

18



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

"TEMPLE CON N₂ DE PIEZAS DE ACERO D2 EN HORNOS AL VACIO"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

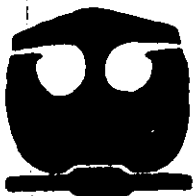
INGENIERO QUIMICO METALURGICO

P R E S E N T A :

JOSE JORGE RUIZ MONDRAGON



EXAMENES PROFESIONALES FACULTAD DE QUIMICA



MEXICO, D.F.

2001

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



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.

Jurado asignado:

Presidente Prof. BERNARDO FABIAN CAMPILLO ILLANES
Vocal Prof. JOSÉ BERNARDO HERNÁNDEZ MORALES
Secretario Prof. SERGIO GARCÍA GALAN
1er Suplente Prof. ARTURO ALEJANDRO SÁNCHEZ SANTIAGO
2º Suplente Prof. ALBERTO INGALLS CRUZ

Sitio donde se desarrolló el tema:

EDIFICIO "D", FACULTAD DE QUÍMICA, U. N. A. M.

Y

ESPECIALIDADES TÉRMICAS, S.A. de C.V.

Asesor del tema:




DR. BERNARDO HERNÁNDEZ MORALES

Supervisor técnico:



M. en C. ALBERTO INGALLS CRUZ

Sustentante:



JOSÉ JORGE RUIZ MONDRAGÓN

Agradecimientos

Antes que todo quisiera mandarles un saludo a todos y cada una de las personas que están cerca de mi y las que me gustaría se encontraran aquí con la finalidad de compartir la dicha que siento al concluir una etapa más de mis metas trazadas.

Le doy gracias a la vida por permitirme estar ahora, celebrando esto con todos y cada uno de ustedes, en especial le doy gracias a las personas que siempre me han brindado su apoyo incondicional, mis padres, que en las buenas y en las malas se encuentran a mi lado apoyándome día con día.

También agradezco a mi hermano Luis y mis hermanas Bertha, Alma y María Elena, con los que he convivido toda mi vida y que han hecho que esta sea mas agradable.

A mis amigos, quienes siempre estuvieron al pendiente de lo que sucedía conmigo y de los pequeños o grandes pasos que he dado: Sergio, Lázaro, Carlos, Luis, José Luis, Roberto, Paola, Verónica, y si se olvida alguno disculpen. En especial a mis amigos Lázaro y Sergio.

A la persona que se encargó de la realización de este trabajo y quien estuvo al pendiente de él, a mi asesor el Dr. Bernardo Hernández al igual que mi coasesor el M.C. Alberto Ingalls, con los cuales viví y goce de los grandes paseos a Cuautitlan Izcalli a la planta para realizar unos tratamientos térmicos de horas. Por todas sus atenciones muchas gracias.

A la gente de la planta de Especialidades Térmicas S.A. de C.V., que se portaron de la manera mas amable, brindándonos el apoyo requerido.

Al programa de becas para tesis de licenciatura en proyectos de investigación (PROBETEL) de la Facultad de Química, por el apoyo económico para la realización de este proyecto.

Gracias a cada uno de los profesores que se esmeraron en transmitir sus conocimientos.

Por todo y muchas cosas mas, mil gracias a todos.

Indice**CAPITULO 1**

<i>Introducción</i>	1
---------------------	---

CAPITULO 2

<i>Antecedentes y Objetivos</i>	2
2.1. Temple	2
2.2. Velocidad de enfriamiento	4
2.3. Problemas para obtener una estructura martensítica	6
2.4. Temple en hornos al vacío	8
2.4.1. Elementos de calentamiento	8
2.4.2. Ventajas y desventajas	10
2.4.3. Medios gaseosos de temple	12
2.4.4. Innovación en sistemas de inyección de gas	13
2.5. Justificación	15
2.6. Objetivos	16

CAPITULO 3

<i>Procedimiento Experimental</i>	17
3.1 Metodología	17
3.2 Diseño y construcción de probetas	17
3.3 Diseño del estudio de los ensayos dentro del horno	18
3.4 Caracterización del sistema (transferencia de calor)	19
3.5 Temple de acero AISI D2	19
3.6 Metalografía y ensayos mecánicos (dureza)	20
3.7 Materiales	20

CAPITULO 4

<i>Resultados y Discusión</i>	24
4.1 Curvas de enfriamiento	24
4.2 Simulación térmica	29
4.3 Microestructura y dureza	40

CAPITULO 5

<i>Conclusiones</i>	45
<i>Referencias</i>	46

CAPITULO 1

Introducción

La necesidad de contar con materiales de propiedades mecánicas específicas ha llevado a desarrollar nuevas tecnologías de proceso de fabricación así como variaciones a los tratamientos térmicos tradicionales.

Mediante un tratamiento térmico, es decir, calentando y enfriando de forma controlada a un material metálico, se produce un cambio microestructural en él y, con esto, un cambio en sus propiedades mecánicas. Para cada composición de acero se requiere un tratamiento térmico específico dependiendo de las propiedades mecánicas que se quieran obtener. La durabilidad de los herramientas depende principalmente del tipo de tratamiento que se le da a las piezas, y del cuidado que se halla tenido al aplicar el tratamiento térmico.

En la actualidad, los materiales se pueden tratar térmicamente sin llegar a oxidar su superficie, lo que es un gran avance ya que ofrece la ventaja de tratar piezas prácticamente terminadas sin tener que llevarlas a otro tratamiento posterior.

En muchos países del mundo es común realizar tratamientos térmicos en hornos con calentamiento al vacío, ya que muchos de estos se utilizan para diversos procesos, ya sea para tratamientos térmicos, fusión, soldadura, etc. En contraste, en México se cuenta con pocas instalaciones de este tipo. De ahí el interés de realizar estudios como el reportado en este trabajo.

CAPITULO 2

Antecedentes Y Objetivos

Los tratamientos térmicos son operaciones de calentamiento seguido de un enfriamiento controlado, que tiene por objeto dar a una pieza metálica las propiedades más convenientes para su manufactura o empleo. Permiten mejorar en gran medida las características mecánicas de un acero de composición determinada, siendo los fines buscados el aumento del límite elástico, la disminución de la fragilidad y el incremento de la dureza, principalmente.

De manera general, un tratamiento térmico no modifica la composición química de un acero, pero puede aportar modificaciones a los tres puntos siguientes:

1. Constitución (estado del carbono y forma alotrópica del hierro);
2. Microestructura (tamaño de grano y distribución de los constituyentes);
3. Estado mecánico (las diferencias de la temperatura en diversos puntos de la pieza provocan irregularidades de dilatación que pueden provocar esfuerzos internos y causar deformaciones).

El propósito es mejorar el acero modificando su constitución y su estructura, evitando destruir el estado de equilibrio mecánico [1].

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 llevar al acero mediante calentamiento a una cierta temperatura (por arriba de su

temperatura de austenización), con la finalidad de obtener una estructura homogénea para posteriormente enfriarlo con suficiente rapidez como para lograr la transformación de fase de austenita a martensita.

La martensita es el principal producto del temple; es una solución sólida sobresaturada de carbono en el hierro α , de la misma composición de la austenita inicial. La transformación de la austenita a martensita consiste en un cambio de red cristalina, con débil desplazamiento de los átomos de hierro. La martensita cristaliza en el sistema cubico tetragonal.

La martensita es ferromagnética en presencia del hierro α , tiene una gran dureza ($HB \approx 700$) y una fragilidad notable. Tiene una morfología de agujas, visible bajo el microscopio a aumentos suficientes después del ataque químico por los reactivos clásicos para aceros; estas agujas están orientadas en el interior de cada grano inicial según tres direcciones paralelas a los lados de un triángulo equilátero.

El endurecimiento de la martensita es de orden fisico-químico; cada átomo de C, más voluminoso que el intersticio en el que esta insertado, separa los dos 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 [1].

Para piezas pequeñas, los factores que afectan el proceso de temple son tres: 1) composición química del acero, 2) temperatura de temple y 3) velocidad de enfriamiento. La última es la más difícil de caracterizar, dependiendo de la naturaleza y grado de agitación del medio de enfriamiento.

El conocimiento del proceso de temple para un acero dado comprende el estudio de la influencia de cada uno de estos factores. El propósito es estudiar la evolución de las transformaciones de la austenita durante el enfriamiento, y su estado fisico-químico (naturaleza de los constituyentes) y microestructural (finura) después del enfriamiento.

La forma de estudio más básica consiste en graficar la variación de la temperatura con el tiempo; esta representación gráfica se conoce como curva de enfriamiento. El trazado de las curvas de enfriamiento fue efectuado por primera vez en 1917 por los señores Chevenard (método dilatométrico), y Portevin y Garvin (análisis térmico)[1].

2.2 VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO

La velocidad de enfriamiento depende del tamaño de la pieza y de la capacidad de extracción del medio de enfriamiento. En aplicaciones prácticas, existe una distribución de velocidades de enfriamiento al interior del componente, es decir, éste no se enfría uniformemente. Para una composición química y un tamaño de grano inicial dados, la evolución de la microestructura depende de la velocidad de enfriamiento. Esto se debe tanto a que se modifica el diagrama de transformación (entre mayor sea la velocidad de enfriamiento menor serán las temperaturas correspondientes a Ar3 y a Ms) como a que la microestructura misma es función de la historia térmica.

Cuando una pieza se enfría al aire, se obtienen velocidades del orden de 100 °C por minuto; la microestructura que se produce es fina, pero su dureza no es muy alta. Una pieza pequeña enfriada en agua experimenta enfriamientos del orden de 100 °C por segundo. Con estas velocidades de enfriamiento se produce martensita; la velocidad de enfriamiento mínima para producir martensita se denomina primera velocidad crítica de temple. Para enfriamientos muy rápidos, que corresponden a piezas enfriadas en aire líquido, se logran velocidades de enfriamiento de hasta 14,000 °C por segundo. Bajo estas condiciones, la temperatura Ms ya no varía con la velocidad de enfriamiento [1].

Cuando la pieza tratada alcanza la temperatura correspondiente a M_s , una fracción muy pequeña de austenita se transforma en martensita con la aparición brusca de agujas que nacen con sus dimensiones definitivas. Si después continúa el enfriamiento, para cada temperatura se transforma una nueva fracción bien determinada de austenita y un mantenimiento isotérmico no hace progresar la reacción. La transformación martensítica es más completa en cuanto mas baja sea la temperatura de enfriamiento. Según lo anterior la austenita residual depende de la temperatura del baño de temple y es esencialmente independiente de la velocidad de enfriamiento [1].

Si la velocidad de enfriamiento se mantiene constante y se hace aumentar la temperatura de austenización por encima de la línea de transformación A_3 del diagrama de equilibrio Fe-C, se encuentran la misma serie de fenómenos, correspondiendo al aumento de temperatura de austenización o a un aumento de la velocidad de enfriamiento. El punto M_s desciende progresivamente y la dureza presenta un máximo. La existencia de este fenómeno puede explicarse por el retraso en la disolución de la cementita durante el calentamiento. Cuando se calienta un acero en las condiciones teóricas correspondientes al diagrama de equilibrio, la transformación perlita-austenita se efectúa teóricamente a temperatura constante por disolución de la cementita y la transformación simultánea del hierro α a hierro γ ; después prosigue la disolución de la ferrita o de la cementita proeutectoide hasta el punto A_{c3} o A_{cm} del diagrama de equilibrio Fe-C, según el tipo de acero (hipoeutectoide o hipereutectoide). Pero en la práctica la permanencia a alta temperatura es limitada, la transformación durante el calentamiento es, muchas veces incompleta, y se observa un retraso de la disolución de cementita libre en aceros hipereutectoides.

Cuando se eleva la temperatura de austenización, la cantidad de carbono puesta en solución aumenta; por consecuencia, la velocidad

crítica de temple descende, puesto que la austenita inicial es más rica en carbono.

La elevación del contenido de C en la martensita, contenido que es el de la austenita inicial, conduce a un aumento de la dureza. Pero descendiendo M_s , la transformación austenita-martensita que se efectúa entre M_s y la temperatura del baño de temple es cada vez más incompleta; la proporción de martensita disminuye en beneficio de la austenita, más blanda. La dureza del producto templado depende de dos factores opuestos: mayor dureza de la martensita, pero menor proporción de la martensita, terminando por dominar esta, lo que explica la existencia de un máximo. La experiencia de muchos investigadores muestra que no se puede disminuir el punto M_s por debajo de la temperatura ambiente, lo cual conduciría a un hipertemple total (estado puramente austenítico). Un estado que no puede realizarse más que con aceros aleados [1].

2.3 PROBLEMAS PARA OBTENER UNA ESTRUCTURA MARTENSITICA

Existen varios problemas para lograr que la pieza obtenga una estructura puramente martensítica, entre los que se encuentran:

1.-*Grosor de la pieza.* La velocidad de enfriamiento decrece desde la superficie hacia el interior de la pieza, por lo que la penetración del temple es una limitante que siempre conduce al temple heterogéneo. Para realizar un temple homogéneo es necesario que las velocidades de enfriamiento sean similares en toda la pieza [1, 2].

2.-*Modificaciones estructurales.* Al exponer la pieza de acero a alta temperatura durante cierto tiempo, el grano de la solución sólida y tiende a crecer; lo cual produce una estructura frágil. Esto impone un límite a la estructura de temple, independiente de la velocidad de enfriamiento, y función del metal y de la duración del calentamiento [1, 2].

3.-*La generación de esfuerzos en las piezas.* Debido a que el enfriamiento en el exterior es más rápido que en el centro de la pieza, la capa superficial se contrae más rápidamente que el núcleo, comprimiéndolo, mientras que el centro se opone a ser comprimido, originándose así una distribución de esfuerzos internos.

Al principio del temple solamente las capas superficiales se transforman en martensita y ejercen una tracción sobre el núcleo de la pieza que cede ante los esfuerzos transmitidos por las capas externas porque aún es plástico. Posteriormente, las capas internas se transforman; y la dilatación correspondiente ejerce sobre las capas superficiales (más frías y por consiguiente, poco plásticas) un esfuerzo de tracción mientras que en el centro en el centro se tiene estado de compresión. Por consiguiente, el estado de esfuerzos en cada punto en el acero sufre variaciones de intensidad, y aún de sentido, en el curso del enfriamiento.

Los esfuerzos pueden sobrepasar el límite de elasticidad y crear deformaciones permanentes que se traducen en deformaciones externas de la pieza (forma y dimensiones); pueden también sobrepasar la resistencia a la rotura y producir grietas.

Las deformaciones plásticas ocurren más fácilmente en caliente que en frío, las deformaciones se producen al principio del enfriamiento, y las grietas en el curso de la transformación martensítica; la tendencia a las grietas crece con el contenido de carbón debido al descenso de M_s [1, 2].

4.-*La oxidación superficial.* Las atmósferas de los hornos pueden provocar la pérdida de carbono de forma superficial; esta descarburización se incrementa con el tiempo y la temperatura de residencia. A veces es necesario prever ésta y sobredimensionar la pieza para que posteriormente se pueda eliminar o bien recurrir a otros tratamientos realizados en otros tipos de hornos, tales como hornos de baño líquido, de atmósfera controlada, neutra, reductora, etc. [1, 2].

2.4 TEMPLE EN HORNOS AL VACÍO

En el horno con calentamiento al vacío el medio enfriante más comúnmente usado es nitrógeno gaseoso a una presión que oscila entre 2 y 6 bar. La severidad del temple depende de la presión de inyección del gas de temple y de la geometría y tamaño de las piezas de trabajo.

El tratamiento térmico al vacío consiste en calentar las piezas en una cámara en donde es evacuado el aire, dando una cierta presión parcial adecuada para evitar la volatilización de elementos aleantes. El vacío sustituye a la atmósfera protectora durante el calentamiento. El tratamiento se puede hacer para diferentes piezas de distintas geometrías, provenientes de diferentes áreas de producción.

El tratamiento fue inicialmente usado para la industria aeroespacial; actualmente se usa en procesos de nitruración, carburación, calentamiento y temple, relevado de esfuerzos y recocido.

La carga de trabajo usual es de alrededor de 100 ton. Este proceso es de tipo batch. Existen hornos al vacío continuos con zonas múltiples de purga para el precalentamiento pero sólo a nivel laboratorio.

Los hornos de carga horizontal están equipados con un elevador especial, el cual transporta de forma estacionaria el material de trabajo al horno. Frecuentemente, este se encuentra sobre unos rieles que indican la posición correcta de carga del horno. El elevador es hidráulico, y coloca la carga dentro del pedestal dentro del horno; el elevador sería innecesario siempre y cuando el transporte de las piezas fuera continuo y controlado[3].

2.4.1 Elementos de calentamiento

El calentamiento se puede realizar mediante resistencia o bien mediante inducción. Los hornos son calentados inductivamente, por cilindros de grafito que radian calor. Mas comúnmente el calentamiento se

realiza por resistencia, en cuyo caso el calor se transfiere por radiación completamente, la actividad de la superficie de calentamiento debe de ser la necesaria para lograr un calentamiento rápido. Casi todos los hornos emplean corriente trifásica de 60Hz de frecuencia [3].

Dependiendo del tipo de potencia usada se utilizan controladores de tipo:

- Autotransformador de variable controlable;
- Reactores de corazón saturable;
- Rectificadores Controladores-Silicio (SCR)

La resistencia de los elementos de calentamiento operan al vacío y no requieren propiedades de resistencia a la corrosión, ya que no operan en atmósferas oxidantes.

La alta temperatura requiere de elementos de calentamiento de baja presión de vapor para que su duración sea máxima. Los materiales que reúnen esta condición son:

- Metales refractarios base tungsteno, molibdeno y tantalio.
- Grafito puro sólido en forma de barras, rodillos y tubos.
- Grafito puro en filamentos, es decir grafito pirolizado.
- Metales como: cromo y níquel, que pueden operar a una temperatura máxima de 980°C.

En la Tabla 1 se presentan las propiedades relevantes de cada tipo de material para calentamiento por resistencia. Puede observarse que los materiales que tienen las mejores propiedades son el tungsteno y el grafito; por razones económicas el grafito es el material mas comúnmente utilizado.

TABLA1. Propiedades físicas de materiales para resistencias de hornos al vacío.

Material	Punto de fusión °C	Máxima temperatura de trabajo, °C	Presión de vapor a 1600 °C, torr.
Molibdeno	2625	1700	10^{-8}
Tantalio	2996	2500	10^{-11}
Tungsteno	3410	2800	10^{-13}
Grafito	3700	2500	10^{-13}
Hierro	1535		10^{-1}

El calentamiento se realiza en hornos al vacío (10^{-4} a 10^{-2} milibar), donde es posible volatilizar óxidos e impurezas fácilmente removibles, lo cual evita el consumo de las resistencias de grafito por oxidación. El potencial de oxidación es minimizado en gran parte debido a la disminución del potencial de interacción de la materia prima con el oxígeno [3].

2.4.2 Ventajas y desventajas

Las **ventajas** que presenta este tratamiento térmico son[3]:

- Previene las reacciones superficiales de oxidación y descarburización de las piezas a tratar, manteniendo la superficie intacta.
- Remueve contaminantes de la superficie, como películas de óxido y trazas de lubricantes.
- Remueve o disuelve sustancias contaminantes en los metales debido al efecto de desgasificación al vacío.
- Remueve oxígeno difundido en la superficie de los metales debido a técnicas de erosión al vacío.
- Alta reproducibilidad.

- No existe intercambio de calor con el ambiente.
- Los problemas de distorsión y rugosidad son reducidos, disminuyendo costos de maquinado.
- Bajos costos de operación.

Las **desventajas** de este proceso son [3]:

- Gran cantidad de piso requerido.
- Baja productividad.
- Largos ciclos de proceso.
- Alto costo de mantenimiento.
- Alto costo de capital de inversión inicial.

El enfriamiento por radiación en este tipo de horno es extremadamente lento. Para acortar el tiempo de residencia, se disminuye el vacío para igualar presiones hasta la presión atmosférica y entonces el gas inerte es introducido a presión. El gas es rápidamente recirculado logrando un enfriamiento convectivo. Las paredes de la cámara son enfriadas externamente por agua.

En el proceso se pueden apreciar dos etapas:

- El calentamiento al vacío.
- El proceso de temple con gas a presión.

Una de las principales diferencias entre el tratamiento convencional de temple y el de temple en hornos al vacío es que este no promueve la oxidación de los materiales y es capaz de eliminar capas delgadas de óxido metálico en la superficie del material por medio de reacciones de disociación gracias al manejo de alto vacío.

En el temple con gas se tienen dos parámetros que sirven como variables de proceso:

- La capacidad de extracción de calor del gas
- Presión del gas

2.4.3 Medios de temple gaseosos usados

La capacidad de extracción del gas depende de las propiedades físicas y químicas del mismo. Los gases más usados son el N₂, Ar, He y H₂. El H₂ es menos usado debido a su alto potencial explosivo, que requiere ciertas precauciones para su manejo [3, 4 y 5].

TABLA 2. Propiedades de los gases usados para temple en hornos al vacío.

Gas	Pureza	Punto de rocío °C	Conductividad térmica (K*10 ³) cal cm/ °C cm ² s	Velocidad de enfriamiento relativa
Argón	99.9995	-79	0.04	0.74
Nitrogeno	99.9993	-79	0.06	1.0
Helio	99.998	-62	0.34	1.03
Hidrogeno	99.9	-59	0.42	1.4

Hasta cierto punto, la calidad del temple depende de la dirección de la corriente de gas dentro de la cámara caliente.

Existen tres formas para inyectar el gas de enfriamiento durante el temple:

1.-Inyección de gas a través de toberas, donde el flujo es perpendicular a la pieza de trabajo. Este modo de inyección también es usado en hornos de tipo horizontal. No es muy recomendable ya que el enfriamiento no es muy uniforme, debido a que las toberas forman cortinas frías.

2.-Inyección de gas con toberas paralelas con respecto a la superficie de enfriamiento. El enfriamiento no es muy uniforme, provocando gradientes

térmicos; la creación de gradientes térmicos es la principal causa de la distorsión y fractura de las piezas metálicas.

3.-La combinación de ambos métodos de inyección de gas lleva a la óptima extracción de calor durante el temple de manera homogénea evitando la creación de gradientes térmicos dentro de las piezas tratadas

El riguroso cálculo de transferencia de calor en el sistema de temple con gas requiere de un análisis de flujo del gas y transporte de energía, incluyendo el efecto del paso de gas con extracción continua de calor, el ventilador y la presión de recirculación en el sistema [5].

2.44 Innovación en sistemas de inyección de gas

Los hornos al vacío con temple con gas a 2 bar son ampliamente utilizados cuando hay requerimientos modestos de velocidad de enfriamiento, como es el caso de los aceros de alta velocidad, los de grado de temple al aire, aceros para herramienta de trabajado en frío y caliente, y algunos aceros martensíticos con sección transversal pequeña [6, 7].

Las piezas a tratar normalmente son acomodadas de forma suelta para optimizar la uniformidad de calentamiento y para que sea máximo el paso del gas a través de la carga para obtener un temple uniforme.

Para tratamientos térmicos de herramientas la solución óptima han sido los hornos al vacío con temple con gas a 6 bar, donde la severidad de temple en comparación a la de 2 bar incrementa de un 3.5 a 4 veces. Esta velocidad de enfriamiento permite el endurecimiento de la mayoría de los aceros para herramienta, en particular los grados de alta aleación y con las secciones transversales de uso más frecuente en las herramientas industriales [6, 7].

Se han desarrollado varios sistemas para evitar el flujo laminar en la cámara del horno y provocar el flujo turbulento, ya que el flujo en varias direcciones mejora la uniformidad del endurecimiento de las piezas tratadas. La versatilidad de los hornos con temple a gas a 6 bar está

limitada cuando se tienen camas acomodadas de manera densa, el endurecido de herramientas de acero de baja aleación y/o de grandes secciones transversales, por lo que se han desarrollado otro tipo de hornos los cuales incrementan su presión de nitrógeno de 6 a 10 bar lo cual resulta un aumento de 140% del coeficiente de transferencia de calor, y si se tuviese un enfriamiento con helio a 20 bar se tendría un incremento de 300% de este coeficiente comparado con el de 6 bar. Con este tipo de hornos es posible el tratamiento térmico de cargas con arreglos muy densos así como el temple de todos los aceros para trabajado en frío, todos los aceros rápidos, y muchos de los aceros de grado de temple en aceite. En este tipo de hornos es posible tener homogeneidad en la dureza aún para piezas con tamaños diferentes en razón de 1:10 con partes de espesor de hasta 2.5 pulgadas y razón de 1:5 en partes de hasta 7 pulgadas de grueso [6, 7].

También es posible aplicar controladores mediante los cuales es posible regular las revoluciones del ventilador durante el enfriamiento logrando así un enfriamiento con etapas isotérmicas en la cámara.

La transmisión de calor en vacío es por radiación, sin embargo, la transmisión solamente es eficiente a temperaturas superiores a 760°C. Con el propósito de efectuar el calentamiento uniforme y rápidamente a temperaturas inferiores, se utiliza el gas en el interior del horno para la transferencia de calor por convección. La zona caliente debe de estar aislada térmicamente para que la calefacción por convección sea rápida e uniforme. La calefacción rompe con mayor efectividad los esfuerzos desarrollados en las partes a tratar. Estos esfuerzos son el resultado de procesos de maquinado previo al tratamiento térmico o por la baja calidad del acero.

Entre las ventajas que presenta este tipo de calentamiento están:

- ✓ Calentamiento uniforme y, por lo tanto, poca distorsión.

- ✓ Acortamiento en el ciclo de calentamiento para el temple y revenido.
- ✓ Mejor uniformidad de calentamiento a bajas temperaturas.
- ✓ Revenido y recocido en el mismo horno y mejor uso del horno.

Se plantea utilizar este sistema para tratar isotérmicamente las piezas de acero con dimensiones grandes, para así evitar distorsión y fisuramiento de las piezas [6, 7].

2.5 JUSTIFICACIÓN

En las empresas de tratamientos térmicos en México se ha iniciado el uso de hornos con cámaras al vacío. Para utilizar esta tecnología adecuadamente, se requiere saber más acerca del proceso y la forma de como poder modificarlo para optimizar el ciclo de tratamiento. Los ciclos de operación largos han hecho poco rentable el proceso, por lo cual el disminuir el tiempo de residencia del espécimen en el horno significa una gran reducción de costos. Manteniendo el control y optimizando la velocidad de extracción de calor durante el tratamiento térmico es posible lograr resultados finales deseables en las propiedades del acero. Una vez caracterizada la transferencia de calor en el sistema se pueden tener criterios para seleccionar los intervalos en los que se puede realizar un tratamiento térmico específico.

2.6 OBJETIVOS

- Estudiar el ciclo de operación de un horno al vacío industrial para piezas de acero D2. Para esto se requieren las siguientes acciones:
- Verificar la uniformidad del temple en la cámara de vacío;
- Instrumentar piezas de acero inoxidable, para caracterizar la extracción de calor durante el temple en la cámara;
- Evaluar la influencia de las variables de proceso en las propiedades mecánicas, específicamente la dureza;
- Caracterizar la microestructura producida.

CAPÍTULO 3

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1 METODOLOGÍA

La metodología seguida para alcanzar los objetivos comprende: a) el diseño de las probetas de temple; b) la medición de curvas de enfriamiento experimentales utilizando un adquisidor de datos (SMARTLINK); c) la caracterización de la extracción de calor en la superficie de probetas de acero inoxidable instrumentadas (para lo cuál se empleará el programa de cómputo CONTA_CYL que resuelve el problema inverso de conducción de calor); d) la evaluación de las propiedades mecánicas (dureza) obtenidas en probetas de aceros de herramienta después del temple en la cámara al vacío, y e) la caracterización de la microestructura de las mismas.

3.2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PROBETAS

Probetas de acero inoxidable. Se instrumentaron probetas cilíndricas (ver Figura 3.1) de acero inoxidable AISI 304, de 1 pulgada de diámetro y 2.5 pulgadas de altura, con termopares tipo K. Los termopares se colocaron de la siguiente manera: uno en el centro geométrico de la probeta y el otro a una distancia de 1/16 de pulgada de la superficie.

Probetas de acero D2. Las probetas de acero AISI D2 son idénticas a las de acero inoxidable AISI 304, es decir, diámetro de 1 pulgada y longitud de 2.5 pulgadas; un par de ellas fueron instrumentadas para verificar su comportamiento.

3.3 DISEÑO DEL ESTUDIO DE LOS ENSAYOS DENTRO DEL HORNO

El horno con cámara al vacío en la empresa *Especialidades Térmicas, S.A. de C.V.* (ver Figura 3.2) fue construido por la compañía Conrad Engelke y es el modelo **Druck-Vakuum-Autoklav** de serie 14847/30. La carcasa del horno tiene una relación de espesor/diámetro de $S/D = 0.00625$, tiene 60 boquillas distribuidas en 12 líneas de inyección con 5 toberas en cada una; por medio de estas toberas se distribuye el N_2 en la cámara. Las boquillas tienen 25 mm de diámetro y la distancia entre boquilla y boquilla, en la dirección longitudinal, es de 144 mm. El calentamiento del horno es por resistencia eléctrica, es decir, el calentamiento se logra pasando una corriente por las resistencias las cuales se calientan por efecto Joule y transfieren este calor a la cámara por radiación. Las resistencias son 12 barras huecas de grafito de 32mm de diámetro, distribuidas de manera homogénea. La pared cilíndrica es enfriada con agua que pasa a través de un serpentín de cobre en la superficie exterior de la cámara ya que el diseño del horno cuenta con una doble pared. El vacío se obtiene succionado el aire desde el fondo de la cámara, lo cual da una mayor garantía de eficiencia. Para el sellado del horno se usan unas grapas, que son usadas como auxiliares de sello.

El horno cuenta con tres termopares: dos fijos, y uno móvil. Al comienzo de este trabajo, se contaba con un solo termopar de control el cual se ubicaba en el seno del fluido dentro de la cámara. Posteriormente se instalaron en el horno cuatro termopares adicionales, con la suficiente longitud para poder barrer la cámara, colocados en los orificios de las probetas (ver Figura 3.3). Las probetas se colocaron sobre bases metálicas horizontales y se distribuyeron en diversas posiciones para cada experimento. En experimentos preliminares se determinó que el enfriamiento en el horno guardaba cierta simetría, lo cual permitió disminuir el número de posiciones a estudiar, haciéndose un barrido como se muestra en la Figura 3.4.

3.4 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA (Transferencia de calor)

Las *curvas de enfriamiento* (temperatura vs tiempo) se obtuvieron utilizando dos termopares (uno en el centro geométrico del espécimen y otro cerca de la superficie) conectados a un sistema de adquisición de datos automático (SMARTLINK). La calibración del registrador se hizo con un sistema de temperaturas conocidas: agua con hielo a 0°C.

Los experimentos para caracterizar la transferencia de calor se realizaron en el horno con cámara de vacío usando especímenes de acero inoxidable AISI 304. El medio de enfriamiento fue nitrógeno gaseoso. Las piezas se calentaron hasta la temperatura de austenización siguiendo las prácticas de calentamiento establecidas para cargas normales. Al mismo tiempo, con el adquisidor de datos SMARTLINK se registró la temperatura de la probeta durante el calentamiento; cuando se observó que las piezas ya habían alcanzado una temperatura uniforme, e idéntica a la de austenización en piezas de acero D2, se inició el temple con el nitrógeno gaseoso, lo cuál también fue registrado con el adquisidor de datos.

3.5 TEMPLE DE ACERO AISI D2

El tratamiento de temple que se practica en *Especialidades Térmicas, S.A. de C.V.* para el acero AISI D2 (en piezas chicas) en horno con cámara al vacío es:

1. Precalentar de 25 a 600 °C por 30 min.;
2. Calentar de 600 a 800 °C por 10 min. y mantener durante 30min;
3. Calentar de 800 a 980 °C por 10 min. y mantener durante 30 min.;
4. Calentar de 980 a 1030 °C por 10 min. y mantener durante 60 min.;
5. Enfriar a una presión de 3 bar durante 30 min. con recirculación.

En los experimentos, el ciclo de calentamiento fue más rápido debido a que la carga consistía únicamente de un máximo de tres probetas.

Además, las dimensiones de las probetas propiciaron un calentamiento uniforme.

3.6 METALOGRAFÍA Y ENSAYOS MECÁNICOS (Dureza).

Para la evaluación de la dureza, las probetas se trataron térmicamente en diferentes puntos en el horno, bajo estas condiciones se observará la influencia de la posición de la probeta en la cámara del horno registrando adicionalmente la microestructura asociada con esta dureza.

3.7 MATERIALES

Los aceros de estudio son los aceros de herramientas ya que son a los que típicamente se les realiza el tratamiento. En particular se estudió al acero AISI D2.

La serie D son aceros de herramienta para trabajado en frío al alto cromo y alto carbono. Se caracterizan porque su contenido de carbón está en el rango de 1.5-2.35 % y cromo nominal hasta de un 12%. Los aceros que contienen molibdeno pueden ser templados al aire y los D3, que tienen molibdeno libre, son templables en aceite.

No es recomendable hacer tratamiento de normalizado a los aceros de la serie D. Generalmente estos aceros son recocidos y posteriormente calentados y templados. Los herramentales sometidos al temple posteriormente son tratados para realizar un relevado de esfuerzos. Un precalentamiento antes de austenizar puede evitar el problema de relevar esfuerzos.

El precalentamiento antes del austenizado reduce los problemas de distorsión en el endurecimiento de partes minimizando la no uniformidad de los cambios dimensionales durante la austenización. Los aceros austenizados no se oxidan siempre y cuando el enfriamiento se realice en baños de sales, en vacío, o en varios tipos de hornos que usan atmósferas

gaseosas que evitan la decarburación (notablemente en atmósferas endotérmica, la disociación de amonía en seco, hidrogeno seco). Temperaturas excesivamente elevadas durante la austenización pueden llegar a ser promotoras de austenita retenida, la cual debe evitarse[8].

Tabla 3.1 Composición Química nominal del acero D2 [3]

NORMA	C	Co	Cr	Mn	Mo	P	Si	V	S
AISI	1.5	1	12					1	
UNS	1.4- 1.6	1 (max)	11- 13	0.6 (max)	0.7- 1.2	0.03 (max)	0.6 (max)	1.1 (max)	0.03 (max)

Dimensión de las probetas:

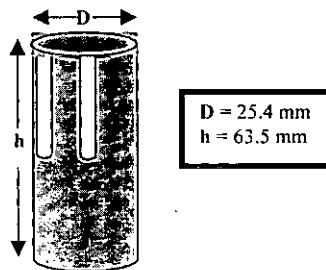


Figura 3.1 Representación esquemática de las probetas de acero inoxidable y de acero de D2 utilizadas en los experimentos.

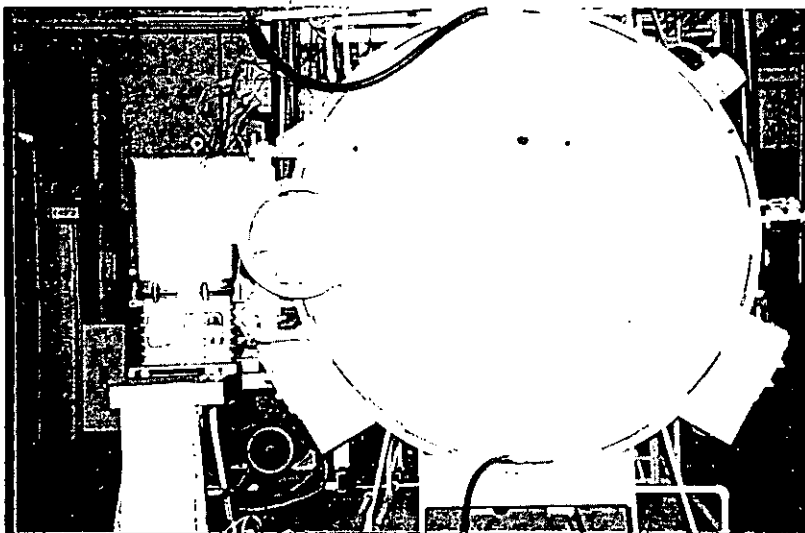


Figura 3.2 Horno de la empresa *Especialidades Térmicas, S.A. de C.V.* utilizado para la caracterización de la cámara y tratamiento térmico.

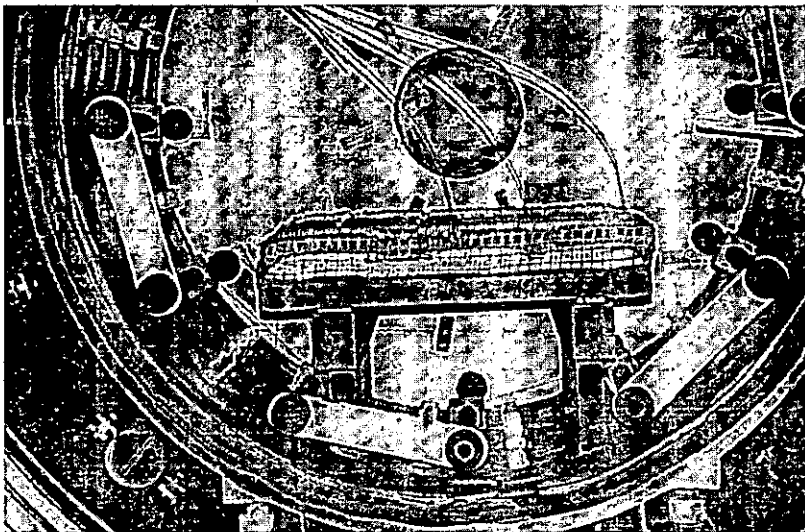


Figura 3.3 Cámara interna del horno de la empresa *Especialidades Térmicas, S.A. de C.V.*

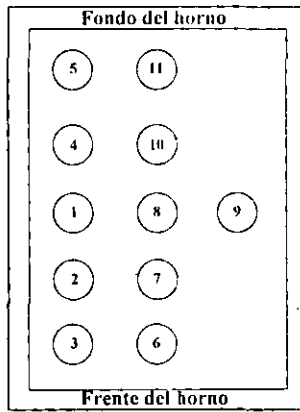


Figura 3.4. Distribución de las probetas en la cámara del horno (vista superior).

Capítulo 4

Resultados y Discusión

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en el horno de cámara al vacío de Especialidades Térmicas S.A. de C.V., junto con las predicciones de un modelo de transferencia de calor aplicado a este proceso industrial.

4.1 CURVAS DE ENFRIAMIENTO

En la Figura 4.1 se presenta un ciclo de calentamiento típico de las probetas. Las rampas que se observan sirven para disminuir el gradiente térmico de la pieza y así disminuir la distorsión.

La respuesta térmica de las probetas de acero D2 y de acero inoxidable durante el enfriamiento se muestra en las Figuras 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, y 4.6, indicándose las posiciones de cada una de ellas dentro de la cámara del horno según la Figura 3.4. Cada una de las figuras presentadas corresponden a una corrida diferente. Las corridas 4.2, 4.4 y 4.5 son para el mismo ciclo de operación, por lo que solamente podemos comparar entre sí los resultados observados en estas tres corridas.

Para las probetas en las posiciones 8 y 1 se registró su evolución térmica tanto en el centro como en la superficie de la pieza (Figuras 4.2 y 4.4). Se observa que el gradiente térmico existente entre estas es mínimo por lo cual podemos asegurar que su enfriamiento es de tipo newtoniano, al menos para las dimensiones de estas probetas (1 pulgada de diámetro).

En la Figura 4.2 se observa la variación de las temperaturas a lo largo de la cámara del horno en donde podemos apreciar una ligera diferencia en cuanto a la velocidad de enfriamiento de la pieza en la posición 6 con respecto a la 11 y la 8, donde la pieza 6 se encuentra más al frente de la cámara, por lo que esta diferencia se podría deber a que el ventilador que recircula el N_2 gaseoso se encuentra más lejos de esta.

En la Figura 4.3 se observa la variación de las curvas de enfriamiento para las posiciones 11, 10, 3 y 1, donde se observa que la diferencia de las curvas de enfriamiento en estas posiciones, para estas condiciones de enfriamiento, es mínima.

En la Figura 4.4 se observa la variación de las curvas de enfriamiento para las posiciones 9, 6 y 1, donde prácticamente las curvas de enfriamiento de estas se enciman una con otra.

En la Figura 4.5 se observa las curvas de enfriamiento para las posiciones 5 y 3, donde ésta solo varía unos cuantos grados centígrados entre cada una de ellas. Estas curvas muestran que la probeta se enfría más rápidamente en la posición 5 que en la 3.

Podemos apreciar que la respuesta térmica mostrada en la Figura 4.6 es totalmente diferente a las otras; esto es debido a que la experimentación en esta ocasión tiene como finalidad conservar una cierta temperatura en el horno en un lapso de tiempo para lograr así realizar tratamientos isotérmicos dentro de este. Esto sería muy conveniente debido a las ventajas que ofrece el tratamiento térmico estudiado, tales como son la limpieza total de la superficie y homogeneidad de propiedades, se agregaría la estabilidad dimensional. Podemos observar que las curvas de enfriamiento en las posiciones 8, 5 y 1 son muy parecidas.

Con lo anterior podemos decir que la variación de la velocidad de enfriamiento en cuanto a la posición no es muy notoria reafirmando con esto la gran homogeneidad de temple dentro de la cámara de temple, lo cual es una de las cualidades del horno.

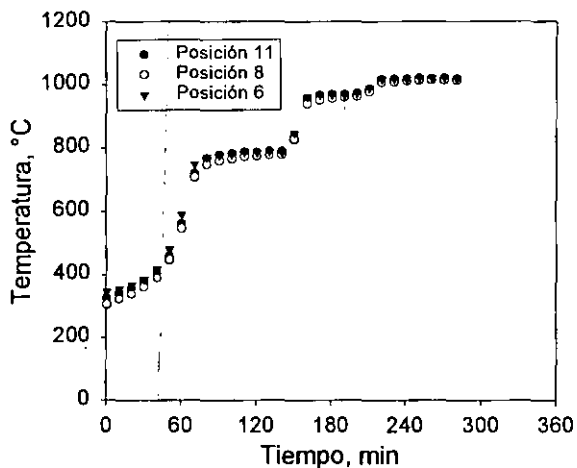


Figura 4.1 Evolución de la temperatura en el interior del horno de tratamiento térmico, durante el calentamiento para la corrida número 1.

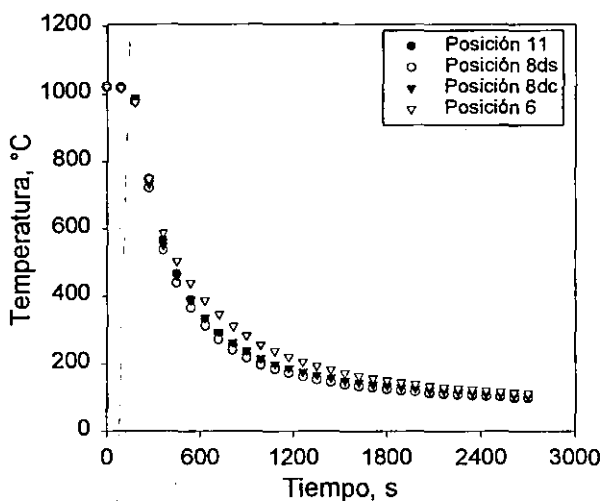


Figura 4.2 Curvas de enfriamiento en el centro de probetas de acero inoxidable, de 1 in. de diámetro, ubicadas en las posiciones 11 y 6, y en el centro, "c", y superficie, "s", de probetas de acero D2 ubicadas en la posición 8, (ver Figura 3.3). Corrida número 1.

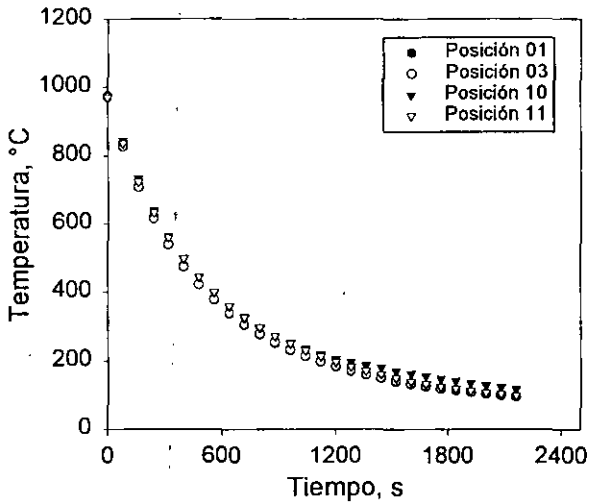


Figura 4.3 Curvas de enfriamiento en el centro de probetas de acero inoxidable, de 1 in. de diámetro, ubicadas en las posiciones 1,3,10 y 11, (ver Figura 3.3). Corrida número 2.

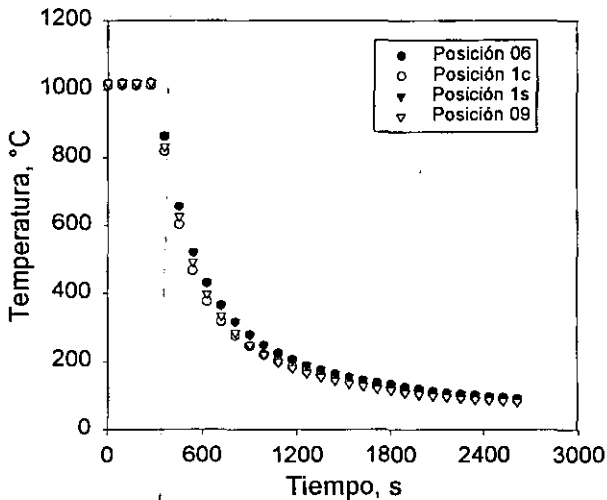


Figura 4.4 Curvas de enfriamiento en el centro de probetas de acero inoxidable, de 1 in. de diámetro, ubicadas en las posiciones 1, 6 y 9, y en la superficie, "s", de la probeta 1 (ver Figura 3.3). Corrida número 3.

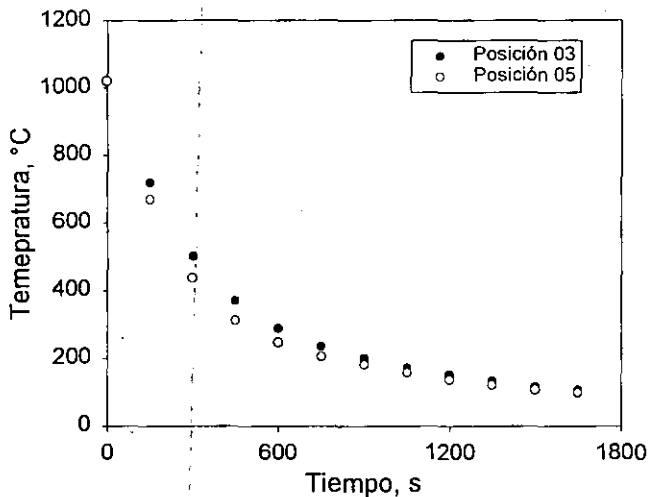


Figura 4.5 Curvas de enfriamiento en el centro de probetas de acero inoxidable, de 1 in. de diámetro, ubicadas en las posiciones 3 y 5, (ver Figura 3.3). Corrida número 4.

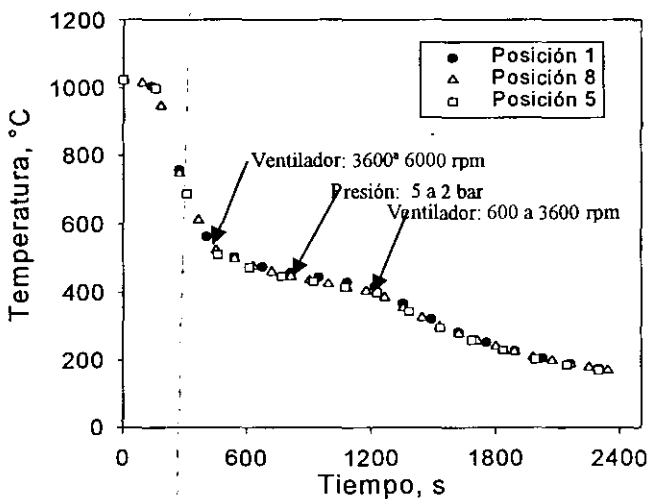


Figura 4.6 Curvas de enfriamiento en el centro de probetas de acero inoxidable de 1 in de diámetro, ubicadas en las posiciones 8, 5 y 1 (ver Figura 3.3). Corrida número 5.

4.2 SIMULACIÓN TÉRMICA

Aplicando la metodología de solución del problema inverso de conducción de calor (IHCP, de sus siglas en ingles) es posible estimar, a partir de las curvas de enfriamiento, tanto los flujos de calor como los coeficientes de transferencia de calor. La metodología de estimación de la condición de frontera térmica involucra la resolución de ecuaciones diferenciales mediante métodos numéricos, las cuales describen la evolución de los campos térmicos. Donde la geometría debe de asegurar que el flujo de calor sea unidireccional. En la Figura 4.7 se ilustra el IHCP para una placa de espesor $2L$, que se encuentra a una temperatura inicial T_0 . Para $t > 0$, una densidad de flujo de calor desconocida, $q(t)$, es aplicado a la frontera en $x=L$, mientras que la frontera en $x=0$ es simétrica con respecto al gradiente térmico. Para estimar la función $q(t)$, las mediciones de temperatura se realizan en la posición x_1 . Se asume que no hay suficiente información para conocer la forma de $q(t)$ y por lo tanto se requiere de un gran número de componentes de $q(t)$ para estimarlos.

El flujo de calor superficial es estimado asumiendo temporalmente que el flujo de calor en tiempos futuros r , durante el tiempo corriente, son constantes. Así, el flujo de calor desconocido en la superficie se obtiene de las temperaturas medidas experimentalmente, incluyendo varios tiempos futuros [9, 10]. El concepto de tiempo futuro se introduce para estabilizar la solución del IHCP.

Para poder introducir los datos obtenidos en el adquisidor de datos se tuvo que realizar una interpolación la cual permitiera obtener datos con un espaciamiento temporal uniforme de 1 segundo ($\Delta t_{cte}=1s$), ya que así se prefiere para poder emplear el programa de computo CONTA_CYL. Para realizar el cálculo en CONTA_CYL se usan 20 nodos, distribuidos a lo largo del radio de la barra, teniendo dos puntos de referencia: uno en el centro y el otro a 1/16 de pulgada de la superficie externa de la barra. Dependiendo de que tan preciso se requiera que sea el cálculo en la

superficie es asignado el número de nodos de la superficie al 1/16 de pulgada y el resto son asignados desde 1/16 hasta el centro de la barra.

$$\begin{aligned} 0 \leq x \leq x_1 & \quad \text{nodos} = 20 - \text{nodos}_1 \\ x_1 \leq x \leq R & \quad \text{nodos}_1 = \# < 20 \end{aligned}$$

Donde x_1 es la posición donde se localiza el termopar (en este caso 1/16 de pulgada).

Para determinar los parámetros óptimos de cálculo de flujo se varió el número de pasos futuros de tiempo que toma el programa para calcular flujos, tomando en consideración 2, 4 y 6 pasos futuros de tiempo. El efecto del número de tiempos futuros utilizados en el cálculo se muestran en la Figura 4.8. A medida que el parámetro r aumenta (es decir, reconsideran más pasos futuros), el máximo de la curva disminuye.

Las curvas de flujo de calor por unidad de longitud, calculada con CONTA_CYL son mostradas en las Figuras 4.9, 4.10, 4.11, y 4.12.

En la Figura 4.9 se puede observar que la variación del flujo de calor por unidad de longitud en función de la temperatura posee un máximo que se encuentra alrededor de los 870°C, lo cual indica que a esa temperatura se alcanza el valor máximo de extracción de calor producido por el N_2 gaseoso y la convección en la cámara, después de ahí existe un cambio de pendiente el cual sugiere una disminución de la capacidad de extracción de calor, debido a la disminución de la diferencia de temperaturas entre el gas y la pieza a tratar.

En la Figura 4.10 se presenta una situación similar ya que también se observa un máximo flujo de calor por unidad de longitud alrededor de los 870 °C y justo ahí existe un cambio de pendiente donde el flujo de calor va descendiendo, es decir la fuerza motriz que es la diferencia de temperatura disminuye causando una disminución de la capacidad de extracción de calor del gas. Un resultado similar se observa en la Figura 4.11.

En la figura 4.12, en contraste a las anteriores, se observan varios cambios de pendiente a lo largo de la curva. Uno es localizado al obtener el

máximo flujo de calor, el cual esta ubicado alrededor de los 870°C , de ahí el flujo de calor empieza a disminuir con una cierta pendiente. Al llegar alrededor de los 500°C se presenta un estancamiento con la temperatura aunque existe flujo de calor, éste no es tan grande como para disminuir la temperatura de la pieza, manteniéndola durante un cierto tiempo a esa temperatura. Después de este tiempo se observa un cambio de pendiente en donde el flujo de calor es llevado hasta cero, es decir que el gradiente térmico entre la temperatura del gas y de la pieza sea mínimo. Estos cambios corresponden a un tratamiento de tipo isotérmico es decir a temperatura constante después de mantenerlo un tiempo es enfriado.

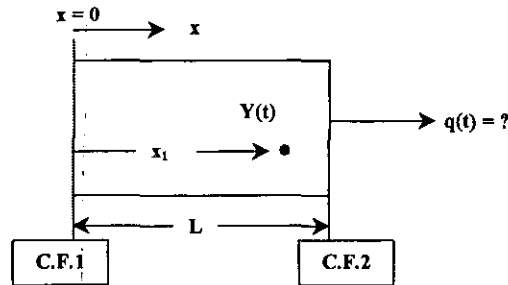


Figura 4.7 Representación esquemática del IHCP en una sola dirección, en una placa de espesor $2L$. El termopar se localiza en la posición $x = x_1$. En $x = 0$ se tiene simetría ($\partial T / \partial x = 0$), y en $x = L$ la densidad de flujo de calor es desconocida.

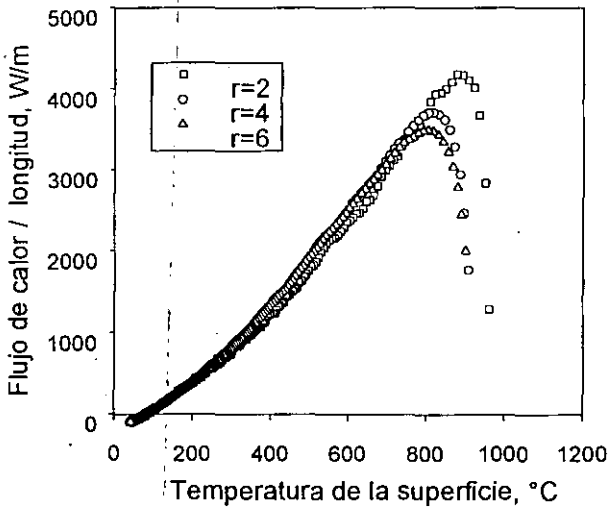


Figura 4.8 Comparación del flujo de calor utilizando 2, 4 y 6 pasos de tiempos futuros.

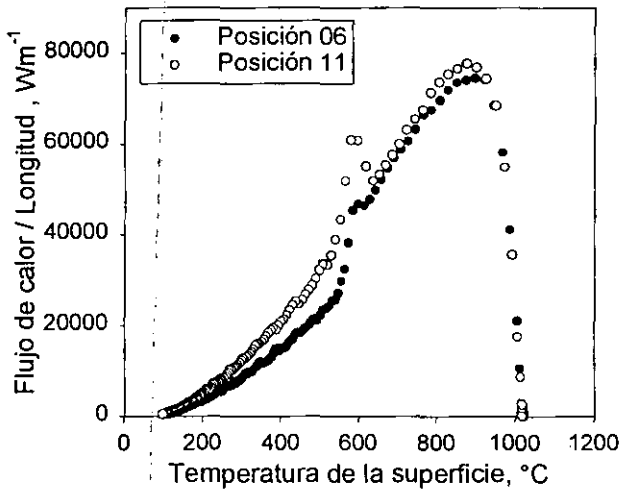


Figura 4.9 Flujo de calor por unidad de longitud como función de la temperatura de la superficie de la pieza para la corrida número 1. Para 2 pasos de tiempos futuros.

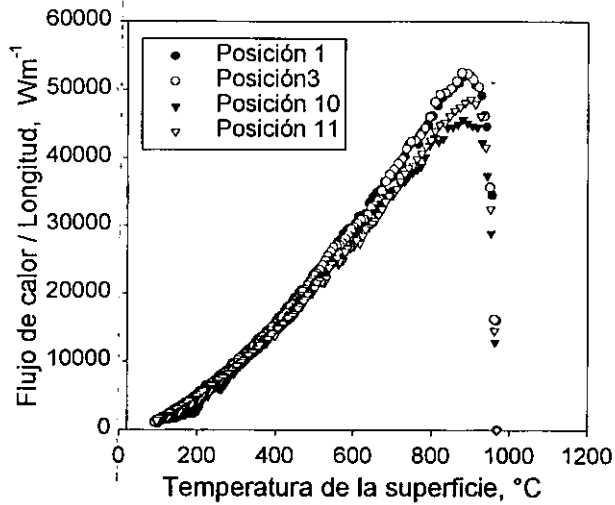


Figura 4.10 Flujo de calor por unidad de longitud en función de la temperatura de la superficie de la pieza para la corrida 2. Para 2 pasos de tiempos futuros.

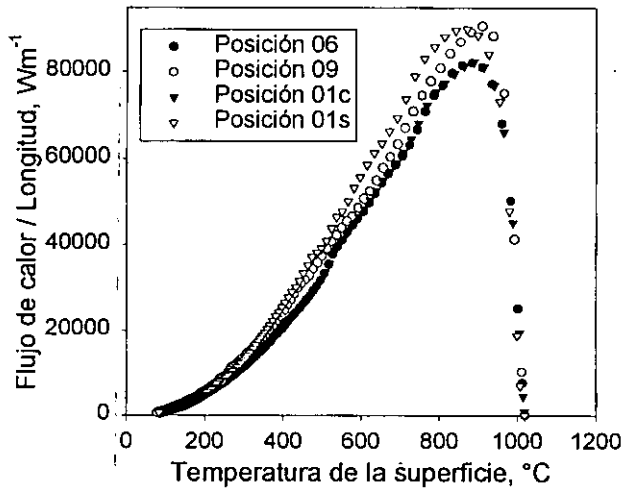


Figura 4.11 Flujo de calor por unidad de longitud en función de la temperatura de la superficie de la pieza para la corrida 4. Para 2 pasos de tiempos futuros.

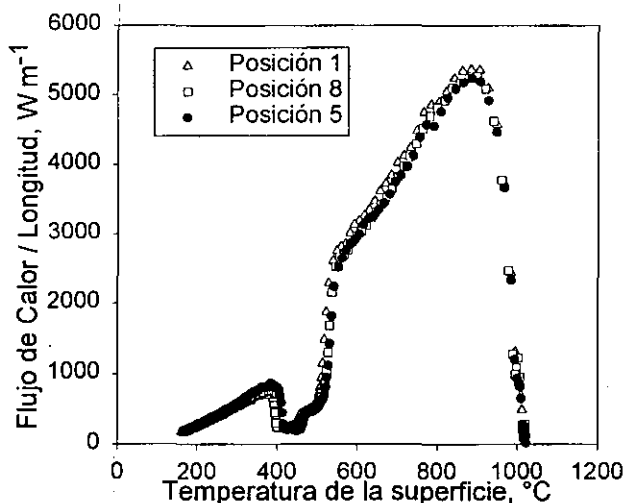


Figura 4.12 Flujo de calor por unidad de longitud en función de la temperatura para la corrida número 5. Para 2 pasos de tiempos futuros.

La predicción numérica de los fenómenos de transporte en procesos industriales es muy importante ya que con esto es posible realizar una simulación teórica del proceso y conocer su comportamiento sin hacerlo de manera física, lo cual involucra grandes gastos y en ocasiones es imposible realizar.

El programa de computo CONTA_CYL (embebido en la interfase de Winprobe) estima el flujo de calor por unidad de longitud y la temperatura de la superficie; con estos datos se procedió a recalculer las curvas de enfriamiento mediante un programa que resuelve el problema directo de conducción de calor (CONDUCT), con lo que se realizó la validación de los resultados obtenidos.

CONDUCT es un programa para flujo en ductos, con el cual se pueden simular procesos difusivos en una, dos y tres dimensiones. Emplea sistemas de coordenadas como el cartesiano, axisimétrico y polar. Esta constituido por dos partes fundamentales: una parte invariable el cual

contiene el esquema general de solución común, posible para todas las aplicaciones en el programa y ciertas restricciones. La parte adaptativa es donde se realiza la especificación general de la geometría, propiedades del material, fuente de calor, reacciones, condiciones de frontera, elementos de salida, etc.[11]

Para el presente estudio se realizaron las siguientes consideraciones para poder realizar el cálculo de la distribución de temperaturas mediante CONDUCT, aplicando los flujos de calor que fueron calculados por CONTA_CYL (ver Figura 4.13):

- 1.-Flujo de calor unidireccional (radial).
- 2.-Coordenadas cilíndricas.
- 3.-Condiciones de frontera:

$$\begin{array}{ll} r = 0 & \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \\ r = L & q = -q_{\text{Conta_CYL}} \end{array}$$

Las curvas de enfriamiento calculadas bajo estas condiciones se muestran en las Figuras 4.14,4.15,4.16,4.17 y 4.18.

De las figuras se puede deducir que el cálculo de los flujos fue excelente, ya que las curvas calculada y experimental se sobrepone en todos los casos, mostrando una diferencia máxima de 3 °C. Con esto, se ha validado tanto el método de estimación del flujo de calor en la frontera como el de solución del problema directo.

De los resultados de CONDUCT se cálculo la rapidez de enfriamiento, la cual se gráfico con respecto a la temperatura de la superficie como se muestra en la Figura 4.19. En ésta figura se observa un valor máximo de la rapidez de enfriamiento (que es una cantidad directamente relacionada con la extracción de calor). El máximo de extracción de calor se ubica en los primeros 400 segundos y posteriormente la extracción de calor disminuye: Este comportamiento se debe a que al entrar el nitrógeno gaseoso, éste tiene una temperatura

menor la cual ayuda a que la extracción de calor sea elevada pero conforme pasa el tiempo el nitrógeno en la cámara se calienta perdiendo su capacidad de extracción de calor.

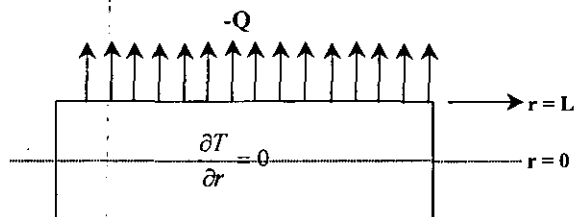


Figura 4.13 Representación esquemática de la aplicación del programa de cómputo CONDUCT en una sola dirección, en un cilindro de diámetro $2L$. En $x = 0$ se tiene simetría ($\partial T / \partial r = 0$), y en $r = L$ la densidad de flujo de calor es conocida que son datos obtenidos por IHCP.

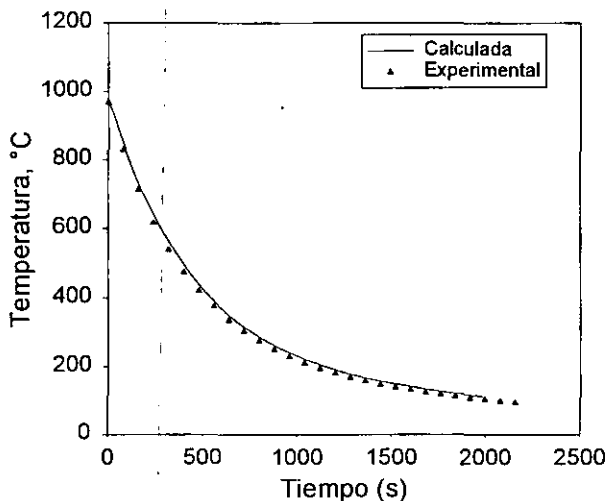


Figura 4.14 Curva de enfriamiento: calculada (línea) y experimental (símbolos), para la corrida 1.

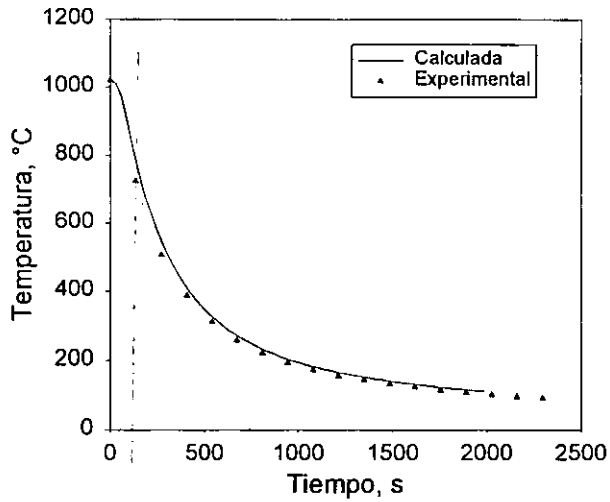


Figura 4.15 Curva de enfriamiento: calculada (línea) y experimental (símbolos), para la corrida 2.

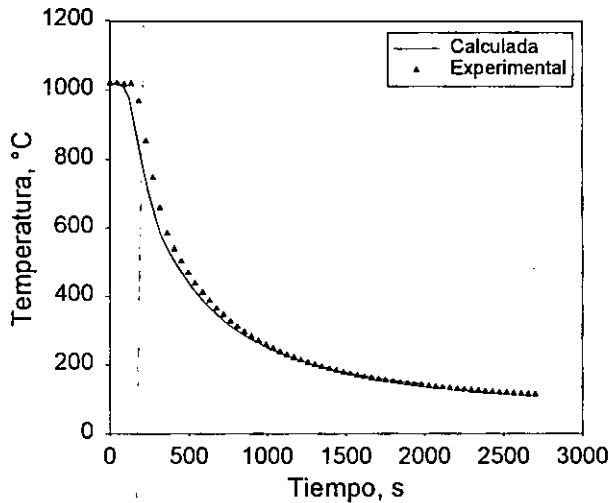


Figura 4.16 Curva de enfriamiento: calculada (línea) y experimental (símbolos), para la corrida 3

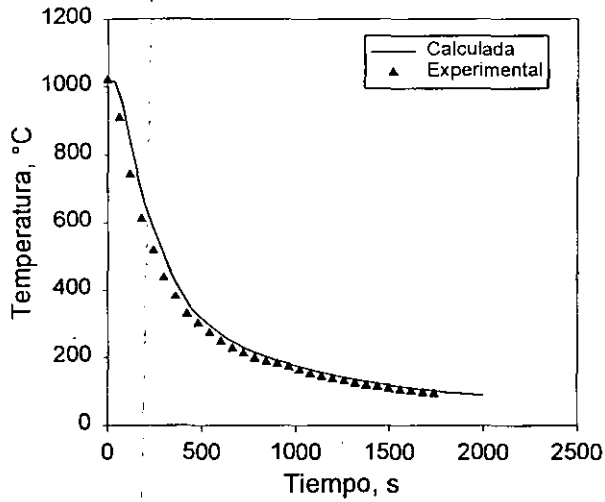


Figura 4.17 Curva de enfriamiento: calculada (línea) y experimental (símbolos), para la corrida 4.

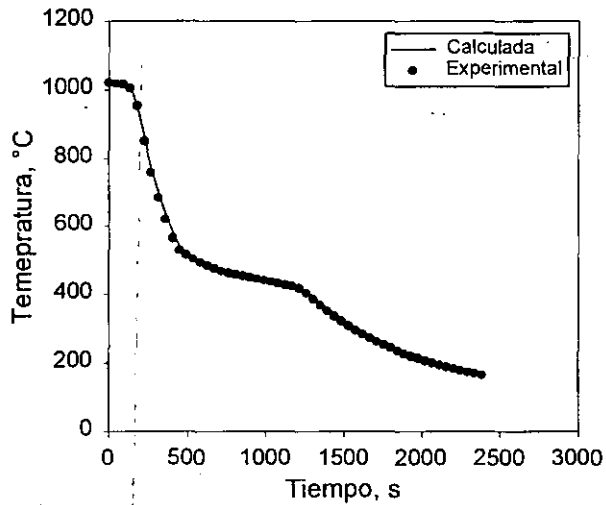


Figura 4.18 Curva de enfriamiento: calculada (línea) y experimental (símbolos), para la corrida 5.

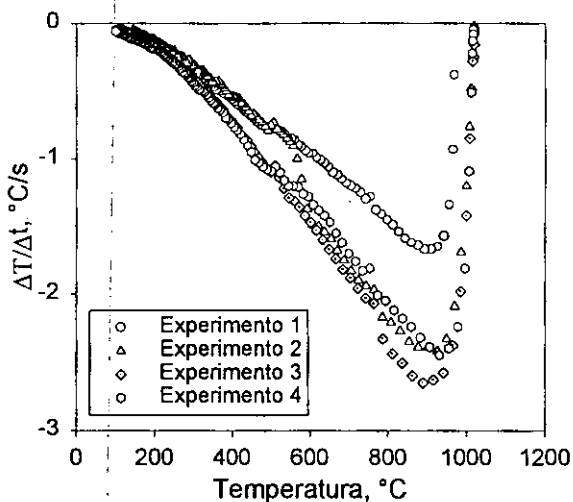


Figura 4.19 Valores calculados de la rapidez de enfriamiento vs temperatura de superficie para los diferentes experimentos.

Las curvas de enfriamiento calculadas en el centro de las probetas de 1 in de diámetro por CONDUCT son sobrepuestas sobre el diagrama de transformación isotérmica (Figuras 4.20, 4.21 y 4.22). En todos los casos se predice una microestructura de 100% de martensítica. Esto se comprobó mediante una preparación metalográfica de las probetas cuyo resultado se muestra en la Figura 4.26.

En las Figuras 4.23 y 4.24 se muestra la variación, tanto longitudinal como transversal, de la rapidez de enfriamiento en el horno, con lo que se puede decir que la homogeneidad de enfriamiento de la cámara es confirmada.

Usando los valores de flujo estimados con CONTA_CYL se prosiguió a calcular las curvas de enfriamiento para piezas de dimensiones diferentes mediante CONDUCT. Los diámetros utilizados para el cálculo fueron de 1, 2 y 3 pulgadas de diámetro, con la finalidad de estimar el efecto del diámetro de las piezas. Los resultados se muestran en la Figura 4.25. Se

observó que las probetas de 1" se enfriaron bajo régimen Newtoniano es decir que se enfría de igual manera en la superficie y en el centro, mientras que para los otros dos casos no es así. La microestructura predicha para la probeta de 1" de diámetro es de 100 % martensita; para una probeta de 2" de diámetro la microestructura que se espera es una mezcla entre martensita y perlita; mientras que para la probeta de 3" de diámetro se predijo una mezcla de martensita, bainita y perlita. Dado que las curvas de enfriamiento en el centro difieren de la superficie, se predice una estructura diferente en el centro y en la superficie para las probetas de 2 y 3 pulgadas.

4.3 MICROESTRUCTURA Y DUREZA ACERO D2

La microestructura final del tratamiento térmico convencional se muestra en la Figura 4.26. en esta fotografía se observa una matriz de martensita con una gran cantidad de carburos dispersos. Los carburos son encontrados tanto en el interior como en el límite de grano. Cabe mencionar que la microestructura observada es la esperada y la reportada en la literatura [8, 12].

Esta microestructura fue observada para las posiciones tanto longitudinal como transversal del horno por lo que podemos decir que las piezas tienen una microestructura uniforme, independientemente de la posición en donde se encuentren en la cámara.

Las piezas mostraron uniformidad microestructural de forma radial y longitudinal.

Se encontró que la dureza de estas piezas es de 63 ± 1 HRC, lo cual reafirma la uniformidad microestructural.

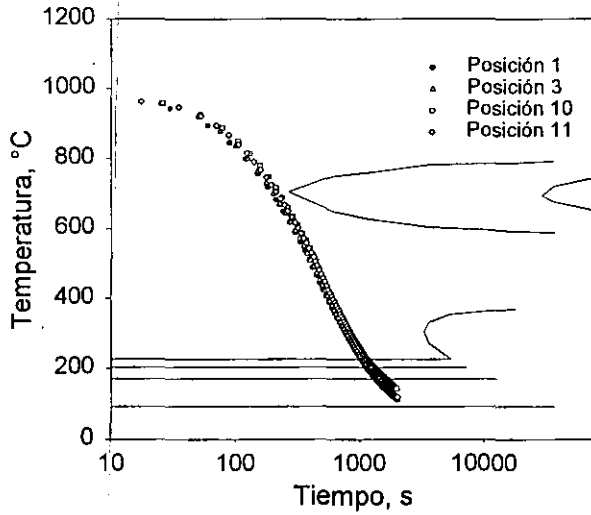


Figura 4.20 Curvas de enfriamiento en el centro de las probetas (calculadas) sobrepuestas en el diagrama de transformación isotérmica del acero AISI D2, para la corrida número 2.

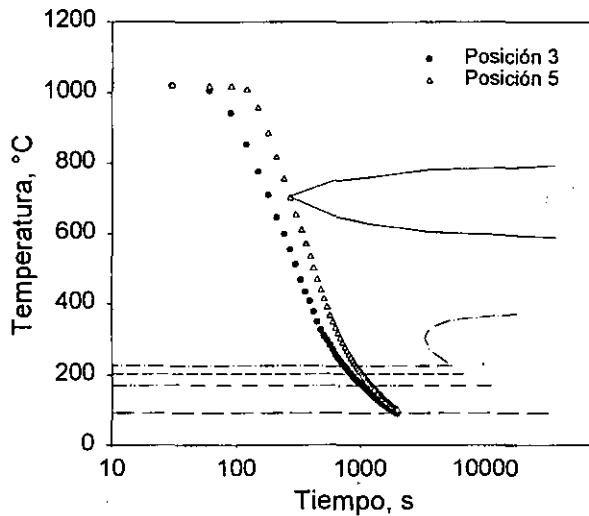


Figura 4.21 Curvas de enfriamiento en el centro de las probetas (calculadas) sobrepuestas en el diagrama de transformación isotérmica del acero AISI D2, para la corrida número 3.

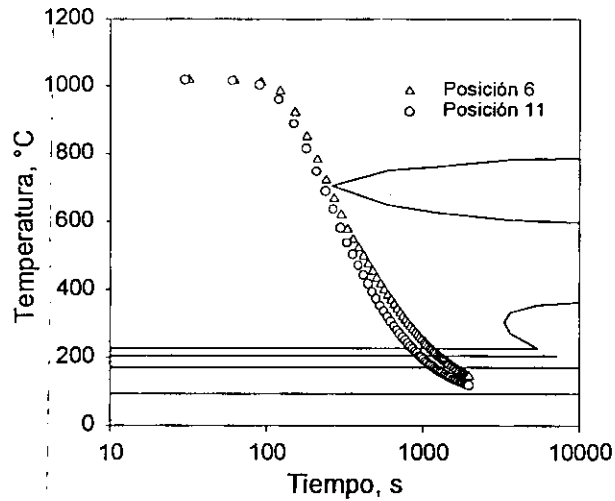


Figura 4.22 Curvas de enfriamiento en el centro de las probetas (calculadas) sobrepuestas en el diagrama de transformación isotérmica del acero AISI D2, para la corrida número 1.

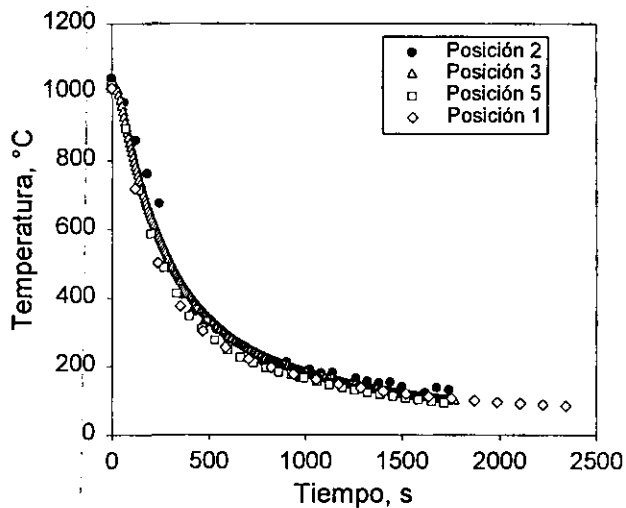


Figura 4.23 Curvas de enfriamiento para probetas colocadas de forma longitudinal en el horno.

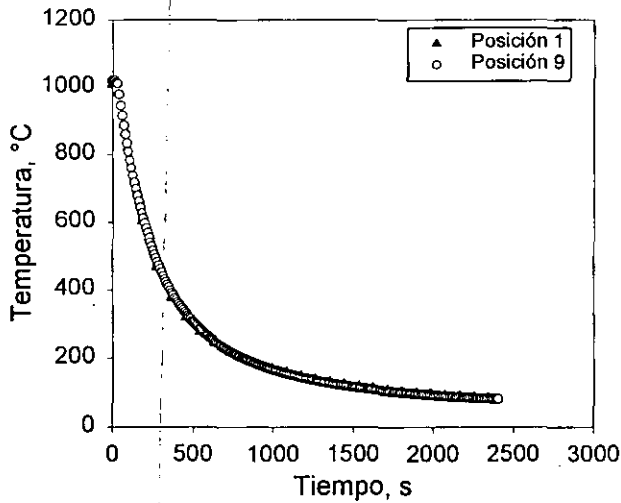


Figura 4.24 Curvas de enfriamiento para probetas colocadas de forma transversal en el horno.

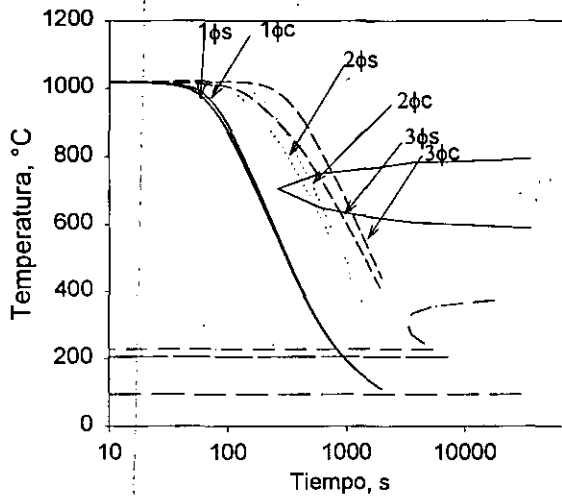


Figura 4.25 Curvas de enfriamiento calculadas (en el centro, "c" y la superficie, "s") para cilindros de acero D2 de 1, 2 y 3 pulgadas de diámetro.

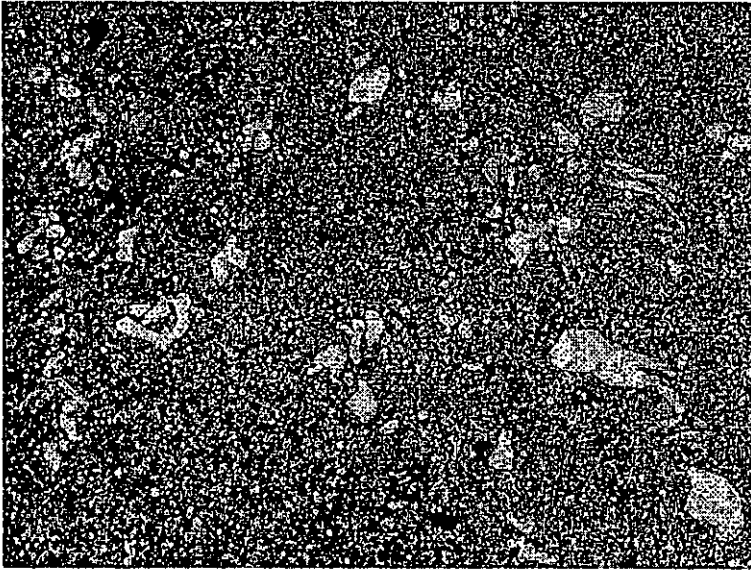


Figura 4.26 Microestructura final típica de las probetas de acero de herramienta AISI D2 con tratamiento de temple. Nital al 4%, 500X.

Capítulo 5

Conclusiones

- ✓ Las curvas de enfriamiento obtenidas para las probetas de acero inoxidable y de acero D2, muestran un comportamiento newtoniano.
- ✓ La máxima velocidad de extracción de calor se obtiene alrededor de los 400 segundos, entre los 850 y 900 °C.
- ✓ Existe una gran homogeneidad en el enfriamiento de la cámara de temple.
- ✓ Los datos obtenidos por CONTA_CYL fueron validados a través de un programa realizado con el código CONDUCT, suponiendo flujo de calor unidireccional.
- ✓ Es posible predecir la microestructura para materiales con dimensiones diferentes, basándose en el cálculo de los flujos de calor.
- ✓ Es posible realizar un tratamiento térmico de martempering de manera eficiente en este tipo de hornos con ayuda de un inversor (controlador de las revoluciones del ventilador de recirculación).

REFERENCIAS

- [1] C. Chaussiin y G. Hilly, **Metalurgia** Tomo 1, "Aleaciones Metálicas", Ediciones Urmo, pp 157-175,1975.
- [2] Apraiz Barreiro, **Tratamientos Térmicos de los Aceros**, pp 69-187.
- [3] **Metals Handbook**, Ninth Edition, Vol. 4, "Heat Treating" ASM. 1985, pp 307-324
- [4] F. Bles y B. Edénhofer, "Advances in increasing the Quenching speed of Single-Chamber Vacuum Furnace with High Pressure Gas-quenching system", *Heat Treatment of Metals*, Vol.4, pp 89-91, 1997.
- [5] HANDBOOK OF QUENCHANTS AND QUENCHING TECHNOLOGY, "Other Quenching Processes"
- [6] Kowalewki, "Selecting High-Pressure Gas Quenching", *Advances Materials & Proceses*, Sección 4/99, pp H37-H40.
- [7] Kowalewki and Josef Olejnick, "Applications for Vacuum Furnaces with 6, 10 and 20 bar Gas Quenching Capabilities", *Industrial Heating*, Octubre 1998.
- [8] **Heat Treater's Guide, Standard Practices and Procedures for Steel**; ASM Metals Park, Ohio 44073, 5th printing 1989 USA, pp. 299-305.
- [9] B. Hernández-Morales, J.K. Brimacombe y E.B. Halwbolt. "Characterization of the Boundary Condition in Heat Treatment Operations using an Inverse Heat Conduction Algorithm." Proc. of the ASME Heat Transfer Division HTD-Vol.317-2, N.Y. 1995, pp. 559-566.
- [10] T. H. Lübben, F. Hoffmann, y P. Mayr, "Scattering of Heat Treansfer Coefficient in High Pressure Gas Quenching" IWT Bremen, Germany, Heat Treating Society ASM, Octubre de 1998. pp 489- 494.
- [11] S.V. Patankar, "Computation of Conduction and Duct Flow Heat Transfer", 1988. pp 1-158.
- [12] **Metals Handbook**, Ninth Edition, Vol. 9 "Metallography and Microestructure" ASM. 1985, pp. 256-259.

- [13] C.H. Luiten y F. Limque, "Developments in Vacuum Furnace", *Heat Treatment*, Metalurgia, March 1980.
- [14] C.H. Luiten y K.H. Edler, "Equipment and processes Developments in Atmosphere and Vacuum", *Heat Treatment of Metals*, Cap.4, pp 101-106, 1987.
- [15] E. Troell, y S. Segerberg, "Cold Chamber Gas Cooling for Low Pollution Hardening" IVF-The Swedish Institute of Production Engineering Research pp. 495-499.
- [16] G.H. Geiger y D.R. Porier. **Transport Phenomena in Materials Processing**, Part II Energy Transport, Chap. 9, pp. 288-290.
- [17] G. Krauss, **Steels: Heat Treatment and Processing Principles**, ASM International, Materials Park, Ohio, 1990, pp 425-429.
- [18] J. Ferrari y N. Ipek, "Gas Quench Vessel Efficiency: Experimental and Computational Analysis". Faxen Laboratoriet, KTH Stockholm, Sweden, Heat Treating Society ASM, Octubre de 1998, pp 500-505.
- [19] M. Narazaki, M. Kogawara, A. Shirayori, y S. Fuchizawa, "Accuracy of Evaluation Methods for Heat Transfer Coefficients in Quenching" Utsunomiya University, Utsunomiya, Japan. pp 509-517.
- [20] J.W. Bouwman, "Tool Hardening in Vacuum Furnace", *Heat Treatment of Metals*, Vol. 3, pp 55-64 , 1978.
- [21] T.W. Ruffle y E.R. Byrnes JR., "Quenching in Vacuum Furnace", *Heat Treatment of Metals*, Vol. 4, pp 81-87, 1979.