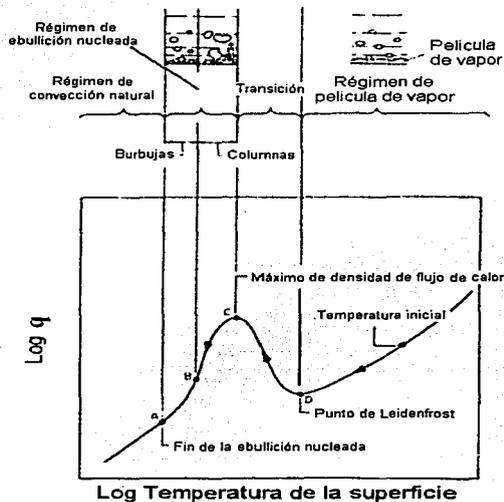


Figura 2.1.- Mecanismos de enfriamiento durante el temple [5].

La segunda región de la curva de enfriamiento se llama zona de ebullición nucleada y corresponde a una rápida transferencia de calor causada por un contacto directo de la pieza con el agua. En esta región la pieza aún se encuentra muy caliente y el agua empieza a ebullicir vigorosamente. El alto calor de la vaporización del agua nos lleva a una rápida transferencia de calor.

En la tercera región o enfriamiento convectivo, la superficie de la pieza se ha enfriado a una temperatura por abajo del punto de ebullición del agua. Sólo la transferencia de calor por convección ocurre en esta región.

La rapidez de calor removido de la pieza templada puede incrementarse por agitación, la cual reduce la estabilidad de la capa de vapor de los alrededores de la pieza durante el inicio del temple. Se puede decir que el enfriamiento por rociado es un tipo de enfriamiento por flujo turbulento en todas las regiones de la curva de enfriamiento. De hecho, se utilizan los mismos términos para describir los mecanismos de transferencia de calor tanto en temple por rociado como en temple por inmersión [3, 5].

Consideremos una serie de gotas de agua moviéndose a través de la superficie de una placa caliente de metal, la primera gota que se ponga en contacto con la placa, a la temperatura superficial de esta, se evaporará instantáneamente. Si la placa está lo suficientemente caliente como para que el líquido en la zona de contacto se encuentre por arriba de su temperatura límite de sobrecalentamiento (260 °C para el agua), entonces una porción del líquido se evaporará en aproximadamente 0.001 s. Esta evaporación ocurrirá después de que la forma esférica original de la gota haya sido deformada significativamente. Dado que la región de contacto representa una pequeña fracción de la masa de la gota, no significa que se haya removido calor de la placa. La película de vapor que se forma mantendrá un remanente de gotas que van hacia la superficie de la placa. La capa de vapor provee una barrera parcial aislante e inhibe el impacto de

gotas adicionales. Sólo cuando estas gotas tengan la suficiente energía cinética (momentum) podrán penetrar la capa de vapor y impactar sobre la placa. El resultado es una película de líquido separada de la placa por una capa de vapor. A esto se le llama película de ebullición o fase de no mojado (nonwetting). Para este régimen de enfriamiento, la transferencia de calor a través de la capa de vapor es relativamente baja, por lo que hay un decremento, relativamente lento, en la temperatura de la placa. Conforme la temperatura cae, el grosor de la capa de vapor decrece. A esta temperatura característica, la cual depende de las condiciones de temple, las gotas de agua con una energía cinética mayor que la promedio penetrarán la película de vapor, en contacto con la placa, e iniciará el mojado sobre la superficie. La temperatura a la cual ocurre esto se le llama *punto de Leidenfrost*. A esta temperatura, la superficie de la placa podrá ser "mojada" por el medio de temple. El incremento en el contacto de las gotas sobre la superficie metálica resultará en un incremento en la transferencia de calor desde la placa, causando un rápido decremento en la temperatura de la placa. Un gran número de gotas podrá penetrar la película, y la transferencia de calor se incrementará mientras la placa entera es mojada con el líquido ebullición. En este punto, el proceso de transferencia de calor se conoce como ebullición nucleada. Posteriormente, la disminución de la temperatura de la placa lleva al fin de la ebullición, y el mecanismo de transferencia de calor es sólo enfriamiento convectivo.

El hecho de entender los mecanismos de enfriamiento, nos ayuda en la comprensión de lo que pasa al interior del acero. Y es a partir de esto que surgen propuestas para la predicción de las propiedades del material que resultan después del proceso de temple.

2.3 Predicción de microestructura y dureza

Una vez que los principios fundamentales que gobiernan el comportamiento de los aceros están suficientemente entendidos, se puede proponer el procesamiento necesario para obtener las propiedades deseadas y de utilidad en la práctica.

El conocimiento del proceso de temple para un acero dado comprende el estudio de la influencia de la composición química del acero, la temperatura de austenización y la velocidad de enfriamiento; siendo esta última la más difícil de caracterizar, ya que depende de la naturaleza y grado de agitación del medio de enfriamiento. [2]; todo esto es la base para el estudio de la evolución de las transformaciones de la austenita durante el enfriamiento, y su estado microestructural después del enfriamiento. La forma de estudio básica consiste en graficar la variación de la temperatura con el tiempo, la cual se conoce como curva de enfriamiento. Las cuales se pueden trazar por dos métodos: 1) Método dilatométrico (Chevenard, 1917) y 2) Análisis térmico (Portevin & Garvin, 1917). Una vez establecido el conocimiento sobre un proceso de temple se pueden establecer métodos para la predicción de durezas.

Los métodos para hacer predicciones de procesos de temple se clasifican en: 1) Prueba y error, 2) Caracterización de la calidad del temple y 3) Modelado del proceso [4]. La complejidad de análisis se incrementa desde las aproximaciones con el método de prueba y error hasta la metodología de modelado. Sin embargo, ésta última es la mejor opción, ya que actualmente se puede tener acceso al hardware y el software necesarios para hacer las mejores aproximaciones tomando en cuenta la mayor cantidad de factores posibles involucrados en el proceso.

Además, sabemos *a priori*, que la respuesta del material al temple se refleja en la microestructura. Si la microestructura es conocida en varias posiciones del componente, entonces es posible estimar las propiedades mecánicas. Esto requiere de las propiedades individuales de los constituyentes y de la cantidad de cada uno de ellos [3]. Sin embargo, las propiedades de cada microconstituyente dependen de las características del mismo; por ejemplo, la dureza de la perlita depende del espaciamiento interlaminar de la misma. Dado que la medición de la dureza es simple y esencialmente no destructiva, muchos tratamientos térmicos son presentados en términos de predicción de dureza, aunque en diseño son las propiedades tensiles las que usualmente se desean.

No debemos olvidar que, por un lado, se ha desarrollado el conocimiento empírico para tratar de predecir los resultados del tratamiento térmico; por ejemplo, para el temple se tienen métodos para evaluar el poder de enfriamiento (Método de Grossmann, Prueba de curvas de enfriamiento y Prueba del gradiente

térmico), métodos para evaluar el poder de endurecimiento (Pruebas de temple por inmersión de probetas cilíndricas de uno o más diámetros o en probetas en forma de cuña, Ensayo Jominy y Ensayo Jominy modificado) y métodos para correlacionar el desempeño del temple con las propiedades de la pieza de acero ya endurecida [8]. Algunos de estos últimos se listan a continuación y la rapidez de enfriamiento [9]:

- 1) Comentarios sobre la interpretación de las curvas de enfriamiento en relación con los diagramas CCT.
- 2) Métodos que proponen correlacionar las curvas de enfriamiento con los resultados de endurecimiento.
 - a) Rapidez de enfriamiento a una cierta temperatura o intervalo de temperaturas.
 - b) El valor V de Tamura.
 - c) El poder de endurecimiento (HP, por sus siglas en inglés) IVF, aplicable a aceites y polímeros.
 - d) HP Castrol/Renault y el Índice Castrol (CI) para aceites.
- 3) Curvas de enfriamiento vs. desempeño del enfriamiento sobre el endurecimiento industrial .

Y por otro lado con la importancia creciente sobre la calidad del producto, hay una urgente necesidad de relacionar cuantitativamente la estructura y propiedades finales del acero con las variables termomecánicas del proceso y los parámetros del acero. Para lograrlo se han desarrollado y se siguen desarrollando

modelos matemáticos de los procesos termomecánicos para predecir el estado metalúrgico del acero en cada etapa de una operación dada. En los procesos de enfriamiento controlado que involucran flujo de calor y transformaciones de fase, el modelo debe incorporar la cinética de descomposición de la austenita como función de la composición, temperatura, tamaño de grano y la transferencia de calor entre el medio externo y la pieza. La descripción matemática de estos fenómenos es complicada debido a que están acoplados, ya que la reacción de descomposición de la austenita es acompañada por evolución térmica. Es decir, la distribución de temperaturas en el acero se ve influenciada por el evento de la transformación que a su vez depende de la temperatura [9]

Sin embargo, la distribución de durezas en componentes templados si puede ser predicha, utilizando métodos numéricos como diferencias finitas o elemento finito provistos de datos de transformación de fase de aceros. Los datos de transformación de fase son las cinéticas correspondientes a la transformación de cada constituyente, para que al final la dureza pueda ser determinada aplicando la regla de adición de los valores de dureza de las diferentes microestructuras formadas a diferentes temperaturas. La principal ventaja de este método es que existen diagramas de transformación de la austenita. Pero las desventajas son que estos diagramas son sensibles a la composición química, variaciones en la microestructura inicial y diferencias en las condiciones de austenización [10]. Un ejemplo de predicción de dureza lo ha reportado B. L. Bramfitt et.al. [11] para una línea de producción para el endurecimiento de

cabezas de rieles. La operación consiste de un sistema de enfriamiento por rociado, cuyo objetivo es producir una microestructura de perlita fina sobre la cabeza del riel.

Actualmente los modelos computacionales para la predicción del endurecimiento son una herramienta muy importante para la industria en el sentido de entender la influencia de varios parámetros del proceso. Sin embargo, es esencial que el programa sea evaluado de acuerdo a la experiencia de las aplicaciones reales [12].

2.4 Objetivo

Es por todo esto que el objetivo del presente trabajo es aplicar una técnica para determinar la aplicabilidad de las condiciones de frontera térmicas caracterizadas en un acero que no sufre transformación de fase, en un acero que sí la sufre durante el temple por rociado; confrontando las curvas de enfriamiento, la distribución microestructural y la dureza obtenidas experimentalmente contra las estimadas con el paquete comercial DEFORMTM3D-HT y las lecturas realizadas en un diagrama CCT reportado en la literatura [14]. También se midió la deformación de la placa, debida a la evolución del campo térmico y microestructural durante el temple.

2.5 Modelo Matemático

El modelo matemático, que representa al proceso de temple por rociado del presente trabajo, parte de la ecuación general de calor:

$$\nabla \cdot k \nabla T + \dot{q} + \Phi = \rho C_v \frac{DT}{Dt} \quad (2.1)$$

Donde T es la temperatura (que es función de la posición y el tiempo), ρ es la densidad, C_v es el calor específico, k es la conductividad térmica, \dot{q} es el calor generado por las transformaciones de fase (por unidad de volumen), Φ es la "función disipación" y la derivada sustancial se escribe como en la ecuación 2.2.

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T \quad (2.2)$$

Considerando:

- Estado inestable
- Coordenadas rectangulares
- Un sólido sin efectos de expansión.
- Velocidad cero.
- Presión constante: $C_v = C_p$.

La ecuación 2.1 se reduce a la siguiente ecuación:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} \quad (2.3)$$

Esta ecuación debe resolverse con las condiciones de frontera e inicial apropiadas (ver apéndice B).

La generación de calor debida a la transformación de fase esta dada por:

$$\dot{q} = \rho H(T) \frac{\Delta F}{\Delta t} \quad (2.4)$$

Donde, H(T) es la entalpía de transformación y F es la fracción transformada, la cual depende de la cinética de transformación respectiva; note además que la variación de la fracción transformada, $\frac{\Delta F}{\Delta t}$, corresponde a condiciones de enfriamiento continuo.

CAPÍTULO 3

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1 Metodología

Las etapas realizadas para alcanzar los objetivos se listan a continuación:

- 1 Diseño de las probetas y sistema de temple.
- 2 Medición de la respuesta térmica del acero durante el rociado con agua.
- 3 Medición de la deformación.
- 4 Medición de la dureza.
- 5 Análisis metalográfico de las probetas templadas.
- 6 Simulación del proceso de temple con el software DEFORMTM3D-HT, aplicando resultados de caracterización de la extracción de calor obtenidos previamente [13].
- 7 Validación de la simulación.

3.2 Diseño y construcción de probetas.

Para la medición de la respuesta térmica se instrumentaron probetas rectangulares de acero AISI 1045 (ver Figura 3.1). Las probetas, con dimensiones 170 x 100 x 12.7 mm, tienen maquinados dos pares de barrenos de 40 mm de profundidad y 1.58 mm de diámetro. Los barrenos están a lo largo de la probeta: un par está en la posición del eje de la espreea, mientras que el otro se encuentra a 45 mm del centro de la placa. La distancia promedio del centro del barreno a la

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

superficie exterior más próxima es de 3.58 mm. Además las probetas tienen maquinados otros cuatro barrenos, con cuerda, de un diámetro de 6.35 mm y 6.35 mm de profundidad. La función de estos barrenos, colocados en los extremos de los cantos superior e inferior de la placa, es poder fijarla firmemente a un marco de acero inoxidable por medio de tornillos también de acero inoxidable. El propósito del marco es sujetar a la probeta durante el temple.

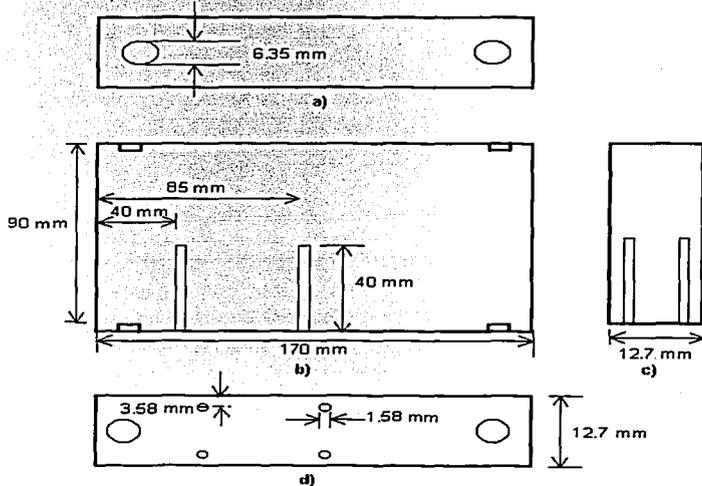


Figura 3.1.- Diseño de las probetas: a) Canto superior de la probeta, b) corte longitudinal de la probeta, c) corte transversal de la probeta y d) canto inferior de la probeta.

Cabe señalar que el diseño de la colocación de los termopares se basa en el estudio de la distribución de las densidades de impacto [13]. Para el cual se instrumentó una malla de 10 x 10 mm con las dimensiones (alto y largo) de la placa, conectando cada orificio de la malla un contenedor en el que se atrapa el agua y entonces poder medir la distribución de las densidades de impacto, repitiendo varias veces el impacto de agua sobre el dispositivo instalado.

3.3 Sistema de temple.

En la realización de las pruebas se utilizó un sistema de calentamiento-enfriamiento que tiene los siguientes componentes:

a) Horno eléctrico de resistencias

Es un horno marca *LINDBERG tipo 56953 CRUCIBLE FURNACE*, con una potencia de 6,800 W. Este horno permite alcanzar una temperatura máxima de 1500 °C.

b) Sistema de transporte

Formado por carro transportador y riel de transporte. El carro transportador es el que permite introducir la probeta en el horno. En el carro transportador se fija el marco de prueba, lo que permite el traslado de la probeta desde el horno hasta la posición de rociado frente a la boquilla. El carro corre por el riel de transporte, asegurando la posición correcta frente a la boquilla. Para disminuir su oxidación, el carro transportador tiene un sistema de enfriamiento con agua corriente.

c) Sistema de rociado de agua

Formado por tanque de almacenamiento de agua, bomba, boquilla y soporte de la boquilla. La capacidad de almacenamiento de agua es de 250 L. La bomba es marca *SIEMENS* con una potencia de 10 hp a 7.460 W. La boquilla es marca *SPRAYING SYSTEMS*, tipo *TEEJET 2540*. Para un fácil posicionamiento se tiene un soporte para la boquilla, que es una estructura metálica que puede manipularse de forma independiente al resto del sistema. Esto se complementa con el hecho de que la boquilla y la bomba se conectan por una manguera flexible de plástico reforzado.

Los componentes del sistema de calentamiento-enfriamiento están colocados como se muestra en la Figura 3.2.

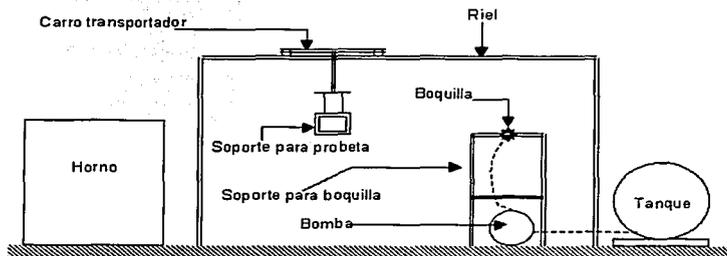


Figura 3.2.-Sistema de calentamiento-enfriamiento

3.3.1 Rociado de las placas de acero 1045.

El rociado de las placas de acero 1045 se realiza sólo sobre una de las superficies de las probetas, con la boquilla a una distancia de 220 mm y un flujo de agua de 23 LPM. El eje mayor de la boquilla esta posicionado verticalmente. La superficie opuesta a la rociada se enfría al aire, ya que se coloca una lamina que impide el paso del agua durante el temple (ver Figura 3.3). Antes de rociar la placa se espera que la bomba se estabilice, para lo que se da un tiempo de 5 s antes de que el agua impacte sobre la placa ya posicionada. Todos los experimentos se filmaron para poder captar el momento preciso del impacto.

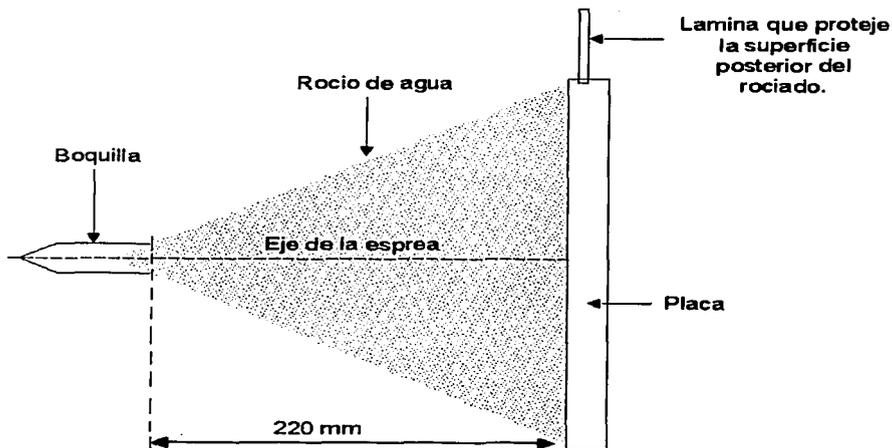


Figura 3.3. Temple por rociado de las placas de acero 1045

3.3.2 Adquisición de datos durante el temple.

Las curvas de enfriamiento (Temperatura vs. Tiempo) se obtuvieron utilizando cuatro termopares tipo K, Chromel-Alumel recubiertos con Inconel, que entran por el canto inferior de la placa. Los termopares están conectados a un sistema automático de adquisición de datos (ver Figura 3.4). Este sistema lo forman una tarjeta de adquisición marca IOTECH modelo Temp Scan/1100 y el software Chart View. La adquisición de datos se llevó a cabo a una razón de 10 lecturas pos segundo por cada termopar.

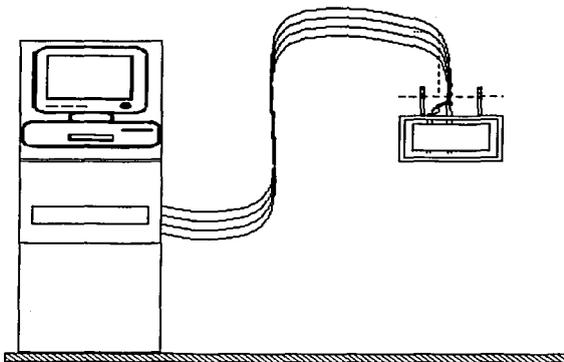


Figura 3.4.-Sistema de adquisición de datos.

La posición y notación asociada de los cuatro termopares se muestra en la Figura 3.5.

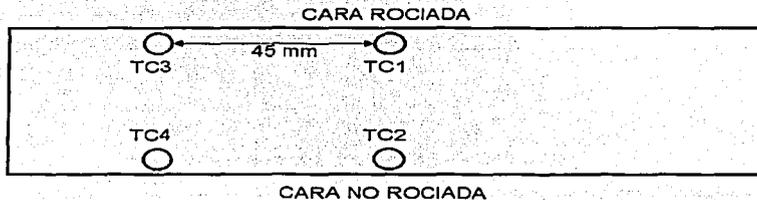


Figura 3.5.- Posición de los termopares (vista inferior de la placa).

3.3.3 Condiciones térmicas de los experimentos.

La matriz de experimentos se muestra en la Tabla 3.1. Las variables independientes son la temperatura inicial y la temperatura del fluido.

Tabla 3.1.-Combinación de condiciones térmicas de los experimentos.

No. de experimento	Temperatura inicial de experimento (T_0), °C	Temperatura del medio de temple (T_f), °C
1	900	23
2	800	23
3	1000	43
4	800	43
5	1000	12
6	800	12

3.4 Medición de la deformación.

La deformación de cada una de las probetas se obtuvo midiendo la distancia entre la superficie rociada y una superficie de referencia, antes y después del temple. Para esto se utilizó una mesa de mármol de granito, de 914.4 x 1219.2 x 203.3 mm, con una planitud de 5.08×10^{-3} mm. Las mediciones se realizaron con un indicador mecánico de carátula analógica con una sensibilidad de 2.54×10^{-5} mm, marca Starret. Este indicador se apoyó en un soporte universal para indicadores, marca Federal. Las mediciones se realizaron en el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la UNAM.

Como se ve en la Figura 3.6, la placa no se posicionó directamente sobre la mesa de planitud, si no que existe un dispositivo de colocación de por medio, con el fin de definir un plano de tres puntos sobre una de las superficies de la probeta. El dispositivo de colocación se compone de una placa de acrílico, con dimensiones iguales a las de la probeta, con tres orificios de diámetro justo para que entren balines de 12.7 mm de diámetro (ver Figura 3.7). Los orificios están colocados cerca de los extremos de la placa de acrílico. Para obtener las mediciones en los mismos puntos, antes y después del temple, se maquinó una guía de posiciones en acrílico con un total de 15 orificios (con un diámetro ligeramente mayor al del punzón del indicador), distribuidos uniformemente, ver Figura 3.8.

El acondicionamiento de las placas para medir la deformación se realizó durante un mínimo de 24 h antes de realizar las mediciones, manteniendo las placas a la temperatura del laboratorio donde se encuentra la mesa de planitud (20°C). La superficie sobre la cual se realizaron las mediciones de deformación, es la rociada. El posicionamiento de la placa sobre los balines, y estos a su vez sobre la mesa de planitud, siempre fue la misma.

La colocación de la referencia para poder realizar las mediciones de deformación sobre los 15 puntos de la placa antes y después del temple se puede ver en la Figura 3.9.

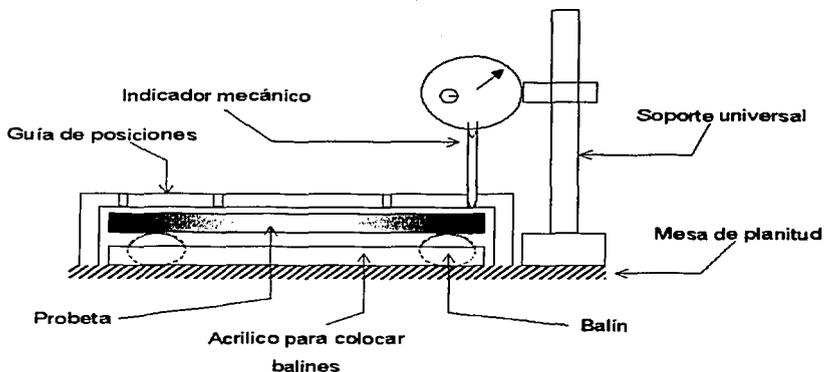


Figura 3.6.- Colocación de los dispositivos para la medición de la deformación.

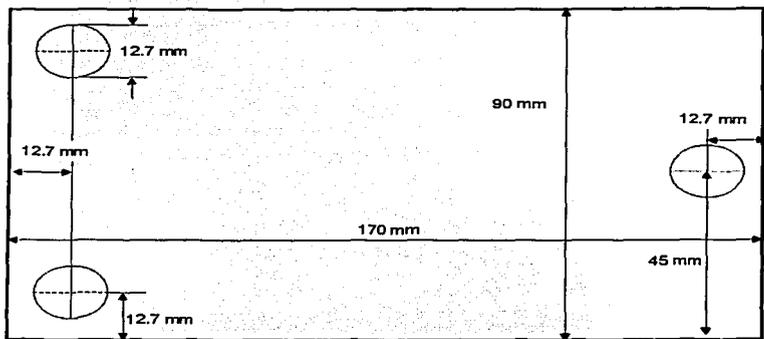


Figura 3.7.-Gua en acrílico para la colocación de balines.

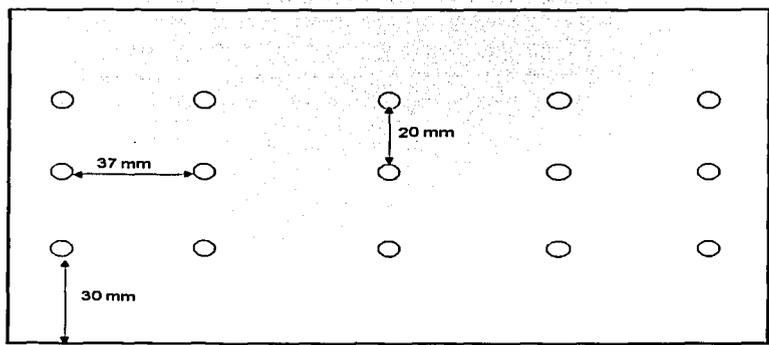


Figura 3.8.- Gua de posiciones en acrílico.

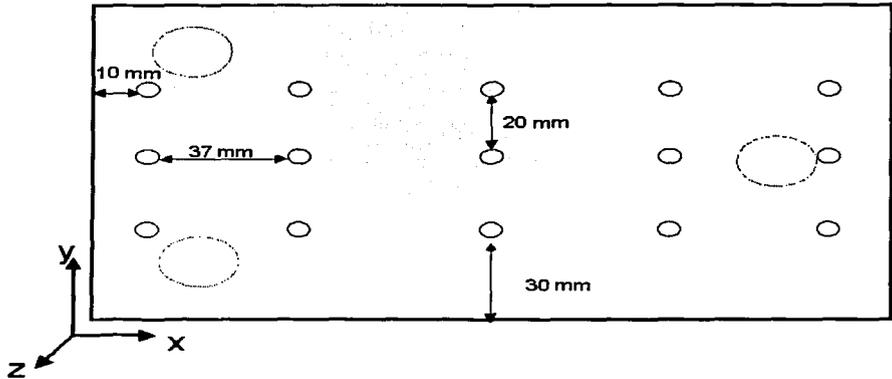


Figura 3.9.- Ubicación de los puntos en la superficie donde se midió la deformación.

3.5 Metalografía y medición de dureza.

Como apoyo a la evaluación de la simulación se llevó a cabo la medición de la dureza y la preparación metalográfica de posiciones seleccionadas en las probetas. Para esto se realizaron cortes de la probeta, como se indica en la Figura 3.10, para poder realizar la preparación metalográfica y la medición de dureza lo más cerca posible a las posiciones de contacto de los termopares. En la metalografía se realizó un pulido hasta espejo con alúmina de $0.05 \mu\text{m}$ y ataque con Nital No. 2. Las durezas se obtuvieron con un durómetro Macromet 3 Buehler para dureza Rockwell / Rockwell superficial, y se midieron en la escala Rockwell C (HRC).

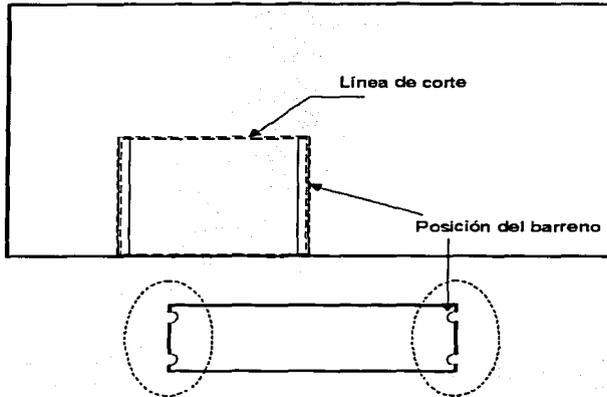


Figura 3.10.- Corte realizado a las placas. El detalle inferior muestra el canto superior del corte, las líneas punteadas muestran la zona donde se realizó la medición de dureza a comparar con la obtenida con el simulador.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Respuesta térmica experimental de las placas de acero 1045.

En esta sección se muestra el análisis de las curvas temperatura vs tiempo (respuesta térmica) obtenidas experimentalmente. Como se describió en el capítulo anterior, las respuestas térmicas se adquirieron con una frecuencia de 10 lecturas por cada termopar. Cabe mencionar que el sistema de adquisición de datos permite que las lecturas para los cuatro termopares se realicen simultáneamente. La Figura 4.1 muestra los perfiles temperatura vs tiempo en una placa de acero 1045 obtenidas para las posiciones correspondientes a los termopares TC1, TC2, TC3 y TC4, (ver Figura 3.1). La placa se calentó hasta una temperatura de 800 °C y se templó con agua a 43 °C. El gasto del medio de enfriamiento es de 23 LPM, y la placa se colocó a una distancia de 22 cm con respecto a la boquilla.

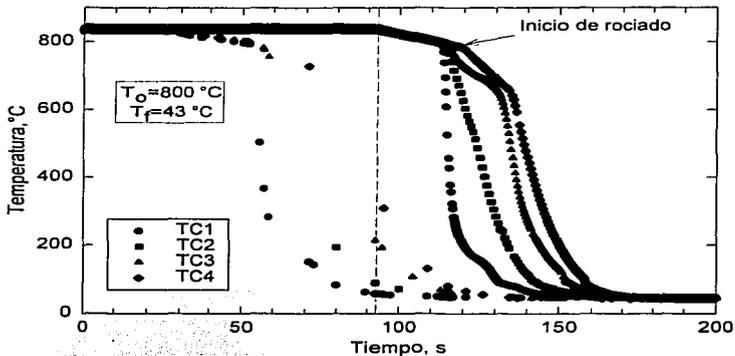


Figura 4.1.-Respuesta térmica (no filtrada) en la posición de los termopares TC1, TC2, TC3 y TC4, para una placa templada desde 800°C con agua a 43°C .

Con respecto a la Figura 4.1 se observa que:

- Los puntos dispersos, alejados de la respuesta térmica de cada uno de los termopares, son el ruido eléctrico generado durante el temple.
- Se distinguen tres zonas, correspondientes a diferentes tipos de enfriamiento.
- La primera zona, que es la línea recta arriba de 800°C durante los primeros 90 s, aproximadamente, corresponde al tiempo al que la placa permanece aún dentro del horno.
- La siguiente zona, correspondiente a los siguientes 30 s, refleja el enfriamiento por radiación, principalmente, durante el transporte desde el horno y hasta el instante del primer impacto con agua.

- La última zona es la respuesta térmica de la placa, en las posiciones de los termopares durante el temple.

La respuesta térmica (temperatura vs. tiempo) obtenida directamente del temple con el sistema de adquisición de datos muestra ruido debido al movimiento del sistema, tanto durante el transporte de la placa como durante el propio temple con rociado de agua. Para poder realizar la comparación de los perfiles experimentales y los simulados, se tiene que eliminar el ruido experimental de los perfiles y eliminar los datos antes de que se inicie el primer impacto de agua sobre la superficie a templar. Por esto los perfiles experimentales que se compararán con los simulados, se modifican eliminándoles el ruido. Los datos que muestran ruido se eliminaron manualmente.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

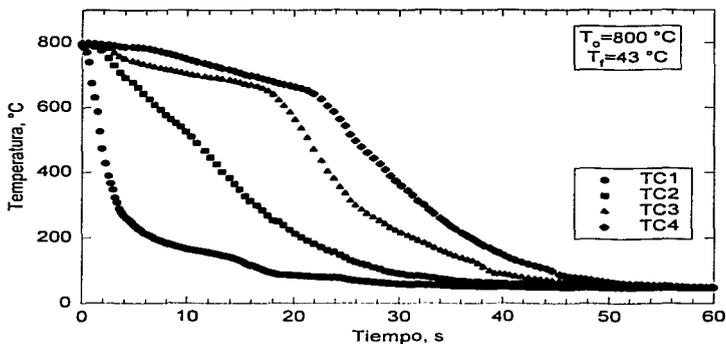


Figura 4.2.-Respuesta térmica (filtrada) en la posición de los termopares TC1, TC2, TC3 y TC4, de una placa templada desde 800°C con agua a 43°C. El eje de las abscisas se ha redefinido para que el origen coincida con el inicio del temple.

Los siguientes puntos son observaciones comunes a todos los experimentos:

- Y Durante los primeros momentos de temple de las placas de acero AISI 1045, cuando el rocío de agua toca a la superficie que está frente a la esprea, se observa una gran cantidad de vapor de agua; ésta disminuye a medida que el tiempo de temple avanza. Nótese que las curvas de enfriamiento reflejan la presencia de esta capa de vapor de agua.
- Y También se debe mencionar que, debido al calentamiento, se forma una capa de óxido sobre toda la superficie de la placa. Pero en la superficie rociada esta capa se desprende debido al impacto de agua; mientras que

en la superficie contraria (la que solo esta expuesta al aire) la capa de óxido permanece intacta.

- Debido al temple las placas sufren deformación. Esta deformación hace que la placa tome una forma cóncava, tomando como punto de referencia la posición de la esprea.

La Figura 4.3 muestra la respuesta térmica, de una placa de acero 1045, en la posición de los cuatro termopares colocados en el interior de la placa (TC1, TC2, TC3 y TC4). Las condiciones experimentales son: la placa está colocada y centrada a 22 cm de la esprea, la temperatura inicial de la placa es de 800 °C, la temperatura del medio de temple es de 12 °C a un gasto de 23 LPM.

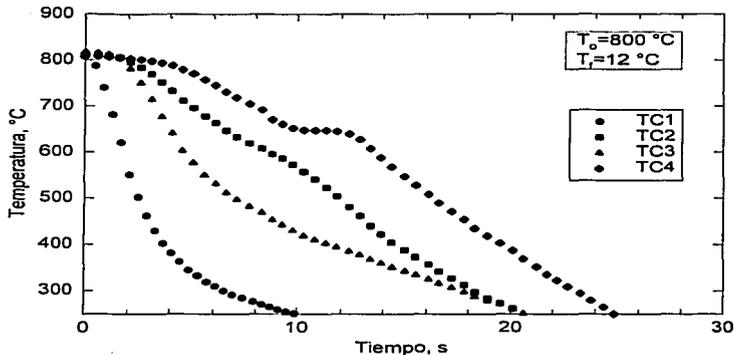


Figura 4.3.-Respuestas térmicas obtenidas en el temple por rociado con agua sobre placas de acero 1045, con agua a 12 °C.

Como se observa en la Figura 4.3, sobre las respuestas térmicas obtenidas para esas condiciones se puede decir que:

- Se presentan puntos donde la "generación" de calor debida a las transformaciones de fase difusionales es significativa, lo cual se refleja en la recalentamiento de las curvas temperatura vs. tiempo para los termopares TC3 y TC4.
- En la posición de los termopares TC1 y TC2 no se notan recalentamientos. Esto se debe a que la severidad del medio de enfriamiento provoca que la rapidez de extracción de calor sea tan grande con respecto al calor generado por la transformación, que este es imperceptible.

- γ En la posición del termopar TC3 se nota una ligera recalescencia, en el rango de 600 °C a 700 °C, indicio de que en ese punto se debe generar calor debido a transformación difusional.
- γ Para el mismo rango de temperaturas en la posición del termopar TC4 se nota claramente la recalescencia debida a una transformación de fase difusional.

La caracterización de las condiciones de fronteras térmicas se obtuvo, en un trabajo paralelo a este [13], a partir de la respuesta térmica de placas de acero inoxidable AISI 304, con las mismas dimensiones y sometidas a condiciones de enfriamiento iguales a las de las placas utilizadas en este trabajo (ver Tabla 3.1). La caracterización de las fronteras térmicas abarca la determinación de la distribución de flujo sobre la superficie rociada, la obtención del coeficiente combinado de convección y radiación de la frontera respectiva aplicando un algoritmo de solución del problema inverso de conducción de calor (IHCP, por sus siglas en inglés) con un modelo unidireccional con dos fronteras activas y la validación del coeficiente de convección, resolviendo el problema directo de conducción de calor (DHCP) con un modelo tridimensional de la placa rociada, utilizando el software DEFORMTM 3D- HT [14].

Considerando que la distribución de flujo de agua obtenida es simétrica, y los resultados arrojados durante la caracterización de la frontera térmica, se decidió colocar los termopares como se indica en la Figura 3.1. Una de las conclusiones resultantes de la caracterización de las condiciones de frontera fue que la ubicación de áreas de aplicación válida de los coeficientes de convección fuera

por zonas, como se indica en la Figura 4.4. Esta distribución se aplicó tanto para la superficie que se roció como para la superficie que se enfrió al aire. En el presente trabajo se considera únicamente la zona central.

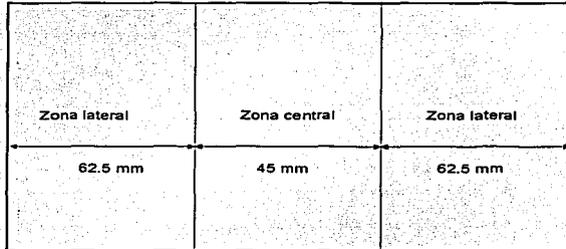


Figura 4.4.- Zonas de aplicación de coeficientes de transferencia de calor por convección para la superficie rociada y la no rociada de las placas de acero AISI 1045.

Las respuestas térmicas, bajo condiciones de enfriamiento similares, del acero AISI 304 y del AISI 1045 son diferentes, como se muestra en la Figura 4.5. En esta figura se compara la respuesta térmica en la posición de los termopares TC1, TC2, TC3 y TC4 en las placas de los dos diferentes aceros. Debe considerarse que la distancia promedio del centro del barreno a la superficie exterior más próxima es de 2.8 mm y de 2.5 mm para la placa de acero AISI 1045 y AISI 304 respectivamente. En los dos casos la temperatura de inicio de rociado de agua es de 800 °C, mientras que la temperatura del medio de temple es de 43 °C. La distancia del centro geométrico de la placa a la espreea es de 22 cm y el gasto del medio de enfriamiento es de 23 LPM.

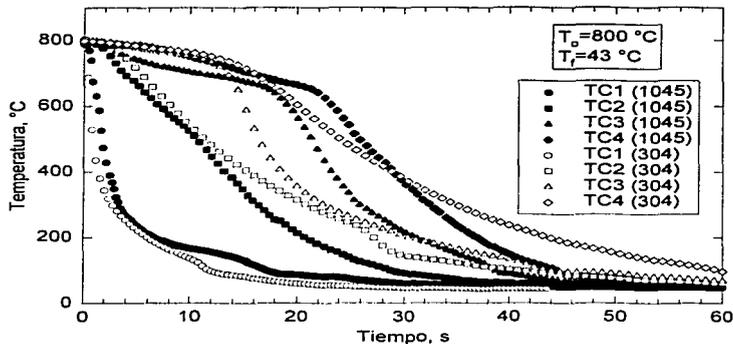


Figura 4.5.- Comparación de la respuesta térmica en placas de acero AISI 304 (líneas) y AISI 1045 (símbolos) calentadas a 800 °C y templadas por rociado con agua a 43 °C .

Con respecto a la Figura 4.5 podemos decir que:

- Cabe hacer notar que el control de las condiciones de experimentación de temple del acero AISI 1045 fueron similares a las que se tuvieron para el acero AISI 304. Se tuvo cuidado de que las condiciones para el proceso fueron lo más rigurosas posible.
- En los termopares del centro (TC1 y TC2) las rapidezces de enfriamiento del acero AISI 1045 y AISI 304 son similares. Esta similitud se da alrededor de los primeros 9 s, tiempo en el cual el TC1 registra temperaturas debajo de 200 °C y el TC2 temperaturas de aproximadamente 500 °C .

- Aunque las rapidezces de enfriamiento de los termopares que están a 45 mm del centro (TC3 y TC4) son similares al inicio del enfriamiento, la rapidez de enfriamiento en la posición de los termopares TC3 y TC4, en el acero AISI 1045, se mantienen a la misma magnitud por más tiempo que en el acero AISI 304.
- Lo anterior es debido a la formación de la capa de óxido sobre la superficie, tanto rociada como no rociada, la cual no tiene una conductividad tan buena como el metal. Por lo tanto la transferencia de calor se ve disminuida hasta que esta capa de óxido se desprende del metal, es entonces cuando el incremento de la rapidez de transferencia de calor se incrementa súbitamente. Al final la capa de óxido que permanece adherida a la placa es la de la superficie no rociada.
- Por otro lado, la cantidad de vapor que se ve durante la experimentación es mayor en el acero AISI 1045 que en el acero AISI 304, lo cual influye en que la rapidez de transferencia de calor por convección permanezca en magnitudes más bajas respecto al caso en que no se presentara esa misma cantidad de vapor.
- Las observaciones anteriores son algunas de las razones del porque es que la rapidez de enfriamiento en la posición de los termopares TC3 y TC4 en el caso del acero AISI 304 aumentan repentinamente alrededor de los 15 s mientras que en el acero AISI 1045 este incremento repentino de rapidez se da hasta los 20 s.

Basándose en estas observaciones, el análisis de resultados sólo se realiza para la zona central. Debido a las diferencias observadas en las diversas respuestas térmicas, se decidió tomar a los coeficientes de transferencia de calor originales [13] como base, con algunas modificaciones para ajustar mejor las predicciones. Las gráficas de algunos de los coeficientes de convección en función de la temperatura de superficie, que se decidió aplicar para simular los procesos de temple, se muestran en las figuras 4.6 a 4.13. En todos los casos el gasto del medio de enfriamiento fue de 23 LPM, y la placa se colocó a una distancia de 22 cm con respecto a la boquilla. Las condiciones que varían son la temperatura inicial de la placa y la temperatura del medio de enfriamiento.

Como se mencionó, para la simulación de los procesos de temple de las probetas de acero 1045 se consideran dos condiciones de frontera, y es a partir de un modelo unidireccional con dos fronteras activas como se caracterizaron las dos condiciones de frontera térmicas sobre una placa de acero AISI 304. Las Figuras 4.6, 4.8, 4.10 y 4.12 muestran los coeficientes de transferencia de calor por convección (h_{tc}) caracterizados sobre la zona central de la superficie rociada en cada una de las placas de acero AISI 304 (h_{c1} original), sometidas a las diferentes condiciones de enfriamiento que se muestran en la Tabla 3.1. En la misma figura se muestra el h_{tc} para la misma zona con el que se simuló el temple de la placa de acero AISI 1045, en condiciones similares al enfriamiento del acero AISI 304 (h_{c1} modificado). La modificación al h_{c1} se realizó al observar que al aplicar directamente el original en la simulación se obtenían respuestas térmicas desplazadas hacia la derecha, con respecto a las experimentales. Esto es, el

enfriamiento simulado no ocurría con suficiente rapidez. En las Figuras 4.7, 4.9, 4.11 y 4.13 se muestra el coeficiente de transferencia de calor para la zona central de la superficie enfriada al aire (h_{c2}), que complementa la entrada de las condiciones de frontera al modelo unidireccional con dos fronteras activas. Nótese que los coeficientes de transferencia de calor están dados en las unidades que acepta el software DEFORM™ 3D-HT.

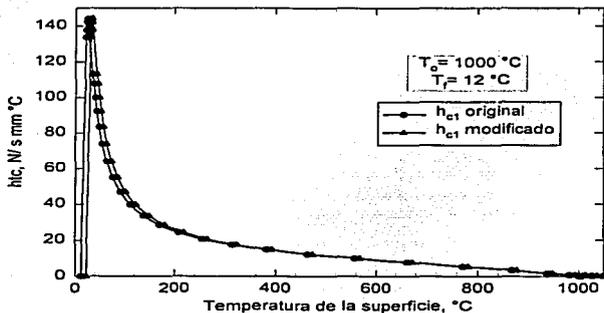


Figura 4.6.- Coeficiente de transferencia de calor (h_{tc}) aplicado sobre la zona central de la superficie rociada con agua, h_{c1} , original (círculos) y modificado (triángulos), para la simulación del temple desde 1000 °C con agua a 12 °C.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

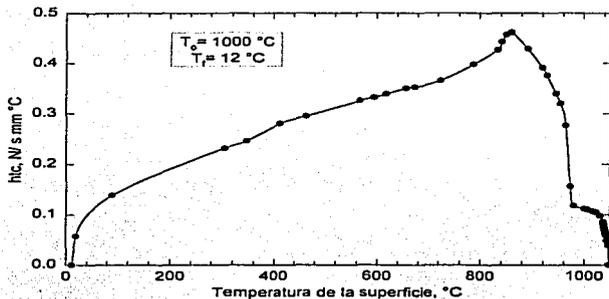


Figura 4.7.- Coeficiente de transferencia de calor (htc) para el enfriamiento al aire (zona central), h_{c2} , para la simulación del temple desde 1000 °C con agua a 12°C.

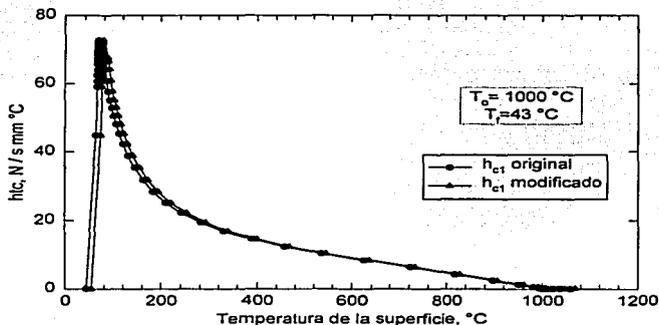


Figura 4.8.- Coeficiente de transferencia de calor (htc) aplicado sobre la zona central de la superficie rociada con agua, h_{c1} , original (círculos) y modificado (triángulos), para la simulación del temple desde 1000 °C con agua a 43°C.

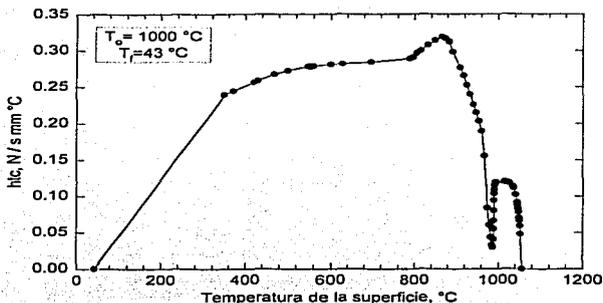


Figura 4.9.- Coeficiente de transferencia de calor (h_{tc}) para el enfriamiento al aire (zona central), h_{c2} , aplicado en la simulación del temple desde 1000 °C con agua a 43°C.

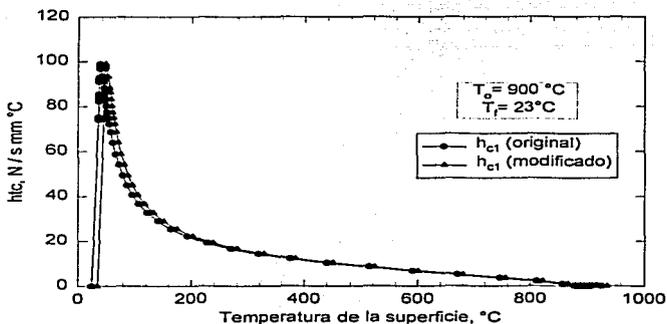


Figura 4.10.- Coeficiente de transferencia de calor (h_{tc}) aplicado sobre la zona central de la superficie rociada con agua, h_{c1} , original (círculos) y modificado (triángulos), para la simulación del temple desde 900 °C con agua a 23°C.

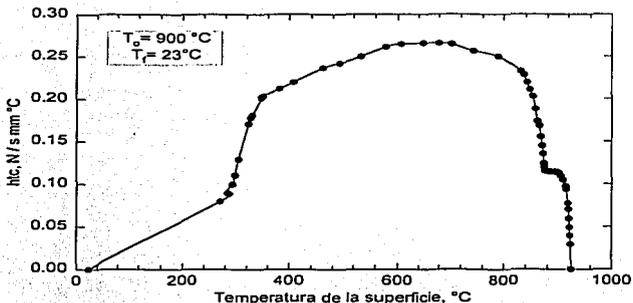


Figura 4.11.- Coeficiente de transferencia de calor (htc) para enfriamiento al aire (zona central), h_{c2} , para la simulación del temple desde 900 °C con agua a 23 °C .

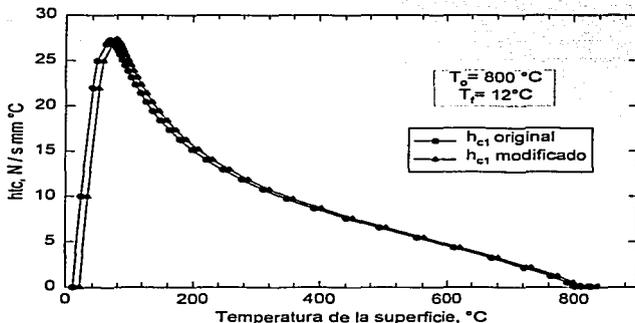


Figura 4.12.- Coeficiente de transferencia de calor (htc) aplicado sobre la zona central de la superficie rociada con agua, h_{c1} , original (círculos) y modificado (triángulos), para la simulación del temple desde 800 °C con agua a 12 °C .

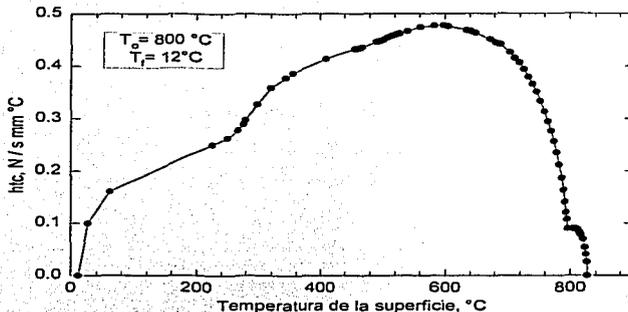


Figura 4.13.- Coeficiente de transferencia de calor (htc) para enfriamiento al aire (zona central), h_{c2} , para la simulación del temple desde 800 °C con agua a 12°C.

De la Figura 4.6 a la Figura 4.13 se puede observar lo siguiente:

- Para todos los casos de temple, el coeficiente de transferencia de calor sobre la zona central de la superficie rociada (h_{c1}) se desplazó ligeramente hacia arriba para lograr que la rapidez de enfriamiento, cerca de los 700 °C, experimental y simulada tuvieran magnitudes similares.
- Para todos los casos de temple, el coeficiente de convección central sobre la superficie enfriada al aire (h_{c2}) caracterizado es el mismo que se introduce a la simulación del proceso de temple, es decir no se modificó.
- Note que la magnitud de los coeficientes de transferencia de calor sobre la cara no rociada (h_{c2}) es mucho menor que la de los coeficientes de transferencia de calor sobre la superficie rociada (h_{c1}).

- La magnitud de h_{c1} es mucho mayor a la magnitud de h_{c2} .
- El máximo alcanzado por h_{c1} se da a temperaturas por debajo de los 100 °C, mientras que el máximo alcanzado por h_{c2} se da a altas temperaturas (por arriba de 500 °C).

4.2 Microestructura y dureza finales de las placas de acero AISI 1045 templadas.

Debido a las condiciones del enfriamiento del temple por rociado, se espera una variación de microestructura desde la superficie rociada hacia la superficie que no se roció. Sobre la superficie rociada se deben entonces tener los mayores valores de dureza, mientras que en la superficie opuesta se debe tener los menores valores de dureza.

Las Figuras 4.14 y 4.15 muestran las microestructuras típicas observadas en todas las placas, cerca de la superficie rociada y cerca de la superficie no rociada, respectivamente.

La Figura 4.14 muestra una microestructura martensítica típica de zonas cercanas a la superficie que recibió el impacto de agua. Esta microestructura se obtuvo del canto superior del corte realizado a la placa (ver Figura 3.10), en la zona que está cerca de la posición del termopar TC1.

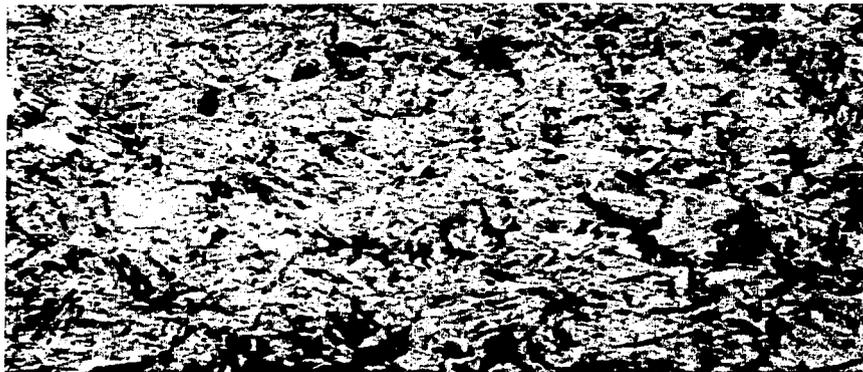


Figura 4.14.- Microestructura típica de una zona cercana a la superficie rociada, en la zona donde se midió la respuesta térmica de la placa con los termopares TC1 o TC3. El ataque químico de la superficie es con Nital No. 2 y esta tomada a 300X.

De la Figura 4.14 podemos decir que:

- Se observa una microestructura de forma acicular, común de las estructuras martensíticas.
- La dureza promedio en la zona correspondiente a esta microestructura es de 55 HRC.

La Figura 4.15 muestra la microestructura que se obtuvo en la superficie no expuesta al rocío de agua. Esta microestructura es común a todas las placas en esa posición. Esta microestructura se tomó del canto superior del corte realizado a la placa (ver Figura 3.10), cerca de los termopares TC2 o TC4.



Figura 4.15.- Microestructura típica de una zona cercana a la superficie enfriada al aire, en la zona donde se midió la respuesta térmica de la placa con los termopares TC2 o TC4. El ataque químico de la superficie es con Nital No. 2 y esta tomada a 300X.

Con respecto a la Figura 4.15 podemos decir que:

- Se observan granos de perlita (gris) sobre una matriz ferrítica (blanca).
- La dureza de zonas con microestructura de este tipo varía de 20 a 30 HRC.

La Figura 4.16 muestra los perfiles de dureza, a través de la placa, tanto para la zona central como para las posiciones localizadas a 45 mm del centro de la placa. Nótese que el origen corresponde a la superficie no rociada. Los perfiles de dureza que muestran las máximas durezas en la superficie sometida a temple y una disminución gradual de valores de dureza, a través del espesor de la probeta, hacia la superficie enfriada al aire.

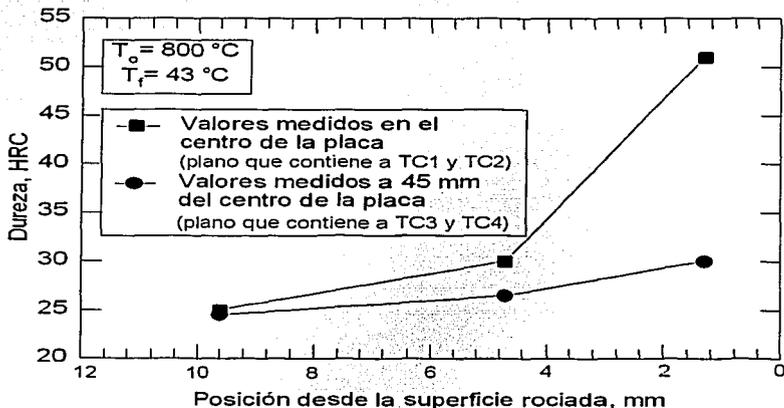


Figura 4.16.-Perfil de dureza (Rockwell C) medido en dos planos: uno que contiene a los termopares TC1 y TC2 (cuadros) y otro que contiene a los termopares TC3 y TC4 (círculos), para una placa templada desde 800°C hasta 43 °C. La posición 0 mm de espesor corresponde a la superficie no rociada y la posición 12 mm de espesor corresponde a la superficie rociada con agua.

En la Figura 4.16 se observa lo siguiente:

- Las mayores durezas se presentan en la zona central cercana a la superficie rociada; las metalografías mostraron que en esta posición predomina la martensita.
- El decremento de dureza es hacia la superficie enfriada al aire, donde se observan microestructuras correspondientes a fases de transformación difusional.
- Entre los 6 mm y los 12 mm de espesor se observan diferencias entre las mediciones tomadas en el centro de la placa con respecto a las realizadas a 45 mm del centro de la placa. En cambio para posiciones que se encuentran más cerca de la superficie no rociada, las durezas son similares en el centro que las que están a 45 mm del mismo.
- Como se ve, la distribución de los perfiles de dureza ocurre tanto en el grosor de la placa como en la longitud de la placa. El área de mayor dureza se encuentra dentro de la zona central de la placa sobre la superficie rociada, correspondiente a la zona donde se obtuvieron las mayores densidades de la distribución de flujo del medio de temple y las mayores densidades de flujo de calor.

4.3 Deformación.

En la Figura 4.17 se muestra un ejemplo de la deformación sufrida por las placas durante el temple. El ejemplo es para la placa calentada a $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ y templada por rociado con agua a $23\text{ }^{\circ}\text{C}$. Las superficies representadas en esta figura se forman con los puntos que se marcaron en la guía de posiciones (de acrílico), localizados en las intersecciones de una cuadrícula de $27\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ (ver Figura 3.6). Estas áreas representan a la superficie, rociada con agua a $23\text{ }^{\circ}\text{C}$, antes y después del temple.

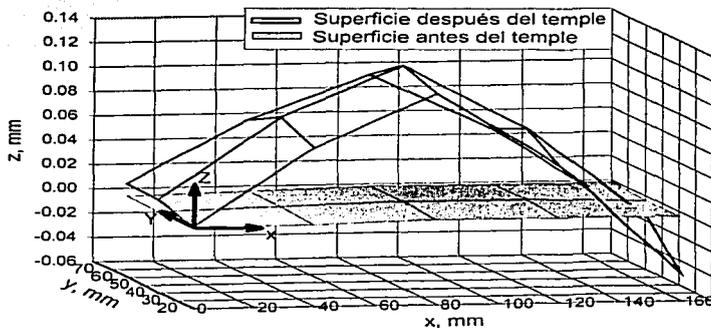


Figura 4.17.- Comparación de la geometría de la superficie rociada de una placa templada desde $900\text{ }^{\circ}\text{C}$, con agua a $23\text{ }^{\circ}\text{C}$, antes y después del temple. El marco de referencia se localiza en la esquina (0,0) de la superficie rociada. El primer punto medido se localiza en la coordenada (11 mm, 37 mm) de la misma superficie.

En la Figura 4.17:

- El desplazamiento después del temple se da en sentido contrario a la dirección del flujo de agua. El máximo desplazamiento, de 0.10 mm, se da en el centro geométrico de la placa.
- Se notan desplazamientos negativos, debido a que el plano formado por los puntos de contacto con los tres balines y la placa no cubre totalmente al plano de la superficie de la placa que se pone en contacto con los mismos.
- Note que las magnitudes en la dirección z son muy pequeñas (centésimas de mm). Por la escala de la gráfica, da la impresión de una deformación muy pronunciada.

Bajo diferentes combinaciones de temperatura de inicio y temperatura del medio de temple, las placas responden con diferentes grados de deformación, como se muestra en la Figura 4.18. En esta figura se comparan las posiciones centrales de la superficie rociada (plano xz), a lo largo de la placa, correspondientes a la línea central de la guía de posiciones en la placa de acrílico.

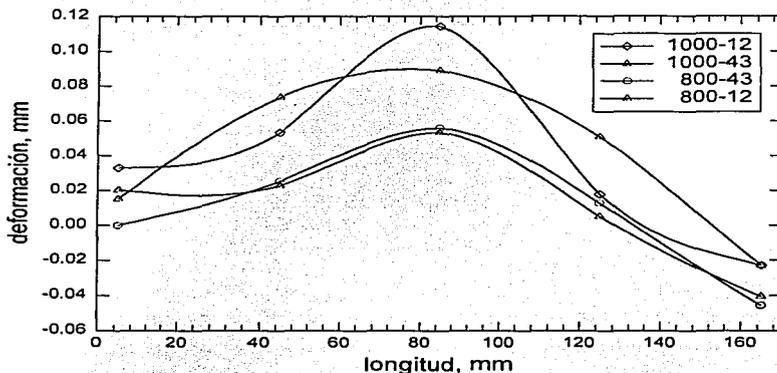


Figura 4.18.- Comparación de las deformaciones finales en placas sometidas a diferentes condiciones de temple, marcadas en el recuadro superior derecho, en el cual se indican las parejas: temperatura de calentamiento - temperatura del medio de temple, ambas dadas en °C.

De la Figura 4.18 se desprende que:

- Y Las mayores deformaciones se presentan cuando la temperatura del medio de temple es de 12 °C.
- Y La máxima deformación ocurre para la mayor diferencia entre la temperatura de calentamiento y la del medio de temple.
- Y Considerando la temperatura del medio de temple constante a 12 °C, la deformación de la placa es proporcional al aumento de la temperatura de calentamiento de la placa. Esto se explica en base a que la diferencia de temperatura entre la temperatura de ebullición del medio de temple y la

temperatura a la que se encuentra éste es mucho mayor (88 °C) que en los otros casos.

- Considerando la temperatura del medio de temple constante a 43 °C, el cambio en la temperatura de calentamiento no causa un efecto notable en la deformación de la placa.

4.4 Validación de las respuestas térmicas simuladas en DEFORM™3D-HT

Las condiciones de frontera térmica, caracterizados por los coeficientes de transferencia de calor mostradas en las figuras 4.6 a 4.13, fueron aplicadas en el paquete comercial DEFORM™3D-HT [14], que resuelve el problema directo de conducción de calor (DHCP) aplicando el método de *elemento finito*. La formulación matemática del DHCP se presenta en el apéndice B.

En las Figuras 4.19 a 4.21 se muestra la comparación entre las curvas de enfriamiento experimentales y las simuladas en la posición de los termopares centrales, cerca de la superficie rociada y cerca de la superficie no rociada, TC1 y TC2 respectivamente, para las placas de acero AISI 1045 sometidas a condiciones de temperatura de calentamiento y temperatura del medio de temple de: 1) 1000 °C a 12 °C (Figura 4.19), 2) 900 °C a 23 °C (Figura 4.20) y 3) 800°C a 43 °C (Figura 4.21). Para todos los casos el gasto del medio de enfriamiento es de 23 LPM, y las placas se colocaron a una distancia de 22 cm de la boquilla. Todas las respuestas térmicas están trazadas sobre el diagrama isotérmico (TTT) que maneja DEFORM™3D-HT para el acero AISI 1045.

FALLA DE ORIGEN

Las propiedades termofísicas y el diagrama de transformación de fase del acero AISI 1045, utilizadas para la simulación, se tomaron de la base de datos del mismo software. Los valores de las propiedades termofísicas se muestran en el apéndice. El incremento de tiempo para la simulación fue de 0.05 s, con un error de convergencia de 0.1, utilizando una malla de 10,000 elementos finitos de geometría tetraédrica.

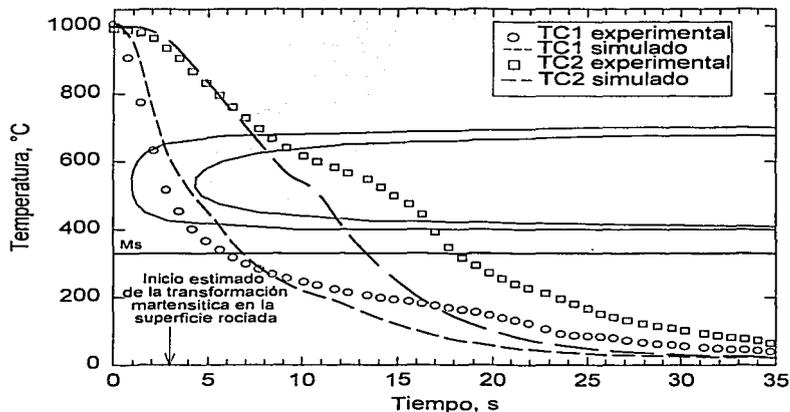


Figura 4.19.-Rapidez de enfriamiento experimental (símbolos) y simulada (líneas), en la posición de los termopares TC1 y TC2, para la placa templada desde 1000 °C con agua a 12 °C.

En la Figura 4.19 se observa lo siguiente:

- La respuesta térmica experimental y simulada es similar en los primeros 7 s, después de los cuales las respuestas térmicas se alejan, solo coincidiendo al final del enfriamiento.
- El inicio estimado de la transformación no difusional, señalado por la flecha, se refiere al inicio de la transformación sobre la superficie rociada. Aunque en el resultado de la simulación se indique que a este tiempo también inicia en la posición de TC2, en la grafica se ve que inicia después de 5 s. Este puede ser un error de programación en el paquete utilizado.
- Se debe hacer notar que aun cuando las respuestas térmicas en la posición del termopar TC1, experimental y simulada, cruzan la "nariz" del diagrama TTT utilizado por DEFORMTM3D-HT, marcado por la flecha, la microestructura y dureza finales en la posición TC1 corresponden a una fase completamente martensítica.
- Además la recalescencia debida a una transformación de fase difusional es más notable en la posición del termopar TC2. El inicio de esta transformación experimental coincide con el de la respuesta térmica simulada; sin embargo esta transformación es de mayor duración experimentalmente de la que se obtiene en la simulación, lo que hace que la respuesta térmica experimental y simulada se alejen a partir de ese momento. La fracción transformada a perlita vs. tiempo, predichas por DEFORMTM3D-HT, para la posición de los termopares TC1 y TC2 se muestra en la Figura 4.20.

- Note que, además, la recalcificación registrada experimentalmente (y la simulada) no se encuentran entre las líneas del inicio (0.01 de fracción transformada) y final de la transformación (0.99 de fracción transformada) del diagrama TTT ubicada en la base de datos de DEFORMTM3D-HT.

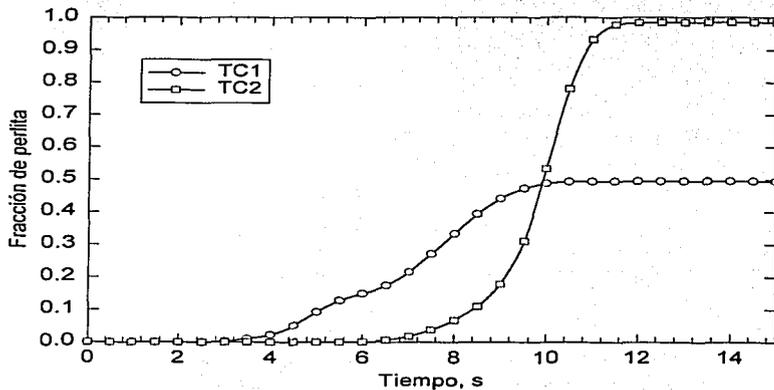


Figura 4.20.- Cinética de la transformación difusional simulada con DEFORMTM3D-HT, en la posición de los termopares TC1 y TC2, para la placa templada desde 1000 °C con agua a 12 °C.

- El inicio de la transformación perlítica en la posición del termopar TC1 es cerca de los tres segundos, y alcanza el máximo de 0.5 de fracción transformada a los 11 segundos.

- Para la posición del termopar TC2, el inicio de la transformación es cerca de los 7 segundos y alcanza casi una transformación total a los 12 segundos.

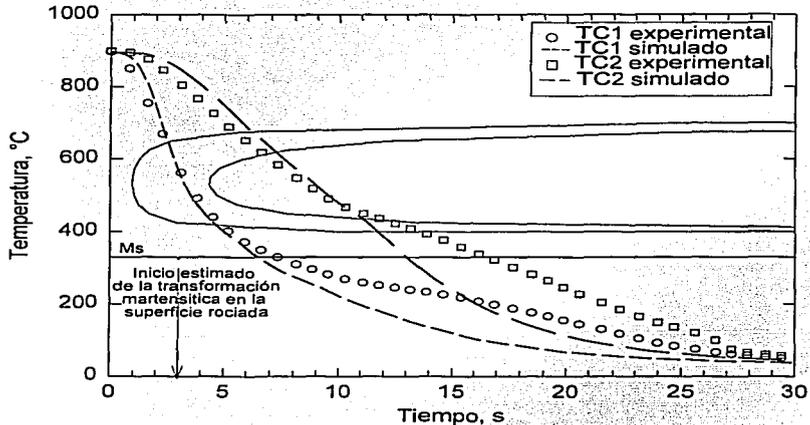


Figura 4.21.- Rapidez de enfriamiento experimental (símbolos) y simulada (líneas), en la posición de los termopares TC1 y TC2, para la placa templada de 900 °C a 23 °C.

Acerca de la Figura 4.21 podemos decir lo siguiente:

- La mayor similitud de la respuesta térmica experimental y simulada se da en los primeros 10 s.

TEST FALLA DE ORIGEN

- Y Se vuelve a notar que la rapidez de enfriamiento en la posición del termopar TC1 cruza el diagrama TTT del simulador y logra alcanzar parte de la transformación no difusional, aunque experimentalmente se observa una mayor fracción de martensita que la estimada por el simulador.
- Y La recalescencia debida a transformaciones de fase es poco perceptible en las respuestas térmicas tanto experimentales como simuladas.
- Y El inicio estimado de la transformación no difusional, señalado por la flecha, se refiere al inicio de la transformación sobre la superficie rociada.

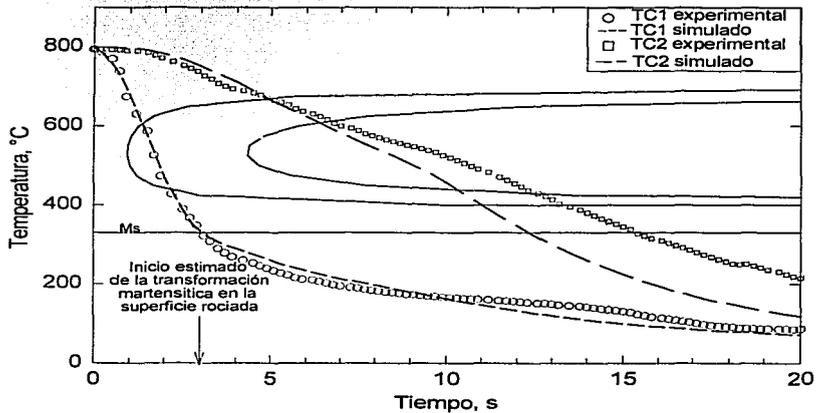


Figura 4.22.- Rapidez de enfriamiento experimental (símbolos) y simulada (líneas), en la posición de los termopares TC1 y TC2, para la placa templada de 800 °C a 43 °C.

Las observaciones a la Figura 4.22 son las siguientes:

- La similitud de la respuesta térmica experimental y simulada en los termopares TC1 y TC2 se da durante los primeros 7 s; después, esta similitud en TC2 disminuye y en TC1 permanece el resto de tiempo.
- En este caso la rapidez de enfriamiento en la superficie y la rapidez de enfriamiento en la posición del TC1 son prácticamente la misma (aunque no se muestre en la figura), lo que hace que el inicio estimado de transformación martensítica sea prácticamente el mismo para la superficie que para la posición del termopar TC1.

Observaciones generales a las figuras 4.18 a 4.20.

- En todos los casos, la rapidez de enfriamiento (pendiente de la curva temperatura vs. tiempo) calculada y experimental es muy similar alrededor de los 700 °C en ambas posiciones (TC1 y TC2) al mismo tiempo. Basándose en esto se considera que el modelo ha sido validado.
- No se debe olvidar que en la simulación no se considera la formación de la capa de óxido sobre las superficies de la placa, haciendo notar que esta capa permanece adherida siempre sobre la superficie enfriada al aire.

4.5 Simulación de temple de 1000°C a 23 °C en una placa de acero AISI 1045.

Una vez validado, el modelo puede aplicarse para simular diversas condiciones de temple, como se ilustra en el ejemplo siguiente, en el que se muestra la respuesta térmica simulada en DEFORMTM3D-HT, utilizando las condiciones de frontera respectivas, para una placa de acero 1045 calentada hasta 1000 °C y enfriada por rociado con agua a 23 °C. Considerando las condiciones del sistema experimental, como lo es la separación de la boquilla a 22 cm, con un gasto del medio de enfriamiento de 23 LPM. La rapidez de enfriamiento se obtiene para las posiciones equivalentes a las que se utilizaron en los experimentos, es decir, sobre la superficie rociada, superficie no rociada y a 2 mm con respecto a cada una de estas superficies (ver Figura 3.1).

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

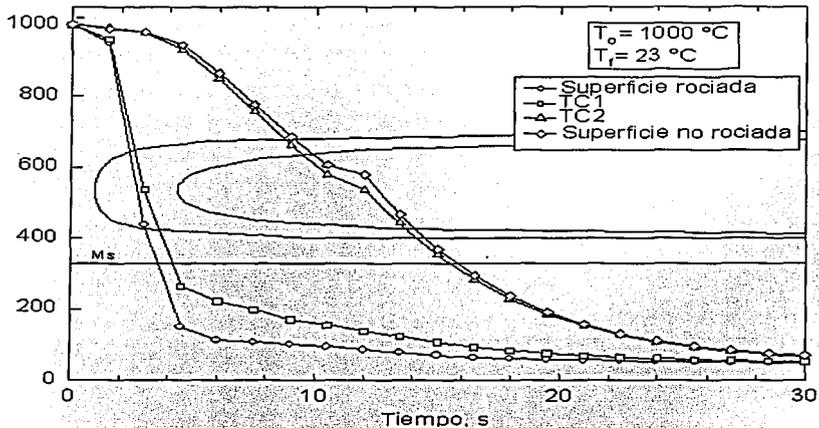


Figura 4.23.- Resposta térmica simulada obtida para uma placa de aço AISI 1045, aplicando os coeficientes de transferência de calor caracterizados com placas de aço AISI 304, em as posições mostradas em a Figura 3.5.

- La rapidez de enfriamiento para la superficie rociada provoca que la transformación martensítica inicie poco antes de 4 s.
- Tanto para la superficie rociada como para la posición la posición de TC1 no se nota recalentamiento, mientras que para la posición TC2 y la superficie no rociada ésta sí es notable.
- Como resultado de la simulación, se tiene 80 % de martensita sobre la superficie rociada, con una dureza de 53.7 HRC; para la superficie opuesta se tiene 99 % de perlita con una dureza de 29.5 HRC.

4.6 Discusión de resultados

El temple por rociado es un problema complejo, ya que la distribución de flujo, velocidad de impacto, formación de vapor durante el temple y formación de la capa de óxido son algunos de los aspectos que se engloban en el coeficiente de transferencia de calor por convección, que es la condición de frontera térmica del sistema. Esta condición de frontera es un factor determinante de cómo se lleva a cabo el enfriamiento dentro de la pieza, influyendo en la formación y distribución de las fases finales, las cuales generan los esfuerzos residuales responsables de la deformación final de la pieza tratada.

Para analizar la validez de los coeficientes de transferencia de calor por convección caracterizados sobre acero AISI 304, aplicados a un acero AISI 1045, se realizan los siguientes pasos: 1) Se calculan la rapidez de enfriamiento (dT/dt) a cerca de 700 °C, experimental y simulada, en las posiciones de los termopares TC1 y TC2; 2) Con el valor de rapidez de enfriamiento del paso anterior se utiliza un diagrama CCT para aceros 1039-1046 reportado por Atkins [15] (ver Figura 4.24), para determinar el porcentaje de fases esperado de acuerdo a este diagrama. El diagrama se construyó con un tratamiento previo de rolado y una austenización a 850 °C. No menciona tamaño de grano, ni tiempo de austenización; 3) Se determina el porcentaje de fases correspondiente a la rapidez de enfriamiento experimental (mediante metalografía) y a la rapidez de enfriamiento simulada (mediante una aproximación numérica de dT/dt).

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

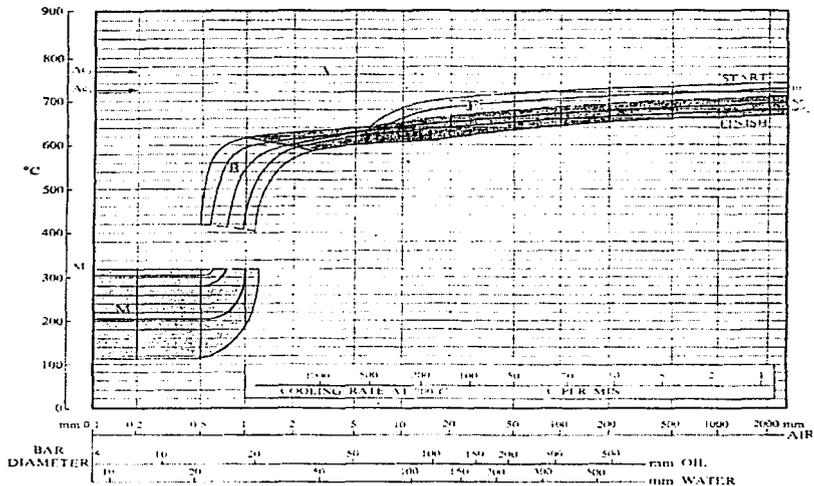


Figura 4.24.- Diagrama CCT para aceros 1039-1046 reportado por Atkins [15].

Las comparaciones de la rapidez de enfriamiento alrededor de los 700°C, en °C/s para cada uno de los casos de temple se muestran a continuación. A la rapidez de enfriamiento a la que se realiza la comparación, obtenida de los datos experimentales o de los obtenidos de la simulación, con la lectura del diagrama CT mostrado arriba, se le referirá como "lectura de CCT".

La nomenclatura para los cuadros comparativos es la siguiente:

T es la temperatura en °C.

$\left(\frac{dT}{dt}\right)_T$ es la rapidez de enfriamiento en $\frac{°C}{s}$ a la temperatura T

% FM es el porcentaje de fases no difusionales.

% FP es el porcentaje de fases difusionales.

Tabla 4.1.- Cuadro comparativo para el temple desde 1000 °C por rociado con agua a 12 °C.

Posición		T	$\left(\frac{dT}{dt}\right)_T$	$\left(\frac{dT}{dt}\right)_{700}$	% de FM	% de FP	HRC
TC1	experimental	690	-170		100		58
	lectura de CCT			-170	100		
	simulada	700	-166		85	15	54.6
TC2	lectura de CCT			-166	100		
	experimental	700	-44		10	90	28.6
	lectura de CCT			-44	32	68	
	simulada	704	-66		2	98	30
	lectura de CCT			-66	52	48	

- Aunque la rapidez de enfriamiento experimental en la posición TC1, difiere en sólo cuatro unidades de la rapidez de enfriamiento simulada, la fracción de martensita observada es poco mayor que la estimada por el simulador, pero coincide con la que se obtiene de la lectura del diagrama CCT.
- La dureza, medida y estimada, en ese punto difiere en menos de cuatro unidades.
- Para la posición TC2 la rapidez de enfriamiento experimental y simulada difiere en veinte unidades, pero la fracción de perlita observada y estimada en la

simulación son similares; aunque ambas están por arriba de la lectura del diagrama CCT.

- En la posición TC2 la dureza medida y estimada difiere en menos de dos unidades.
- En esta placa se observa la mayor fracción estimada de martensita en la posición de TC1; que es cerca de la zona central de la superficie rociada. Y es en esta zona donde se registra la mayor magnitud de deformación de la placa, haciendo notar que es esta placa la que presenta la mayor deformación en esa zona (ver Figura 4.18).

Tabla 4.2.- Cuadro comparativo para el temple desde 1000 °C por rociado con agua a 43 °C.

Posición		T	$\left(\frac{dT}{dt}\right)_r$	$\left(\frac{dT}{dt}\right)_{700}$	% de FM	% de FP	HRC
TC1	experimental	704	-217		100		57
	lectura de CCT			-217	100		
	simulada	712	-303		72	28	52
	lectura de CCT			-303	100		
TC2	experimental	700	-39		15	85	30
	lectura de CCT			-39	38	62	
	simulada	703	-62			98	30.5
	lectura de CCT			-62	52	48	

- En la posición TC1 la diferencia entre la rapidez de enfriamiento experimental vs simulada es de cerca de cien unidades. Y el porcentaje que se observa de martensita es mayor al 72 % estimado por el simulador, pero es igual a la lectura en el diagrama CCT. Sin embargo la diferencia de dureza, medida y estimada, es de sólo cinco unidades.

- Para el caso de la posición TC2, la rapidez de enfriamiento experimental es menor en más de veinte unidades de la simulada, la cual estima una fracción de perlita similar a la que se observa y siempre mayor de la lectura del diagrama CCT.
- Para esta posición la dureza medida y estimada son prácticamente la misma.
- Bajo estas condiciones de enfriamiento, es la segunda placa con mayor deformación en la zona central de la superficie rociada (ver Figura 4.18); zona en la que tiene una fracción estimada de martensita ligeramente menor a las condiciones del temple desde 1000° con agua a 12 °C.

Tabla 4.3.- Cuadro comparativo para el temple desde 900 °C por rociado con agua a 23 °C.

Posición		T	$\left(\frac{dT}{dt}\right)_r$	$\left(\frac{dT}{dt}\right)_{700}$	% de FM	% de FP	HRC
TC1	experimental	707	-121		85	15	58
	lectura de CCT			-121	100		
	simulada	690	-180		73	27	50
	lectura de CCT			-180	100		
TC2	experimental	700	-54		15	85	29
	lectura de CCT			-54		100	
	simulada	707	-60			100	30
	lectura de CCT			-60	30	70	

- La diferencia en la rapidez de enfriamiento en la posición TC1 es de alrededor de sesenta unidades, aunque las fracciones de martensita experimental y simulada son similares, siempre están por abajo de las lecturas del CCT.
- La dureza experimental es de magnitud similar a la estimada por el simulador.

- Para estas condiciones de enfriamiento, la rapidez de enfriamiento experimental y simulada, en la posición de TC2 son similares, al igual que las fracciones estimadas de perlita.
- La dureza medida y estimada para la posición TC2 es prácticamente la misma.

Tabla 4.4.- Cuadro comparativo para el temple desde 800 °C por rociado con agua a 12 °C.

Posición		T	$\left(\frac{dT}{dt}\right)_r$	$\left(\frac{dT}{dt}\right)_{700}$	% de FM	% de FP	HRC
TC1	experimental	697	-121		85	15	52
	lectura de CCT simulada	698	-180	-121	100		
	lectura de CCT			-180	73	27	50
TC2	experimental	700	-54		15	85	25.5
	lectura de CCT simulada	700	-60		45	55	
	lectura de CCT			-60		99.7	30
	lectura de CCT			-60	51	49	

- A pesar de las sesenta unidades de diferencia en la rapidez de enfriamiento experimental y simulada en TC1, las fracciones de martensita son similares, pero por debajo de las lecturas en el CCT que estiman una transformación 100% martensítica.
- La dureza medida en la posición TC1, es de la misma magnitud que la estimada en la simulación.
- Para la posición TC2 se pudieron comparar las rapidezces de enfriamiento exactamente a los 700 °C y se ve que son de magnitud similar. Siendo las fracciones de perlita, observada y estimada, similares pero por arriba de las lecturas del diagrama CCT.

- Sin embargo la dureza estimada por el simulador es ligeramente mayor a la que se mide sobre la placa.
- La fracción de martensita en TC1 es similar a la que se obtiene en el temple de 1000 °C a 43 °C, pero la deformación de la placa es menor.

Tabla 4.5.- Cuadro comparativo para el temple desde 800 °C por rociado con agua a 23 °C.

Posición		T	$\left(\frac{dT}{dt}\right)_T$	$\left(\frac{dT}{dt}\right)_{700}$	% de FM	% de FP	HRC
TC1	experimental	706	-123		98	2	58
	lectura de CCT			-123	100		
	simulada	701	-135		85	15	55
	lectura de CCT			-135	100		
TC2	experimental	703	-47			90	29
	lectura de CCT			-47	40	60	
	simulada	700	-30			99	30
	lectura de CCT			-30		100	

- La rapidez de enfriamiento, experimental y simulada, en TC1 difiere en quince unidades.
- La fracción de martensita estimada por el simulador está por debajo de la que se observa y de la lectura del CCT, sin embargo la dureza, medida y estimada, son muy similares.
- Aunque en TC2 la rapidez de enfriamiento simulada es menor a la experimental, la magnitud de las fracciones de perlita, estimada y observada, es similar. Coincidiendo la fracción de perlita estimada con la lectura del CCT.
- La dureza medida y la estimada son iguales.

Tabla 4.6.- Cuadro comparativo para el temple desde 800 °C por rociado con agua a 43 °C.

Posición		T	$\left(\frac{dT}{dt}\right)_T$	$\left(\frac{dT}{dt}\right)_{700}$	% de FM	% de FP	HRC
TC1	experimental	674	-218		100		51
	lectura de CCT			-218	100		
	simulada	701	-179		80	20	48
	lectura de CCT			-179	100		
TC2	experimental	700	-32			90	25
	lectura de CCT			-32		100	
	simulada	700	-44			99.5	30
	lectura de CCT			-44	32	68	

- La rapidez de enfriamiento, experimental y simulada, en TC1 muestra que la fracción de martensita estimada y observada son congruentes con las lecturas del CCT.
- La dureza estimada por el simulador esta ligeramente por debajo de la medida.
- Para TC2, la rapidez de enfriamiento simulada es poco mayor a la experimental, pero la fracción de perlita es similar en los dos casos.
- Además la dureza estimada esta por arriba de la medida.
- La fracción de martensita es comparable con la que se obtiene con un temple de 1000°C a 12°C, aunque la deformación es similar a la del temple de 800°C a 43°C.

A pesar de que las condiciones de experimentación, tales como temperatura de austenización y tratamiento previo al temple, difieren a las condiciones marcadas en el diagrama CCT de la Figura 4.24, la fracción de fases predicha por este diagrama es similar a las fracciones observadas experimentalmente y a las

obtenidas por la simulación. Y es en los casos de la posición TC2 donde se observan las mayores diferencias de las comparaciones realizadas en las Tablas 4.1 a 4.6. Al comparar la dureza, reflejo de la formación y distribución de los constituyentes microestructurales, podemos decir que la simulación es correcta.

Se recomienda que en trabajos posteriores en la misma línea de investigación, se tenga un mayor control en el tiempo de austenización; puesto que puede ser una fuente de error en los resultados obtenidos. El tiempo de austenización influye en el tamaño de grano y este a su vez se relaciona de forma directa con la cinética de transformación de fase.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

Como resultado de aplicar un análisis metalúrgico (distribución microestructural, dureza y deformación) acompañado de la determinación las respuestas térmicas (temperatura vs. tiempo) experimentales y simuladas con DEFORM™3D-HT, sobre la zona central de placas de acero AISI 1045 templadas por rociado con agua, podemos concluir que:

- ✓ Bajo un sistema experimental idéntico, las fronteras térmicas caracterizadas durante el enfriamiento por rociado del acero AISI 304 son aplicables, con algunas modificaciones, a la simulación del temple por rociado del acero AISI 1045.
- ✓ Al relacionar las curvas de enfriamiento con los diagramas CCT, con el criterio de comparación de la rapidez de enfriamiento a 700 °C, la distribución microestructural estimada por el simulador es cualitativamente similar a la obtenida experimentalmente.
- ✓ La dureza es el parámetro con el que definimos claramente que la simulación es correcta, ya que los perfiles de dureza estimados y experimentales son prácticamente iguales.

- ✓ La máxima deformación, debida a los esfuerzos residuales de la pieza, después del temple se tiene con la mayor diferencia entre la temperatura de calentamiento (T_a) y la temperatura del medio de temple (T_f).
- ✓ La metodología que se sigue en el presente trabajo muestra que la aplicación de la ingeniería microestructural (fenómenos de transporte y transformaciones de fase) nos permite profundizar en el conocimiento del procesamiento térmico de los aceros.

Para la zona lateral (ver Figura 4.4) podemos concluir que:

- ✓ Bajo un sistema experimental idéntico, las fronteras térmicas caracterizadas durante el enfriamiento por rociado del acero AISI 304 no son aplicables a la simulación del temple por rociado del acero AISI 1045, debido a que la capa de óxido formada sobre la superficie del acero AISI 1045 hace que la transferencia de calor sea diferente al caso del acero AISI 304.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. A. Barreiro. *Tratamientos térmicos de los aceros*. Dossat Plaza de Santa Ana. 8va Edición. Madrid, 1974.
- [2] C. Chaussin y G. Hilly. *Metalurgia Tomo I, Aleaciones Metálicas*. Ediciones Urmo, 1975.
- [3] Ch. R. Brooks. *Principles of the Heat Treatment of Plain Carbon and Low Alloy Steels*. ASM International, 1996.
- [4] G. E. Totten, M.E. Dakins y R.W. Heins. *Cooling Curve Analysis of Synthetic Quenchants- A Historical Perspective*. J. Heat Treating, 6(2), 1988.
- [5] G. E. Totten, C.E. Bates y N.A. Clinton. *Handbook of Quenchants and Quenching Technology, Spray Quenching*. Ed. ASM International, 1993.
- [6] R. G. Stachowiak. *Development of a Controlled Cooling System at Stelco's 3760 mm Plate Mill*. Memorias del 35TH MWSP Conference, ISS-AIME, Vol. XXXI, 1994.
- [7] *Quenching and Carburising*. Memorias del Third International Seminar of the International Federation for Heat Treating and Surface Engineering, The Institute of Materials, Melbourne, 1991.
- [8] J. Bodin y S. Segerberg. *Measurement and Evaluation of the Quenching Power of Quenching Media for Hardening*. Memorias de la 1st International Conference on Quenching & Control of Distortion, U.S.A., ASM International, 1992.

- [9] J. Iyer, J.K. Brimacombe y E.B. Hawbolt. *Prediction of the Structure and Mechanical Properties of Control-Cooled Eutectoid Steel Rods*. Memorias del Mechanical Working & Steel Processing Conference XXII, U.S.A., 1984.
- [10] H. M. Tensi y A. Stich. *Possibilities and Limits to Predict the Quench Hardening of Steel*. Memorias de la 1st International Conference on Quenching & Control of Distortion, U.S.A., ASM International, 1992.
- [11] B. L. Bramfitt, R.L. Croos y D.P. Wirick. *Advanced In-Line Head Hardening of Rail*. Iron and Steel Making, Vol. , No. , 1995.
- [12] J. Bodin y S. Segerberg. *Benchmark Testing of Computer Programs for Determination of Hardening Performance*. Memorias de la 1st International Conference on Quenching & Control of Distortion, U.S.A., ASM International, 1992.
- [13] E. B. Montufar J. "Caracterización de la Extracción de Calor en una Placa de Acero Templada por Rociado de Agua". Tesis de licenciatura, UNAM, México D.F. 2003.
- [14] K. Arimoto, et al. *Development of Heat Treatment Simulation System DeformTM-HT*. Memorias de la 18 Heat Treating Conference, U.S.A., ASM International, 1999.
- [15] M. Atkins. *Atlas of Continuous Cooling Transformation Diagrams for Engineering Steels*. ASM & British Steel Corporation, 1980.

APÉNDICE A

Propiedades termofísicas y mecánicas, tomadas de la base de datos de DEFORMTM3D-HT, para el acero AISI 1045

Parámetro	Valor
Capacidad calorífica de la austenita	4.631 N mm ⁻² C ⁻¹
Capacidad calorífica de la aleación	4.631 N mm ⁻² C ⁻¹
Calor latente para la transformación austenita-perlita	595.36 N mm ⁻²
Calor latente para la transformación austenita-martensita	661.51 N mm ⁻²
Dureza de la austenita	20 HRC
Dureza de la perlita	30 HRC
Dureza de la martensita	60 HRC

Tabla 1.- Datos para la curva Jominy para el acero AISI 1045..

Distancia, mm.	Dureza, HRC
1.58	62
2.37	61
3.16	59
3.95	56
4.74	52
5.53	46
6.32	38
7.11	34
7.90	33
8.69	32
9.48	32
10.27	31
11.06	31
11.85	30
12.64	30
14.22	29
15.80	29
18.96	28
22.12	27
25.28	26
28.44	25
31.60	23
34.76	22
37.92	21

Expresión para el cálculo de fracción de martensita transformada.

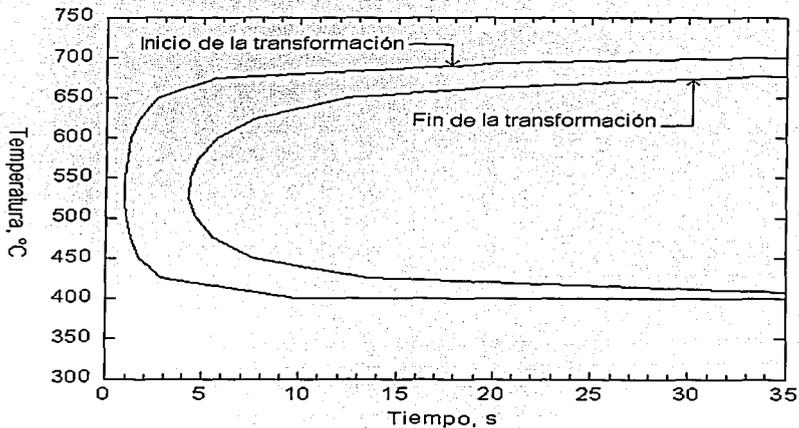
$$\xi_M = 1 - \exp(0.016 T - 5.18)$$

Donde T está dada en ° C.

El inicio de la transformación martensítica es a los 330 °C.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Diagrama Temperatura-Tiempo-Transformación isotérmico para el acero AISI 1045.



TESIS CON
FALLA DE COPIEN

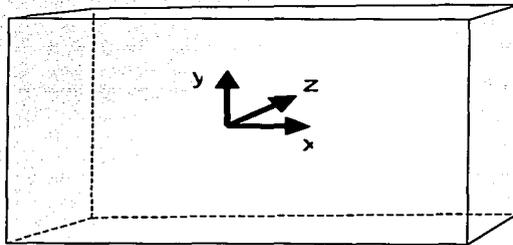
ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

APÉNDICE B

Modelo matemático que representa al temple por rociado del presente trabajo:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} \quad (\text{B.1})$$

Considerando al origen como se muestra en la siguiente figura, se pueden establecer las condiciones de frontera.



Considerando simetría en el plano yz en $x=0$:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad \forall \theta \quad (\text{B.2})$$

Además el enfriamiento en las superficies frontal y posterior ocurre por un coeficiente combinado de convección y radiación ($h_{cn} = h_c + h_r$), es decir:

$$\text{en } z=0 \text{ (cara rociada):} \quad -k \frac{\partial T}{\partial z} = -h_{c1}(T_f - T), \quad t > 0 \quad (\text{B.3})$$

$$\text{en } z=L_z \text{ (cara no rociada):} \quad -k \frac{\partial T}{\partial z} = -h_{c2}(T_f - T), \quad t > 0 \quad (\text{B.4})$$

Mientras que el enfriamiento por los extremos de la placa es despreciable.

$$\text{en } y=L_y: \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad t > 0 \quad (\text{B.5})$$

$$\text{en } y = -L_y: \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad t > 0 \quad (\text{B.6})$$

$$\text{en } y=L_x: \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad t > 0 \quad (\text{B.7})$$

La condición inicial esta dada por.

$$T(x, y, z, t) = T_0, \quad t=0 \quad (\text{B.8})$$