



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN**

**“TRATAMIENTOS TERMICOS DE UNA FUNDICIÓN
BLANCA CON ALTO CONTENIDO DE CROMO”**

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICISTA

P R E S E N T A:

HUGO LÓPEZ RODRÍGUEZ

ASESOR: DR. HÉCTOR ENRIQUE CURIEL REYNA



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.
ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS



DEPARTAMENTO DE
EXAMENES PROFESIONALES

DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
P R E S E N T E

ATN: L. A. ARACELI HERRERA HERNANDEZ
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos
comunicar a usted que revisamos la Tesis :
Tratamientos Termicos de una Fundición Blanca con alto Contenido de Cromo

que presenta el pasante: Hugo López Rodríguez
con número de cuenta: 40504335-4 para obtener el título de :
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en
el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 6 de Noviembre de 2009

- | | | |
|------------------|--|--|
| PRESIDENTE | <u>Dr. Héctor Enrique Curiel Reyna</u> | |
| VOCAL | <u>M.I. José Juan Contreras Espinosa</u> | |
| SECRETARIO | <u>M.I. Ramón Osorio Galicia</u> | |
| PRIMER SUPLENTE | <u>M.I. Jesús García Lira</u> | |
| SEGUNDO SUPLENTE | <u>Ing. Eusebio Reyes Carranza</u> | |

DEDICATORIAS:

Mi tesis la dedico con todo mi amor y cariño.

A ti DIOS que me diste la oportunidad de vivir y de regalarme una familia tan maravillosa.

Con mucho cariño principalmente a mis padres que me dieron la vida y han estado con migo en todo momento. Gracias por todo papá y mamá por darme una carrera para mi futuro y por creer en mí, anqué hemos pasado momentos difíciles este año anterior, siempre han estado apoyándome y brindándome todo su amor, por todo esto les agradezco de todo corazón el que estén conmigo a mi lado.

Los quiero de todo corazón y este trabajo es para ustedes.

A mis hermanos Marco Aurelio y Magali Lilian gracias por estar conmigo y apoyarme siempre, los quiero mucho.

A esa gran familia que siempre ha estado ahí y que siempre han creído en mí que desde el primer momento me brindaron y me brindan todo el apoyo, colaboración y cariño sin ningún interés.

A mis grandes amigos: Ma. Isabel Pelaez, Ma. Luisa López, Patricia Irineo, Eduardo Pelaez, Erick Talonia, Jorge Miguel y Rubén Figueroa; muchas gracias por estar con migo en todo este tiempo donde he vivido momentos felices, gracias por ser mis grandes amigo y recuerden que siempre los llevo en mi corazón.

A mis compañeros y amigos.

Que gracias al equipo que formamos logramos llegar hasta el final del camino y que hasta el momento, seguimos siendo amigos: Alejandro Álvarez, Miguel Ángel Hernández, Isaac Hernández, Anabel Avilés, Anahí Chávez, Diego García, David Guillermo, Carlos Hernández y David Gómez.

Gracias a todos ustedes...

AGRADECIMIENTOS:

A la Universidad Nacional Autónoma de México y en especial a la Facultad De Estudios Superiores Cuautitlán que me dieron la oportunidad de formar parte de ellas.

A MI ASESOR DR. HÉCTOR ENRIQUE CURIEL REYNA:

Por el tiempo y dedicación en la realización de esta tesis y por compartir sus conocimientos de forma incondicional impulsando mi espíritu por los senderos de la superación.

AL CDR. TOMÁS RANGEL ORTIZ:

Por el apoyo incondicional que me ofreció durante todo el tiempo en la realización de este trabajo manifestando en cada momento de sus enseñanzas, comprensión, profesionalismo y sobre todo su gran calidad humana.

A LOS INGENIEROS NOÉ ALBERTO CORTÉS GUERRERO Y JUAN GARCIA:

Por todo el apoyo y colaboración desinteresada en diversas ocasiones en los laboratorios.



INDICE

INTRODUCCIÓN _____ 3

TRATAMIENTOS TÉRMICOS _____ 5

RECOCIDO. _____ 7

RECOCIDO DE AUSTENITIZACIÓN COMPLETA O DE
REGENERACIÓN. _____ 8

RECOCIDOS SUBCRÍTICOS. _____ 10

 a) Recocido de Ablandamiento. _____ 10

 b) Recocido Contra Acritud. _____ 11

 c) Recocido Subcrítico Globular. _____ 11

RECOCIDOS DE AUSTENIZACIÓN INCOMPLETA (GLOBULARES). __ 11

NORMALIZADO. _____ 13

TEMPLE. _____ 14

REVENIDO. _____ 15

TRATAMIENTOS ISOTÉRMICOS DE LOS ACEROS. _____ 16

AUSTEMPERING _____ 17

MARTEMPERING _____ 18

RECOCIDO ISOTÉRMICO _____ 20

CARACTERÍSTICAS Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL ____ 21

TRATAMIENTO TÉRMICO. _____ 24



PREPARACIÓN DE LA MUESTRA	28
CORTE	28
DESBASTE	29
PULIDO	30
ATAQUE	31
ANÁLISIS METÁLOGRAFICO	33
MICROSCOPIA	33
MICROSCOPIA ÓPTICA	33
Principios Generales del Microscopio Metalografico.	34
Muestreo	38
ENSAYO DE DUREZA	39
<i>DISCUSIÓN Y RESULTADOS</i>	<i>46</i>
PRUEBA DE DUREZA	46
MICROESTRUCTURA	47
<i>CONCLUSIONES</i>	<i>58</i>
<i>BIBLIOGRAFÍAS</i>	<i>59</i>



INTRODUCCIÓN

Las fundiciones blancas aleadas con Cromo son productos muy demandados por las industrias minera, mineralúrgica, siderúrgica y cementera, en virtud de su alta dureza, resistencia a la abrasión y resistencia a la oxidación/corrosión, que se obtienen por moldeo y se caracterizan por poseer unas microestructuras formadas a base de un alto contenido de carburos eutécticos, junto a otra fase predominantemente martensítica. Estas fundiciones se utilizan mucho en las industrias minera y cementera, en aquellas situaciones en las que el producto debe soportar simultáneamente acciones de desgaste abrasivo e impactos, como ocurre en las instalaciones de trituración y molienda, clasificación granulométrica o sistemas de bombeo de lodos abrasivos. En otras ocasiones, el empleo de estas fundiciones requiere un buen comportamiento mecánico, dureza, resistencia al desgaste y tenacidad a temperaturas (200-600 °C), como es el caso de los cilindros de trabajo de los trenes de laminación que se utilizan en el conformado de aleaciones metálicas.

El conformado de todos estos productos se realiza mediante técnicas de moldeo, directamente, a partir del caldo líquido. Siendo habitualmente fundiciones hipoeutécticas, su solidificación comienza



con la formación de dendritas γ de γ y termina con la formación del constituyente eutéctico $\gamma + M_7C_3$. En el enfriamiento posterior, en virtud de la típica pérdida de solubilidad de la Austenita con la disminución de la temperatura, precipitan cantidades importantes de estos mismos carburos.

El tratamiento térmico de estas fundiciones consiste en una austenitización a una temperatura a la que, o bien precipitan carburos o por el contrario, se disuelven muchos de los carburos que habían precipitado en el enfriamiento posterior al moldeo (ocurrirá una u otra cosa según sea su composición química, tamaño de la pieza, condiciones de enfriamiento tras el moldeo, etc). De cualquier modo, tras el mantenimiento a elevada temperatura, se obtiene una Austenita suficientemente aleada y con un contenido alto de Carbono, templeable que se transforma parcialmente en Martensita, en el enfriamiento de temple. Queda sin embargo, después del temple una fracción importante de Austenita retenida, que debe eliminarse tras dos o incluso, tres tratamientos de revenido con objeto de conseguir la necesaria estabilidad microestructural. En el curso de estos tratamientos de revenido, tiene además, lugar un significativo endurecimiento estructural (endurecimiento secundario), propiciado por la precipitación de carburos y la transformación de la Austenita retenida en Martensita. Se logran así, unos productos con una dureza final comprendida entre 600 y 800 HV.



Este trabajo tiene por objeto la definición de tratamiento térmico de una fundición blanca de alto Cromo. Para ello, se han modificado las temperaturas de mantenimiento durante los tratamientos de austenitización y se ha controlado la microestructura de los productos obtenidos utilizando microscopía, junto con la determinación de su dureza y microdureza Vickers.

TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Los tratamientos térmicos son operaciones de calentamiento y enfriamiento cuidadosamente controladas y que se aplican a un metal o aleación en estado sólido, con el fin de obtener ciertas propiedades.

Los tratamientos térmicos no modifican la composición química del acero y sí tres factores que caracterizan las aleaciones Fierro-Carbono, como son: constitución, estructura y estado mecánico.

Con los tratamientos térmicos se modifica la constitución de los aceros, modificando el estado en que se encuentra el Carbono y el estado alotrópico del Fierro; se modifica la estructura variando el tamaño de grano y el reparto de los constituyentes. El estado mecánico también queda afectado por los esfuerzos a los que quedan sometidos los



materiales después de algunos tratamientos térmicos, principalmente después del temple.

Todos los procesos básicos de tratamientos térmicos para aceros incluyendo la transformación o descomposición de la Austenita, la naturaleza y la apariencia de estos productos de transformación determinan las propiedades físicas y mecánicas de los materiales.

Los tratamientos térmicos más usados son: El recocido, temple, normalizado, revenido, cementado, nitrurado, temple en baño de sales, temple en baño de plomo, etc.

En la *figura 1.1* muestra la representación esquemática de los tratamientos térmicos usuales en los aceros donde se indica por donde atravesamos la curva de Transformación Tiempo-Temperatura (TTT) en el enfriamiento.

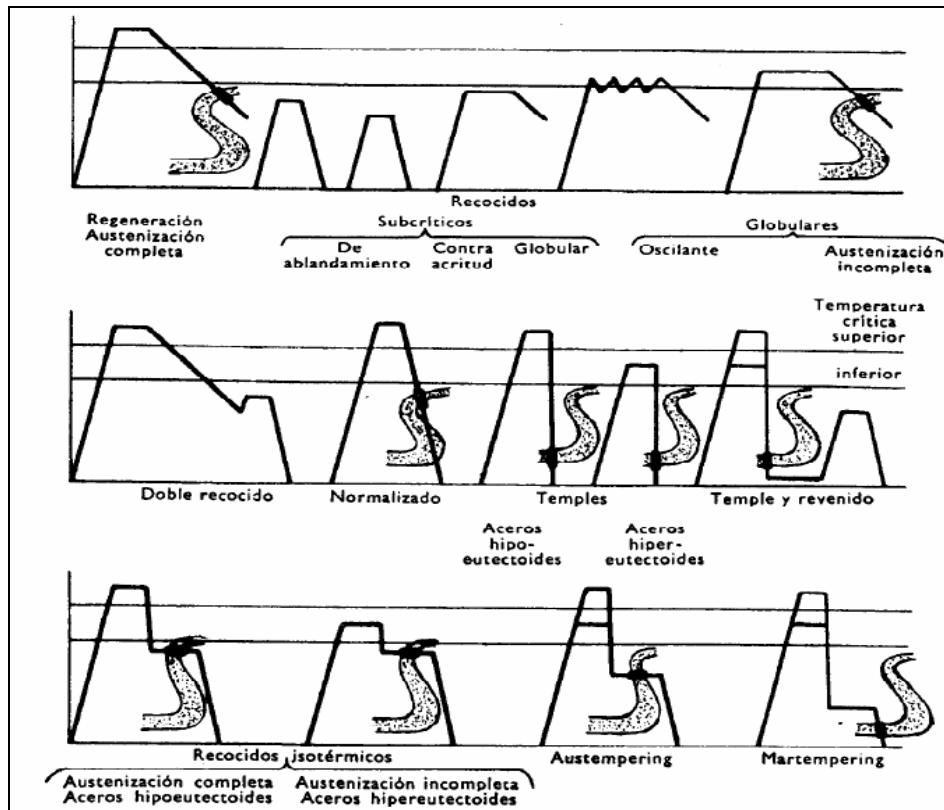


Figura 1.1 Representación esquemática de diversos tratamientos térmicos, empleando el diagrama de la curva S. (Curva TTT)

RECOCIDO.

Con este nombre se conocen varios tratamientos cuyo objeto principal es ablandar el acero; otras veces también se desea además regenerar su estructura o eliminar tensiones internas. Consisten en calentar los aceros para luego enfriarlos lentamente. Por lo general estos enfriamientos se hacen apagando el horno y dejando enfriar la pieza



dentro del mismo con la puerta abierta o cerrada, dependiendo de la velocidad deseada.

Existen varias clases de recocidos dependiendo de la finalidad que persigan y de la temperatura de calentamiento. En la industria se pueden clasificar en tres grupos: Recocidos con austenitización completa, recocidos subcríticos y recocidos con austenitización incompleta.

RECOCIDO DE AUSTENITIZACIÓN COMPLETA O DE REGENERACIÓN.

Cuando decimos que un acero esta recocido se refiere a este recocido concretamente. Si se habla de otros recocidos se especificara a cual se refiera.

Este recocido consiste en calentar hasta la austenitización y enfriar muy despacio, de forma que la microestructura obtenida contenga Perlita gruesa. En la *Figura 2.1* a y b este enfriamiento se representa por R.

Para los aceros hipereutectoides este recocido de regeneración se puede hacer a temperaturas superiores a la critica superior A_{cm} , es



decir se austeniza completamente. Y para los aceros eutectoides por encima de la temperatura crítica inferior.

En la industria la misión fundamental del presente recocido es ablandar los aceros y regenerar la microestructura, de forma que sea lo más parecida a lo que nos daría el diagrama de fases Fe-Fe₃C.

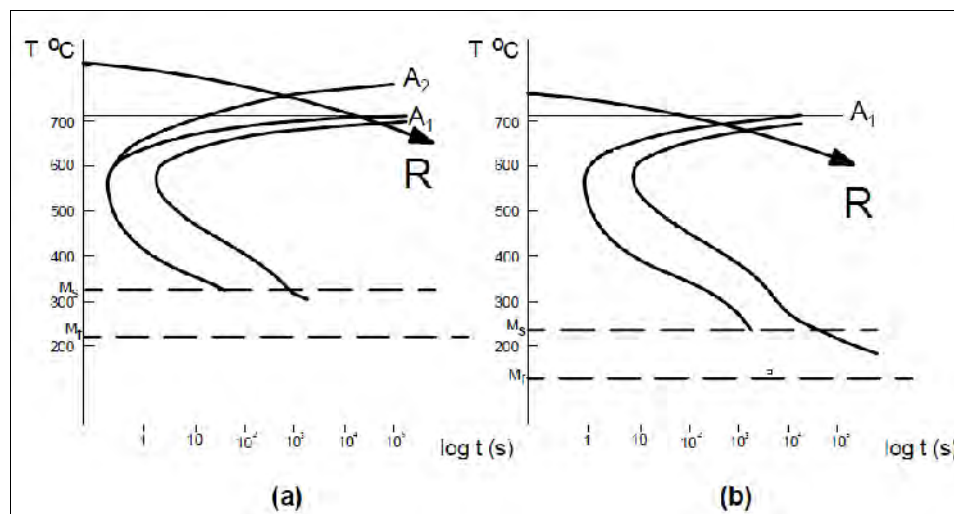


Figura 2.1 Representación esquemática sobre diagramas TTT del enfriamiento correspondiente al recocido de regeneración total (R): a) para un acero hipoeutectoide y b) para un acero eutectoide.



RECOCIDOS SUBCRÍTICOS.

El calentamiento se hace por debajo de la temperatura crítica inferior, no teniendo tanta importancia como en el caso anterior la velocidad de enfriamiento, pudiendo incluso enfriarse el acero al aire sin que se endurezca. Por medio de este tratamiento se eliminan las tensiones del material y se aumenta su ductilidad.

Se pueden distinguir tres clases de recocidos subcríticos: a) de ablandamiento, b) contra acritud y c) globular. A continuación se estudian cada uno de ellos.

a) Recocido de Ablandamiento.

Su principal objeto es ablandar el acero por un procedimiento rápido y económico. Con este tratamiento no se suelen obtener las menores durezas, pero en muchos casos las que se consiguen son suficientes para mecanizar perfectamente los materiales. El proceso consiste en calentar el acero hasta una temperatura, que siendo inferior a la crítica Ac_1 , sea lo más elevada posible y enfriar luego al aire. Las durezas que se obtienen en ciertos aceros de herramientas y de construcción de alta aleación, después de este tratamiento, suelen ser algunas veces demasiado elevadas para el mecanizado.



b) Recocido Contra Acritud.

Se efectúa a temperaturas de 550° a 650°C y tiene por objeto, aumentar la ductilidad de los aceros de poco contenido en Carbono (menos de 0,40 %) estirados en frío. Con el calentamiento a esa temperatura, se destruye la cristalización alargada de la Ferrita, apareciendo nuevos cristales poliédricos más dúctiles que los primitivos, que permiten estirar o laminar nuevamente el material sin dificultad. El enfriamiento se suele hacer al aire.

c) Recocido Subcrítico Globular.

En ocasiones para obtener en los aceros al Carbono y de baja aleación una estructura globular de muy baja dureza, en cierto modo parecida a la que se obtiene en el recocido globular de austenitización incompleta (que se estudia a continuación), se les somete a los aceros a un calentamiento a temperaturas inferiores pero muy próximas a la crítica Ac_1 , debiendo luego enfriarse el acero lentamente en el horno.

RECOCIDOS DE AUSTENIZACIÓN INCOMPLETA (GLOBULARES).

Son tratamientos que se suelen dar a los aceros al Carbono o aleados, de más de 0,50 % de Carbono, para ablandarlos y mejorar su maquinabilidad. Consisten en calentamientos prolongados a



temperaturas intermedias entre la crítica superior e inferior, seguidos siempre de un enfriamiento lento. El fin que se persigue con estos recocidos es obtener la menor dureza posible y una estructura microscópica favorable para el mecanizado de las piezas. Por medio de estos tratamientos se consigue con bastante facilidad en los aceros hipereutectoides que la Cementita y los carburos de aleación adopten una disposición más o menos globular que da para cada composición una dureza muy inferior a cualquier otra microestructura, incluso la Perlita laminar.

Unas veces se hace el recocido empleando un ciclo oscilante de temperaturas que son unas veces superiores y otras inferiores a Ac_1 . Otras veces (que suelen ser mayoría) se emplean temperaturas ligeramente superiores a Ac_1 . Al primero de estos tratamientos se le suele simplemente llamar recocido globular oscilante y al segundo se le llama simplemente recocido globular de Austenitización incompleta.

En los aceros hipoeutectoides es algo más difícil obtener estructuras globulares, que por otra parte no tienen en general tanto interés como en los aceros hipereutectoides. Sin embargo con permanencias prolongadas y oscilaciones de temperatura se consigue también en los aceros de bajo contenido en Carbono estas estructuras. Recientemente se ha comenzado a exigir estructuras globulares en numerosos aceros de construcción y de baja aleación.



NORMALIZADO.

Este tratamiento consiste en un calentamiento a temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior, seguido de un enfriamiento en aire tranquilo. De esta forma, se deja el acero con una estructura y propiedades que arbitrariamente se consideran como normales y características de su composición. Se suele utilizar para piezas que han sufrido trabajos en caliente, trabajos en frío, enfriamientos irregulares o sobrecalentamientos y también sirve para destruir los efectos de un tratamiento anterior defectuoso. Por medio del normalizado, se eliminan las tensiones internas y se uniformiza el tamaño de grano del acero.

Se emplea casi exclusivamente para los aceros de construcción al Carbono o de baja aleación. Los aceros de muy bajo Carbono tienen la curva TTT muy desplazada a la izquierda (*Figura 2.2*) por lo que por muy rápido que se enfríen no se puede obtener Martensita (siempre tocamos la nariz) y el normalizado es el que les confiere mejores propiedades mecánicas.

Por otra parte, cuando las curvas TTT están muy desplazadas a la derecha, como la de la *Figura 2.2* que corresponde a un acero



hipotético muy aleado, el enfriamiento N, al aire, no toca las curvas y por tanto dará Martensita. Se dice de estos aceros de temple al aire.

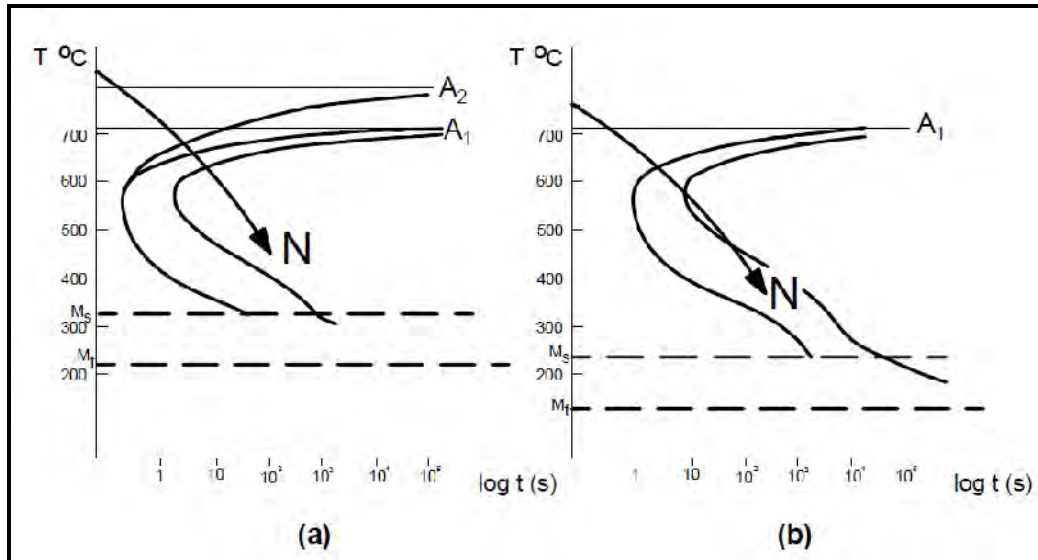


Figura 2.2 El normalizado en a) un acero de muy bajo Carbono y b) un acero muy aleado.

TEMPLE.

El temple tiene por objeto endurecer y aumentar la resistencia de los aceros. Para ello, se calienta en general el acero a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior y se enfría rápidamente (según la composición y tamaño de la pieza) en un medio conveniente, agua, aceite, etc. En los aceros de herramientas el



calentamiento para el temple sólo se llega a la austenitización incompleta.

REVENIDO.

Los aceros después de templarlos suelen quedar generalmente demasiado duros y frágiles para los usos que van a ser destinados. Estos inconvenientes se corrigen por medio del revenido ya que con estos tratamientos se consigue mejorar la tenacidad de las piezas templadas a costa de disminuir su dureza, su resistencia mecánica y su límite elástico. También se consigue eliminar o por lo menos disminuir los esfuerzos internos del material producidos a consecuencia del temple. A veces, el revenido en un acero de alta aleación puede ocurrir que en lugar de disminuir la dureza aumente. Esto es debido a la transformación de la Austenita residual en la Martensita y por lo tanto, al aumentar el porcentaje de este constituyente, aumenta también la dureza.

El revenido consiste en calentar el acero a una temperatura más bajo que su temperatura crítica inferior (A_1), enfriándolo luego generalmente al aire, aunque algunos aceros se enfrían en agua o aceite.



TRATAMIENTOS ISOTÉRMICOS DE LOS ACEROS.

Reciben este nombre ciertos tratamientos en los que el enfriamiento de las piezas no se hace de una forma regular y progresiva, sino que se interrumpe o modifica a diversas temperaturas durante ciertos intervalos, en los que permanece el material a temperatura constante durante un tiempo, que depende de la composición del acero, de la masa de las piezas y de los resultados que se quieren obtener.

Después de los recientes estudios realizados sobre la curva (TTT) se han desarrollado mucho estos tratamientos, que se usan en la actualidad para el temple de troqueles, herramientas, engranes, muelles, etc. Se obtiene de esta forma una gran tenacidad, muy pequeñas deformaciones y se elimina el peligro de grietas y roturas. También se emplea con gran éxito un tratamiento de esta clase, que recibe el nombre de recocido isotérmico, para el ablandamiento de los aceros.



AUSTEMPERING

El Austempering (también llamado austemplado, temple diferido o temple bainítico), consiste en calentar el acero a una temperatura ligeramente superior a la crítica (hasta la temperatura de austenitización), seguido de un enfriamiento rápido a un baño de sales, que se encuentra a una temperatura justo por arriba de la línea M_s , como se muestra en la (figura 2.4) manteniéndose a una temperatura constante, durante un tiempo suficiente, hasta que realice la total transformación de la Austenita en Bainita.

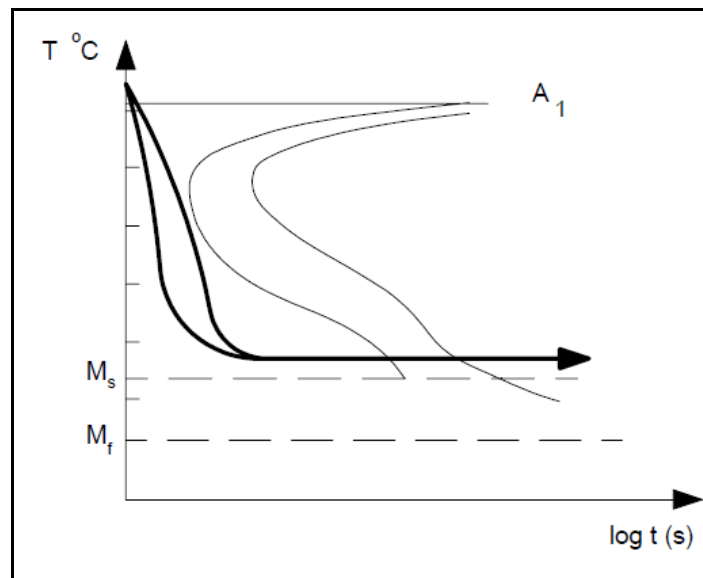


Figura 2.4 Representación esquemática del Austempering



La temperatura de baño debe ser superior a la temperatura del punto M_S (inicia la temperatura de la Martensita) y suele variar de 250°C a 550°C.

En el tratamiento se obtiene ausencia de esfuerzos internos y grietas microscópicas que se producen en los temple ordinarios martensíticos. Además la tenacidad es mucho más elevada en las piezas tratadas con austemplado, que con piezas templadas y revenidas. Cuenta con mayor ductibilidad, también hay menos distorsión y peligro de fisuras, porque el tratamiento utilizado no es tan drástico como el temple convencional.

MARTEMPERING

Este tratamiento isotérmico se efectúa calentando el acero y manteniéndolo a una temperatura por arriba de la temperatura crítica superior A_3 , durante un tiempo suficiente para su completa austenitización y enfriándolo luego en un baño de sales, cuya temperatura suele oscilar entre 200 y 300 °C y debe ser superior a la M_S .

Este acero debe permanecer en un baño de sales el tiempo suficiente para que toda la pieza, alcance e iguale la temperatura del baño,



enfriando luego la pieza al aire libre. De esta forma se obtiene una estructura martensítica con muy pocos esfuerzos internos. Cuando convenga disminuir la dureza o resistencia obtenida, se debe dar posteriormente al acero un revenido, para obtener Martensita revenida.

Es necesario que el enfriamiento sea suficientemente rápido para que la curva de enfriamiento no corte la nariz del diagrama TTT (como se muestra en la *figura 2.5*) en ningún punto, pues si lo hace, parte de la Austenita se transforma en otros constituyentes.

Las principales ventajas, es evitar la deformación y tensiones internas. Su aplicación queda limitada a piezas que no sean muy grandes.

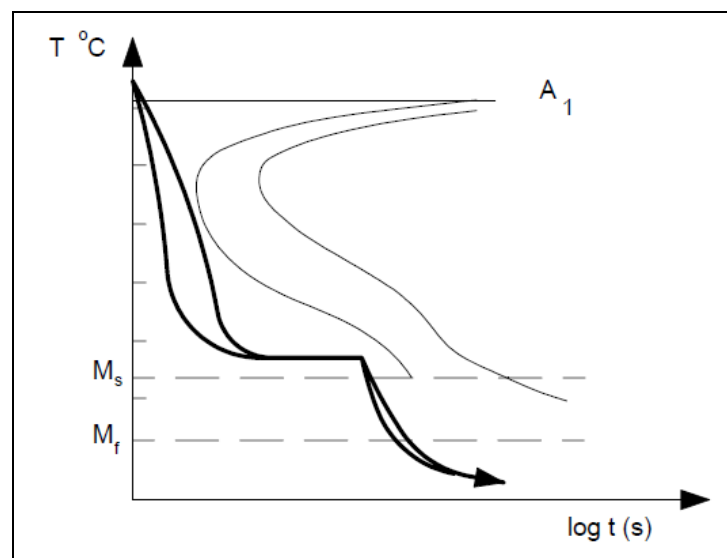


Figura 2.5 Representación esquemática del Martempering en un diagrama

TTT



RECOCIDO ISOTÉRMICO

Este tratamiento que ha tenido en los últimos años gran aceptación y éxito en la industria, tiene la ventaja de ser mucho más rápido que los recocidos ordinarios de enfriamiento lento.

El recocido isotérmico consiste en calentar el acero a una temperatura ligeramente superior a la crítica y enfriar lo más rápido posible, hasta una temperatura ligeramente inferior a A_1 , manteniendo el acero a esta temperatura el tiempo necesario para que verifique la transformación y luego se enfríe al aire (*figura 2.6*). Este tratamiento es muy rápido y se obtienen durezas muy bajas. El calentamiento se suele hacer con austenitización completa en los aceros hipoeutectoides y austenitización incompleta en los aceros hipereutectoides. En cierto modo estos tratamientos pueden considerarse como casos particulares de los recocidos de austenitización completa e incompleta.

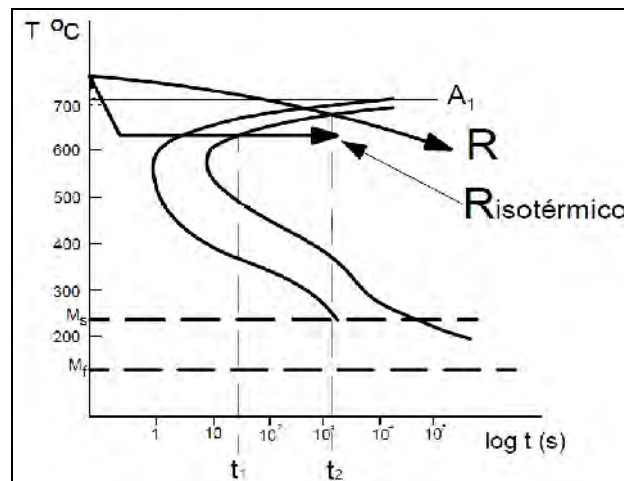


Figura 2.6 Recocido isotérmico



CARACTERÍSTICAS Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL

Este trabajo ha sido realizado sobre una fundición blanca de alto Cromo, obtenida del buje de un sistema de bombeo para la extracción de lodos abrasivos, cuyas composiciones químicas se detallan en la *Tabla 1*. Se diferencian principalmente, además del porcentaje de Carbono, en su contenido de Cromo y Molibdeno.

3.81 % C	14.75 %Cr	2.50 %Mo	Cr/C = 3.87
----------	-----------	----------	-------------

Tabla 1 Composición química de las fundiciones blancas de alto Cromo (% en peso)



Diagramas isotérmicos de la transformación

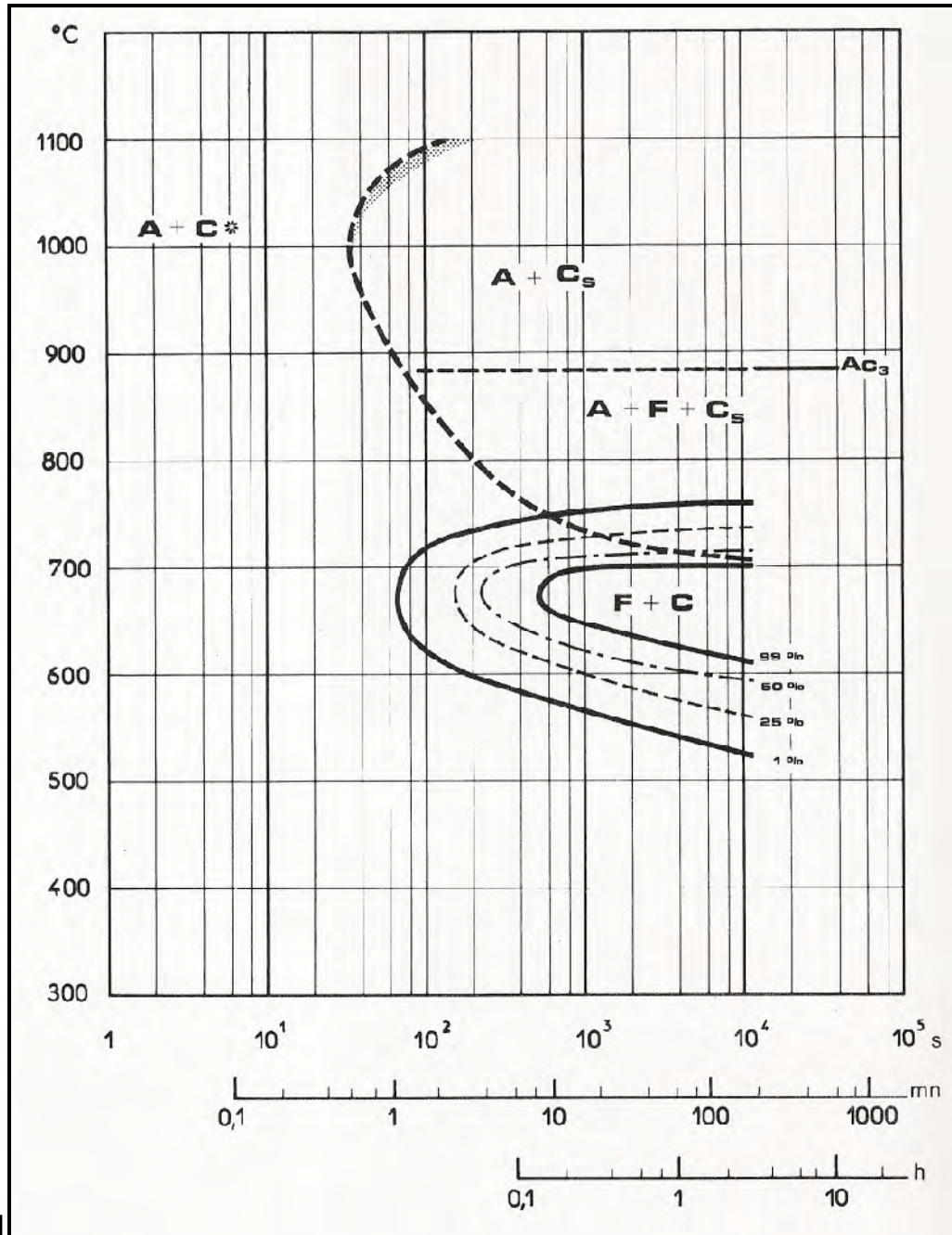


Figura 4.1 La curva isotérmica de la transformación para la condición desestabilizada a 1100°C

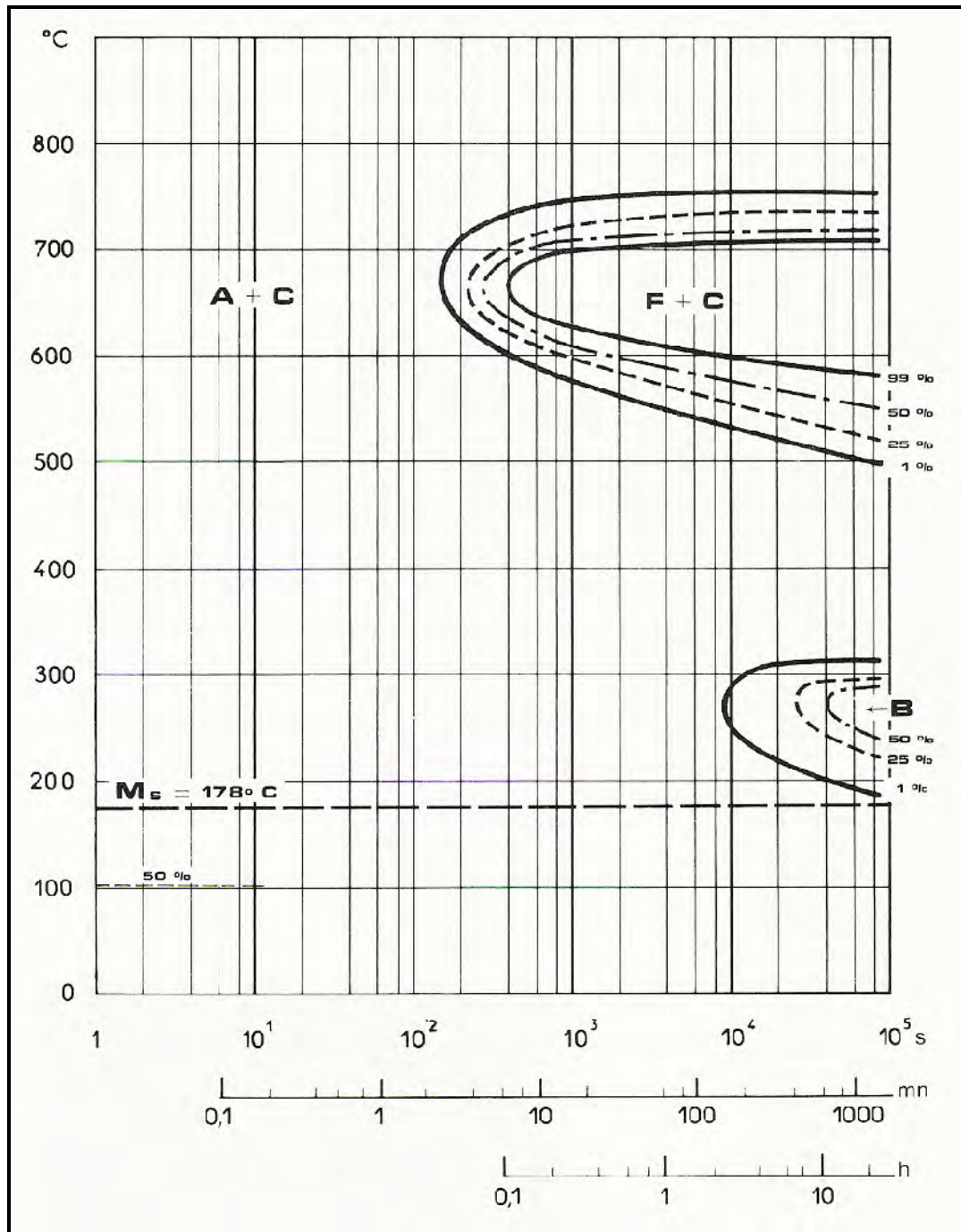


Figura 4.2 La curva isotérmica de la transformación para la condición desestabilizada a 1000°C



TÉCNICA EXPERIMENTAL

TRATAMIENTO TÉRMICO.

El objetivo que se persigue en la fundición blanca con alto contenido de Cromo es conseguir las mejoras y propiedades mecánicas a partir de dicho material. Este hecho conduce a actuar sobre la microestructura de la fundición, lo que implica la necesidad de estudiar los tratamientos térmicos a los que será sometida.

Se tomó una muestra de material de fundición blanca obtenida de un buje de un sistema de bombeo para la extracción de lodos abrasivos, del cual se cortaron cuatro piezas, con las que se obtuvieron las probetas del experimento *figura 5.1*. Estas probetas fueron tratadas de la siguiente manera:

Se consideraron 4 muestras para la experimentación

No. Probeta	Tratamiento Térmico	Tipo de enfriamiento
1	Enfriamiento Isotérmico	150°C
2	Enfriamiento Isotérmico	350°C
3	Enfriamiento Isotérmico	550°C
4	Enfriamiento Isotérmico	750°C

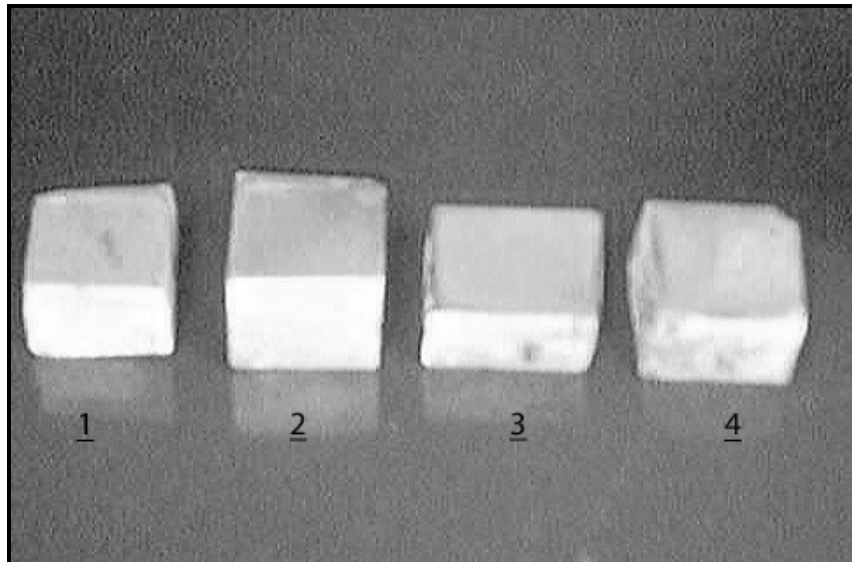


Figura 5.1 Probetas de la experimentación

Para la experimentación se realizó el tratamiento de recocido isotérmico para las cuatro probetas, seleccionando la temperatura de austenitización T_a (1050°C). Este tratamiento consiste en calentar la probetas a la temperatura de austenitización T_a durante un tiempo de 0.5 horas y a continuación se introdujeron a un segundo horno, cada probeta a temperatura T_{e_i} diferente: $T_{e_1} = 150^{\circ}\text{C}$, $T_{e_2} = 350^{\circ}\text{C}$, $T_{e_3} = 550^{\circ}\text{C}$ y $T_{e_4} = 750^{\circ}\text{C}$., durante 24 horas. Finalmente se saca cada probeta de este segundo horno para dejar enfriar al aire hasta temperatura ambiente. (Figura 5.2)

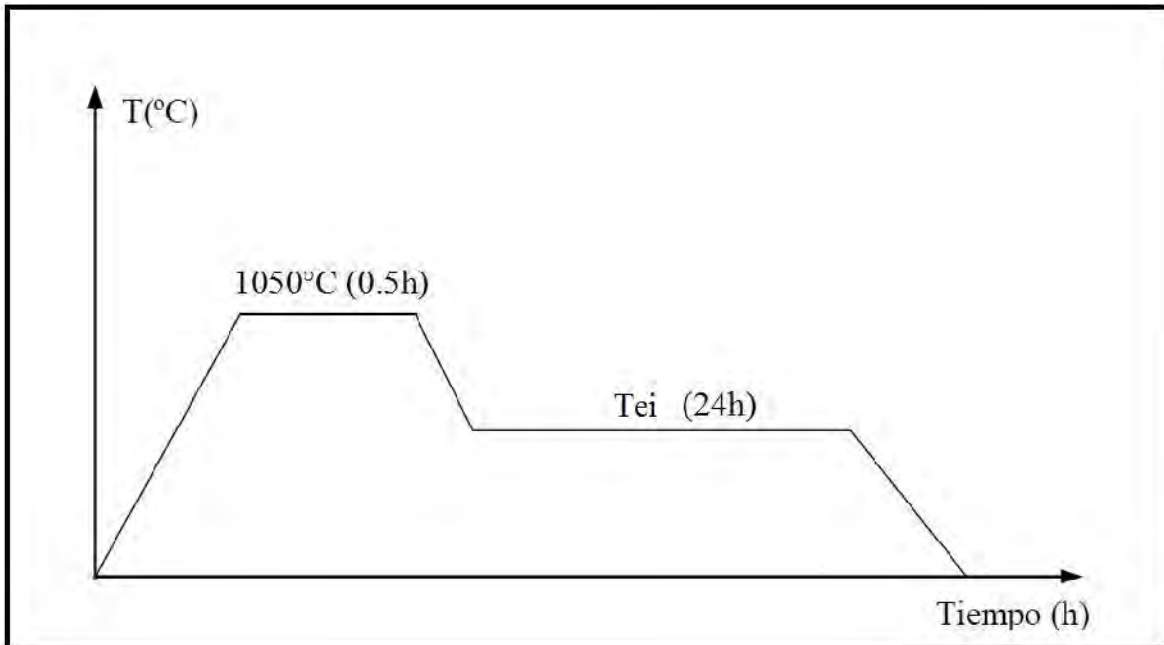


Figura 5.2 Tratamiento de austenitización a 1050°C durante 30 minutos con posterior enfriamiento a T_{ei} durante 24 h.

Para la realización de estos tratamientos térmicos se utilizaron dos hornos de marca impalab con una temperatura máxima de 1200°C , potencia de 2950 Watts, tensión 220 Volts, corriente 20 de Amp., Frecuencia de 60 Hz Fases: 2 fases. *figura 5.3* ubicados en el laboratorio de metalurgia en el Centro de Asimilación Tecnológica (CAT) de la FES-Cuautitlán. Ambos hornos son eléctricos y programables y están dispuestos de forma continua para facilitar el trasvase rápido de la probeta de uno al otro.



Figura 5.3 horno Impalab



PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

Se han utilizado técnicas metalográficas para identificar las fases presentes en las microestructuras de los materiales. Estas fases que constituyen el agregado metálico son generalmente, de tamaño microscópico y para su observación de estudio, es preciso preparar debidamente las probetas.

Una superficie metálica en la que se van a observar unas fases microscópicas ha de ser perpendicular entre superficie, plana y estar pulida. Plana porque la pequeña profundidad del foco de los sistemas ópticos de observación a grandes aumentos no permitirá enfocar la imagen simultáneamente en planos situados a distintos niveles y estar pulido para que sólo puedan aparecer en ella detalles propios de su estructura, se realizan una serie de consecutivos : corte, desbaste y ataque que se describen a continuación:

CORTE

Como la muestra utilizada era excesivamente grande, fue necesario reducir a un tamaño más pequeño. Para ello se utilizó una máquina cortadora de disco abrasivo, en la que se sujetó la pieza en bruto a la



mordaza de la máquina, se le acerca el disco que al girar va produciendo el corte de la pieza, al mismo tiempo que se vierte un líquido refrigerante sobre el disco y la muestra, evitando el calentamiento excesivo de esta última.

DESBASTE

La superficie a pulir, primero ha de ser desbastada pasándola por papel con abrasivo de grano cada vez más fino. En este trabajo se empezó con lija de grano 80, pasándola posteriormente por las de 100, 180, 240, 320, 500, 600, 800, 1000, 1200 y 1500. Los papeles de lija se apoyaron sobre una superficie plana, en este caso se utilizó una pulidora de disco marca **LECO** modelo **Vari/Pol VP-50 @ 500 rpm** *figura 5.4* y la probeta se apoya sobre ellos por la cara a desbastar, frotándola en una dirección hasta que se observa en su superficie solo marcas de desbaste correspondientes al papel que se está utilizando. La dirección de desbaste se gira 90° al pasar de un papel al siguiente. Habiendo previamente aclarado la probeta con un chorro de agua con el fin de eliminar las posibles virutas de la última lija utilizada.



Figura 5.4 Pulidora de disco marca LECO modelo Vari/Pol VP-50 @ 500 rpm

Después de haber pasado por todas la lijas y limpiado perfectamente la probeta, se está en condiciones de pasar a la etapa de pulido.

PULIDO

La superficie de la probeta, desbastada hasta el grano más fino y limpia, se pasa por un paño impregnado de algún abrasivo. El tipo de abrasivo y del paño dependen del tipo de material de la probeta. El



utilizado en este caso fue alúmina de grano fino ($0.3\mu\text{m}$) para un pulido fino y como paño se ha utilizado uno de tela de nylon.

Los paños, siempre húmedos y con suficiente abrasivo, van sujetos a un disco giratorio, aunque también pueden ir apoyados sobre superficies planas y limpias. En nuestro caso para realizar el pulido nos hemos ayudado con la pulidora de disco utilizada en el desbaste de las probetas. El disco gira y la probeta apoyada suavemente sobre él, se hizo girar círculos en sentido contrario al del disco.

Una vez terminado con el pulido con el fin de obtener una superficie espectacular, se procedió a la limpieza de la probeta antes de proceder al ataque.

ATAQUE

Una superficie pulida revela ya una serie de hechos interesantes, como puede ser de grietas, inclusiones, fases (si su forma y color las hacen diferenciables), poros, etc. Pero, normalmente, la probeta hay que atacarla con un reactivo químico que actúa de forma selectiva sobre los diversos constituyentes estructurales (fases, límite de grano, impurezas, zonas deformadas...).

Antes de atacar la probeta ha de estar desengrasada y limpia. Luego, es importante de elegir un buen reactivo que ataque al material en



cuestión; en este caso para la fundición blanca con alto contenido de Cromo se ha elegido el reactivo que se compone de las siguientes sustancias:

<i>1 parte de</i>	<i>Agua</i>
<i>1 parte de</i>	<i>Acido nítrico (HNO₃)</i>
<i>1 parte de</i>	<i>Acido clorhídrico (HCl)</i>

Preparado el reactivo, se vierte un poco en un recipiente en el que se introduce la probeta unos segundos, mojando la superficie pulida. Se detiene el ataque con agua y se observa la superficie. Esta operación se repite hasta que la superficie a examinar este bien atacada. El tiempo de ataque es muy variable y sólo la practica o la observación repetida de la probeta al microscopio dirán cuando debe darse por terminado.

Después del ataque se lavó la probeta con abundante agua corriente y se secó con alcohol (si es absoluto mejor) y un secado con aire caliente.



ANÁLISIS METÁLOGRAFICO

Una vez que las muestras preparadas metalográficamente, ya se puede proceder a su análisis. Para ello se utilizaron diferentes técnicas e instrumentos que se describen a continuación.

MICROSCOPIA

Todas las operaciones descritas en el apartado anterior, tienen por objeto revelar superficies metálicas planas sus, constituyentes estructurales al ser observados en el microscopio. El microscopio es un instrumento fundamental del metalurgista, por lo que es importante saber sacar un rendimiento óptimo de sus grandes posibilidades.

MICROSCOPIA ÓPTICA

Con la ayuda del microscopio óptico se puede estudiar los microconstituyentes de los metales, aleaciones y en muchos casos es posible reconstruir la historia de los procesos de fabricación, el efecto



de los tratamientos térmicos y en ocasiones determinar también las causas que han producido la rotura de piezas o herramientas.

Dentro de los microscopios ópticos, están los que se denominan "microscopios metalúrgicos". Se diferencian del resto en el método de iluminación. En medicina, farmacias, biología, etc., se suelen observar muestras transparentes, mientras que en metalografía las probetas que se examinan son opacas, por lo que es necesario emplear sistemas de iluminación especiales diferentes de los que se emplean en la mayoría de los microscopios ordinarios. La iluminación que se emplea en los microscopios metalográficos se suele denominar 'iluminación vertical y se realiza por reflexión de luz, producida por una bombilla a un arco, en un cristal plano o en pequeño prisma, esos elementos reflectores van colocados en el tubo central del microscopio.

Principios Generales del Microscopio Metalografico.

El lente objetivo se compone de varias lentes que agrupados, forman un sistema óptico positivo y convergente.

Si una probeta metalográfica se coloca un poco más allá del punto focal frontal del lente objetivo, se obtiene una imagen primaria real mayor que el objeto y situado al otro lado del sistema de lentes que componen dicho objetivo. El tamaño de esta imagen primaria depende



de las distancias relativas a que se encuentran del lente objetivo, el objeto y su imagen. La distancia a que tal imagen se forma, con relación siempre al lente objetivo, depende de la distancia focal de este elemento y de la distancia a que se encuentra el objeto con relación al punto focal frontal del lente objetivo.

Si la imagen primaria producida por el lente objetivo se forma a una distancia apropiada, es posible que el segundo sistema óptico (el ocular) amplifique aún esa imagen en una cantidad proporcional a su aumento propio. La distancia entre ocular y objetivo es fija y corresponde a la longitud mecánica del tubo del microscopio. Para lograr que la imagen primaria se forme en la posición debida con respecto al ocular, se debe enfocar el microscopio.

El lente objetivo es capaz por sí mismo, de dar una imagen real del objeto, pero existen unos oculares como los de Huygens, que colaboran en la formación de esta imagen. La lente frontal del ocular o lente de campo, forma sistema con el lente objetivo para originar una imagen primaria en el foco de la lente de salida u ocular. Si la posición de esta imagen primaria es correcta, la lente ocular (no confundir con el ocular que es el sistema completo) en unión con el sistema de lentes que forman el ojo humano, producen una imagen real en la retina. La imagen formada en la retina es derecha y no está invertida, pero debido a la forma con que responde el sistema nervioso a las



excitaciones de la retina, el observador tiene la conciencia de que tal imagen es invertida y se encuentra localizada en el espacio exterior y a cierta distancia del ojo. Esta imagen en el espacio, no existe realmente y se denomina imagen virtual. *Figura 5.4*

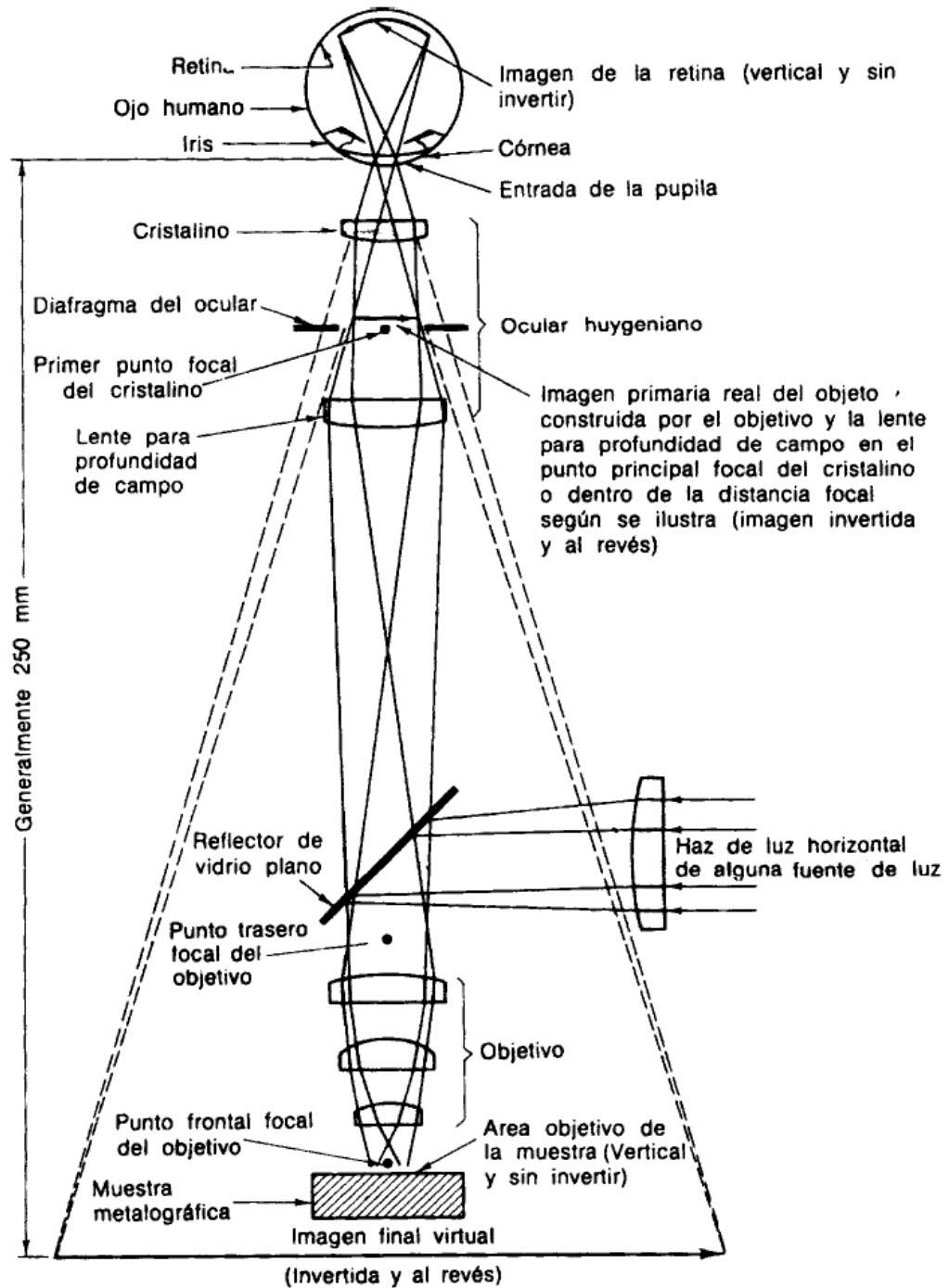


Figura.5.4 Ilustración del principio del microscopio metalúrgico compuesto y la traza de los rayos a través del sistema óptico desde el campo objetivo hasta la imagen final virtual.



Muestreo

La experiencia ha demostrado que el éxito en el estudio microscópico depende en mucho del cuidado que se tenga para preparar la muestra. El microscopio más costoso no revelará la estructura de una muestra que haya sido preparada en forma deficiente. El procedimiento que se sigue en la preparación de una muestra es comparativamente sencillo y requiere de una técnica desarrollada sólo después de práctica constante. El último objetivo es obtener una superficie plana, sin rayaduras, semejante a un espejo. Las etapas necesarias para preparar adecuadamente una muestra metalográfica se explican a continuación.

La selección de una muestra para estudio microscópico puede ser muy importante. Si lo que se va a investigar es una falla, se debe escoger la muestra más próxima al área de la falla y comparársele con una tomada de la sección normal o sana.

Si el material es suave, como metales o aleaciones no ferrosas y aceros no tratados térmicamente, la sección puede obtenerse por corte manual con una segueta. Si el material es duro, la sección puede obtenerse mediante un disco cortador abrasivo, el cual es un plato delgado fabricado de un abrasivo de tipo adecuado, que gira a alta



velocidad. La muestra debe mantenerse fría durante la operación de corte.

El microscopio óptico utilizado para examinar las muestras de este trabajo fue un OLIMPUS Tokio.

ENSAYO DE DUREZA

Una manera de cuantificar la dureza de un material es medir la resistencia que opone la superficie de un material a ser penetrado por un objeto duro. Puede definirse como la unidad de medida de la resistencia de un material a la deformación plástica.

Existen distintos métodos para la dureza de los materiales, pero de acuerdo a la norma ASTM E-92, en este trabajo se ha utilizado el procedimiento de dureza Vickers y se tomará la dureza en la escala Rockwell C con fines de comparación.

Prueba de dureza Vickers

Se basa en forzar un pequeño penetrador en forma de pirámide de diamante, con un ángulo de 136° entre caras opuestas (*figura 6.1*),



sobre la superficie del material a ensayar en condiciones controladas de cargas y velocidades de aplicación de la carga. Las cargas aplicadas pueden variar entre 1 y 100 kg y se aplican durante unos instantes (10-15 segundos). Tras el ensayo, se mide el tamaño de la huella resultante que se relaciona con un número de dureza; cuando más blando es el material, mayor y más profunda es la huella y menor es el número de dureza.

La dureza Vickers (HV) se calcula partiendo de la fuerza en Newton y de la diagonal en mm de la huella de la pirámide según la fórmula:

$$Hv = 1,8544 \cdot \frac{F}{d^2}$$

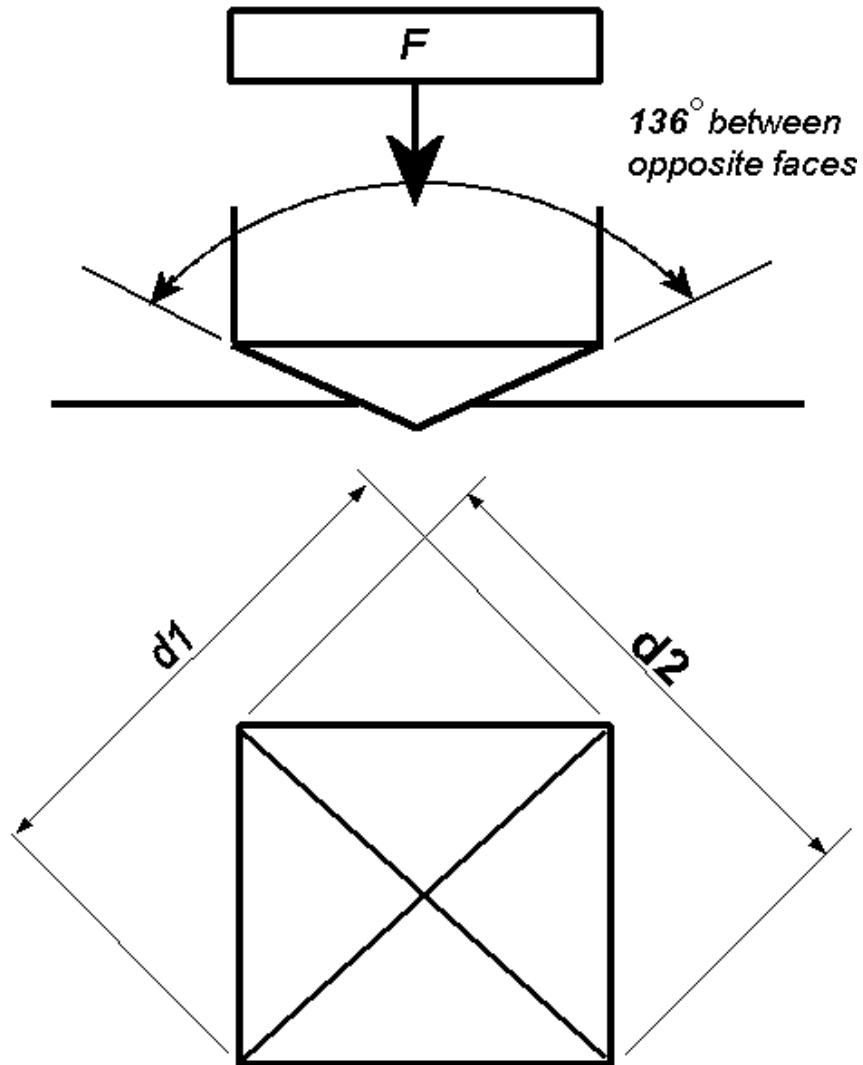


Figura 6.1 Marcas del penetrador en forma de pirámide de diamante, con un ángulo de 136° entre caras opuestas

F = fuerza en kgf.

d = media aritmética de las dos diagonales, $D1$ y $D2$ en mm



La carga utilizada en este caso fue de 2 kg y el tiempo empleado fue de 15 segundos. La huella resultante se observó en el proyector de perfiles, con lo que se obtuvieron las medidas de las diagonales de la misma. La media de estas medidas se convirtió en un número de dureza con la ayuda de tablas de equivalencia. Los ensayos de dureza se han realizado con un durómetro de la marca **Amsler Otto Wolper** modelo **D-6700**, fabricado en Alemania, puede determinar durezas en escala Vickers, Brinell y Rockwell.

Para cada tipo de tratamiento térmico, se realizaron unas diez huellas de dureza y se calculó el valor medio de todas las medias. El resultado representa la dureza correspondiente al material sometido ese tratamiento térmico concreto.

Pruebas de dureza Rockwell.

Es también una prueba de impresión, pero el número de dureza se determina por una medición diferencial de la profundidad que puede leerse directamente en un indicador de carátula de la máquina que se usa para poner la carga. Para obtener una lectura de dureza, primeramente el equipo utiliza una precarga de 10 kilogramos en el penetrador. Esto reduce el efecto de polvo, película de aceite, etc., dependiendo del tipo de penetrador y la escala que se use, entonces



se impone una carga mayor de 60, 100 ó 150 kilogramos para forzar al penetrador en el material de trabajo. Una vez que el penetrador se ha asentado en su completa profundidad la carga mayor se elimina. La profundidad diferencial permanente entre la carga menor a mayor se lee directamente como un número de dureza Rockwell. La siguiente *figura 6.2*, nos muestra el probador de dureza Rockwell.

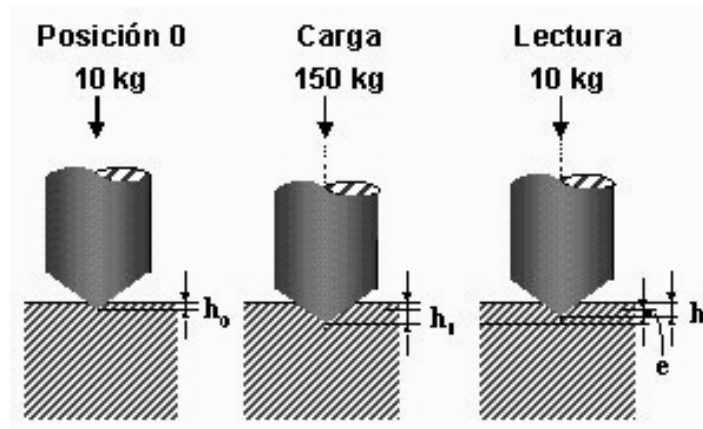


Figura. 6.2 Probador de dureza Rockwell.

Casi todas las pruebas de dureza con el equipo Rockwell se efectúan con dos penetradores estándar.

El que se usa para materiales suaves es una esfera de acero endurecido de 1/16 de pulgada de diámetro, soportada en un mandril especial que permite reemplazar con facilidad la esfera si llega a



dañarse. En la siguiente *tabla 6.1* se muestran las relaciones entre la designación de la escala, cargas y penetradores.

Símbolo de la escala	Penetrador	Carga mayor (kg)	Aplicaciones
A	Diamante	60	Aceros tratados y sin tratar. Materiales muy duros. Chapas duras y delgadas.
B	Bola de 1/16 pulgada	100	Aceros recocidos y normalizados.
C	Diamante	150	Aceros tratados térmicamente.
D	Diamante	100	Aceros cementados.
E	Bola de 1/8 pulgada	100	Metales blandos y antifricción.



F	Bola de 1/16 pulgada	60	Bronce recocido.
G	Bola de 1/16 pulgada	150	Bronce fosforado y otros materiales.
H	Bola de 1/8 pulgada	60	Metales blandos con poca homogeneidad, fundiciones con base Fierro.
K	Bola de 1/8 pulgada	150	Aplicaciones análogas al tipo anterior.

Tabla 6.1 Símbolo de escala para cada penetrador, la carga y sus aplicaciones.

El penetrador usado y el tamaño de la carga de impresión en la prueba del material se definen por una letra que es parte de la lectura Rockwell.

La letra designa las condiciones de la prueba, es una parte importante de la notación de la dureza, porque el número sólo puede representar varias condiciones diferentes de dureza.



DISCUSIÓN Y RESULTADOS

PRUEBA DE DUREZA

Los resultados obtenidos en los ensayos de dureza Vickers efectuados sobre las probetas tratadas térmicamente mediante proceso de austenitización a 1050°C durante 30 minutos, seguido de un tratamientos isotérmico a distintas temperaturas durante 24 horas se muestran en la *tabla 6.1*.

Tabla 6.1 Resultados de prueba de dureza

TRATAMIENTO TÉRMICO	VICKERS	ROCWELL C
Enfriamiento Isotérmico a 150°C – 24 h	584	64
Enfriamiento Isotérmico a 350°C – 24h	594	65
Enfriamiento Isotérmico a 550°C – 24h	538	61
Enfriamiento Isotérmico a 750°C – 24h	452	50



Se obtuvo un incremento en la dureza tomando como referencia la más baja a temperatura del enfriamiento isotérmico de 750°C:

TRATAMIENTO TÉRMICO	DUREZA Vickers	DUREZA Rockwell C
<i>Enfriamiento isotérmico a 150°C</i>	<i>29.20%</i>	<i>27.10%</i>
<i>Enfriamiento isotérmico a 350°C</i>	<i>31.4%</i>	<i>30.35%</i>
<i>Enfriamiento isotérmico a 550°C</i>	<i>19.0%</i>	<i>21.82%</i>

MICROESTRUCTURA

La selección de la muestras para el estudio microscópico, se ubico una sección de la probeta en donde se pudiera observar la afectación de la temperatura de enfriamiento de los tratamientos térmicos aplicados.

En todas las probetas se puede identificar las mismas zonas: carburo primario Cr_3C (granos hexagonales), carburos eutectoides Cr_7C_3 , Ferrita y Perlita. Pero en distintas proporciones.



El comportamiento del material con los tratamientos isotérmicos a distintas temperaturas presenta en su microestructura un aumento en el tamaño de los carburos primarios, con un enfriamiento mayor de la temperatura después de austenitización del material, esto también afecta a los carburos eutectoides que se presentan en mayor cantidad en estas mismas condiciones, mientras que la ferrita está más presente cuando el enfriamiento de la temperatura es menor después de la austenitización.

Como se muestra en la *figura 6.1 y 6.2* que representa el tratamiento térmico de enfriamiento isotérmico a una temperatura de enfriamiento a 150°C en la cual la disminución de la temperatura es la mayor de todos los tratamientos isotérmicos en la cual presenta un mezcla con un alto volumen de carburos primarios Cr_3C , seguido de una considerable proporción de carburos eutectoides Cr_7C_3 y unas pequeñas regiones de perlita representadas en manchas negras, todas estas sobrepuestas en una matriz ferrítica.

Para el tratamiento de enfriamiento isotérmico con un enfriamiento a 350°C se observa que el carburo primario va gradualmente disminuyendo el tamaño en general todavía encontrando carburos de gran tamaño, mientras que los carburos eutectoides van disminuyendo en cantidad, la Perlita aumenta en cantidades significativas, *figura 6.3 y 6.4*.



En la siguiente probeta corresponde al enfriamiento a 550°C en esta probeta se observa que los carburos primarios empiezan hacerse más uniforme mientras aparecen agujas del mismo carburo demasiado grandes, los carburos eutectoides van disminuyendo en cantidad mientras que la perlita sigue en la misma proporción y ya se empieza a notar más cantidad de Ferrita en la matriz. *Figura 6.5 y 6.6.*

Para el último tratamiento isotérmico después de la austenitización se enfrió a 750°C se observan los carburos primarios se encuentran más ordenados mientras que los carburos eutectoides están en menos cantidad, la perlita sigue en la misma proporción y la matriz de Ferrita se encuentra en mayor concentración, *figura 6.7 y 6.8.*

FOTOGRAFÍAS

La microestructura en el caso de la probeta austenitizada 30 minutos a 1050°C seguida de un tratamiento de enfriamiento isotérmico a 150°C durante 24 horas (*figura 6.1, 6.2*)

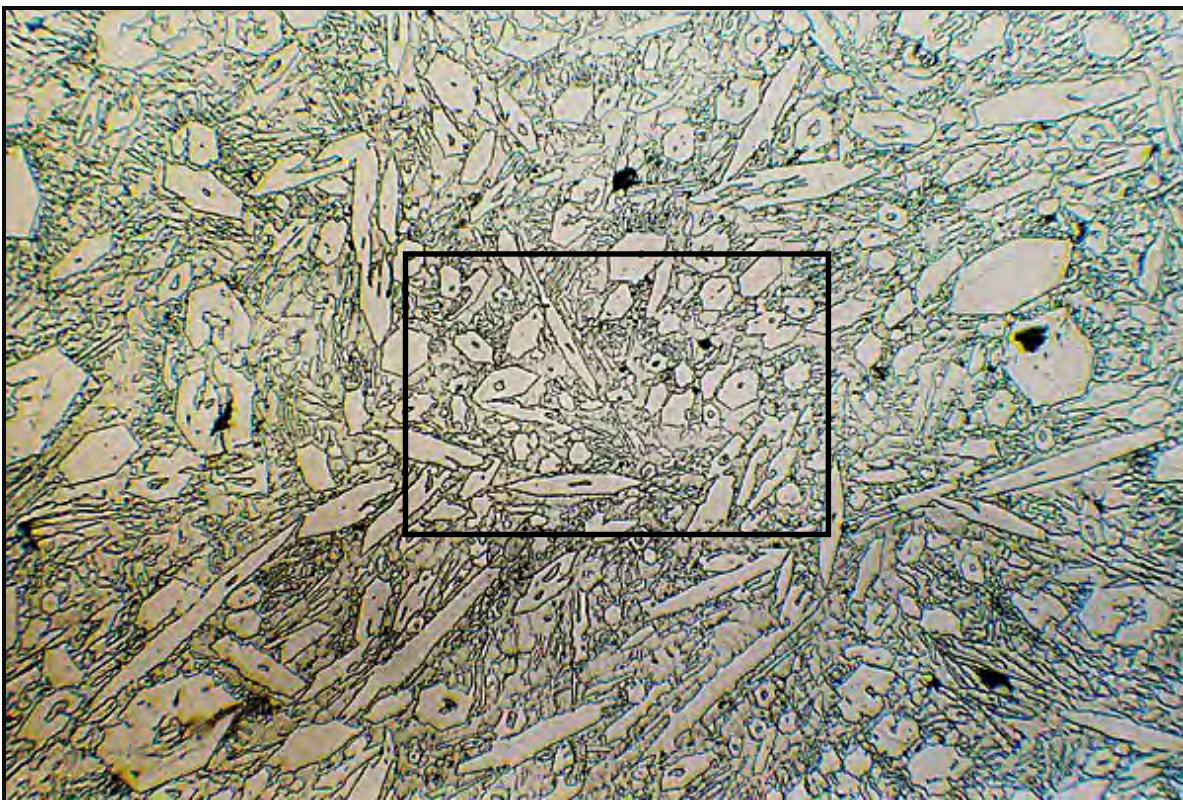


Figura 6.1.- Fundición blanca al alto Cromo con tratamiento de austenitización a 1050°C más un tratamiento isotérmico a 150°C (100x)



Carburo primario Cr_3C

Perlita



Carburo eutectoide Cr_7C_3

Ferrita

Figura 6.2.- Fundición blanca al alto Cromo con tratamiento de austenitización a 1050°C más un tratamiento isotérmico a 150°C (200x)



La microestructura en el caso de la probeta austenitizada 30 minutos a 1050°C seguida de un tratamiento de enfriamiento isotérmico a 350°C durante 24 horas (*figura 6.3, 6.4*)

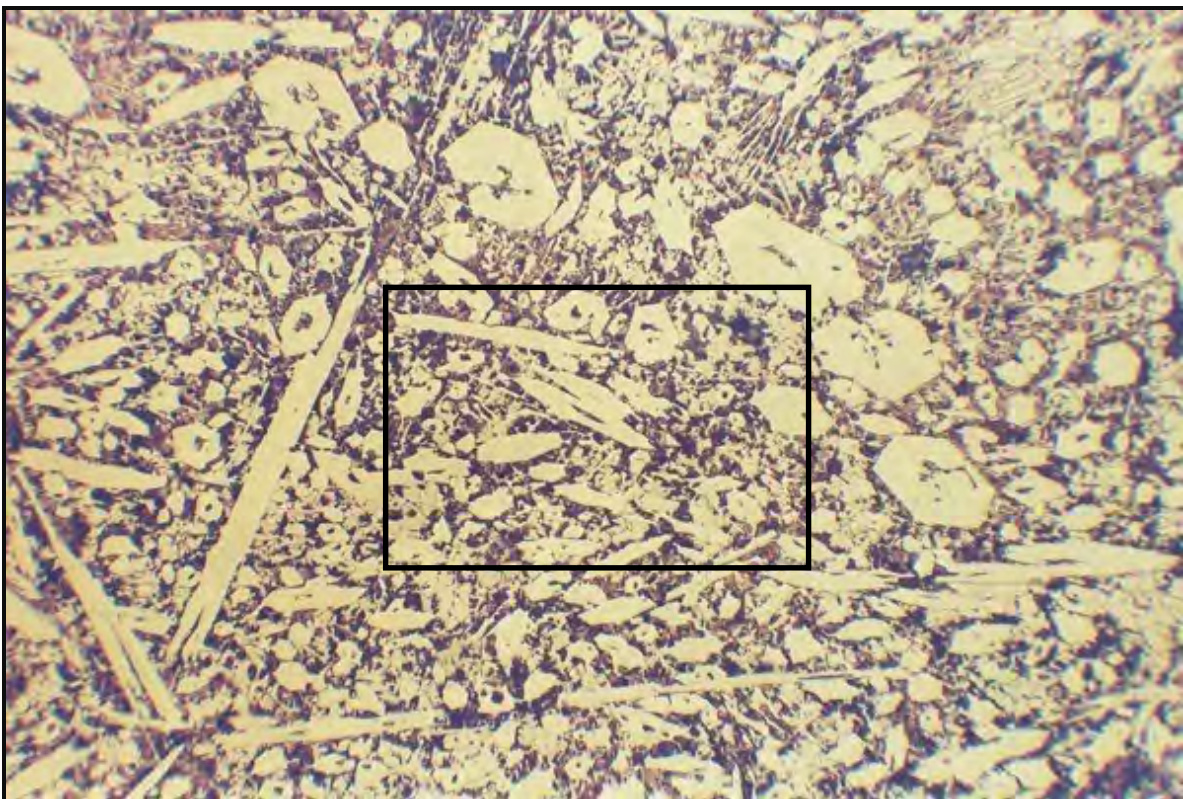


Figura 6.3.- Fundición blanca al alto Cromo con tratamiento de austenitización a 1050°C más un tratamiento isotérmico a 350°C (100x)

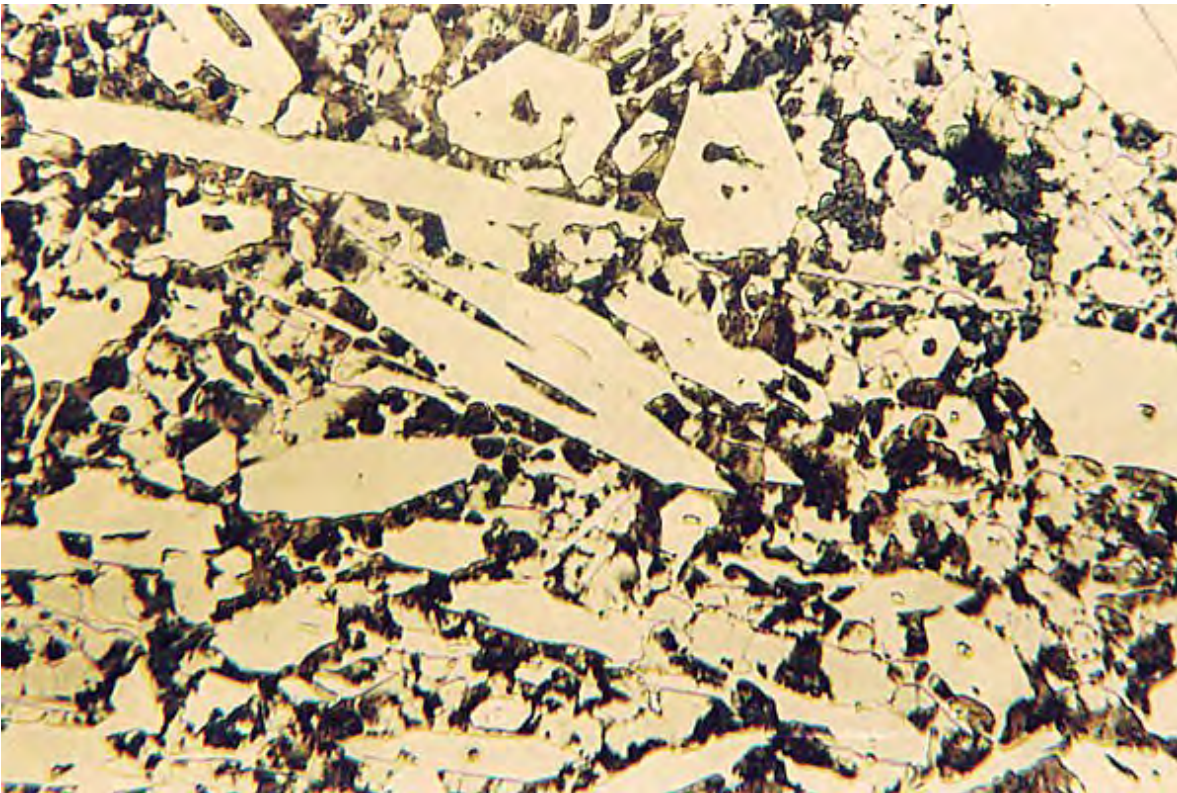


Figura 6.4.- Fundición blanca al alto Cromo con tratamiento de austenitización a 1050°C más un tratamiento isotérmico a 350°C (200x)



La microestructura en el caso de la probeta austenitizada 30 minutos a 1050°C seguida de un tratamiento de enfriamiento isotérmico a 550°C durante 24 horas (*figura 6.5, 6.6*)

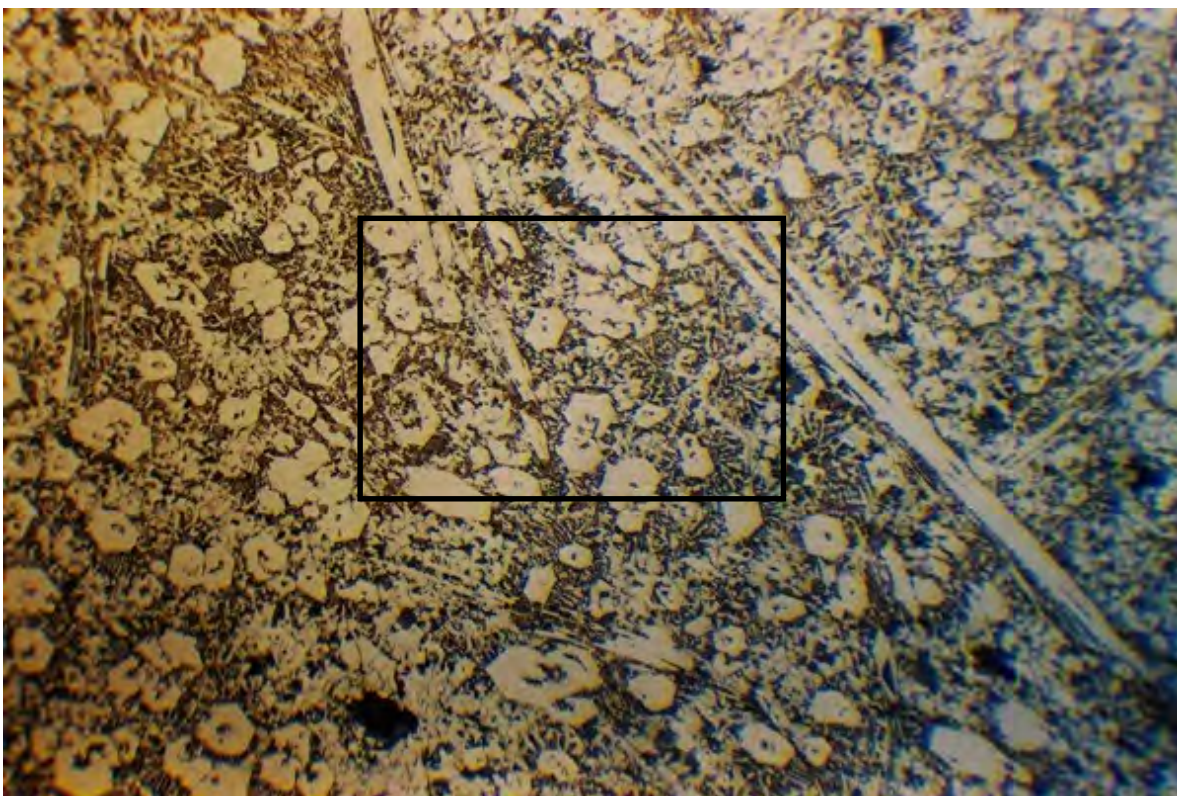


Figura 6.5.- Fundición blanca al alto Cromo con tratamiento de austenitización a 1050°C más un tratamiento isotérmico a 550°C (100x)

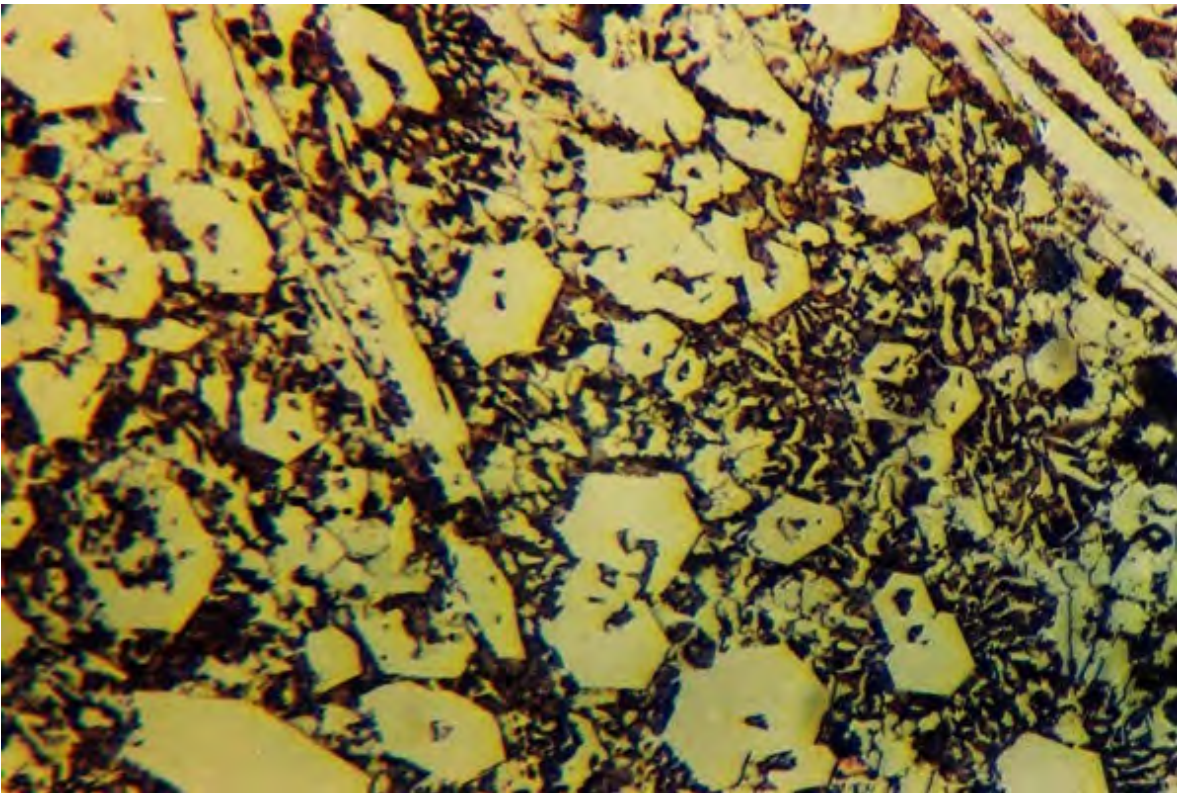


Figura 6.6.- Fundición blanca al alto Cromo con tratamiento de austenitización a 1050°C más un tratamiento isotérmico a 550°C (400x)



La microestructura en el caso de la probeta austenitizada 30 minutos a 1050°C seguida de un tratamiento de enfriamiento isotérmico a 750°C durante 24 horas (*figura 6.7, 6.8*)

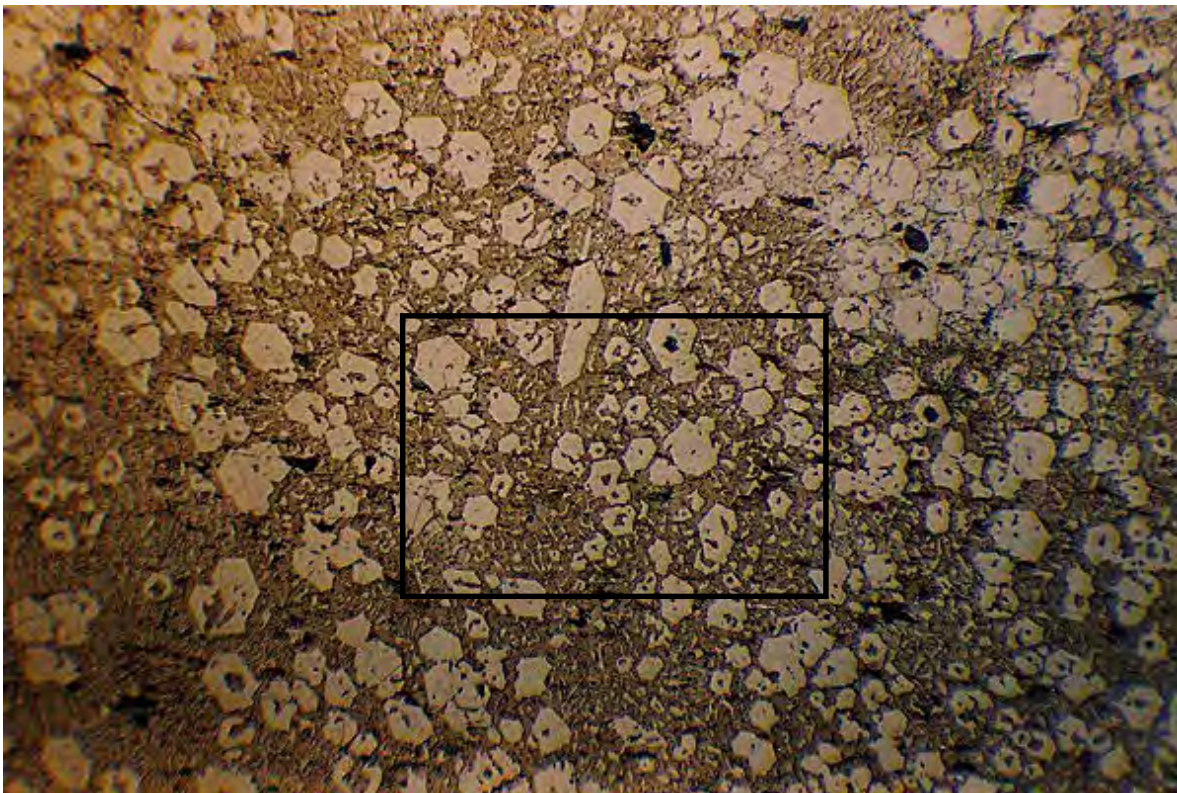


Figura 6.7.- Fundición blanca al alto Cromo con tratamiento de austenitización a 1050°C más un tratamiento isotérmico a 750°C (100x)

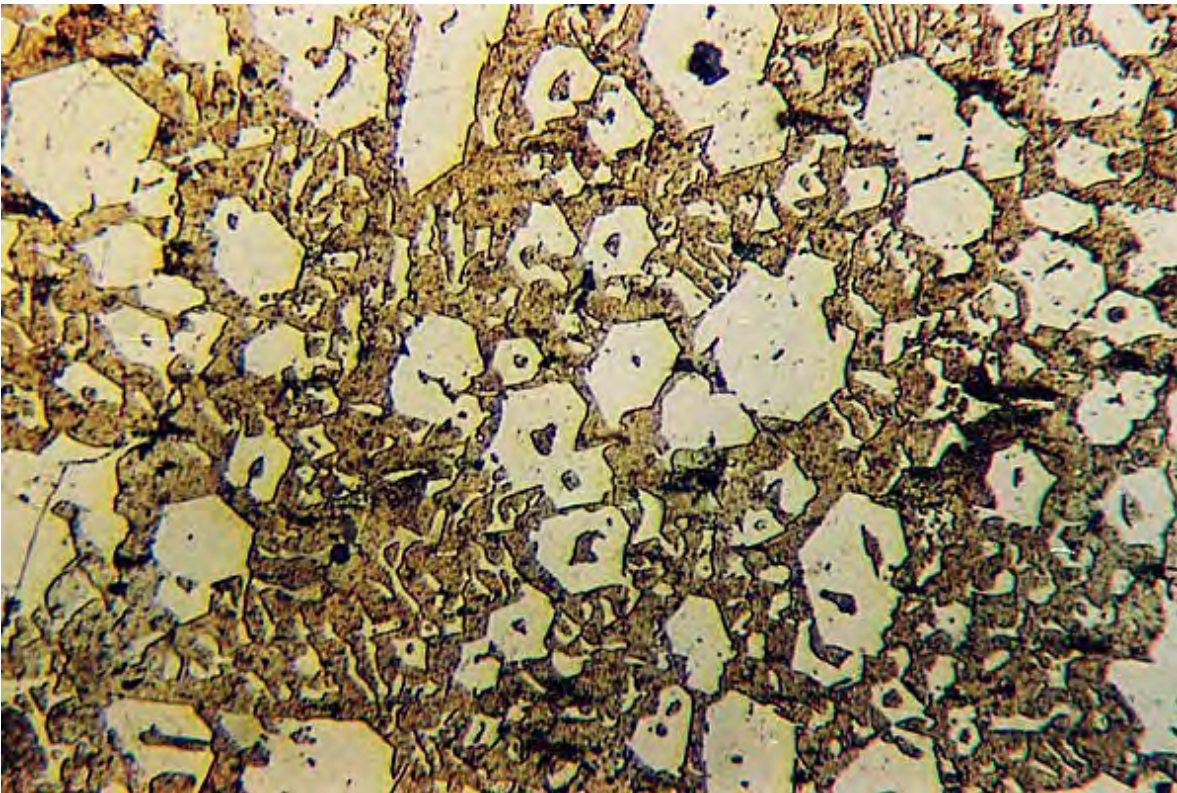


Figura 6.8.- Fundición blanca al alto Cromo con tratamiento de austenitización a 1050°C más un tratamiento isotérmico a 750°C (200x)



CONCLUSIONES

El trabajo experimental del enfriamiento isotérmico mostro:

1.- La dureza de las fundiciones blancas con alto contenido en Cromo resultan modificadas por la temperatura del enfriamiento isotérmico a un mismo tiempo, influye en la disminución de la dureza, esto es a mayor temperatura de enfriamiento menor dureza.

2.- La estructura metalúrgica cambia en cuanto a su morfología y tamaño, esto es:

Presenta en su microestructura un aumento en el tamaño de los carburos primarios, con un enfriamiento mayor de la temperatura después de austenitización del material, esto también afecta a los carburos eutectoides que se presentan en mayor cantidad en estas mismas condiciones, mientras que la ferrita está más presente cuando el enfriamiento de la temperatura es menor después de la austenitización.



BIBLIOGRAFÍAS

1. Metallography principles and practice, George F. Vander Voort. McGraw-Hill Book Company, 1999.
2. Avner, S., "Introducción a la metalurgia Física", McGraw-Hill, 1988.
3. American Welding Society, In Situ Determination of Transformation Temperatures in the Weld Haz, By Phillip R. H., January, 1983.
4. American Society for Metals, Symposium On Applications Of Modern Metallographic Techniques (1969: Filadelfia, Filadelfia).
5. "Introducción a la metalurgia física", 2ª Edición Sydney H. Avner, McGraw Hill, 1984.
6. "Tecnología del acero", 3a edición, José Ma. Laceras y Esteban, Cedel, 1978.
7. "Metals Handbook", vol. 3, 9a. Edición, American Society for Metals, 1987.
8. "Metals Handbook", vol. 1, 9ª. Edición, American Society for Metals, 1983.
9. "Materiales y procesos de fabricación", Harry D. Moore, Limusa, 1987.



10. "Materiales de Ingeniería y sus aplicaciones", Richard A. Flinn, McGraw Hill, 1979.
11. "La ciencia e Ingeniería de los Materiales", Donal R. Askeland, Grupo editorial Iberoamérica.