



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

CARACTERIZACION DE LA REPUESTA METALURGICA
DE ACEROS GRADO HERRAMIENTA TEMPLADOS EN
UN LECHO FLUIDIZADO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO METALURGICO

P R E S E N T A :

JUAN RAMÓN GONZÁLEZ LÓPEZ



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 Fabián Campillo Illanes |
| Vocal | Prof. José Bernardo Hernández Morales |
| Secretario | Prof. Carlos González Rivera |
| 1er. Suplente | Prof. Arturo Alejandro Sánchez Santiago |
| 2do. Suplente | Prof. Balbina Ojeda Ramirez |

Sitio donde se desarrollo el tema:

LABORATORIO 008 “TRATAMIENTOS TÉRMICOS”, EDIFICIO “D”,
FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM.

Asesor del tema:

Dr. José Bernardo Hernández Morales

Sustentante:

Juan Ramón González López

CONTENIDO

| | |
|--|----|
| CONTENIDO..... | I |
| INDICE DE FIGURAS..... | II |
| INDICE DE TABLAS..... | IV |
| CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| CAPITULO 2 ANTECEDENTES..... | 3 |
| 2.1 Tratamientos térmicos..... | 3 |
| 2.2.1 Temple..... | 3 |
| 2.1.2 Procesos de temple..... | 4 |
| 2.2 Lecho fluidizado..... | 5 |
| 2.2.1 Determinación de la velocidad de fluidización..... | 7 |
| 2.2.2 Similitud entre los lechos fluidizados y los líquidos..... | 9 |
| 2.2.3 Número de fluidización y temperatura del lecho..... | 10 |
| 2.2.4 Transferencia de calor..... | 11 |
| 2.2.5 Temple en el lecho fluidizado..... | 16 |
| 2.3 Martensita..... | 17 |
| CAPITULO 3 DESARROLLO ESPERIMENTAL..... | 19 |
| 3.1. Equipo..... | 19 |
| 3.2. Probetas..... | 22 |
| 3.3. Condiciones experimentales..... | 22 |
| 3.4. Obtención de la velocidad de mínima fluidización..... | 23 |
| 3.5. Obtención de las curvas de enfriamiento..... | 23 |
| 3.6 Metalografía y medición de dureza..... | 24 |
| 3.7 Aceros AISI 4140 Y AISI 9840..... | 24 |
| CAPITULO 4 RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS..... | 27 |
| 4.1 Acero AISI 4140..... | 27 |
| 4.2 Acero AISI 9840..... | 34 |
| CAPITULO 5 CONCLUSIONES..... | 44 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 45 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1: Varios tipos de contacto de lechos fluidizados..... | 7 |
| Figura 2.2: Caída de presión vs. velocidad del gas para un lecho fluidizado de partículas con tamaño no uniforme..... | 8 |
| Figura 2.3: Caída de presión para camas pobremente aireadas..... | 9 |
| Figura 2.4: Comportamiento semejante a un líquido de un lecho fluidizado..... | 9 |
| Figura 2.5: Efecto del número de fluidización sobre las curvas de enfriamiento..... | 10 |
| Figura 2.6: Efecto de la temperatura sobre el flujo que corresponde al de la mínima fluidización, para partículas con un diámetro de 0.1 mm..... | 11 |
| Figura 2.7: El efecto del tamaño de grano de la alúmina en las curvas de enfriamiento para diámetros de 50 y 75 mm x 100 mm..... | 12 |
| Figura 2.8: El efecto del tamaño de la partícula de alúmina en la respuesta térmica..... | 13 |
| Figura 2.9: Coeficientes de transferencia de calor en función del número de fluidización para experimentos con alúmina o con carburo de silicio..... | 13 |
| Figura 2.10: Efecto de la composición del gas sobre la rapidez de enfriamiento para un cilindro con un diámetro de 50 mm..... | 14 |
| Figura 2.11: Curvas de enfriamiento para un cilindro de 25 mm de diámetro x 50 mm de largo, en varios medios de enfriamiento..... | 14 |
| Figura 2.12: Influencia del tipo de distribuidor del gas en la calidad de fluidización..... | 15 |
| Figura 2.13. Curvas de enfriamiento de probetas de acero inoxidable AISI 304 enfriadas en un sistema alúmina-aire: sin burbujeo (triángulos) y con burbujas (triángulos invertidos y círculos)..... | 16 |
| Figura 2.14. Respuesta térmica de probetas de acero AISI 9840 templadas en un lecho fluidizado: con flujo de mínima fluidización, correspondiente a 53 l/min de aire, (círculos); y con 95 l/min (triángulos) de aire..... | 17 |
| Figura 2.15: Temperaturas de comienzo de la transformación de la martensita (Ms) y morfología de la martensita como función del contenido de carbono..... | 18 |
| Figura 3.1: Esquema del reactor de lecho fluidizado..... | 19 |
| Figura 3.2: Esquema del reactor de lecho fluidizado..... | 20 |
| Figura 3.3. Esquema del equipo utilizado en el trabajo experimental..... | 20 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.4: Horno tipo “libro” utilizado en los experimentos..... | 21 |
| Figura 3.5. Soporte metalico..... | 21 |
| Figura 3.6: Esquema de las probetas utilizadas en la experimentación..... | 22 |
| 3.7: Diagrama CCT para el acero AISI 4140 [16]. Se muestran dos procesos de tratamiento térmico... | 25 |
| Figura 3.8: Diagrama CCT para el acero AISI 9840 | 26 |
| Figura 4.1. Ciclo térmico completo..... | 28 |
| Figura 4.2: Curvas de enfriamiento para el acero AISI 4140, para diferentes números de fluidización..... | 29 |
| Figura 4.3: Rapidez de enfriamiento vs. temperatura para el acero AISI 4140 para diferentes números de fluidización..... | 30 |
| Figura 4.4: Curva de rapidez de enfriamiento vs. tiempo para el acero AISI 4140 para diferentes números de fluidización..... | 31 |
| Figura 4.5: Durezas en función del número de fluidización para un acero AISI 4140..... | 32 |
| Figura 4.6 Metalografía de la muestra de acero 4140 templada en un lecho fluidizado con $N_f = 1.8$. Imagen a 1000X..... | 33 |
| Figura 4.7: Metalografía de la muestra de acero 4140 templada en un lecho fluidizado con $N_f = 1.6$. Imagen a 1000X..... | 33 |
| Figura 4.8 Metalografía de la muestra de acero 4140 templada en un lecho fluidizado con $N_f = 1.4$. Imagen a 1000X..... | 34 |
| Figura 4.9 Metalografía de la muestra de acero 4140 templada en un lecho fluidizado con $N_f = 1.2$. Imagen a 1000X..... | 34 |
| Figura 4.10: Curvas de enfriamiento para el acero AISI 9840, para diferentes números de fluidización..... | 35 |
| Figura 4.11: Rapidez de enfriamiento como función de la temperatura para el acero AISI 9840, para diferentes números de fluidización..... | 36 |
| Figura 4.12: Rapidez de enfriamiento como función del tiempo para el acero AISI 9840, para diferentes números de fluidización..... | 38 |
| Figura 4.13: Durezas obtenidas para el acero 9840, para diferentes números de fluidización..... | 39 |
| Figura 4.14: Metalografía de la muestra de acero 4140 templada en aire quieto. Imagen a 1000X..... | 40 |
| Figura 4.15: Metalografía de la muestra de acero 4140 templada en aceite. Imagen a 1000X..... | 40 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.16: Metalografía de la muestra de acero 4140 templada en un lecho fluidizado con $N_f = 1.2$. Imagen a 1000X..... | 41 |
| Figura 4.17: Metalografía de la muestra de acero 4140 templada en un lecho fluidizado con $N_f = 1.4$. Imagen a 1000X..... | 41 |
| Figura 4.18: Metalografía de la muestra de acero 4140 templada en un lecho fluidizado con $N_f = 1.6$. Imagen a 1000X..... | 42 |
| Figura 4.19: Metalografía de la muestra de acero 4140 templada en un lecho fluidizado con $N_f = 1.8$. Imagen a 1000X..... | 42 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 3.1: Condiciones para los experimentos..... | 22 |
| Tabla 4.1: Rapideces máximas de enfriamiento en función del número de fluidización para el acero AISI 4140..... | 32 |
| Tabla 4.2: Rapideces máximas de enfriamiento en función del número de fluidización para el acero AISI 9840..... | 37 |

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

Los tratamientos térmicos de aceros representan una etapa importante en la manufactura de piezas terminadas; sin embargo, los medios de enfriamiento convencionales (aceite, baños de sales) son contaminantes y potencialmente peligrosos para los trabajadores, por lo que es deseable buscar medios de enfriamiento alternativos. El lecho fluidizado podría ser una opción conveniente para este proceso, por lo que deben realizarse investigaciones para caracterizar a la respuesta metalúrgica de componentes metálicos templados en este medio de enfriamiento.

Un lecho fluidizado consiste en una columna formada por partículas sólidas, a través de las cuales pasa un fluido (líquido o gas) provocando una caída de presión. Si el fluido se mueve a velocidades bajas a través del lecho no produce movimiento de las partículas, pero al ir incrementando gradualmente la velocidad se llega a un punto donde las partículas no permanecen estáticas sino que se separan y mueven; este proceso recibe el nombre de fluidización.

En este trabajo se templaron probetas cilíndricas de aceros AISI 4140 y 9840 en un reactor de lecho fluidizado escala laboratorio. El reactor es de acero y contiene partículas de alúmina (malla 54) suspendidas con aire a temperatura ambiente. La alimentación del aire es a través de un tapón poroso.

La principal variable independiente que se maneja es el flujo de aire que entra al sistema, a partir del cuál se define al número de fluidización. Para caracterizar a la respuesta metalúrgica del lecho fluidizado se obtuvieron: 1) historia térmica, 2) distribución final de dureza, y 3) distribución final de microestructura, para aceros AISI 4140 y AISI 9840, para diferentes condiciones de enfriamiento (números de fluidización).

Como resultado de este trabajo se puede citar que: 1) se obtuvo martensita como microestructura final para todos los temple, 2) se observó la influencia del número de fluidización, y 3) se demostró que el lecho fluidizado puede ser un medio alternativo al temple en aceite.

Objetivo

El objetivo de este trabajo es el determinar si el lecho fluidizado (alúmina-aire) podría ser un medio de temple alternativo para el temple en aceite de piezas fabricadas con aceros AISI 4140 o AISI 9840.

Metodología propuesta

Para alcanzar este objetivo es necesario caracterizar las respuestas térmica y metalúrgica de probetas fabricadas con estos aceros cuando son templadas en un lecho fluidizado y compararlas con los resultados para el temple en aceite. A su vez, estas caracterizaciones se logran a través de los pasos siguientes:

- Instalación del equipo necesario para realizar las pruebas experimentales y verificación de su funcionamiento para las condiciones de operación requeridas.
- Ejecución de las pruebas experimentales, en las que el flujo de aire que entra al sistema (y, por lo tanto, el número de fluidización) es la variable independiente.
- Medición de la dureza final.
- Determinación de la microestructura final.
- Procesamiento y análisis de los resultados obtenidos.

CAPITULO 2. ANTECEDENTES

2.1 Tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos tienen por objetivo mejorar las propiedades (principalmente mecánicas) de los aceros. Esto se puede lograr controlando la composición, la temperatura de austenización, y las condiciones empleadas para enfriar el acero desde la temperatura de austenización hasta la temperatura ambiente. Cuando también se utiliza un medio para provocar la difusión de una especie química al interior de la pieza se habla de un tratamiento termoquímico.

Existe una gran diversidad de tratamientos térmicos y termoquímicos, siendo los más comunes los siguientes: temple, nitruración, cementación, revenido, carbonitruración, recocido, normalizado y recocido isotérmico.

2.1.1 Temple

El término temple se refiere al proceso de enfriar componentes metálicos rápidamente desde la temperatura de austenización o temperatura de trabajo, la cual depende del tipo de acero. Aceros de alta aleación e inoxidables pueden ser templados para minimizar la presencia de carburos en los bordes de grano o mejorar la distribución de la ferrita, pero la mayoría de los aceros al carbono, baja aleación, así como los de herramienta son templados para producir cantidades controladas de martensita en la microestructura. Obtener dureza y tenacidad específicas usualmente implica lograr la microestructura requerida, al mismo tiempo que se minimizan los esfuerzos residuales, la distorsión, y la posibilidad de agrietamiento.

La selección de un medio de enfriamiento depende de la capacidad de endurecimiento de la aleación en particular, la selección del grosor y la forma de la pieza, y por ende las rapidezces de enfriamiento requeridas. Los medios de temple pueden ser líquidos o gaseosos. Los medios líquidos más comunes son: aceite, agua, soluciones acuosas de polímeros, y agua con sales. Los medios gaseosos utilizados son: aire, hidrógeno y gases inertes.

La efectividad del temple depende de la composición del acero, tipo del medio de temple, y las condiciones del uso del medio de temple.

2.1.2 Procesos de temple

La rapidez de extracción de calor por un medio de temple y la forma en que es usado afecta sustancialmente al redimiendo del proceso. Variaciones en las prácticas del temple han resultado en la asignación de nombres específicos a algunas técnicas de temple [6]:

- Temple directo
- Temple en intervalos de tiempo
- Temple selectivo
- Temple por spray
- Temple por neblina
- Temple interrumpido

Temple directo se refiere a templar directamente desde la temperatura de austenización y es la más usada en la práctica. El termino temple directo se usa para diferenciarlo del tipo cíclico de otras prácticas indirectas las cuales pueden ser carburizado, enfriamiento lento, recalentado, seguidos por un temple.

Temple en intervalos de tiempo se usa cuando la rapidez de enfriamiento de la parte a templar necesita cambiar abruptamente durante el ciclo de enfriamiento. El cambio de la rapidez de enfriamiento puede consistir de un aumento o disminución de la misma, el cual es necesario para obtener los resultados deseados. La práctica normal es disminuir la temperatura de una parte mediante el temple en un medio capaz de extraer calor rápidamente hasta que la parte ha sido enfriada por debajo de la nariz de la curva Transformación-Temperatura-Tiempo (TTT), y entonces transferir la parte a un segundo medio (por ejemplo aceite), para que pueda enfriar más lentamente a través del rango de la formación de la martensita. Temple en intervalos de tiempo es muy frecuentemente usado para disminuir la distorsión, agrietamiento, y cambios dimensionales.

Temple selectivo se usa cuando es deseable para ciertas áreas de una parte estar relativamente inafectada por el medio de temple. Esto se puede lograr aislando un área para ser enfriada lentamente,

por lo que el medio de temple únicamente tocará aquellas partes que se desee que se enfríen rápidamente.

Temple por spray trata de dirigir fuertes corrientes de líquido a áreas de la pieza que se desea temprar. La rapidez de enfriamiento es muy alta debido a que las gotas que se forman por la alta intensidad del spray impactan en la superficie y remueven el calor con una alta eficiencia.

Temple por neblina utiliza una neblina fina o rocío que se producen a través de gotas de un líquido que son transportadas por medio de un gas. Aunque se parece al temple por spray, el temple por neblina produce bajas rapidezces de enfriamiento debido a la baja cantidad de líquido de la corriente (cuando se utilizan bajas presiones del gas).

El temple interrumpido se refiere al rápido enfriamiento del metal desde la temperatura de austenizado a un punto sobre la temperatura M_s donde se sostiene por un periodo específico de tiempo, seguido después por un enfriamiento en aire. Hay tres tipos de temple interrumpido: austempering, martempering, y tratamiento isotérmico. La temperatura a la cual se interrumpe el temple, el tiempo que se mantiene la pieza a temperatura constante, y la rapidez de enfriamiento puede variar dependiendo del tipo de acero y el grosor de la pieza.

Austempering consiste de un enfriamiento rápido desde la temperatura de austenización hasta una temperatura que ronda los 230 a 400 °C, manteniendo la temperatura para permitir una transformación isotérmica, seguida por un enfriamiento en aire. El austempering se puede aplicar a aceros medio carbono o aleados. Los baños de sales son los medios de temple más usados para realizar el austempering.

Martempering es un proceso similar al austempering, en el cual la pieza es templada rápidamente desde la temperatura de austenización hacia una temperatura cercana a M_s . El martempering difiere del austempering en que la pieza permanece a temperatura constante unicamente el tiempo necesario para que toda la pieza esté a la misma temperatura. Cuando el equilibrio se establezca en la pieza, antes de que ocurra la transformación, la pieza es enfriada en aire hasta que alcance la temperatura ambiente.

El tratamiento isotérmico es parecido al austempering, pero difiere en que se emplean dos baños. Después del primer temple y antes de que la transformación empiece, la pieza es transferida a un segundo baño, seguida por un temple en aire.

El caso del temple en un lecho fluidizado se aborda en la sección siguiente.

2.2 Lecho fluidizado

Las técnicas del lecho fluidizado no son una tecnología nueva en la industria metalúrgica. Una patente del siglo XIX describe la tostación de minerales bajo las condiciones de un lecho fluidizado, poniendo atención a la notable uniformidad de la temperatura que posee el lecho fluidizado [1]

La fluidización consiste en hacer que una cama de partículas secas y finamente divididas (típicamente alúmina), se comporte como un líquido, cuando sus partículas individuales estén microscópicamente separadas unas de las otras por el movimiento de un gas, que se introduce en la parte inferior y recorre todo el lecho.

La secuencia de eventos por los que pasa un lecho de ser empacado a que ocurra transporte neumático se ilustra en la Figura 2.1 [7, 8]. Se considera que una cama está en la fase densa cuando ésta exhibe un límite físico superior o una superficie bien definida. A un flujo suficientemente alto, la velocidad terminal de los sólidos se excede, y la cama entra en un estado de movimiento por lo que la superficie exterior deja de existir, y las partículas sólidas son llevadas afuera del lecho fluidizado. Este estado constituye una fase dispersa, diluida, y delgada del lecho fluidizado con transporte neumático de sólidos. La mayoría de los lechos usados para los tratamientos térmicos son del tipo burbujeante o agregativo.

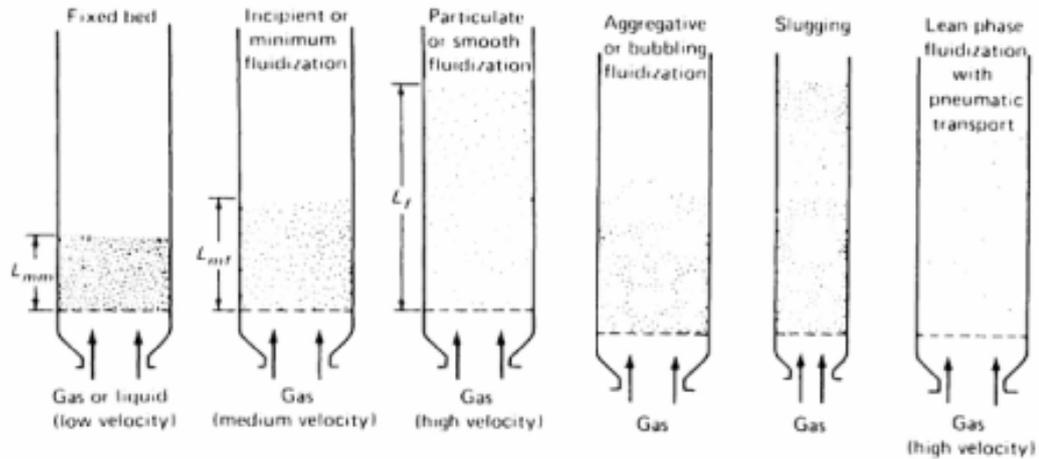


Figura 2.1: Varios tipos de contacto de lechos fluidizados [1].

Aunque las propiedades de los componentes sólidos o fluidos determinan la calidad de la fluidización, muchos otros factores influyen la velocidad de mezclado del sólido, el tamaño de las burbujas, y la extensión de la heterogeneidad en el lecho fluidizado. Estos factores incluyen: la geometría de la cama, el flujo del fluido, tipo de distribuidor, y las características internas del lecho como las pantallas, baffles, e intercambiadores de calor.

2.2.1 Determinación de la velocidad de fluidización

Para determinar cualitativamente el grado de fluidización, cuando una observación visual no es posible se utiliza un diagrama de caída de presión (ΔP) vs. velocidad (μ). Una cama bien fluidizada se comportará como en la Figura 2.2, la cual tiene dos zonas. La primera zona se caracteriza por flujos lentos en la cama compacta, la caída de presión es proporcional a la velocidad del gas y usualmente alcanza valores ligeramente más altos que la presión estática de la cama. A medida que se va incrementando la velocidad del gas, la cama compacta se desbloquea repentinamente, resultando en un decremento de la caída de presión hasta la presión estática de la cama.

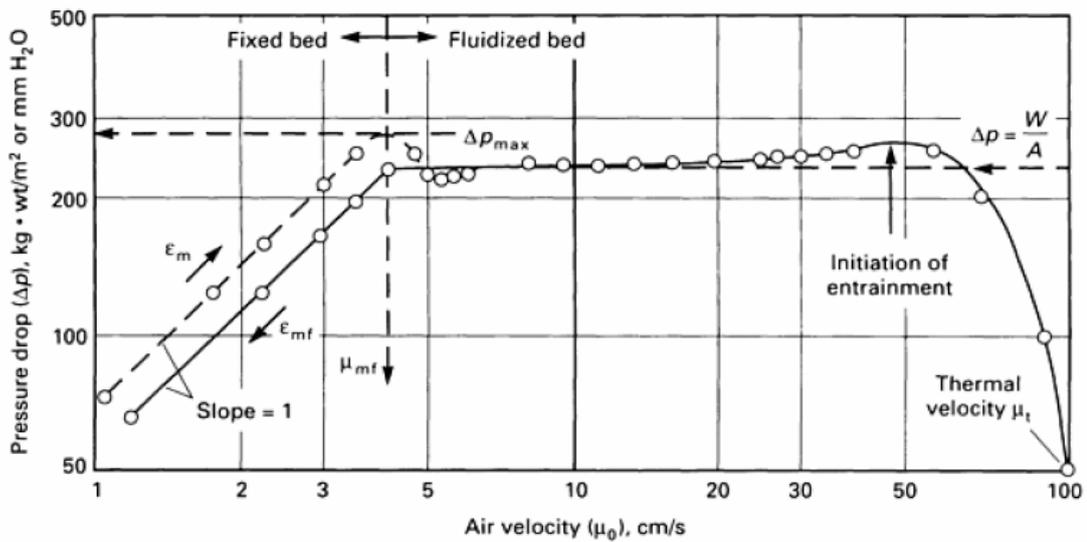


Figura 2.2: Caída de presión vs velocidad del gas para un lecho fluidizado de partículas con tamaño no uniforme [1].

Cuando la velocidad del gas es más alta que la de mínima fluidización, la cama se expande y las burbujas crecen, resultando en una cama heterogénea. Esta es la segunda zona o fase densa gas-sólido, en donde la caída de presión va a permanecer prácticamente inalterable independientemente de que la velocidad del gas aumente. Esta zona se caracteriza por estar bien aireada y presentar una fácil deformación sin resistencia apreciable, por su carácter hidrodinámico la fase densa gas-sólido se comporta como un líquido. Si se introduce un gas dentro de un tanque que contiene un líquido de baja viscosidad, la presión requerida para la inyección del gas es parecida a la presión estática del líquido, y es independiente del flujo de gas. La constancia en la caída de presión en estas dos situaciones y el burbujeo tanto en líquido como en el lecho fluidizado, se pueden tomar como análogos.

Dos ejemplos de lechos fluidizados con bajo rendimiento se muestran en los diagramas de la Figura 2.3. Las grandes fluctuaciones de presión que se muestran en la Figura 2.3 (a) sugieren una cama con fluctuaciones; cuando se da ausencia del característico cambio de pendiente agudo en la mínima fluidización y la caída de presión anormal como en la Figura 2.3 (b), hay contacto incompleto con las partículas ocasionando que pocas estén fluidizadas.

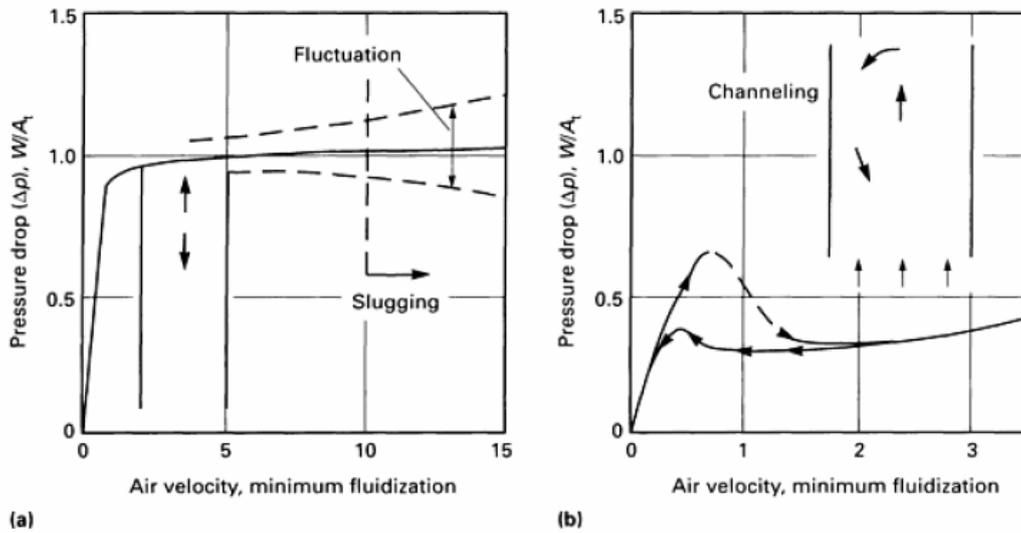


Figura 2.3: Caída de presión para camas pobremente aireadas [1].

2.2.2 Similitud entre los lechos fluidizados y los líquidos

Cuando la fluidización ocurre en un contenedor dividido en compartimientos llenados con diferente cantidad de partículas, las superficies de los diferentes compartimientos se igualan y mantienen los mismos niveles tan pronto todo el sistema este fluidizado. Este sigue el principio de comunicación de los tanques para líquidos. Se puede hundir una mano en el medio fluidizado y experimentar sensaciones similares a las que se sentirían en un líquido; por ejemplo, objetos ligeros flotan en la superficie.

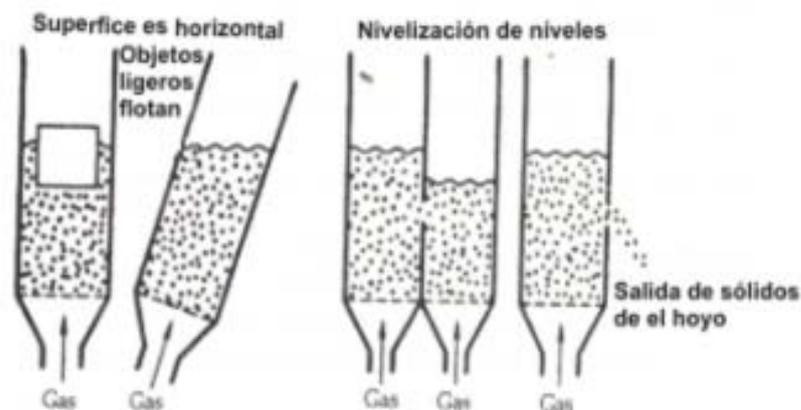


Figura 2.4: Comportamiento semejante a un líquido de un lecho fluidizado [1].

2.2.3 Número de fluidización y temperatura del lecho

Uno de los parámetros más importantes de un lecho fluidizado es el número de fluidización. Se define como la razón de la velocidad lineal del gas a través del lecho dividida por la velocidad lineal necesaria para alcanzar la condición de mínima fluidización [8]. Matemáticamente:

$$N_f = v/v_{mf} \tag{2.1}$$

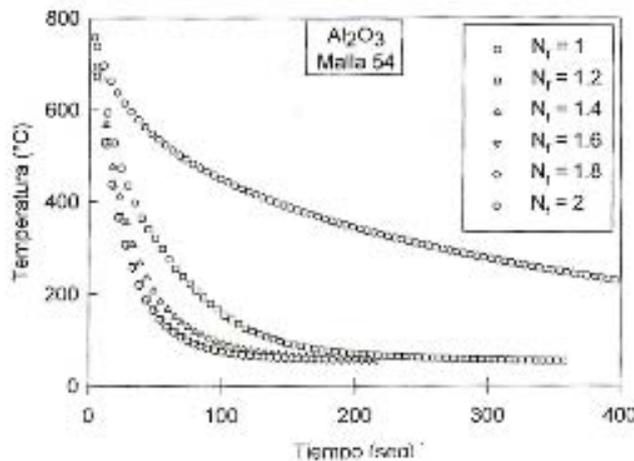


Figura 2.5: Efecto del número de fluidización sobre las curvas de enfriamiento para alumina malla 54 [15]. La probeta es de acero inoxidable.

Como una primera aproximación es posible aproximar a la velocidad de mínima de fluidización (μ_{mf}) con una función del cuadrado del diámetro de la partícula (d) y una función lineal de la masa de la partícula (p), como se muestra a continuación [8]:

$$M_{mf} = d^2 p \tag{2.2}$$

En el diseño de los hornos el efecto de la temperatura debe de ser tomado en consideración, ya que esta variable afecta considerablemente a la fluidización. Por ejemplo, en la Figura 2.6 se aprecia que al aumentar la temperatura se necesita menos flujo de gas para lograr la fluidización.

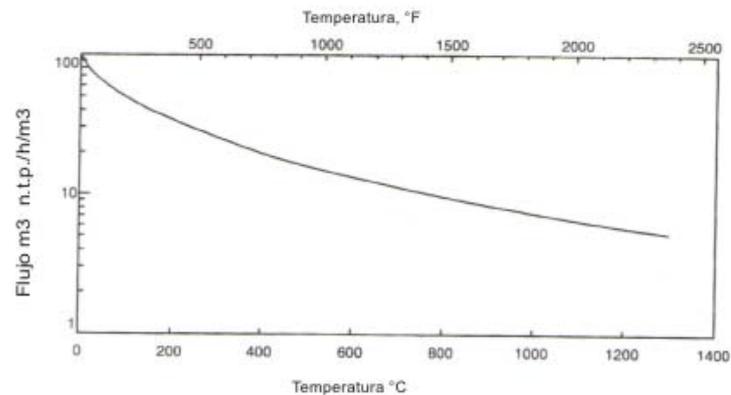


Figura 2.6: Efecto de la temperatura sobre el flujo que corresponde al de la mínima fluidización, para partículas con un diámetro de 0.1 mm [8].

2.2.4 Transferencia de calor

El coeficiente de transferencia de calor de un lecho fluidizado, está típicamente entre 120 y 1200 $W/m^2\text{°C}$. Este valor permite que las piezas sean calentadas o enfriadas a rapidezces muy cercanas a las que se obtienen en los baños de plomo o de sales. El movimiento turbulento, la rápida circulación de las partículas, y el gran tamaño del área interfacial sólido-gas son elementos importantes que contribuyen al elevado valor del coeficiente de transferencia de calor en un lecho fluidizado.

En el trabajo realizado por Kovacs [7] se ha establecido que los siguientes parámetros son importantes para el desempeño térmico de un lecho fluidizado:

i) Diámetro de la partícula

Resultados experimentales muestran que la máxima rapidez de enfriamiento es directamente proporcional al tamaño de partícula (ver Figura 2.7). En la práctica se ha encontrado que el tamaño óptimo de la partícula se encuentra en el rango de 100 a 150 μm .

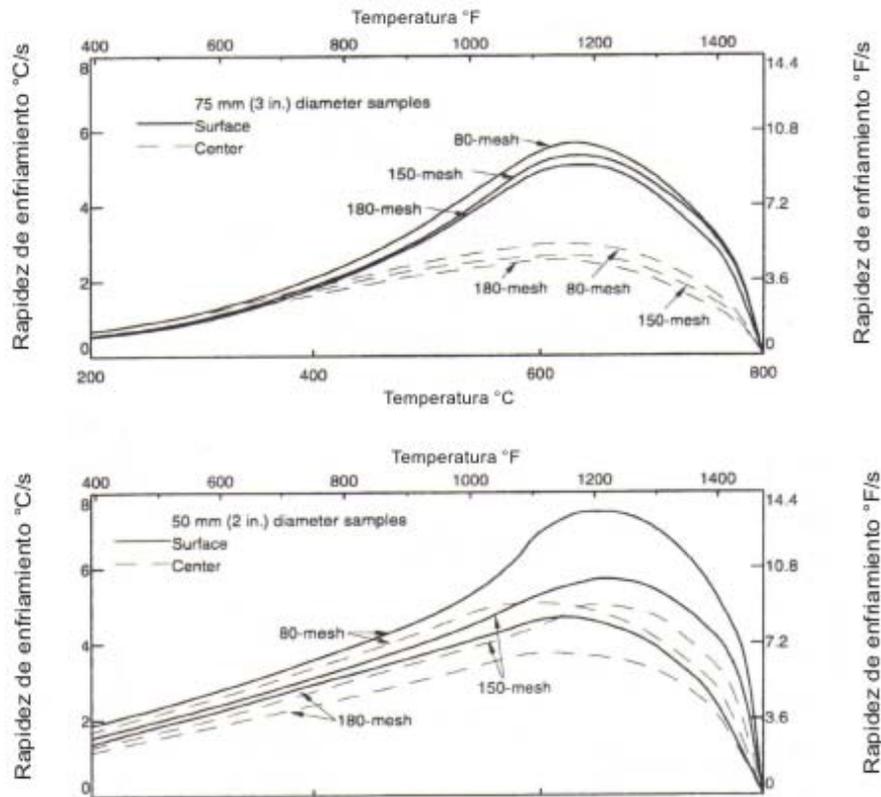


Figura 2.7: El efecto del tamaño de grano de la alúmina en las curvas de enfriamiento para probetas de diámetros de 50 y 75 mm x 100 mm de longitud[8].

ii) Tipo de partícula y densidad

Se han reportado trabajos para un gran rango de tamaño y tipo de partículas (como se muestra en las Figuras 2.8 y 2.9). Los resultados indican que la conductividad térmica de la partícula tiene poco o nulo efecto en las características de transferencia de calor del lecho, pero se ha encontrado que la densidad de partícula es muy importante. En la práctica se ha encontrado que el carburo de silicio y la alúmina son las más convenientes a una densidad cercana a 1760 kg/cm^3 . Como puede apreciarse en la Figura 2.10, el coeficiente de transferencia de calor de la alúmina es solo marginalmente superior al del carburo de silicio. Generalmente el gran costo del carburo de silicio ha hecho que se prefiera la alúmina.

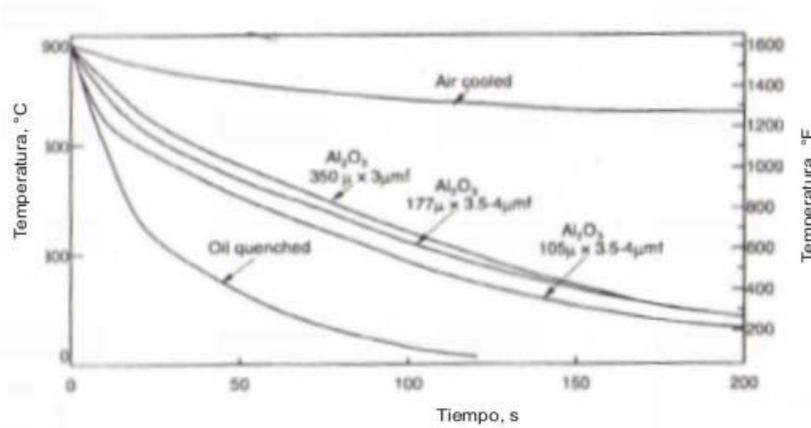


Figura 2.8: El efecto del tamaño de la partícula de alúmina en la respuesta térmica [10].

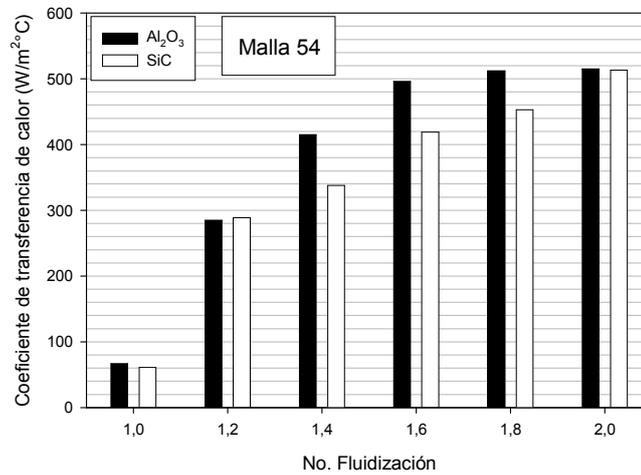


Figura 2.9: Coeficientes de transferencia de calor en función del número de fluidización para experimentos con alúmina o con carburo de silicio (ambos para malla 54) [12].

iii) Velocidad de fluidización del gas

Sin importar el medio de fluidización o el gas empleado para soportarlo, diversas pruebas han mostrado que la transferencia de calor óptima se logra cuando la velocidad de fluidización es 3 a 4.5 veces mayor que la mínima requerida para la fluidización. El aumento de la velocidad requerida para el enfriamiento refleja la importancia del mecanismo convectivo de transferencia de calor.

iv) Composición del gas

El gas empleado en la mayoría de los trabajos reportados es el aire, pero en el comienzo de los 1970's el efecto del tipo de gas en la rapidez de enfriamiento comenzó a estudiarse, como se muestra

en las Figuras 2.10 y 2.11. La razón por la cual se utiliza aire, es que a temperatura ambiente el volumen de gas requerido para la fluidización es muy grande, por lo que por consideraciones de costo se limita el uso de otros gases.

El alto costo del helio, alrededor de 20 a 30 veces el costo por metro cúbico de nitrógeno, es el mayor problema para cambiar al helio. Se ha propuesto al hidrógeno, sujeto a condiciones de seguridad, como una posible alternativa del rendimiento del enfriamiento ya que tiene la ventaja de que es un gas menos costoso. Se ha reportado que en la fase inicial del enfriamiento desde la temperatura de endurecimiento, si se introduce helio hasta que la pieza alcanza la temperatura Ms, a partir de ese punto se puede introducir nitrógeno para reducir la rapidez de enfriamiento y también ahorrar helio.

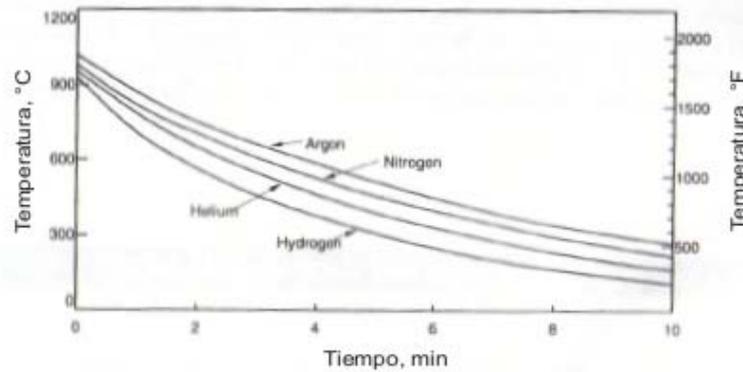


Figura 2.10: Efecto de la composición del gas sobre la rapidez de enfriamiento para un cilindro con un diámetro de 50 mm [10].

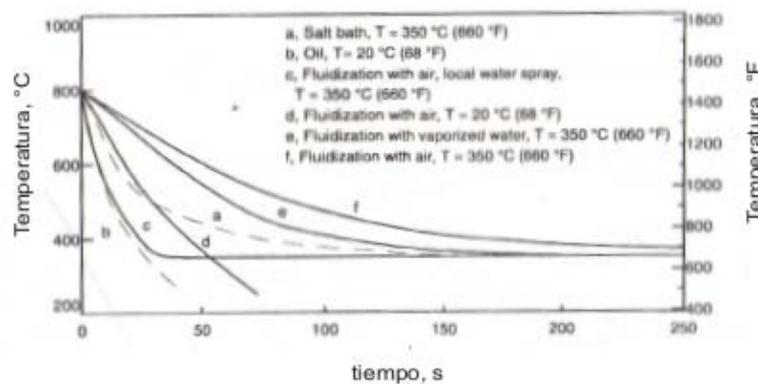


Figura 2.11: Curvas de enfriamiento para un cilindro de 25 mm de diámetro x 50 mm de largo, en varios medios de enfriamiento [10].

v) Distribuidor del gas

La Figura 2.12 muestra el efecto del tipo de distribuidor empleado sobre el comportamiento del lecho. Al pasar de un plato con un solo orificio a un tapón poroso se mejora notablemente la calidad del lecho.

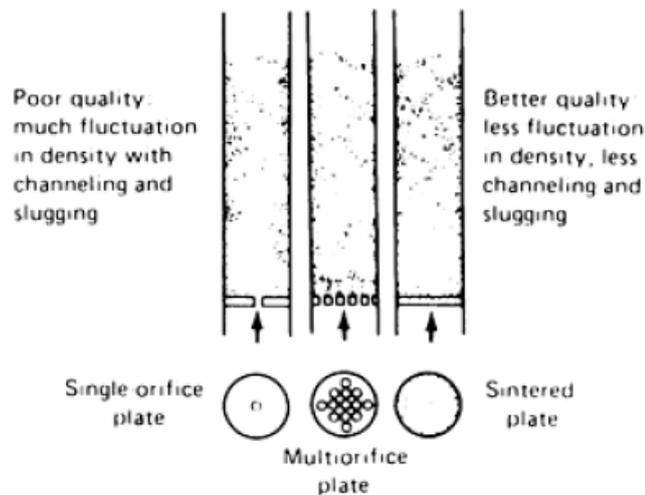


Figura 2.12. Influencia del tipo de distribuidor del gas en la calidad de fluidización [1].

Vergara estudió el comportamiento hidrodinámico de un reactor con un distribuidor de placa con múltiples orificios a partir de un modelo físico; además caracterizó el impacto del burbujeo y del acanalamiento en la extracción de calor del lecho fluidizado [13, 15]. Demostró que la presencia de borbotones y acanalamiento son inherentes al diseño del distribuidor. En cuanto al comportamiento térmico, en la Figura 2.13 se aprecia que la extracción de calor aumenta rápidamente al pasar de la velocidad de mínima fluidización a una condición de 1.11 veces ese valor, pero después ya no se observan cambios significativos al aumentar la velocidad del aire que se alimenta al lecho.

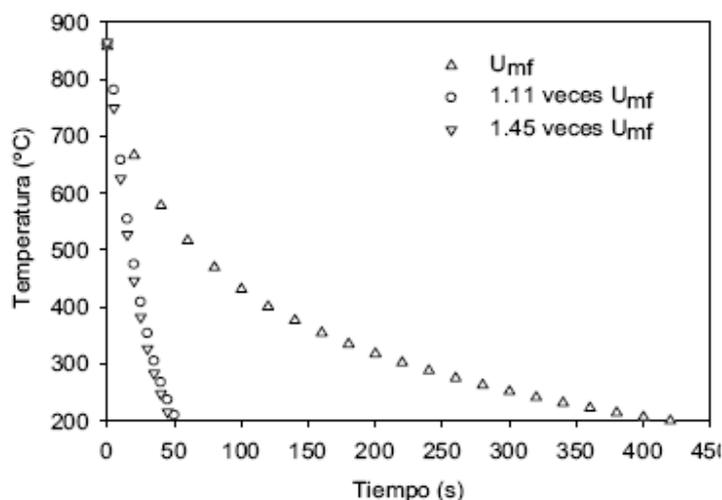


Figura 2.13. Curvas de enfriamiento de probetas de acero inoxidable AISI 304 enfriadas en un sistema alúmina-aire: sin burbujeo (triángulos) y con burbujas (triángulos invertidos y círculos) [13].

2.2.5 Temple en el lecho fluidizado

Las severidades de temple obtenidas con un lecho fluidizado están entre las que se obtienen en aire quieto y aceite de lenta agitación como medios de temple, por lo que es posible utilizar este tipo de reactores para templar aceros que tengan buena templabilidad. Algunas ventajas de templar en un lecho fluidizado son: su flexibilidad, buen control de proceso, y limpieza; en contraposición, una de las desventajas, que inhibe su uso, es el costo del gas. A pesar de que el uso del lecho fluidizado está limitado por el costo de operación, presenta la ventaja de una rapidez transferencia de calor relativamente uniforme en todo el rango de temperaturas durante el temple, por lo cual el proceso es reproducible. El lecho fluidizado no tiene las desventajas ambientales del temple en aceites o en sales fundidas.

La Figura 2.14 muestra las curvas de respuesta térmica para el temple del acero AISI 9840 en un lecho fluidizado de alúmina-aire a temperatura ambiente realizado por Dueñas [11]. Para el temple con aire a 53 l/min se obtuvo bainita, mientras que el temple con aire a 95 l/min produjo martensita. Con este ejemplo se ilustra la flexibilidad del lecho fluidizado ya que, utilizando un mismo medio de temple, se pueden obtener resultados distintos. Cabe mencionar que en ese trabajo se utilizó un plato multiperforado en la base del reactor como distribuidor.

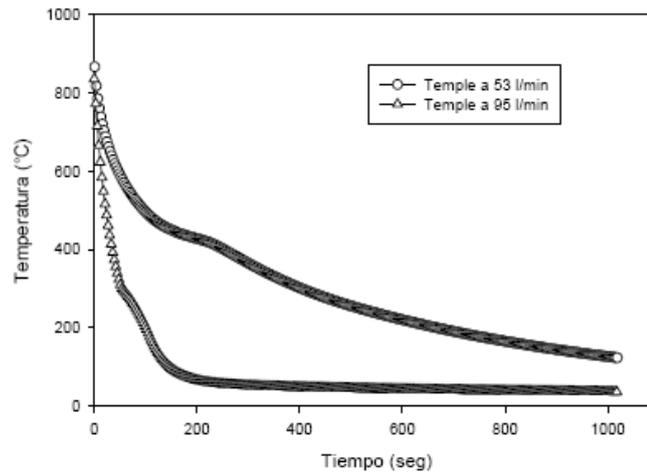


Figura 2.14. Respuesta térmica de probetas de acero AISI 9840 templadas en un lecho fluidizado: con flujo de mínima fluidización, correspondiente a 53 l/min de aire, (círculos); y con 95 l/min (triángulos) de aire [11].

2.3 Martensita

La martensita es un componente microestructural metaestable que se encuentra en aleaciones ferrosas y no ferrosas. Floris Osmond la llamó así en 1895, en honor al metalógrafo alemán Adolf Martens [2,3].

La martensita, en aceros, es esencialmente una solución supersaturada, intersticial, sólida de hierro y carbono. La martensita se forma en el acero cuando este es enfriado rápidamente desde la fase austenita. Debido a que la transformación martensítica se produce desde una fase de alta temperatura en equilibrio a una fase de baja temperatura, inestable, la martensita es metaestable y solo se produce a rapidezces de enfriamiento muy altas. Se ha propuesto un mecanismo cortante para explicar esta transformación, en donde un gran número de átomos se mueven casi al mismo tiempo cooperativamente, todo lo contrario al movimiento átomo por átomo que ocurre en las transformaciones con difusión. Esta acción cortante produce dos características importantes en la transformación: relaciones de orientación entre la fase original y el producto y una superficie inclinada alrededor del cristal de la martensita. Debido a la ausencia de difusión en la transformación, tanto la austenita como la martensita tienen la misma composición [2].

La extensión de la transformación martensítica depende de la temperatura, y solamente ocurre dentro de un rango de temperatura definido por las temperaturas a las que comienza (M_s) y termina

(M_f) la transformación. Puede haber austenita presente después de que el proceso de temple termine; se le llama austenita retenida [5].

Es importante notar que las temperaturas M_s y M_f no presentan histéresis como las temperaturas críticas de las transformaciones tipo difusión. Cuando el contenido de carbono del acero aumenta, la formación de carburo se incrementa, por lo cual la temperaturas M_s y M_f disminuyen (Figura 2.15)

En el acero se observan generalmente dos morfologías distintivas para la martensita: aguja y placa. Los aceros con un por ciento en peso de carbono abajo del 0.6, presentan predominantemente una morfología tipo aguja. En cambio las aleaciones que están por arriba del 0.6 presentan una morfología tipo placa.

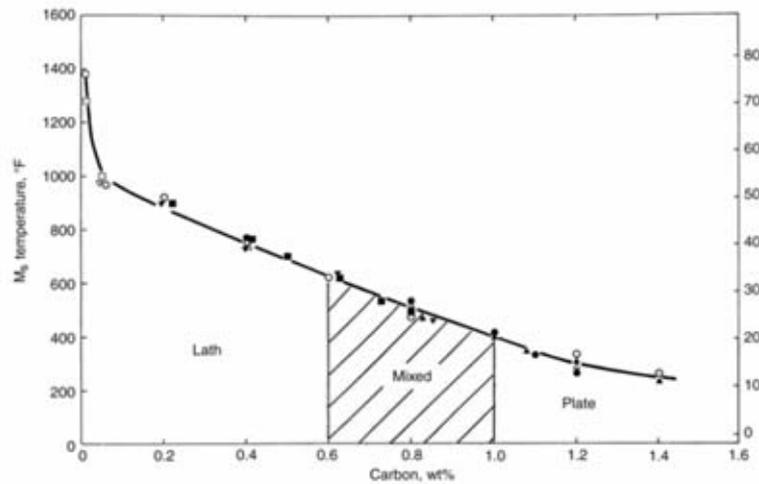


Figura 2.15. Temperaturas de comienzo de la transformación de la martensita (M_s) y morfología de la martensita como función del contenido de carbono [5].

CAPITULO 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este capítulo se describe el equipo utilizado y el procedimiento experimental seguido para la obtención de la velocidad mínima de fluidización y de las curvas de enfriamiento durante el temple, así como la caracterización metalúrgica del producto.

3.1. Equipo

El reactor de lecho fluidizado se construyó con acero al carbono y está compuesto de una columna de fluidización cilíndrica de 0.7 m de longitud por 0.13 m de diámetro, con una cámara de 0.14 m de longitud y 0.13 m de diámetro dentro de la cual se encuentra el filtro. La cámara y el lecho se conectan por medio de bridas de tal forma que el filtro quede en la entrada de la columna de fluidización, mientras una tela de acero inoxidable malla 200 se coloca en la parte superior del filtro para evitar la infiltración de partículas finas en el filtro, evitando que se atasque y disminuya la eficiencia en la distribución del aire. Además se coloca un manómetro diferencial tipo U para determinar la diferencia de presión dentro del sistema, y así obtener la velocidad de mínima fluidización.

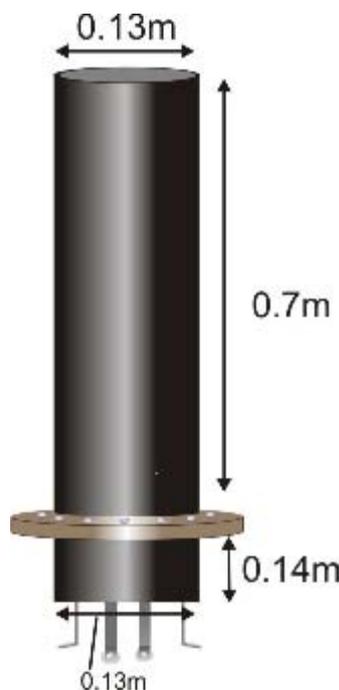


Figura 3.1: Esquema del reactor de lecho fluidizado.

El distribuidor de aire (de 12 cm de diámetro x 7.5 cm de altura, ver Figura 3.2) utilizado se fabricó con arena shell para corazones de fundición, la cual se clasificó por medio de cribas para obtener un tamaño de partícula de malla 60, con lo cual se consigue una porosidad homogénea en todo el filtro. La arena se compactó en moldes cilíndricos y se sinterizó para que el filtro fuera estable.

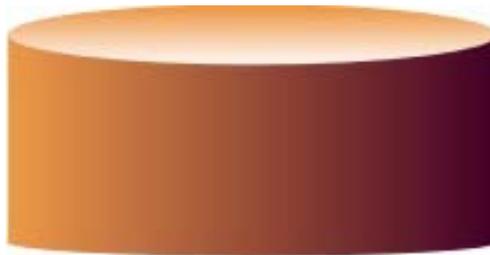


Figura 3.2: Distribuidor de aire empleado dentro del reactor de lecho fluidizado.

El sistema que suministra aire al lecho fluidizado (Figura 3.3) esta conformado por:

- Un compresor (marca Evans) de 120 litros de capacidad que trabaja en un rango de presión de entre 80 y 120 psi , que suministra aire al sistema.
- Filtro y desecador que limpian el aire removiendo partículas de aceite y agua.
- Regulador de presión para asegurar que el flujo de aire sea estable y constante.
- Rotámetros marca Cole Palmer, que regula la cantidad de aire que entra al sistema.

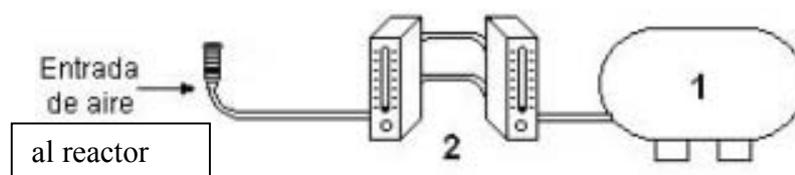


Figura 3.3. Esquema del sistema que suministra aire al reactor. 1) Compresor de aire, 2) rotámetros.

El sistema de calentamiento es un horno de resistencias cilíndrico tipo libro (Figura 3.4), el cual se abre en la mitad para la entrada y salida de la probeta.

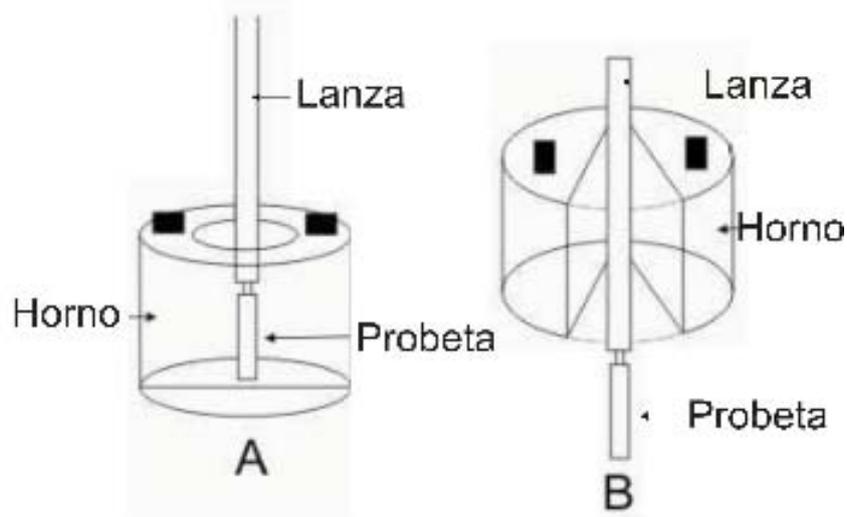


Figura 3.4: Horno tipo “libro” utilizado en los experimentos: A) la probeta se calienta a 850 °C. B) se abre el horno y se efectúa el temple sumergiendo la probeta en el lecho fluidizado.

Se construyó un soporte metálico (Figura 3.5) constituido de un marco y de dos ejes, por los que se desplaza la lanza que guía a la probeta en su descenso desde la posición de calentamiento a la de temple.

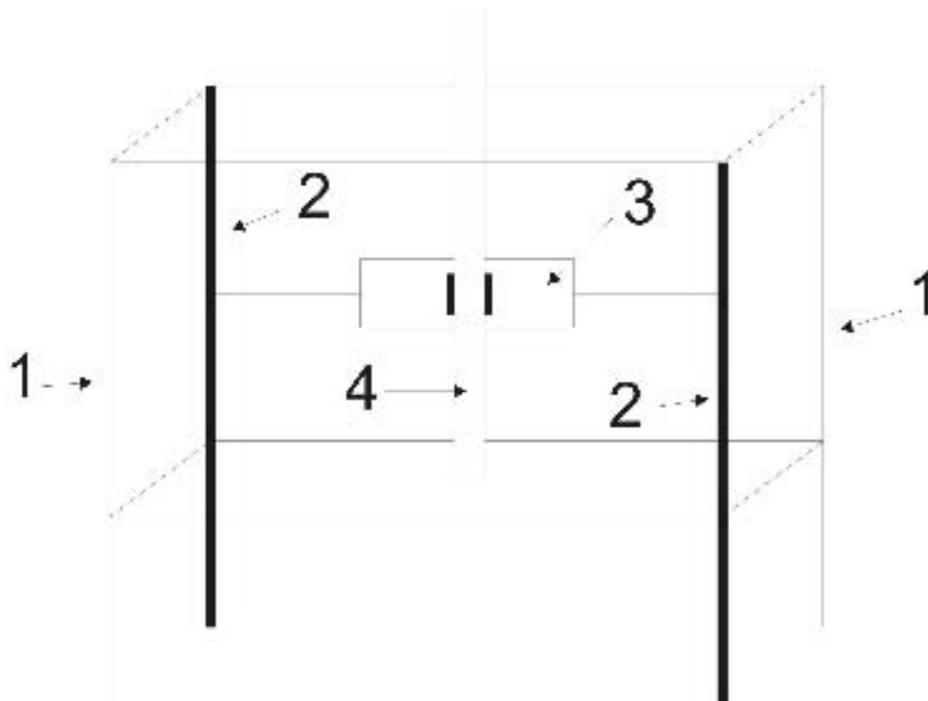


Figura 3.5. Soporte metálico: 1) jaula, 2) ejes, 3) placa, 4) tubo.

3.2 Probetas

Las probetas empleadas (ver Figura 3.6) se fabricaron de acero AISI 4140 y AISI 9840, y sus dimensiones fueron: 12.7 mm de diámetro y 50.8 mm de longitud. Cada probeta fue instrumentada con un termopar, para lo cual se maquino un barreno, este barreno se encuentra en el centro geométrico y su profundidad es a la mitad de la longitud de la probeta. Los termopares empleados para realizar la medición son tipo K, de 1/16 de in. de diámetro.

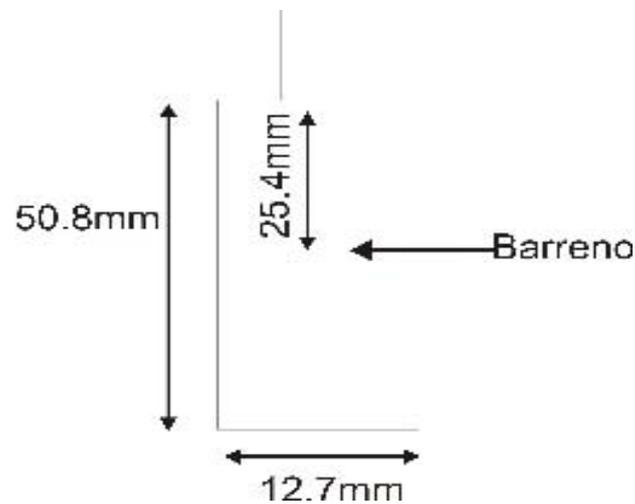


Figura 3.6: Esquema de las probetas utilizadas en la experimentación.

3.3. Condiciones experimentales

Los experimentos se diseñaron considerando los límites de rapidez de enfriamiento que podrían producirse con el reactor de lecho fluidizado. En la tabla 3.1 se enlistan las condiciones de trabajo que se emplearon para realizar los experimentos.

Tabla 3.1: Condiciones para los experimentos.

| | |
|------------------------------------|--------------------|
| Temperatura de austenización | 850°C |
| Tiempo de austenización | 15 min |
| Número de fluidización | 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 |
| Presión del sistema | 80 psi |
| Frecuencia de adquisición de datos | 1 seg |

3.4 Obtención de la velocidad de mínima fluidización

La velocidad de mínima fluidización se determina a través de experimentos en frío en los que se mide la caída de presión en función del flujo volumétrico. Debe notarse que el orificio inferior del manómetro se colocó arriba del distribuidor poroso. De esta forma los gradientes de presión únicamente corresponden al lecho fluidizado. Ya que se obtuvo la velocidad de mínima fluidización, el distribuidor se colocó en la salida exacta de la cámara de distribución.

3.5 Obtención de las curvas de enfriamiento

El procedimiento experimental comenzaba instalando los termopares en los barrenos de la probeta. Prosiguiendo con la colocación de la probeta en el soporte metálico. La probeta se calentaba hasta 850°C dentro del horno de resistencias y se mantenía a esa temperatura durante 15 minutos.

El lecho fluidizado se cargaba con la cantidad de alúmina necesaria para alcanzar una altura de 19 cm. Los termopares eran conectados a un sistema de adquisición de datos de 6 canales, marca Keihtley's Smartlink modelo KBNM – TC42, que a su vez se conectaba a una computadora portátil. Se introducía aire al lecho fluidizado, cuidando que el flujo de aire y la presión fueran los adecuados. Se configuraba el sistema de adquisición de datos y se empezaba a grabar el historial térmico.

La probeta se calentaba hasta 850 °C en el horno de resistencias tipo libro. Se preparaba el sistema que suministra aire, para lo cuál los rotámetros se ajustaban a los valores especificados. Una vez transcurridos 15 minutos desde que la probeta alcanzaba 850 °C, el horno se abría y desplazaba

hacia atrás, para permitir que la probeta se sumergiera dentro del lecho fluidizado. La grabación del historial térmico se finalizaba cuando la probeta alcanzaba una temperatura de aproximadamente 40°C.

3.6 Metalografía y medición de dureza

Una vez terminado un ensayo, la probeta se cortaba a la mitad para realizar metalografía y ensayo de dureza (Rockwell C).

3.7 Aceros AISI 4140 Y AISI 9840

Los Diagramas CCT son muy usados para predecir las microestructuras finales de la aleación de interés, cuando es enfriada continuamente en un medio de temple. Uno de los métodos más empleados para construir los diagramas CCT es por medio de la dilatometría [9]. En este método las temperaturas de transformación para los correspondientes productos finales son obtenidas de las curvas de dilatación vs. temperatura; estas curvas se apartan de un comportamiento lineal cuando comienza una transformación de fase (debido a que estas transformaciones siempre producen un cambio, positivo, de volumen). Estas temperaturas son asociadas a las correspondientes curvas de enfriamiento para trazar el diagrama CCT.

La forma más común en que son presentados estos diagramas es la de temperatura vs. tiempo, pero también se usan diagramas que utilizan a la temperatura y a la rapidez de enfriamiento como ejes. Para facilitar la lectura, es común agregar un segundo eje de abscisas donde aparece el diámetro de la barra asociado con el enfriamiento en diversos medios de temple (por ejemplo, aire, aceite y agua).

La interpretación de estos diagramas es que para un determinado diámetro se puede hacer una estimación de la microestructuras que se formaran en el centro de la pieza para condiciones de enfriamiento en aire, temple en aceite, y temple en agua; por ejemplo en la figura 3.7, que es un diagrama CCT para el acero AISI 4140, a un diámetro de 10 mm enfriado en aire se traza una línea recta (desde la temperatura de austenización hasta la temperatura final del proceso), la cual muestra que se esperaría obtener ferrita, perlita, y pequeñas cantidades de bainita como microestructuras finales para este diámetro. Otro ejemplo, en la figura 3.7, sería el de trazar una línea recta (desde la

temperatura de austenización hasta la temperatura final del proceso) para un diámetro de 12.78 mm, en donde se observa que la línea únicamente cruza la zona de martensita, por lo cual solo se obtendría martensita como microestructura final.

En la Figura 3.8 se muestra el diagrama CCT para el acero 9840.

Finalmente, para este trabajo, que es el temple de los aceros AISI 4140 y AISI 9840 templados en el lecho fluidizado, se empleará la rapidez de enfriamiento obtenida con un determinado número de fluidización a una temperatura específica, para determinar que microestructuras finales se obtendrían. Esto es debido a que no hay reportados diagramas CCT para su uso con lechos fluidizados.

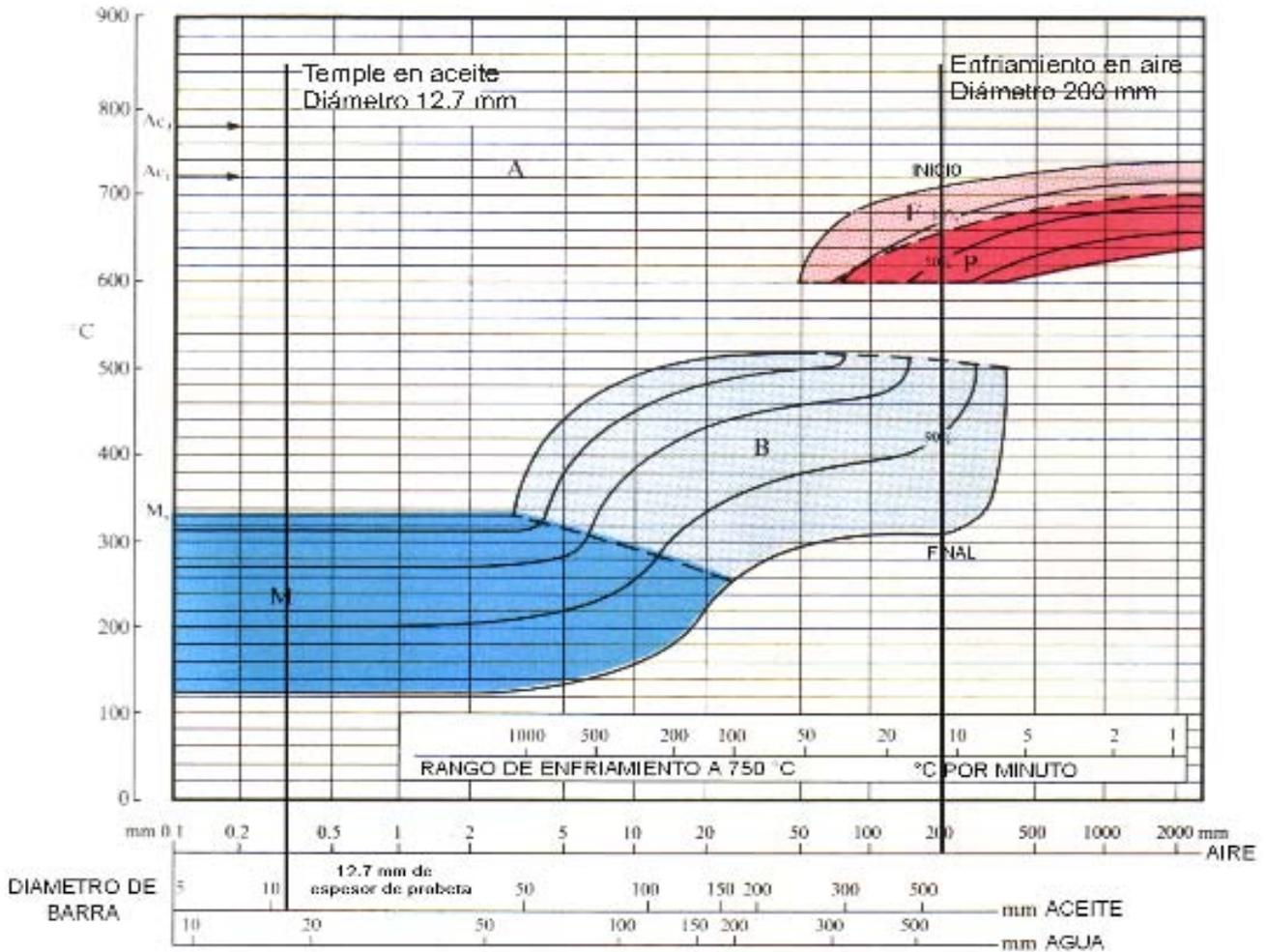


Figura 3.7: Diagrama CCT para el acero AISI 4140 [16]. Se muestran dos procesos de tratamiento térmico.

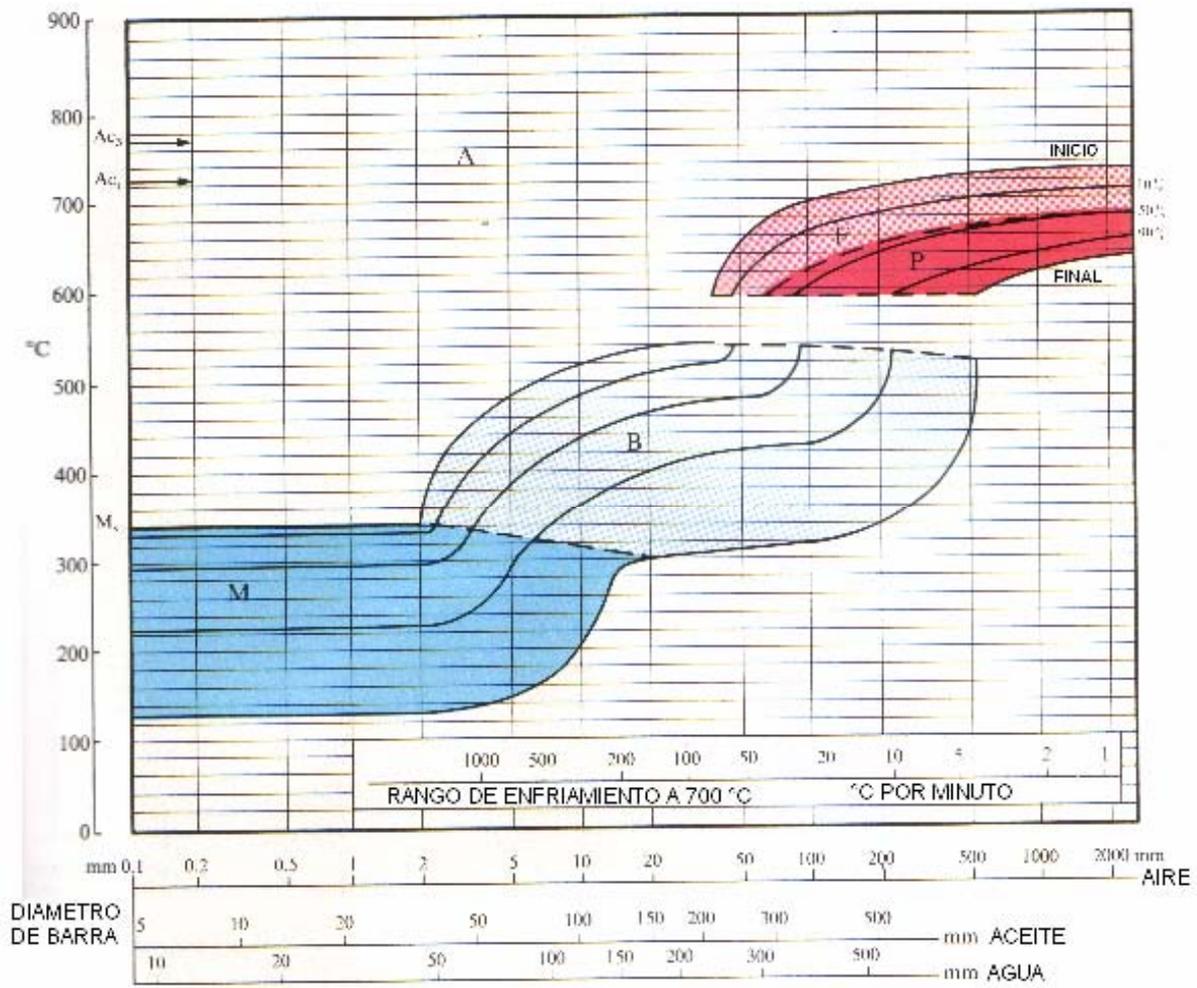


Figura 3.8: Diagrama CCT para el acero AISI 9840 [4]

Capítulo 4. Resultados y análisis de resultados

En esta sección se presentan y analizan los resultados obtenidos durante los experimentos con los aceros AISI 4140 y AISI 9840.

4.1 Acero AISI 4140

En la figura 4.1 se presenta el ciclo completo de tratamiento, que comprende: calentamiento, austenizado, y temple. Las dos primeras etapas se llevaban a cabo en el horno de resistencias y la última en el lecho fluidizado alúmina-aire.

La primera etapa es el calentamiento, que es la etapa más larga y comprende el tiempo en el que la probeta está dentro del horno de resistencias. Se observa al principio un calentamiento rápido pero conforme la probeta se acerca a los 600°C este va disminuyendo, debido a que la diferencia de temperaturas entre el horno y la probeta se reduce. En la segunda etapa la probeta alcanza aproximadamente los 850°C y se mantiene durante 15 minutos a esta temperatura. En esta etapa es cuando se da la transformación a austenita en la probeta. La razón de dejar 15 minutos la probeta dentro del horno es debido a que en las primeras pruebas realizadas se ha encontrado que es tiempo suficiente para que toda la probeta se transforme en austenita, y se ha encontrado que dejando la probeta más tiempo en el horno ya no tiene repercusión en el resultado final.

En la tercera etapa la probeta se saca del horno y se sumerge dentro del lecho fluidizado. Durante el traslado de la probeta del horno al lecho fluidizado el enfriamiento ocurre por radiación y convección al aire. Desde que la probeta entra al lecho fluidizado hasta el inicio de la transformación de fase austenita-martensita ocurre el enfriamiento más severo en la probeta. Durante la transformación se genera calor y por esa razón hay un ligero calentamiento. Una vez terminada la transformación de fase, la probeta se vuelve a enfriar pero a una severidad menor que al principio.

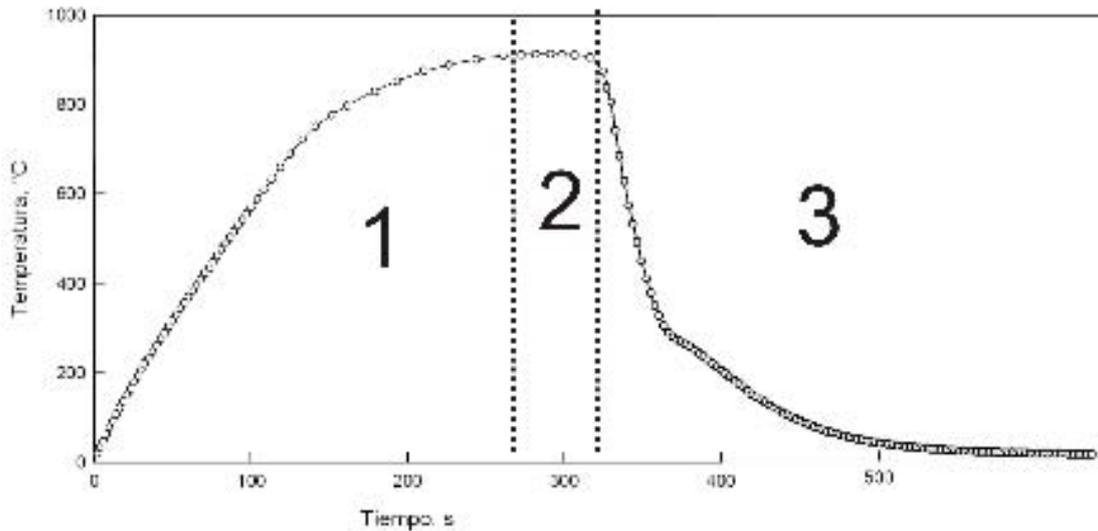


Figura 4.1. Ciclo térmico completo: 1) calentamiento, 2) austenizado, 3) temple.

Las curvas de enfriamiento que se muestran en la Figura 4.2, son el resultado del temple de probetas de acero AISI 4140 a diferentes números de fluidización en el reactor de lecho fluidizado. El temple de las probetas se realizó desde la temperatura de austenización (alrededor de 850°C) hasta alcanzar una temperatura de aproximadamente 40°C.

En la Figura 4.2 se aprecia que al aumentar el número de fluidización las curvas de enfriamiento presentan una mayor pendiente, lo que indica que la extracción de calor se incrementa. El hecho de que se pueda extraer más calor conforme se aumenta el número de fluidización es una gran ventaja tecnológica, debido a que esta característica confiere al lecho fluidizado una gran flexibilidad sin complicar la operación del mismo. Esta flexibilidad también ofrece una ventaja económica, y es que con un solo sistema se obtienen diferentes grados de temple, no como en el temple en aceite para el que se tiene que tener varios tipos de aceite para poder tener diferentes severidades de temple. Por ser un primer estudio no se pudieron obtener los intervalos de confianza, los cuales son necesarios para poder asegurar estadísticamente si las curvas de enfriamiento son iguales. Aun así para los números de fluidización de 1.2 y 1.8 están lo suficientemente separados para asegurar que las curvas de enfriamiento no son iguales.

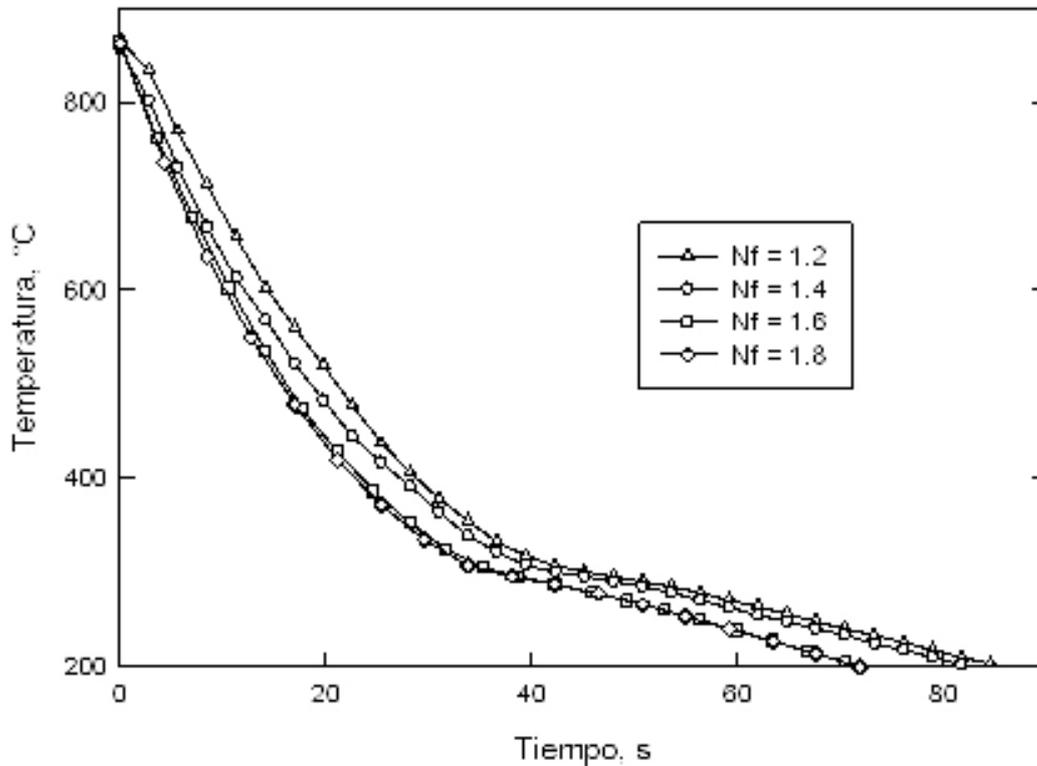


Figura 4.2: Curvas de enfriamiento para el acero AISI 4140, para diferentes números de fluidización.

A partir de los datos de temperatura vs. tiempo adquiridos durante los experimentos, se calculó (numéricamente) la rapidez de enfriamiento. Las rapidezces de enfriamiento en función de la temperatura para el acero AISI 4140 se grafican en la Figura 4.3, en donde alrededor de los 820 a 800 °C se observa un primer cambio de pendiente y alrededor de los 320°C se detecta un segundo cambio de pendiente para todas las curvas. El primer cambio de pendiente se debe a que se alcanza la máxima capacidad de extracción de calor del lecho fluidizado; a partir de esa temperatura la combinación de transferencia de calor por convección y radiación disminuye monotónicamente. El segundo cambio de pendiente ocurre por la transformación de la austenita a martensita, que es una reacción exotérmica por lo que se observa una drástica disminución de la rapidez de enfriamiento.

Las rapidezces máximas de enfriamiento que se obtuvieron de la Figura 4.3 se muestran en la Tabla 4.1. De la tabla se observa claramente que conforme se aumente el número de fluidización la rapidez máxima de enfriamiento se incrementa.

A partir de las curvas de la Figura 4.3, se observa que la transformación de austenita a martensita comienza (la rapidez de enfriamiento disminuye) alrededor de 320°C y acaba (la rapidez de enfriamiento aumenta) cerca de 250°C para todos los números de fluidización. Con esto se corrobora que las temperaturas M_s y M_f no cambian con la rapidez de enfriamiento, para las condiciones de operación estudiadas..

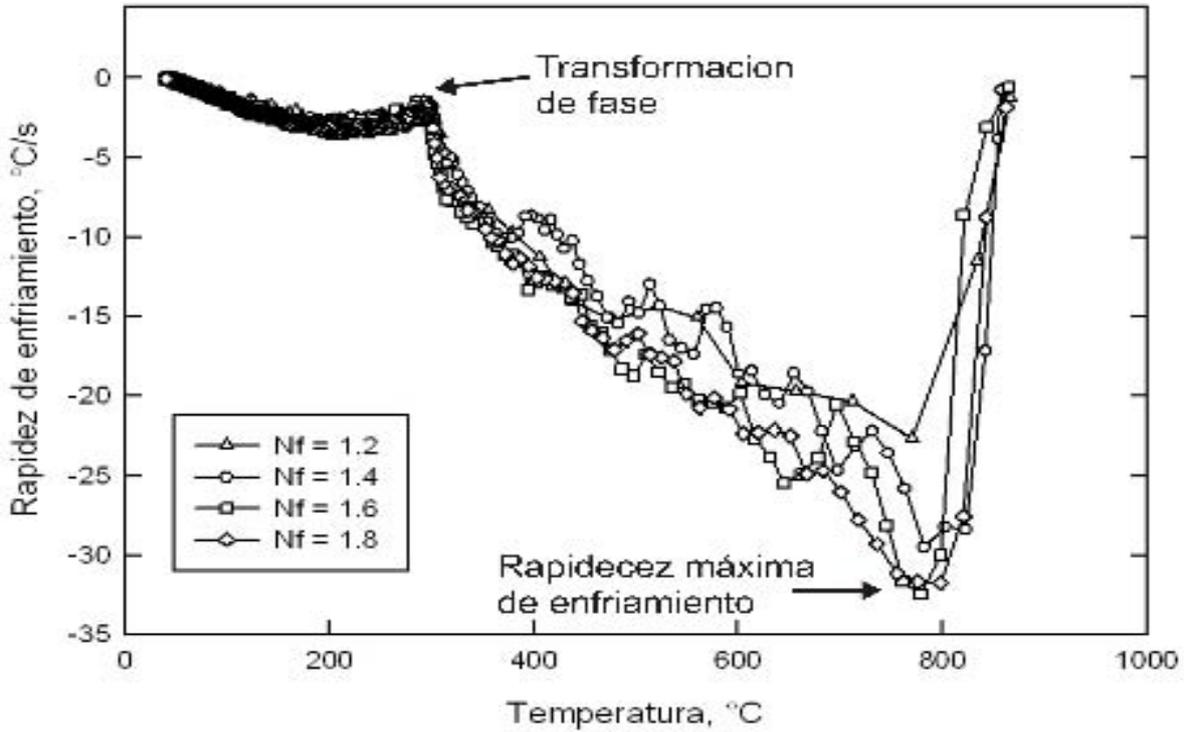


Figura 4.3: Rapidez de enfriamiento vs. temperatura para el acero AISI 4140 para diferentes números de fluidización. Los cálculos corresponden a la posición del termopar cercano a la subsuperficie.

Tabla 4.1: Rapideces máximas de enfriamiento en función del número de fluidización para el acero AISI 4140.

| N_f | Rapidez máxima de enfriamiento (°C/s) |
|-------|--|
| 1.2 | -22 |
| 1.4 | -28 |
| 1.6 | -31 |
| 1.8 | -33 |

La figura 4.3 también ilustra que las rapidezces de enfriamiento que se obtienen en un reactor de lecho fluidizado se pueden controlar con precisión. Esto da una gran ventaja que es el de obtener propiedades parecidas en los materiales que se les esta efectuando el temple.

En la figura 4.4 se grafica la evolución de las rapidezces de enfriamiento en el tiempo para diferentes números de fluidización para el acero AISI 4140. Durante los primeros 5 segundos la rapidez de enfriamiento aumenta. A partir de este punto la rapidez de enfriamiento disminuye hasta que inicia la transformación martensítica (alrededor de los 40 segundos). En la transformación de fase se genera calor, lo que ocasiona el cambio de pendiente. Después del cambio de pendiente las rapidezces de enfriamiento disminuyen suavemente.

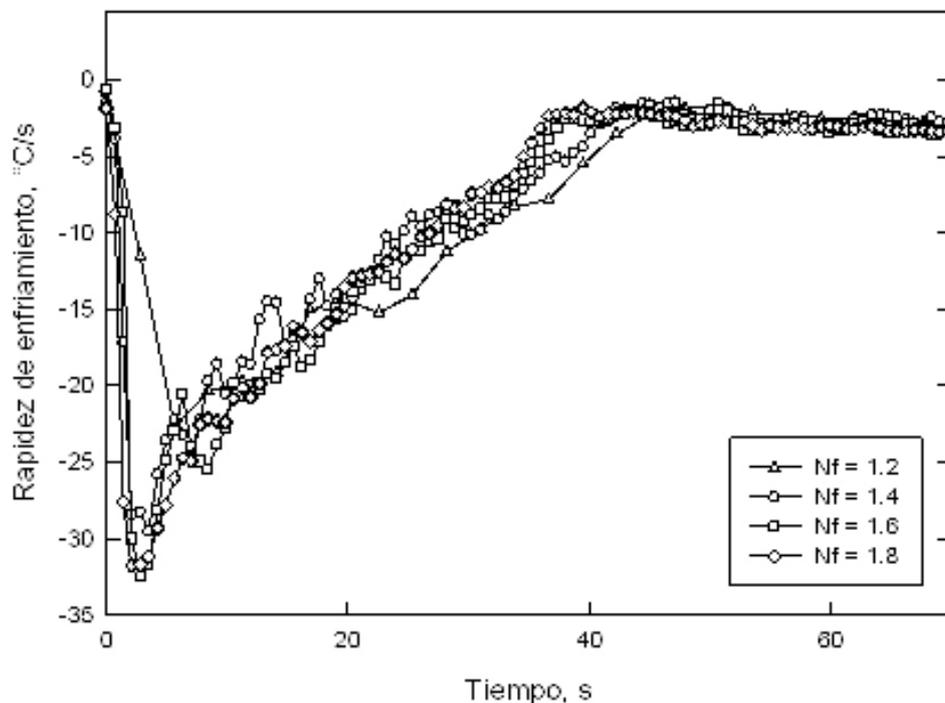


Figura 4.4: Curva de rapidez de enfriamiento vs. tiempo para el acero AISI 4140 para diferentes números de fluidización.

El efecto que se tiene al cambiar el número de fluidización en la dureza en la probeta, se muestra en la Figura 4.5. Al aumentar el número de fluidización, la dureza de la probeta también se

incrementa. La máxima dureza fue 56 HRC a un número de fluidización de 1.8; la mínima fue 51 HRC a un número de fluidización de 1.2. La incertidumbre de la medición (obtenida como la desviación estándar de 4 mediciones) es de 2 unidades. Hay que notar que no hay mucha diferencia entre las durezas obtenidas, por lo que se puede adelantar que el usar medios de enfriamiento que favorezcan una mayor extracción de calor (tales como agua o aceite) no ayudarían mucho a obtener durezas más grandes, debido a que el acero AISI 4140 presente una excelente templabilidad.

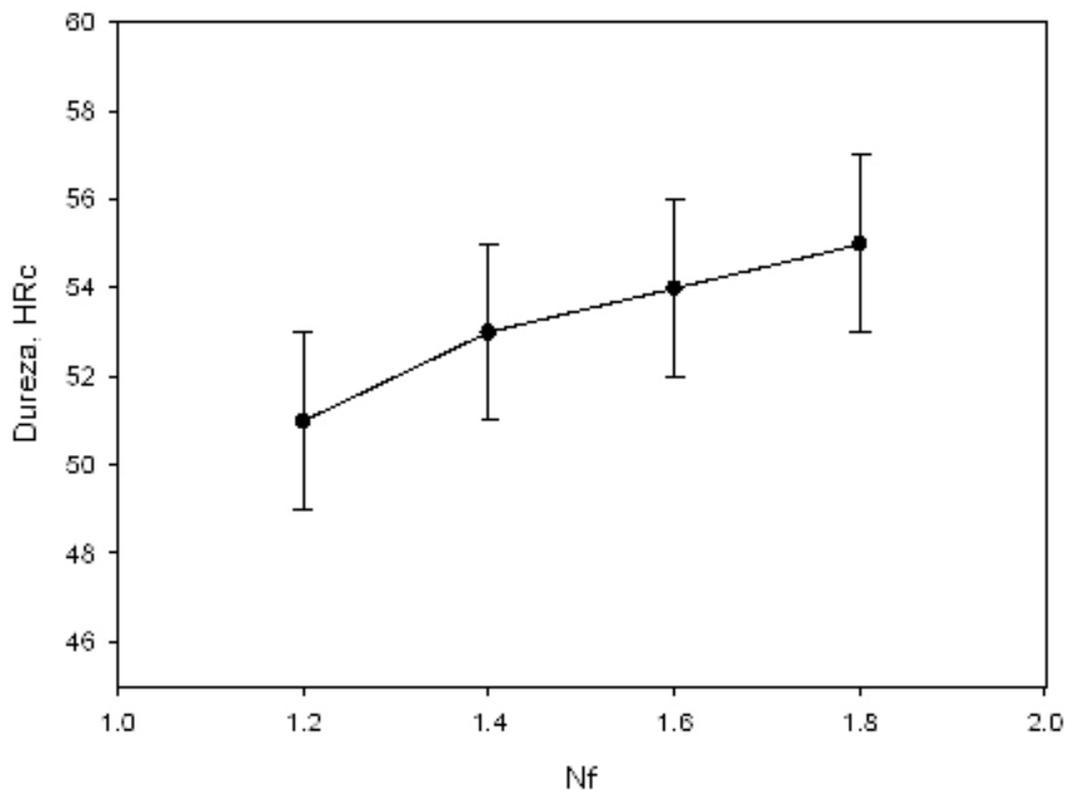


Figura 4.5: Durezas en función del número de fluidización para un acero AISI 4140.

Las metalografías de las microestructuras finales correspondientes al acero AISI 4140 se presentan en las Figuras 4.6 a la 4.9. En todas las imágenes se observa la presencia de martensita sin que se aprecien otras fases, tales como perlita o bainita. Relacionando a los resultados de la Figura 4.5 con las metalografías obtenidas, se concluye que el único factor que podría explicar el aumento de la dureza en la Figura 4.5 es la disminución de la austenita retenida, ya que la influencia de otros microconstituyentes queda descartada al no haberse detectado en las microestructuras, y sabiendo que la composición química del acero no varió

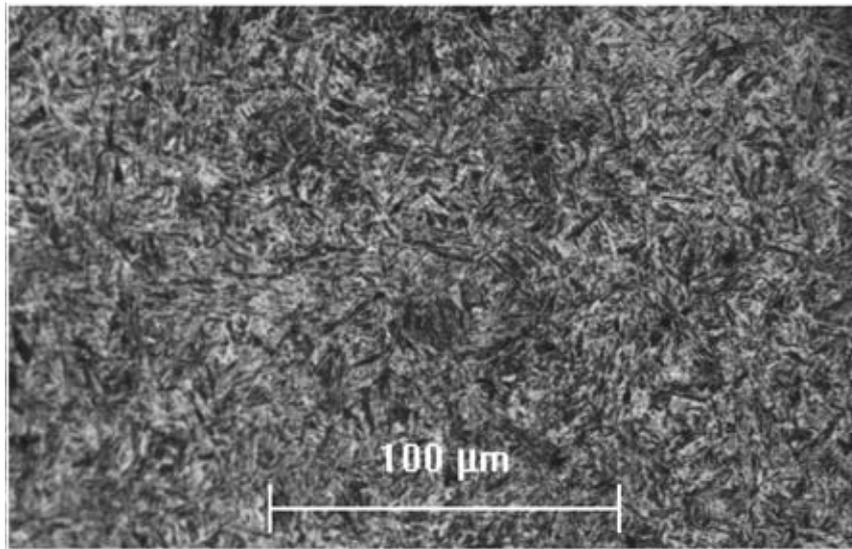


Figura 4.6 Metalografía de la muestra de acero 4140 templada en un lecho fluidizado con $N_f = 1.8$.

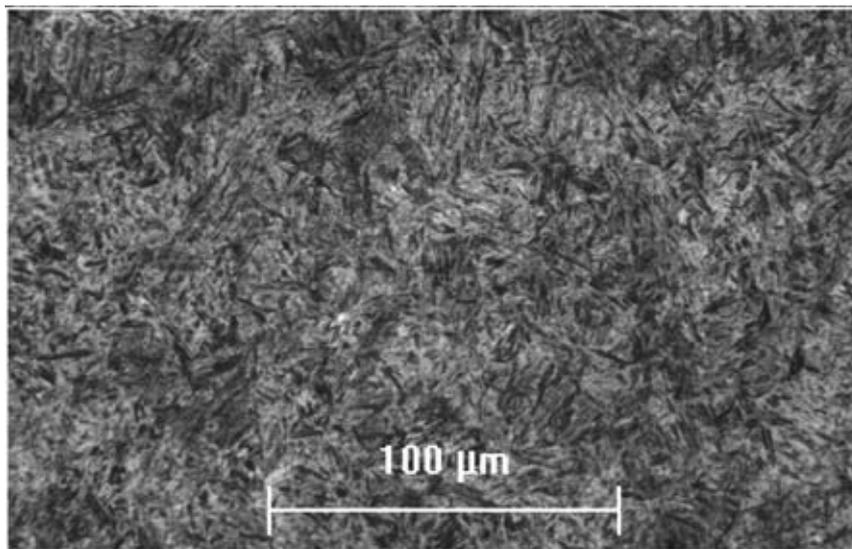


Figura 4.7: Metalografía de la muestra de acero 4140 templada en un lecho fluidizado con $N_f = 1.6$.

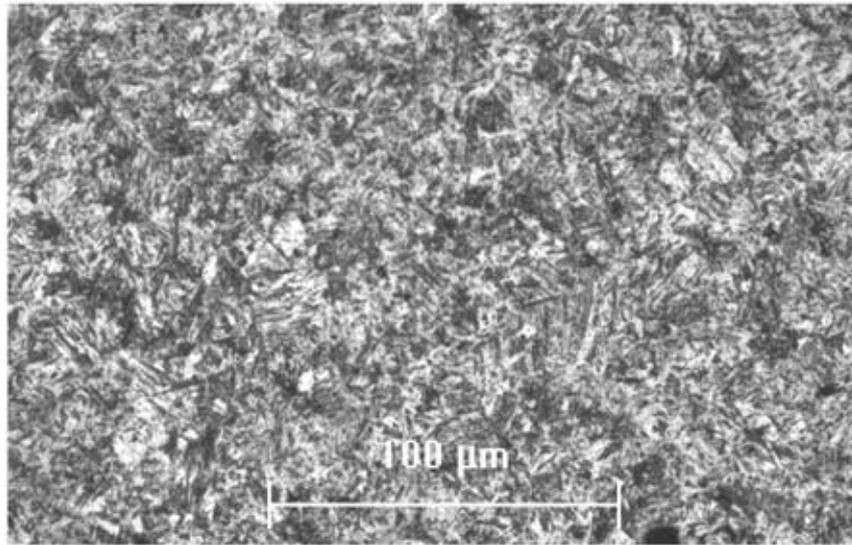


Figura 4.8 Metalografía de la muestra de acero 4140 templada en un lecho fluidizado con $N_f = 1.4$.

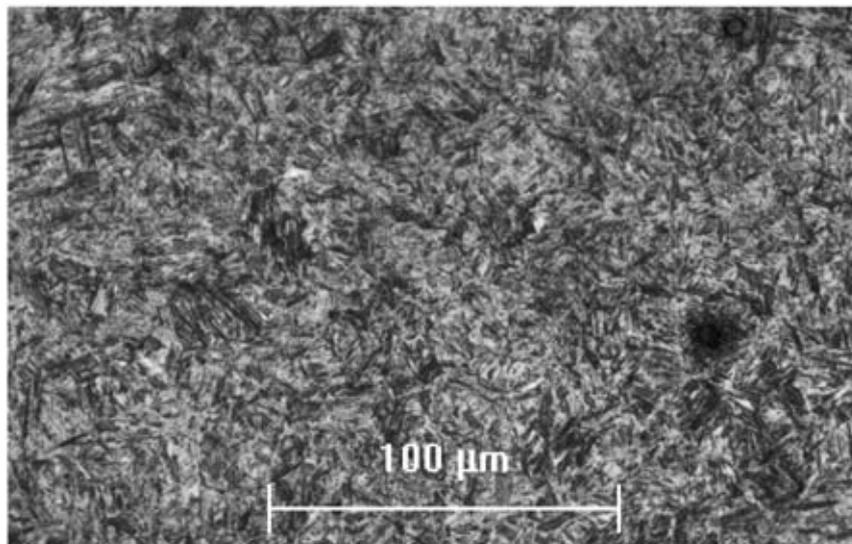


Figura 4.9 Metalografía de la muestra de acero 4140 templada en un lecho fluidizado con $N_f = 1.2$.

4.2 Acero AISI 9840

Las curvas de enfriamiento para el acero AISI 9840 se muestran en la Figura 4.9; estas curvas se obtuvieron bajo las mismas condiciones que para el acero 4140. Además, en esa misma figura se puede apreciar el comportamiento térmico de la probeta de acero 9840 en otros medios de enfriamiento, en

donde el aire es el más lento y el aceite es el más rápido quedando en medio de estos el enfriamiento en lecho fluidizado. Se observa que por medio del lecho fluidizado se pueden obtener varias condiciones de enfriamiento lo cual lo convierte en un medio de temple flexible. Tanto para el aceite como para el lecho fluidizado, el cambio de pendiente más significativo se observa alrededor de los 320 °C, con lo cual se puede adelantar que se obtendrá la misma distribución final de microestructuras.

Al ir aumentando el número de fluidización, las curvas de enfriamiento tienden a ser desplazadas hacia mayores rapidez de enfriamiento; este mismo efecto ocurre en el acero AISI 4140. Entonces el número de fluidización de 1.8 es donde se tiene el enfriamiento más severo. Bajo todas las condiciones de enfriamiento se aprecia un recalentamiento, asociado con una transformación de fase en estado sólido, alrededor de 320 °C.

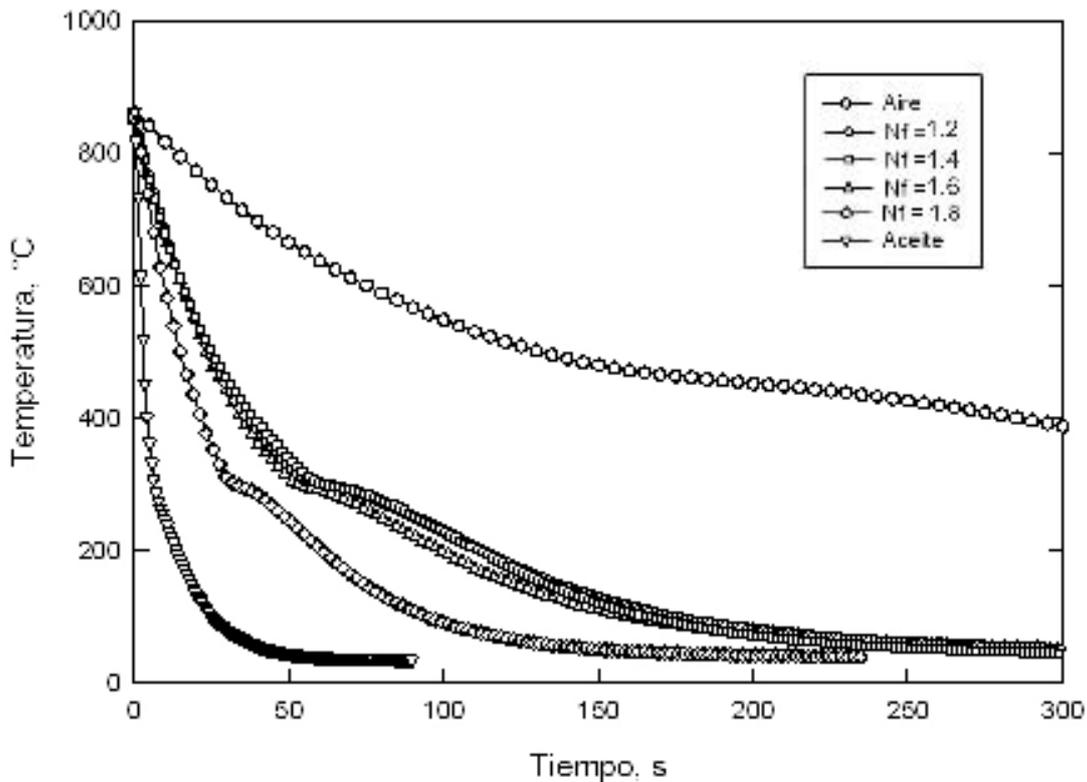


Figura 4.10: Curvas de enfriamiento para el acero AISI 9840, para diferentes números de fluidización. Se incluyen también enfriamientos en aire y en aceite.

Las curvas de rapidez de enfriamiento (calculada numéricamente) vs. temperatura para el acero AISI 9840 se muestran en la Figura 4.11. Al igual que en el caso del acero AISI 4140, la rapidez de enfriamiento aumenta a medida que aumenta el número de fluidización. Las rapidezces máximas de enfriamiento se obtienen entre los 840 y 830 °C que es cuando la probeta ya está completamente sumergida en el lecho fluidizado. Las rapidezces máximas de enfriamiento obtenidas a partir de la Figura 4.11 se muestran en la Tabla 2.

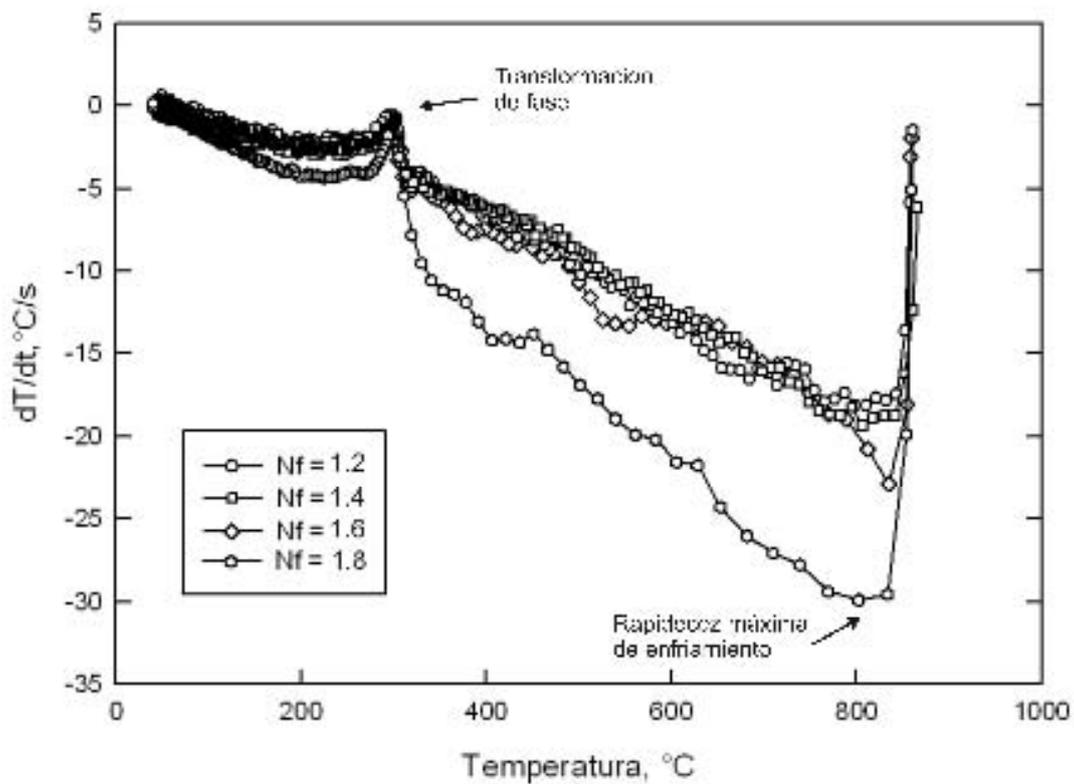


Figura 4.11: Rapidez de enfriamiento como función de la temperatura para el acero AISI 9840, para diferentes números de fluidización.

Tabla 4.2: Rapideces máximas de enfriamiento en función del número de fluidización para el acero AISI 9840.

| Nf | Rapidez máxima de enfriamiento (°C/s) |
|-----|--|
| 1.2 | -18 |
| 1.4 | -19 |
| 1.6 | -24 |
| 1.8 | -30 |

Las rapideces de enfriamiento en el acero AISI 9840 son ligeramente menores que las obtenidas para el acero AISI 4140, además de que en el acero AISI 4140 las diferencias más grandes se obtienen entre los números de fluidización de 1.2 y 1.4 mientras para el acero AISI 9840 es en los rangos de 1.6 y 1.8.

Como, para las condiciones bajo estudio, se extrae calor suficientemente rápidamente como para producir cerca del 100% de martensita, se podría escoger el número de fluidización de 1.2 como el óptimo, ya que se estaría obteniendo la microestructura deseada, la pieza de interés desarrollaría menor cantidad de esfuerzos internos y la distorsión de la pieza sería la menor de todas.

En la Figura 4.12 se muestra la evolución de las rapideces de enfriamiento en función del tiempo para el acero AISI 9840. La evolución que se obtuvo es parecida a la observada para el acero AISI 4140. A tiempos cortos se obtienen las máximas rapideces de enfriamiento y, conforme la probeta se acerca a la temperatura de transformación, las rapideces de enfriamiento disminuyen. Durante la transformación, todas las rapideces de enfriamiento tienden a cero, debido a que en la reacción se genera calor y hay un breve recalentamiento. Acabando la transformación la probeta sufre un nuevo enfriamiento, aunque menos severo que al principio del temple. De la figura 4.12 se observa que la temperatura de transformación fue la misma para todos los temple, aunque ocurrió a diferentes tiempos.

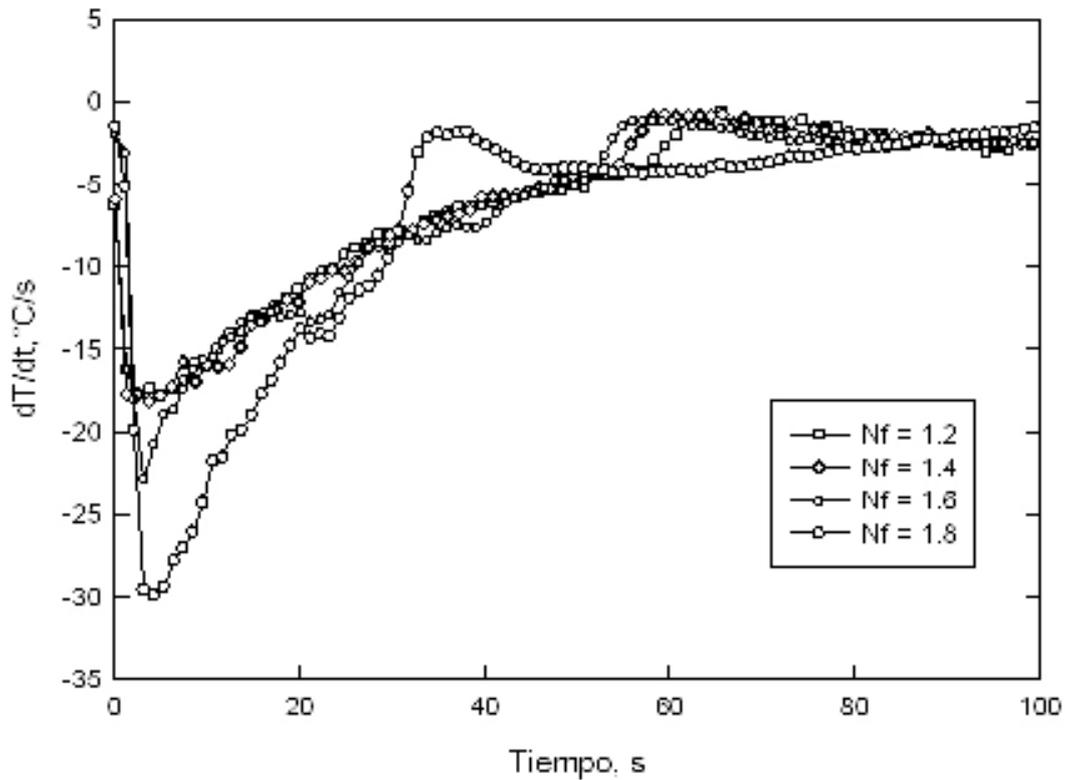


Figura 4.12: Rapidez de enfriamiento como función del tiempo para el acero AISI 9840, para diferentes números de fluidización.

El efecto del número de fluidización sobre la dureza se observa en la Figura 4.13. La dureza más alta (56 HRC) se observó para el número de fluidización de 1.8 y la menor (54 HRC) correspondió a un número de fluidización de 1.2. Este rango de dureza es menor que el obtenido para el acero AISI 4140. La incertidumbre de la medición (obtenida como la desviación estándar de 4 mediciones) es de 2 unidades.

En esta figura también se añadieron las durezas obtenidas del temple en aire y aceite para realizar una comparación. Al comparar el lecho fluidizado con el aire quieto hay una diferencia notable; esto es debido a que con el temple al aire se obtuvo perlita como principal microconstituyente, mientras que para las piezas templadas en el lecho fluidizado el principal microconstituyente es la martensita. En cambio la dureza obtenida del temple en aceite es muy parecida a las obtenidas en el lecho fluidizado, ya que para ambos medios el principal microconstituyente final es la martensita.

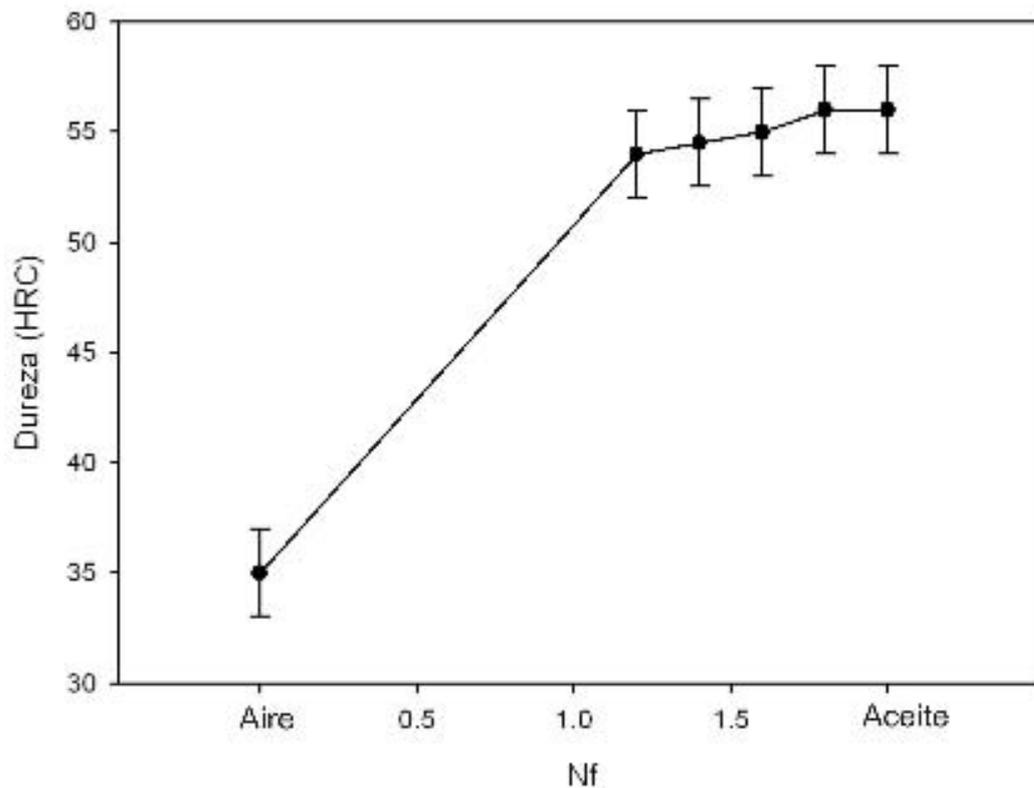


Figura 4.13: Durezas obtenidas para el acero 9840, para diferentes números de fluidización. También se muestran los datos para enfriamiento en aire y en aceite.

En las Figuras 4.14 a la 4.17 se presentan las metalografías para el acero AISI 9840 para los diversos números de fluidización. La microestructura que se obtuvo del enfriamiento al aire es la única que presenta a la perlita como fase principal. Para las microestructuras obtenidas en el aceite y en el lecho fluidizado el microconstituyente principal es la martensita, por lo que se corroboran las altas durezas obtenidas en la Figura 4.13.

A los aumentos que se obtuvieron las microestructuras no es posible identificar la morfología de la martensita, pero en la literatura se reporta que aceros por debajo del 0.6 %C tienden a desarrollar la morfología tipo aguja por lo que, como el acero AISI 9840 tiene nominalmente 0.4 %C, entonces se puede suponer que la morfología de la martensita que se está obteniendo es de tipo de aguja.

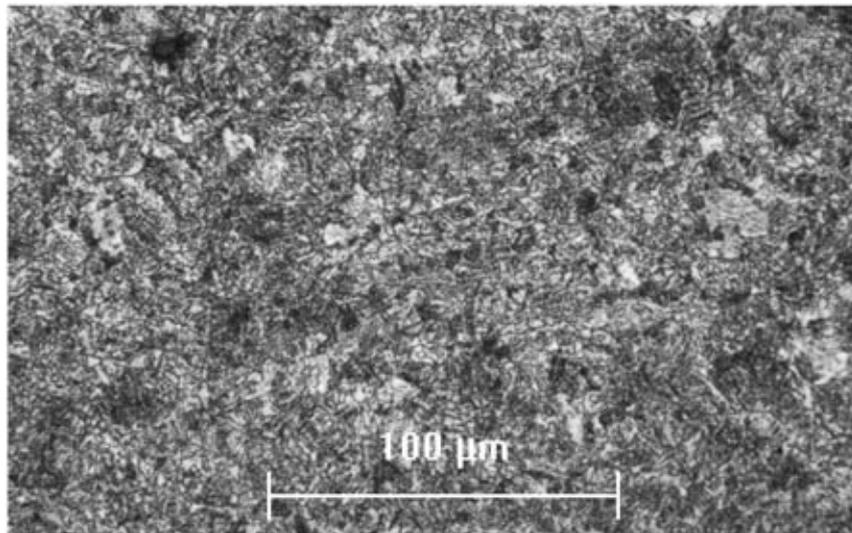


Figura 4.14: Metalografía de la muestra de acero 9840 enfriada en aire quieto.

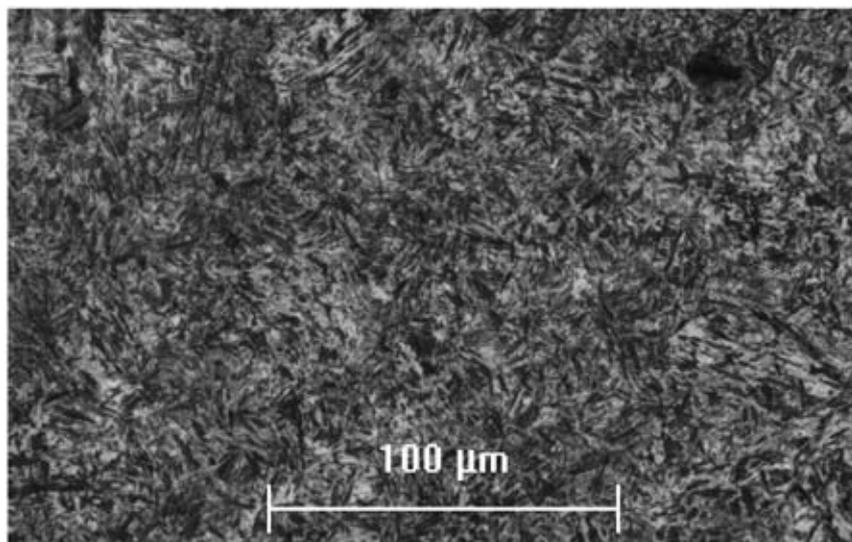


Figura 4.15: Metalografía de la muestra de acero 9840 templada en aceite.

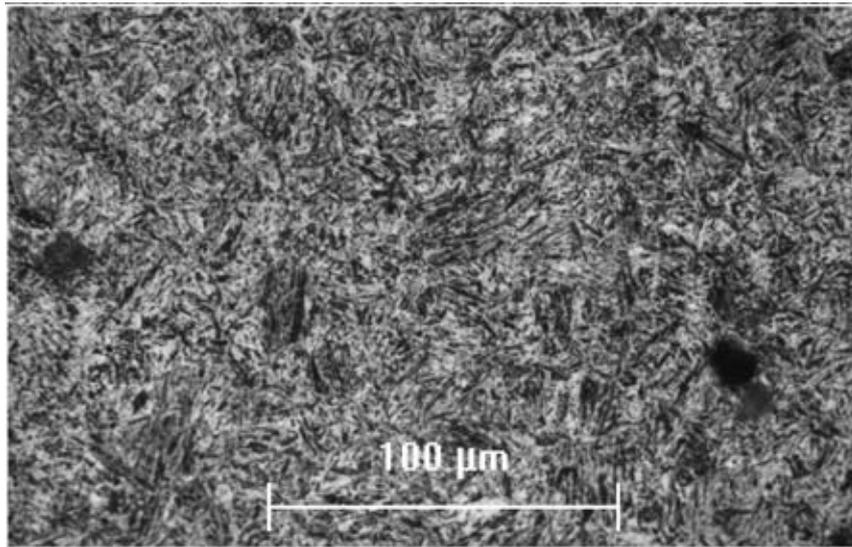


Figura 4.16: Metalografía de la muestra de acero 9840 templada en un lecho fluidizado con $N_f = 1.2$.

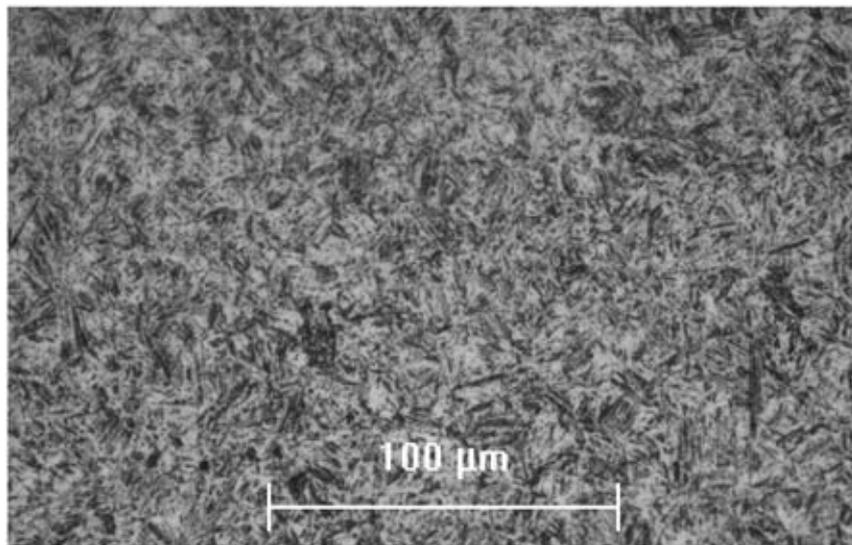


Figura 4.17: Metalografía de la muestra de acero 9840 templada en un lecho fluidizado con $N_f = 1.4$.

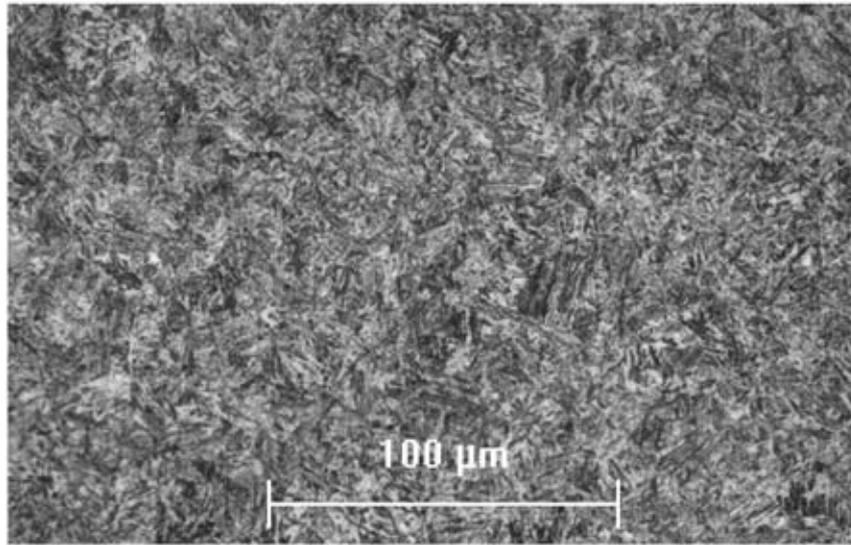


Figura 4.18: Metalografía de la muestra de acero 9840 templada en un lecho fluidizado con $N_f = 1.6$.

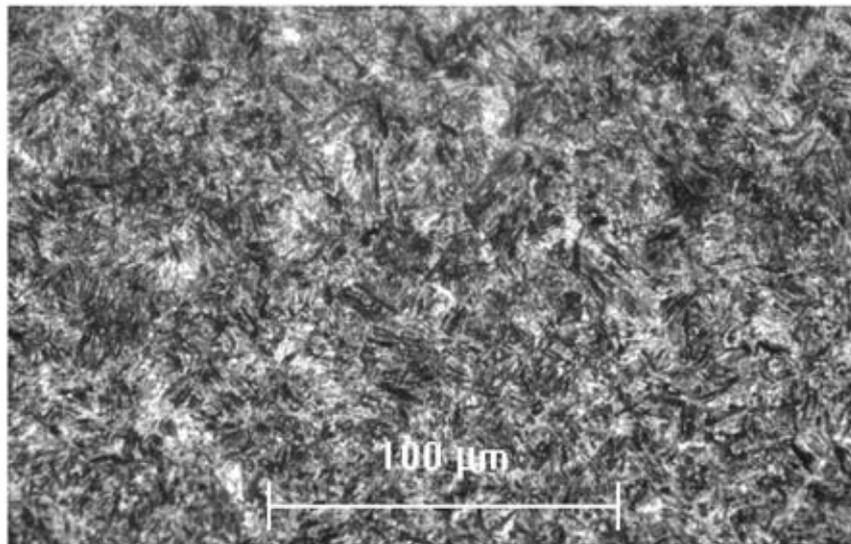


Figura 4.19: Metalografía de la muestra de acero 9840 templada en un lecho fluidizado con $N_f = 1.8$.

De las figuras 4.13 y 4.19 se observa que el acero AISI 9840 presenta, al igual que el acero AISI 4140, una gran templabilidad, por lo que a pesar de que se aumentara la rapidez de enfriamiento, la dureza ya no aumentaría. Por los resultados obtenidos se justificaría el empleo del lecho fluidizado como un posible sustituto del aceite, ya que con el lecho fluidizado se logra la rapidez de enfriamiento necesaria para lograr formar martensita, además de reducir los esfuerzos residuales, y evitar

agrietamientos en la pieza o posibles distorsiones que podrían ocurrir si se realizara el temple en aceite. Además el proceso es más limpio.

Capítulo 5. Conclusiones

En este trabajo se caracterizó la respuesta térmica y metalúrgica de los aceros AISI 4140 y AISI 9840 para un proceso de temple en lecho fluidizado a escala laboratorio.

A partir del análisis de los resultados experimentales, se puede concluir que:

- El objetivo planteado al principio de este trabajo sí se cumplió ya que el lecho fluidizado resulta ser un excelente medio alternativo al temple de aceros AISI 4140 y AISI 9840 en aceite, habiéndose obtenido durezas de la misma magnitud, confirmadas por microestructuras.
- En el lecho fluidizado se pueden obtener diferentes rapidezces de enfriamiento y, con ello, diversos resultados con el empleo de un solo medio.
- Las rapidezces de enfriamiento más severas se obtuvieron a un número de fluidización de 1.8 para los aceros AISI 4140 y AISI 9840.
- Para los aceros AISI 4140 y AISI 9840 se obtuvo martensita para todos los números de fluidización.
- El número de fluidización 1.2 es ideal para ambos aceros debido a que se obtiene cerca del cien por ciento de martensita, y es donde menor consumo energético se tiene.

BIBLIOGRAFÍA

- 1) R.W. Reynolson, **Heat Treatment in Fluidized Bed Furnaces**, ASM International, 1995, United States, pp 3-110.
- 2) C.M. Wayman y H.K.D.H. Bhadeshia, **Physical Metallurgy of Steels**, Lavoisier, 4a edición, 1996, pp 1505-1548.
- 3) J. D. Verhoeven, **Fundamentals of Physical Metallurgy**, John Wiley & Sons, 1989, pp 457-483.
- 4) **ASM Metals Handbook**, “Mechanical Testing and Evaluation”, ASM International, Volume 9, 2000.
- 5) **ASM Metals Handbook**, “Metallography and Microstructures”, ASM International, Volume 8, 2000.
- 6) **ASM Metals Handbook**, “Heat Treating”, ASM International, Volume 4, 2000.
- 7) R. W. Reynoldson, “Controlled Atmosphere Fluidized Beds for the Heat Treatment of Metals”, *Heat Treatment of Metals*, 1977, p-11-16.
- 8) R. W. Reynoldson, “Fluidized Bed Quenching Technology”, *Proceedings of the Second International Conference on Quenching and Control of Distortion*, Cleveland, Ohio, 4-7 noviembre, 1996, pp. 495-502.
- 9) D. Geldart, **Principles of Powder Technology : Gas Fluidization**, Edited b M. J. Rhodes, John Wiley & Sons, 1990.

BIBLIOGRAFÍA

- 10) P. Vigier y C. Iacob, "Heat Transfer in Fluidized Bed for a Low Gas Flow Rate", *Powder Technology*, 1997, p 1-16.
- 11) A.M. Dueñas Pérez, H.J. Vergara Hernández, B. Hernández Morales y M. Díaz Cruz. "Comparación entre el lecho fluidizado y aceite agitado como medios de enfriamiento para el temple de aceros grado maquinaria (AISI 4140 y AISI 9840)". *Memorias del XXVI Encuentro Nacional de la Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química, A.C.* Universidad de Las Américas-Puebla, 2005. CD-ROM (sin número de página).
- 12) B. Beltrán Fragoso, B. Hernández Morales, H.J. Vergara Hernández y M. Díaz Cruz. "Caracterización de la Extracción de Calor durante el Temple de Materiales Metálicos en un Lecho Fluidizado con Tapón Poroso ". *Memorias del XXV Encuentro Nacional de la Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química, A.C.* Universidad Autónoma Metropolitana, 2004. CD-ROM (sin número de página). ISBN 970-31-0268-9.
- 13) H.J. Vergara Hernández, M- Díaz Cruz y B. Hernández Morales. "Estudio del Comportamiento Dinámico y Térmico en un Reactor de Lecho Fluidizado para el Tratamiento Térmico de Metales". *Memorias del XXIV Encuentro Nacional de la Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química. A.C.* Instituto Tecnológico de Celaya, 2003. Pp. 383-387.
- 14) A. M. Dueñas Pérez, "Caracterización de un lecho fluidizado como sistema alternativo para el temple de aceros grado maquinaria (AISI 4140 y AISI 9840)", Tesis de Licenciatura, IPN, México 2005.
- 15) B. Beltrán Fragoso, "Transferencia de calor durante procesos de temple en lechos fluidizados con tapón poroso", Tesis de Licenciatura, UNAM, México 2004.