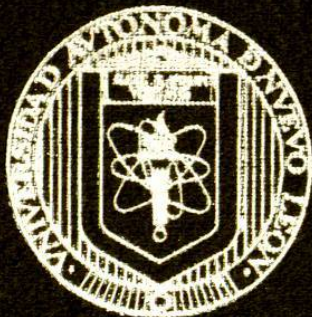


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



**SECUENCIA DE PROCESAMIENTO DE ACEROS DE
MAQUINARIA**

TESIS

**CON OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE
LA INGENIERIA MECANICA CON ESPECIALIDAD EN
DISEÑO MECANICO**

PRESENTA

RICARDO CALVO ALTAMIRANO

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.
DICIEMBRE DE 1996



1080071283

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



SISTEMA DE PROCESAMIENTO DE ACEROS DE
MAQUINARIA

TESIS

CON OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE
LA INGENIERIA MECANICA CON ESPECIALIDAD EN
DISEÑO MECANICO

PRESENTA

RICARDO CALVO ALTAMIRANO

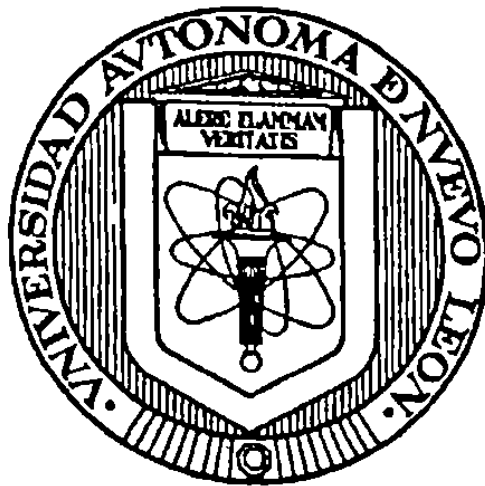
SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.
DICIEMBRE DE 1996



TM
TS320
C3



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO.

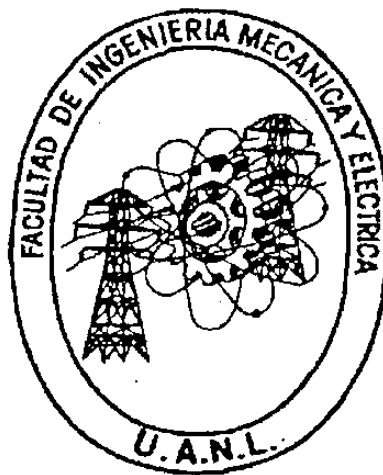


TESIS:
SECUENCIA DE PROCESAMIENTO DE ACEROS DE
MAQUINARIA
CON OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE
LA INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN
DISEÑO MECÁNICO

QUE PRESENTA
RICARDO CALVO ALTAMIRANO.

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N.L. DICIEMBRE DE 1996.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO.



TESIS:
SECUENCIA DE PROCESAMIENTO DE ACEROS DE
MAQUINARIA
CON OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE
LA INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN
DISEÑO MECÁNICO

QUE PRESENTA
RICARDO CALVO ALTAMIRANO.

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N.L. DICIEMBRE DE 1996.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO.

Los miembros del comité de tesis, recomendamos que la presente tesis realizada por el Ing. RICARDO CALVO ALTAMIRANO, sea aceptada como opción para obtener el grado de maestro en ciencias de la ingeniería mecánica con especialidad en diseño mecánico.

EL COMITÉ DE TESIS




M.C. JOSE LUIS CAVAZOS GARCÍA
ASESOR



M.C. BUENAVENTURA J. FLORES RDZ.
COASESOR



M.C. PAULINO FLORES SAAVEDRA
COASESOR



M.C. ROBERTO VILLARREAL GARZA
SUB-DIRECTOR DIVISIÓN DE POSGRADO

SAN NICOLAS DE LOS GARZA N.L. DICIEMBRE DE 1996.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi mas sincero agradecimiento a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, de la Universidad Autónoma de Nuevo León y a Tratamientos Térmicos Omega, por permitirme utilizar sus instalaciones, para efectuar las pruebas practicas de los diferentes tratamientos térmicos.

A mi asesor M.C. José Luis Cavazos García. Así como al M.C. Buenaventura J. Flores Rodríguez y al M.C. Paulino Flores Saavedra, por sus valiosas sugerencias e interés en la revisión de este trabajo.

A mi familia, por el apoyo moral que siempre me ha brindado y a todas las personas que contribuyeron de una forma u otra en la realización de esta tesis.

Y a DIOS ante TODO y por TODO.

CON TODO RESPETO

A MI MADRE

PROLOGO

El objetivo primordial de ésta tesis es la de presentar una secuencia de procesamiento para los aceros de maquinaria.

Los tratamientos térmicos tienen más de un siglo de ser aplicados (1890), pero en los inicios su entendimiento era limitado. Hoy en día (1996), los mecanismos básicos se entienden mucho mejor pero aún así, se deben combinar el arte, la técnica y la ciencia.

La estructura del acero está relacionada con sus propiedades y comportamiento.

El tratamiento térmico modifica la estructura y también sus propiedades.

En los capítulos 1, 2 y 3 se explican los conceptos teóricos básicos sobre el acero, los tratamientos térmicos y los equipos para efectuarlos.

En el capítulo 4 se describen los métodos de clasificación de los aceros, enfatizando en las normas S.A.E., A.I.S.I. y la U.N.S.

En el capítulo 5 se desarrolla la secuencia de procesamiento recomendada para los diferentes aceros de maquinaria.

En el capítulo 6 se dan las conclusiones a que se llegó en la presente tesis.

Y al final la bibliografía consultada para la realización de la tesis.

SÍNTESIS:

CAPITULO 1:

En este capítulo se da información sobre el acero, las formas alotrópicas del hierro, con sus respectivas estructuras cristalinas y las temperaturas a las que ocurren dichos cambios. También se da el diagrama hierro-carburo de hierro y diagramas triple T, donde se muestran los tiempos y temperaturas en las que ocurre la transformación de la austenita a los diferentes fases obtenidas según la velocidad de enfriamiento.

CAPITULO 2:

En este capítulo se da una breve explicación de los diferentes tratamientos térmicos:

- Templado
- Revenido
- Recocido
- Normalizado
- Austempering
- Martempering
- Recocido isotérmico
- Cementación
- Cianuración
- Nitruración

Las variantes de cada uno de los procesos, sus objetivos y las temperaturas a las cuales se aplican.

CAPITULO 3:

Para dar un tratamiento térmico a un acero, es necesario contar con equipo de respaldo, hornos, medios de enfriamiento, durometros, etc. En este capítulo se explican algunos de los hornos más utilizados en los tratamientos térmicos:

- Horno continuo
- Horno no- continuo
- Horno de atmósfera controlada
- Horno al vacío
- Horno de cama fluidizada

Otro equipo indispensable para verificar la dureza del acero, son los durometros. Aquí se da una explicación completa sobre los ensayos de dureza más usados:

- Ensayo rockwell
- Ensayo brinell
- Ensayo vickers

Y al final se da una tabla de equivalencias entre los diferentes ensayos de dureza.

CAPITULO 4:

En este capitulo se mencionan diferentes métodos de clasificar el acero.

- Según el contenido de carbono.
- Según el uso o aplicación.
- Según su composición química

Se explican las claves de identificación, según las normas AISI y SAE para los aceros :

- Tipo maquinaria
- Tipo herramienta
- Tipo inoxidable

Y por ultimo se da una tabla de equivalencias entre las normas AISI y UNS.

CAPITULO 5:

En este capitulo se citan algunos de los aceros de maquinaria mas comunes:

- 1020
- 1045
- 4140
- 8620

Se dan sus composiciones químicas, sus características, la secuencia óptima de procesamiento y la información detallada de los diferentes tratamientos térmicos, que se le pueden aplicar, incluyendo gráficas que muestran la variación de la dureza con respecto a la temperatura de revenido.

CAPITULO 6:

En este capitulo se dan los resultados que se obtuvieron en pruebas que se hicieron a diferentes aceros y se hace la comparación con los datos teoricos que se tienen sobre esos mismos aceros.

CAPITULO 7:

En éste capitulo se tienen las siguientes conclusiones:

- Hay que identificar el acero.
- Caracterizar el horno.
- maquinar todas las caras de la pieza.
- evitar la oxidación
- eliminar la decarburación
- tener un diseño óptimo de la herramienta.

BIBLIOGRAFÍA.

ÍNDICE:

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN. -----	1
1.1.- ¿Qué es el acero? -----	1
1.2.- Estructura del acero-----	2
1.3.- Cambios alotrópicos del hierro puro -----	4
1.4.- Diagrama de fase hierro-cementita-----	5
1.4.1 solubilidad del carbono en el hierro -----	6
1.4.2.- Austenita-----	7
1.4.3.- Cementita-----	7
1.5.- Transformación de la austenita -----	8
1.5.1.- Acero eutectoide -----	9
1.5.2.- Acero hipoeutectoide-----	9
1.5.3.- Acero hipereutectoide -----	9
1.5.4.- Histerisis-----	10
1.5.5.- Homogenización de la austenita -----	11
1.5.6.- Efectos de los elementos de aleación-----	11
1.5.7.- Temperatura de transformación -----	12
1.5.8.- Contenido de carbono -----	12
1.5.9.- Transformación isotérmica de la austenita -----	14
1.5.10.- Bainita-----	18
1.5.11.- Martensita-----	19
1.5.12.- Propiedades de los productos de la transformación -----	20
CAPITULO 2: TRATAMIENTOS TÉRMICOS MAS USADOS. -----	22
2.1.- Recocido -----	22
2.1.1.- Recocido de austenización completa o de regeneración-----	22
2.1.2.- Recocido subcrítico-----	22
2.1.3.- Recocidos de austenización incompleta (globulares) -----	24
2.2.- Normalizado-----	25
2.3.- Temple -----	25
2.4.- Revenido -----	26
2.5.- Tratamientos isotérmicos de los aceros-----	26
2.5.1.- Austempering -----	26
2.5.2.- Martempering-----	27
2.5.3.- Recocido isotérmico-----	27
2.6.- Temple superficial-----	28
2.7.- Tratamientos en los que hay cambio de composición -----	28
2.7.1.- Cementación -----	28
2.7.2.- Cianuración -----	28
2.7.3.- Sulfinización -----	28
2.7.4.- Nitruración -----	29
2.8.- Finalidades del tratamiento térmico-----	29

2.7.3.- Sulfinización	28
2.7.4.- Nitruración	29
2.8.- Finalidades del tratamiento térmico	29
CAPITULO 3: EQUIPO USADO EN LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS	30
3.1.- Hornos para tratamientos térmicos	30
3.1.1.- Hornos no-continuos	32
3.1.2.- Hornos continuos	32
3.1.3.- Hornos de sales fundidas	34
3.1.4.- Horno de metales fundidos	35
3.1.5.- Hornos de cama fluidizada	35
3.1.5.- Horno de atmósfera controlada	36
3.1.7.- Hornos al vacío	37
3.2.- Medios de enfriamiento	38
3.3.- Durómetros	40
3.3.1.- Ensayo Rockwell	41
3.3.2.- Ensayo Brinell	46
3.3.3.- Ensayo Vickers	48
3.3.4.- Ensayo de microdureza	49
3.3.4.1.- Ensayo Knoop	49
CAPITULO 4: CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS	56
4.1.- Métodos de clasificación	56
4.2.- Identificación de aceros tipo maquinaria	56
4.3.- Identificación de aceros tipo herramienta	58
4.4.- Identificación de aceros tipo inoxidable	60
4.5.- Sistema de numeración unificado (UNS)	61
CAPITULO 5: ACEROS DE MAQUINARIA	64
5.1.- Acero De Maquinaria 1020	65
5.2.- Acero De Maquinaria 1045	68
5.3.- Acero De Maquinaria 4140	70
5.4.- Acero De Maquinaria 8620	73
CAPITULO 6 : RESULTADOS	76
CAPITULO 7: CONCLUSIONES	77
BIBLIOGRAFÍA	79
RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO	80

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

El acero es el material de ingeniería y construcción mas importante del mundo. Es aproximadamente el 80% de todos los metales producidos. Este predominio se debe a la combinación de resistencia, facilidad de fabricación, un amplio rango de propiedades físicas y mecánicas, a un bajo costo.

Mientras algunos aceros son relativamente suaves y dúctiles y se trabajan fácilmente; como las defensas y carrocerías de automóviles. Otros pueden ser endurecidos para usarse como herramientas para cortar materiales a una forma deseada; un ejemplo es la navaja de rasurar. Existen miles de tipos de composición de aceros, los cuales presentan propiedades mecánicas diferentes y estas pueden modificarse mediante tratamientos térmicos.

Se define el tratamiento térmico, como el proceso de calentar y enfriar una aleación en el estado sólido con el fin de obtener propiedades específicas.

Antes de considerar el tratamiento térmico del acero, será de ayuda explicar que es el acero y consideraremos la estructura interna del acero.

1.1 ¿QUE ES EL ACERO?

Fundamentalmente todos los aceros son mezclas de hierro y carbono (máx. 2.00%). Los aceros comunes al carbono también tienen pequeñas cantidades de otros elementos como manganeso, silicio, fósforo y azufre. Por ejemplo el acero AISI o SAE 1045 tiene 0.45% C, 0.75% Mn, 0.040% P, 0.050% S y 0.22% Si.

Aceros aleados son aquellos, que tienen cantidades específicas de otros elementos en su composición química. Los elementos más comúnmente aleados con el acero son el níquel, cromo, molibdeno, vanadio y tungsteno; el manganeso también cae en esta categoría cuando se encuentra en cantidades arriba del 1% . Uno o más de estos elementos de aleación pueden ser necesarios en el acero, para darle las características especiales que lo hagan útil en alguna aplicación de ingeniería. Sin embargo el carbono es el elemento principal de la mayoría de los aceros, debido a que la cantidad de carbono presente en el acero común, tiene un efecto pronunciado en sus propiedades y en la selección del tratamiento térmico, recomendable para obtener ciertas propiedades deseadas.

1.2 ESTRUCTURA DEL ACERO.

Todos los metales por naturaleza son cristalinos. En la solidificación del acero, se forman pequeños cristales. Observando metales con un microscopio de alto poder, no se revelarán los átomos o las redes espaciales; solo se verán granos individuales o cristales. Para poder observar el arreglo de átomos en el hierro o el acero, deberá ser necesario, pulir , atacar y amplificar la superficie del metal; 35 millones de veces, que si se observara a simple vista.

Todos los granos o cristales están compuestos de átomos ligados en un patrón definido. Esta estructura atómica es llamada red espacial . A una temperatura determinada los átomos en un grano están espaciados una distancia definida y esta no puede ser cambiada.

Existen 14 tipos de redes espaciales. Los metalurgistas ferrosos necesitan conocer solamente dos : la cúbica de cuerpo centrado y la cúbica de caras centradas, figs. 1a y 1b.

La cúbica centrada en el cuerpo se abrevia b.c.c., tiene un átomo en cada esquina del cubo imaginario y uno en el centro del cuerpo . La cúbica centrada en las caras se abrevia f.c.c., tiene un átomo en cada esquina del cubo y uno en el centro de cada una de las caras.

El hierro puro y el acero al carbono tienen la estructura b.c.c. a la temperatura ambiente mientras que a altos rangos de temperatura el arreglo es f.c.c.. Hay un rearrreglo de átomos en los granos del hierro o del acero, al ser calentados a ciertos valores de temperatura, donde ocurren cambios de b.c.c. a f.c.c.. Este reacomodo de átomos es llamado cambio alotrópico. La temperatura a la cual estos cambios ocurren, se llama temperatura de transformación. La ciencia del tratamiento térmico del acero depende de la alotropía del hierro y la variación de la solubilidad de carbono en cada forma cristalina del hierro.

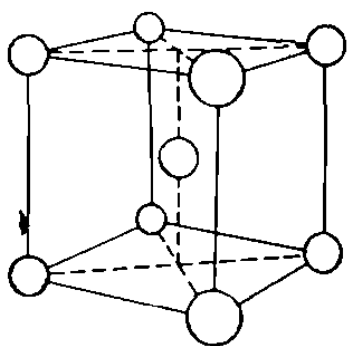


Fig.1a. Red cúbica centrada en el cuerpo (b.c.c.)

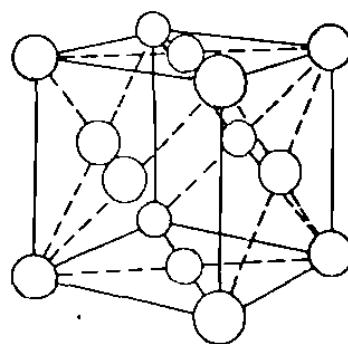


Fig. 1b. Red cúbica de cara centradas (f.c.c.)

1.3 CAMBIOS ALOTRÓPICOS EN EL HIERRO PURO.

Dado que el hierro es el elemento predominante en las aleaciones hierro -carbono. Es conveniente hacer un estudio de los cambios alotrópicos del hierro por ser de gran importancia en el tratamiento térmico del acero.

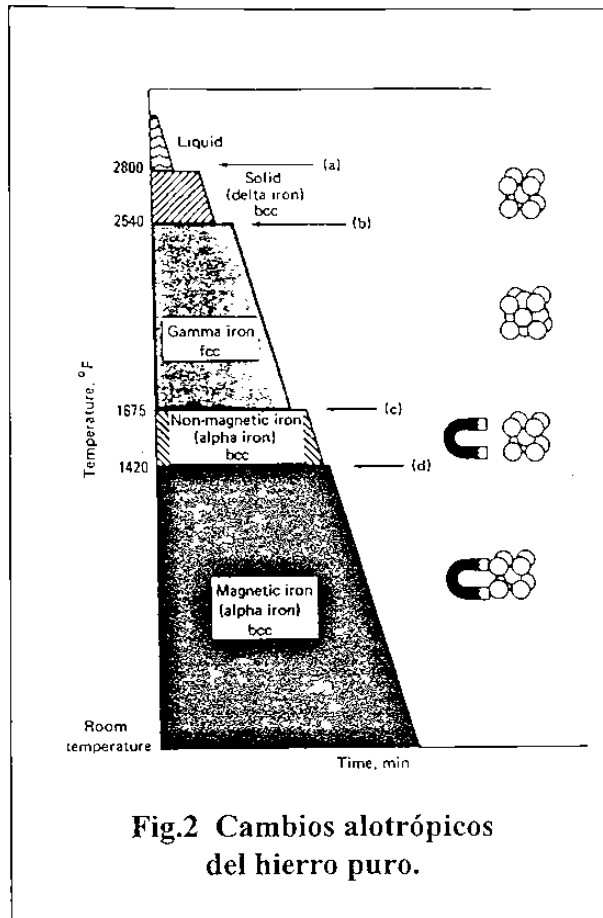
Asumir que el hierro puro se funde en un crisol aislado, de tal manera que permita enfriarlo lentamente y hacer una tabulación de temperatura contra tiempo.

En la figura 2 se observa que arriba de 1540°C (2800°F) el hierro es líquido; a 1540°C (2800°F) el hierro comienza a solidificar y la temperatura se mantiene constante hasta que solidifique totalmente. Después de solidificar el hierro la temperatura comienza a descender a una razón uniforme hasta que alcanza 1395°C (2540°F), a esta temperatura hay una ligera permanencia, comparada con la que se tuvo a 1540°C (2800°F). Entre 1540°C (2800°F) y 1395°C (2540°F), el hierro es conocido como hierro delta, con una estructura b.c.c.. A 1395°C (2540°F) la curva de enfriamiento indica que hay un cambio de hierro delta (b.c.c.) a hierro gama (f.c.c.) esta transformación no es de importancia en los tratamientos térmicos; porque no se aplican a éstas temperaturas.

Cuando termina la transformación a 1395°C (2540°F) la temperatura comienza a descender nuevamente a una razón constante hasta los 915°C (1675°F) donde nuevamente hay una permanencia por un corto tiempo; y a esta temperatura el hierro gama (f.c.c.) cambia a hierro alfa (b.c.c.). Esta transformación es de gran importancia en el tratamiento térmico del acero. La permanencia a 770°C (1420°F) no tiene importancia en los tratamientos térmicos ya que representa un cambio en las propiedades magnéticas del hierro, al pasar de no-magnético a magnético, y se le llama punto de Curie.

Resumiendo, los procesos en los cuales ocurre un cambio de arreglo atómico se llama transformación. Este tipo de transformación no solamente ocurre en el hierro sino también en muchas de sus aleaciones, las cuales tienen sus propias temperaturas de

transformación. Y estas transformaciones son de vital importancia en los tratamientos térmicos del acero.



1.4 DIAGRAMA DE FASE HIERRO - CEMENTITA.

Cuando el hierro puro alcanza la transformación a 915°C (1675°F), lo hace a temperatura constante. Arriba de 915°C (1675°F) el hierro es (f.c.c.) y abajo de ésta temperatura es (b.c.c.). Cuando hay átomos de carbono presente, dos cambios tienen lugar. La temperatura de esta transformación es menor y la transformación ocurre en un rango de temperaturas y no a temperatura constante. Esta información a sido condensada

en el diagrama de fase fig 3. Una fase es una porción de materia física, química y cristalograficamente homogénea, la cual esta separada de las otras fases por limites de grano.

Las siguientes fases ocurren en aleaciones hierro - carbono: aleación fundida, austenita, ferrita, cementita y grafito. Estas fases también son llamados constituyentes. No todos los constituyentes como la perlita o la bainita, son fases, dado que, algunas son mezclas y no son totalmente homogéneas.

Un diagrama de fase es una representación gráfica de la temperatura de equilibrio y la composición de las fases. En el sistema hierro - cementita, la temperatura es colocada verticalmente y la composición horizontalmente. En un sistema metálico, la presión, es usualmente considerada constante, o puede ser tomada como una variable adicional en casos raros. Este diagrama es llamado incorrectamente diagrama de equilibrio hierro - carbono. porque la fase del lado derecho es cementita, y no carbono o grafito, y el termino equilibrio, no es apropiado porque la fase cementita no es realmente estable. En otras palabras, dando suficiente tiempo (menos si la temperatura es elevada) el carburo de hierro o cementita, se descompone a hierro y grafito. El acero grafitiza. Esto es una reacción perfectamente natural y solamente el diagrama hierro-grafito es propiamente llamado diagrama de equilibrio.

En el diagrama hierro - cementita se indican, que fases están presentes a cada temperatura y los limites de composición de cada una de ellas. En el diagrama la temperatura es colocada verticalmente y la composición horizontalmente. Cualquier punto en el diagrama representa una composición y una temperatura definida, cada valor puede ser encontrado sacando la proyección al eje correspondiente.

1.4.1 Solubilidad del carbono en el hierro. Es más fácil aceptar el hecho que el carbono se disuelve uniformemente en el hierro fundido, de la misma manera que la sal se disuelve en el agua. Sin embargo, es difícil esquematizar o dibujar al carbono sólido o al

carburo de hierro disuelto en el hierro sólido. La habilidad del hierro y carbono para formar soluciones sólidas hace posible el tratamiento térmico del acero.

Refiriéndonos al diagrama hierro - cementita el área marcada como austenita, es una área donde el hierro retiene mucho carbono disuelto. De hecho, la mayoría de los tratamientos térmicos, como el recocido, normalizado y temple empiezan con el calentamiento del acero dentro del rango austenítico, para disolver el carburo en el hierro.

1.4.2 Austenita. Es el termino aplicado a la solución sólida de carbono en hierro f.c.c.. Como otros constituyentes en el diagrama, la austenita tiene una solubilidad definida por el carbono, la cual depende de la temperatura. El área sombreada en el diagrama limitada por AGFDE, es donde se encuentra la austenita. Como se muestra en el diagrama, el contenido de carbono puede variar de 0 a 2%. Dado que uno de los límites del área de la austenita es hierro gama, la austenita puede ser definida como una solución sólida de carbono o carburo de hierro en hierro gama. Bajo condiciones normales la austenita no puede existir a temperatura ambiente, en aceros comunes al carbono. Esta sólo puede existir a temperaturas elevadas, en la zona del diagrama limitada por la línea AGFED.

Los límites de solubilidad para el carbono, en la estructura b.c.c. del hierro son mostrados por la línea ABC del diagrama. Esta área del diagrama se conoce como alfa (α) y la fase es llamada ferrita. La máxima solubilidad del carbono en el hierro α es .025% y ocurre a 725°C, a temperatura ambiente solamente disuelve .008% de carbono.

1.4.3 Cementita. Viendo el diagrama, éste no se extiende más allá de 6.67% de carbono. Normalmente el carbono no se encuentra presente en aceros como carbono, sino como cementita, un compuesto de hierro y carbono el cual tiene la fórmula Fe_3C .

1.5 TRANSFORMACIÓN DE LA AUSTENITA.

La transformación de austenita a ferrita y cementita puede dar diferentes microestructuras dependiendo de la composición y la velocidad de enfriamiento.

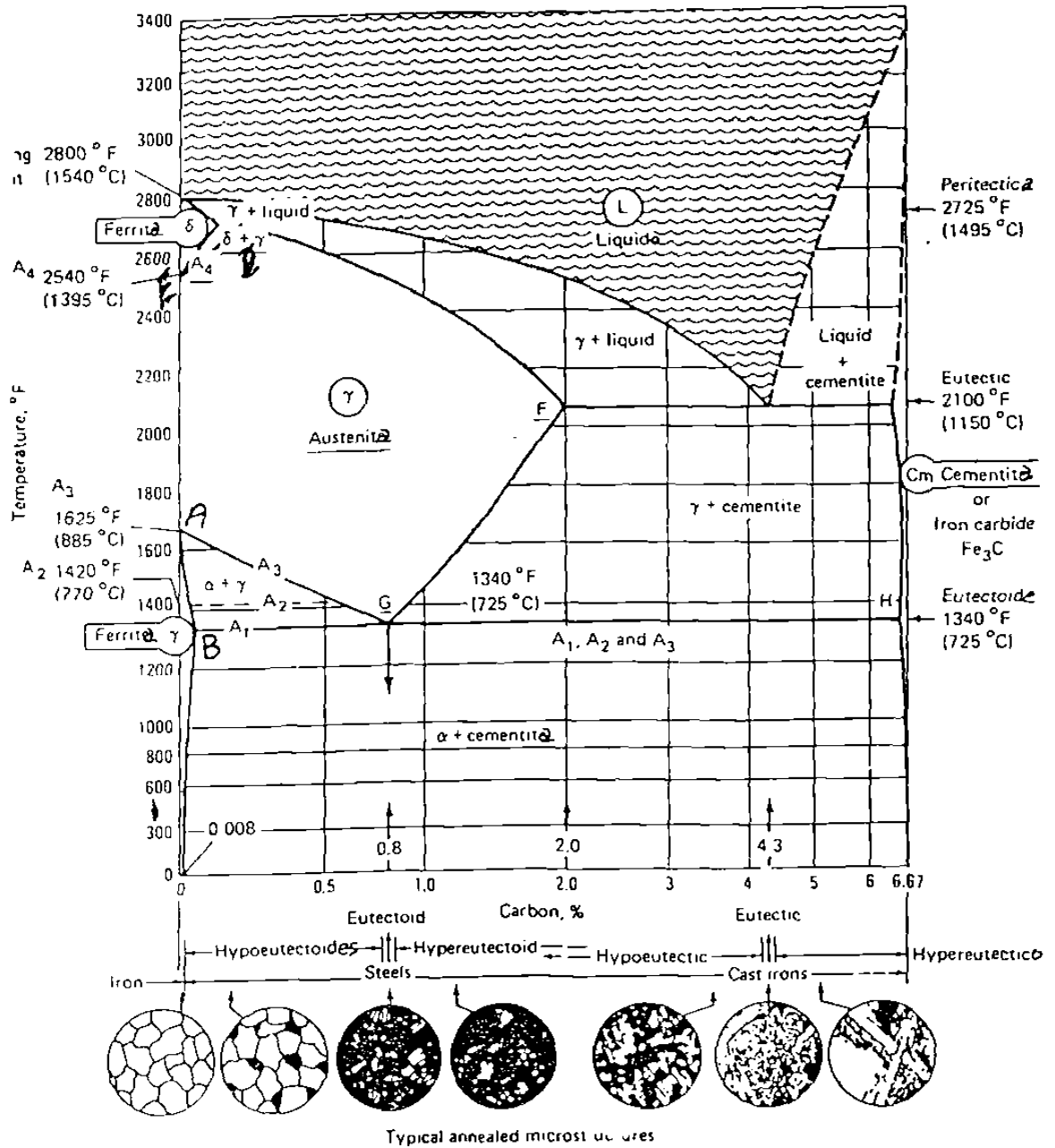


Fig. 3 Diagrama de fase hierro cementita

1.5.1 Acero eutectoide. Un acero al carbono conteniendo 0.77% de carbono es una solución sólida en el rango de la temperatura austenítica, entre 725°C a 1370°C. Todo el carbono está disuelto en la austenita. Cuando esta solución sólida se enfría lentamente, ocurren varios cambios a 725°C. Esta temperatura es de transformación o temperatura crítica del sistema hierro-cementita. A esta temperatura el acero se transforma de una solución sólida homogénea a dos nuevas fases distintas. Este cambio ocurre a temperatura constante y con generación de calor. Las nuevas fases son ferrita y cementita, formadas simultáneamente; sin embargo, esto ocurre a una sola composición punto "G" en la fig. 3. Estos dos nuevos constituyentes pueden desarrollarse separadamente de la austenita en otros aceros. La transformación en el punto "G" es conocida como reacción eutectoide y por esta razón el acero de 0.77% C es llamado acero eutectoide. La ferrita y cementita formada en la reacción eutectoide es llamada perlita. La fig. 4 muestra la microestructura de perlita y cementita. La perlita está compuesta de placas alternadas de ferrita y cementita. Se llama perlita porque muestra un color similar al de la madre perla. El acero de 0.77% C tiene 100% perlita, a temperatura ambiente y mediante enfriamiento lento.

1.5.2 Aceros hipoeutectoides. Los aceros que contengan menos de 0.77% C son conocidos como aceros hipoeutectoides. A temperatura ambiente las fases presentes son ferrita y perlita.

El contenido de ferrita en estos aceros, es inversamente proporcional al contenido de carbono del acero y el contenido de perlita es directamente proporcional.

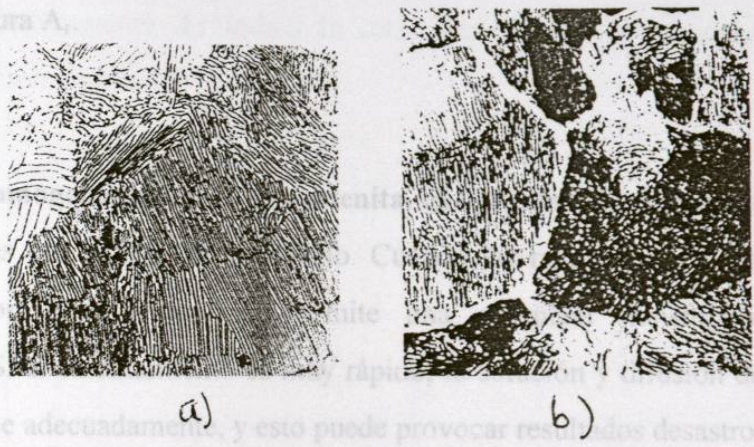
La línea BG del diagrama fig. 3 es llamada línea crítica inferior A_1 y la línea AG es llamada línea crítica superior A_3 .

1.5.3 Aceros hipereutectoides. Los aceros que contengan entre 0.77 y 2% de carbono son llamados aceros hipereutectoides.

La línea GF del diagrama fig. 3 es llamada línea crítica A_{cm} o línea de la solubilidad de la cementita y la línea GH es llamada línea crítica inferior A_{3-1} .

son conocidas como A_c , el subíndice r viene de la palabra en francés refroidissement, que significa enfriamiento.

La diferencia entre las temperaturas de transformación en el calentamiento o en el enfriamiento varía con la rapidez del calentamiento y del enfriamiento. Entre más rápido se caliente el acero más alta será la temperatura A_c . Y entre más rápido se enfrie menos será la temperatura A_c .



1.5.5 Histeresis. La diferencia entre las temperaturas de transformación en el calentamiento y el enfriamiento se llama histeresis. Cuando el acero se calienta y se enfría, la temperatura de transformación cambia. Esto se debe a la histeresis. La histeresis es la diferencia entre las temperaturas de transformación en el calentamiento y el enfriamiento. La histeresis puede ser causada por la presencia de impurezas en el acero o por la velocidad de calentamiento y enfriamiento. La histeresis puede ser corregida aumentando la temperatura de transformación o reduciendo la velocidad de calentamiento y enfriamiento. La histeresis puede ser evitada calentando el acero a una temperatura más alta y enfriándolo más lentamente.

Para corregir esta condición, la temperatura debe ser elevada y dar un tiempo suficiente para permitir que la difusión del carbono ocurra, y se distribuya uniformemente en la austenita.

**Fig.4 Microestructura de los aceros eutectoide e hipereutectoide
a) perlita b) perlita y cementita**

1.5.4 Histeresis. Las temperaturas críticas mostradas en el diagrama se obtienen a condiciones de enfriamiento y calentamiento muy lento. Sin embargo en la práctica comercial las razones de calentamiento exceden las condiciones obtenidas en laboratorio, por lo que los cambios ocurren a temperaturas de unos cuantos grados arriba de las indicadas en la fig. 3 y son conocidas como temperaturas A_c el subíndice c viene de la palabra en francés chauffage, que significa calentamiento.

Es importante determinar un conjunto de datos para estos aceros aleados. Un método para obtener las temperaturas de transformación es calentar una muestra del acero

Por otra parte en la practica comercial del enfriamiento, las transformaciones ocurren a unos cuantos grados por abajo de las temperaturas mostradas en la fig. 3 y estas son conocidas como A_r , el subíndice r viene de la palabra en francés refroidissement, que significa enfriamiento.

La diferencia entre las temperaturas de transformación en el calentamiento o en el enfriamiento varia con la rapidez del calentamiento y del enfriamiento. Entre mas rápido se caliente el acero más alta será la temperatura A_c . Y entre mas rápido se enfríe menor será la temperatura A_r .

1.5.5 Homogeneización de la austenita. El diagrama hierro-cementita solamente muestra las fases que existen en equilibrio. Cuando las razones de calentamiento y de enfriamiento son muy lentas, se permite una completa transformación de los constituyentes. Si el calentamiento es muy rápido, la solución y difusión del carbono no puede presentarse adecuadamente, y esto puede provocar resultados desastrosos.

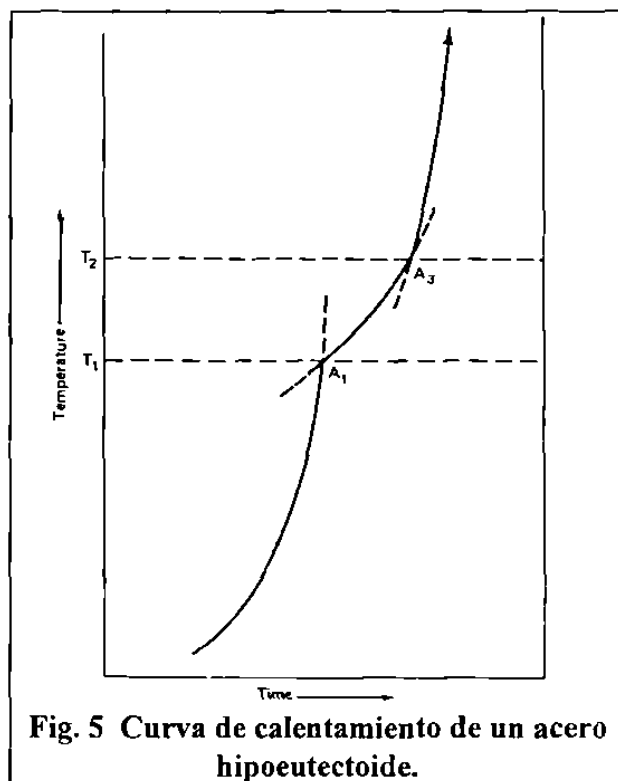
Para corregir esta condición, la temperatura debe ser elevada y dar un tiempo suficiente para permitir que la difusión del carbono ocurra, y se distribuya uniformemente en la austenita. Esto es llamado homogeneización.

1.5.6 Efectos de los elementos de aleación. El diagrama hierro-cementita muestra las relaciones de equilibrio entre carbono y hierro puro. Sin embargo al agregar elementos de aleación especial, cambian las temperaturas de transformación, y a menudo es necesario conocer éstas temperaturas.

Es impráctico determinar un diagrama de fases para éstos aceros aleados. Un método para obtener las temperaturas de transformación es calentar una muestra del acero

a una velocidad uniforme tomando datos de temperatura contra tiempo. Después se construye una gráfica similar a la mostrada en la fig. 5

1.5.7 Temperatura de transformación. Durante el primer paso del calentamiento, la temperatura de la probeta se incrementa a una razón uniforme. A temperatura T_1 la razón de calor absorbido se decreta hasta que la temperatura T_2 es alcanzada, después de este punto la razón se incrementa nuevamente. La temperatura T_1 es la temperatura crítica e indica el comienzo de la transformación de ferrita a austenita. Y la temperatura T_2 indica la total transformación a austenita. En el enfriamiento ocurren los efectos inversos.



1.5.8 Contenido de carbono. Las fases representadas en el diagrama hierro-cementita son fases metaestables. Las temperaturas en las cuales ocurren las

transformaciones son determinadas por condiciones de calentamiento y enfriamiento lento.

Condiciones de enfriamiento rápido, se alejan de las condiciones de equilibrio, y produce estructuras metaestables, y la relación mostrada en el diagrama de fase hierro cementita debe ser modificado.

No hay dificultad en comprender por que en el enfriamiento rápido de un acero hipoeutectoide se obtiene un exceso de perlita. La transformación de la austenita a ferrita y perlita es un proceso de difusión, el cual involucra el movimiento de átomos de carbono. La velocidad de difusión depende del tiempo y de la temperatura. Bajo condiciones de enfriamiento rápido, la temperatura crítica A_3 , se pasa muy rápido y se cuenta con un tiempo muy corto para que los átomos de carbono se difundan. Cuando la temperatura es menor a la temperatura crítica A_3 , habrá más austenita que se transforme en perlita, esto sucede hasta antes de alcanzar la temperatura crítica A_1 .

En muchas ocasiones es posible estimar, el contenido de carbono de un acero, mediante el examen de microestructura, es decir, determinando la cantidad de perlita presente en dicho acero. De lo anterior se deduce que es importante conocer la historia previa del acero para hacer una estimación correcta. Un acero que se enfría rápidamente tendrá más perlita que uno que se enfría más lentamente, por lo que el contenido de carbono en relación con el contenido de perlita no es correcto.

El diagrama de fase hierro - cementita es también útil para estimar el contenido de carbono del acero, mediante el examen de la microestructura. Esto se hace como sigue:

- La estimación se hace con las fracciones de las áreas de perlita, de ferrita y de cementita. La cantidad de carbono en la ferrita es despreciable.
- La perlita contiene 0.77% de carbono y la cementita 6.7% de carbono.

- Por lo tanto $0.77\% \cdot$ la fracción de área de perlita $+ 6.7\% \cdot$ fracción de área de cementita $=$ % de carbono.

Por ejemplo en la microestructura b) de la figura 4 hay 93% de perlita y 7% de cementita. El contenido de carbón calculado es: $0.77 \cdot 0.93 + 6.7 \cdot 0.07 = 1.19\% \text{ C}$ y realmente este acero contiene 1.25 % C.

Cálculos del contenido de carbono mediante el examen de la microestructura, se hacen ocasionalmente. Los métodos químicos son más rápidos y exactos, algunos de ellos lo hacen en tres minutos, por supuesto se requiere de una muestra representativa del acero.

1.5.9 Transformación isotérmica de la austenita. Cuando en un acero eutectoide, la transformación de la austenita se lleva a cabo, los átomos de carbono se difunden de tal manera que el producto es perlita. Esta sí es vista al microscopio tiene la apariencia de capas alternadas. Con velocidades de enfriamiento muy lento, la distancia entre las capas es mayor que en el caso de enfriamientos más rápidos. La razón del poco espaciamiento, se debe a una baja velocidad de difusión. Y hay poco tiempo para la difusión del carbono. La distancia de translación de los átomos de carbono es pequeña, por lo tanto, el espaciamiento de las capas de cementita es pequeño.

La formación de perlita a partir de la austenita es un proceso de nucleación y crecimiento. Como en todo proceso de nucleación, se requiere cierto tiempo para que los átomos tengan la energía suficiente y así efectuar el proceso de crecimiento. Al empezar a empujar una rueda en una superficie, se requiere de una energía extra, por algunos segundos, para ponerla en movimiento, pero una vez que empezó a moverse no es difícil mantenerla en esa condición. De manera similar sucede en la formación de la perlita, la energía extra viene siendo un sobreenfriamiento por abajo de la temperatura crítica A_1 .

Con el siguiente experimento se puede mostrar el fenómeno de la formación de la perlita en un acero eutectoide. Del diagrama de fases hierro - carburo de hierro se

observa que la transformación completa del acero eutectoide a austenita es a los 725°C , sin embargo para asegurar que todas las partes del metal estén arriba de A_{c1} , las probetas se calentaron hasta 760°C y rápidamente se ponen en un baño de sales fundidas a 675°C . Después de medio segundo se saca una probeta, a un segundo la segunda, a dos segundos la tercera y las otras a 4, 8, 16, 32, 63, 125, 250, 500 y 1000 segundos, y éstas son enfriadas inmediatamente en agua fría. Las probetas se examinan metalográficamente para determinar, el tiempo necesario para nuclear la perlita y el tiempo necesario para completar la formación de la perlita.

En la figura 6 se observa la microestructura de las muestras examinadas, que no revelan perlita en las primeras segundos, pero en los subsiguientes, se ve un aumento en la cantidad de perlita. En la última probeta toda la microestructura es perlita. Posteriormente en una segunda y tercera serie de probetas, son colocadas en baños de sales fundidas a temperaturas de 620°C y 565°C ; respectivamente y se aplica el mismo procedimiento. Estas probetas se examinan para determinar el inicio y el final de la transformación a perlita. De los datos obtenidos en la figura 6 se obtiene la gráfica de la fig. 7.

En la gráfica de la fig.7 se observa cuanto tiempo es necesario para iniciar y completar la formación de la perlita a cada temperatura.

La línea P_0 indica el tiempo que se necesita para que inicie la formación de la perlita y la línea P_1 indica cuando, toda la austenita a sido transformada a perlita.

La perlita formada a 565°C es perlita fina, es decir el espaciamiento entre las capas alternadas de ferrita y cementita es pequeño. Las probetas que se mantuvieron a temperaturas altas produce perlita mucho mas gruesa.

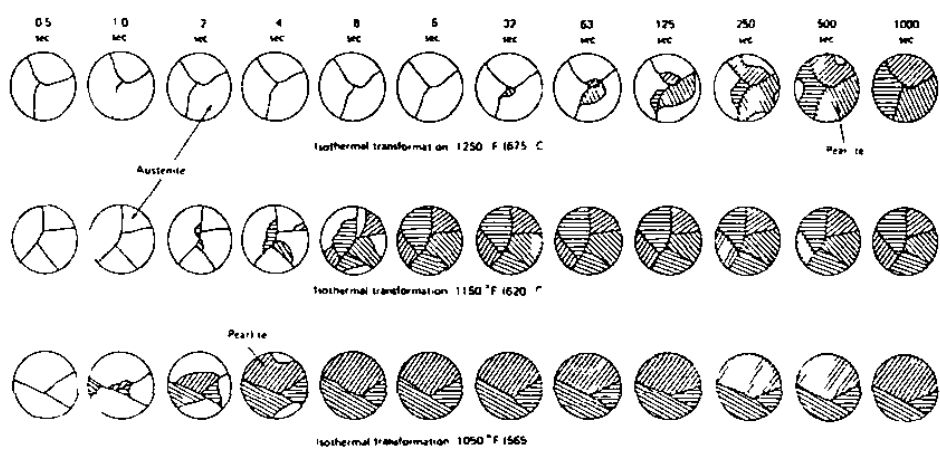


Fig. 6 Transformación isotérmica de un acero al carbono con 0.80% c.

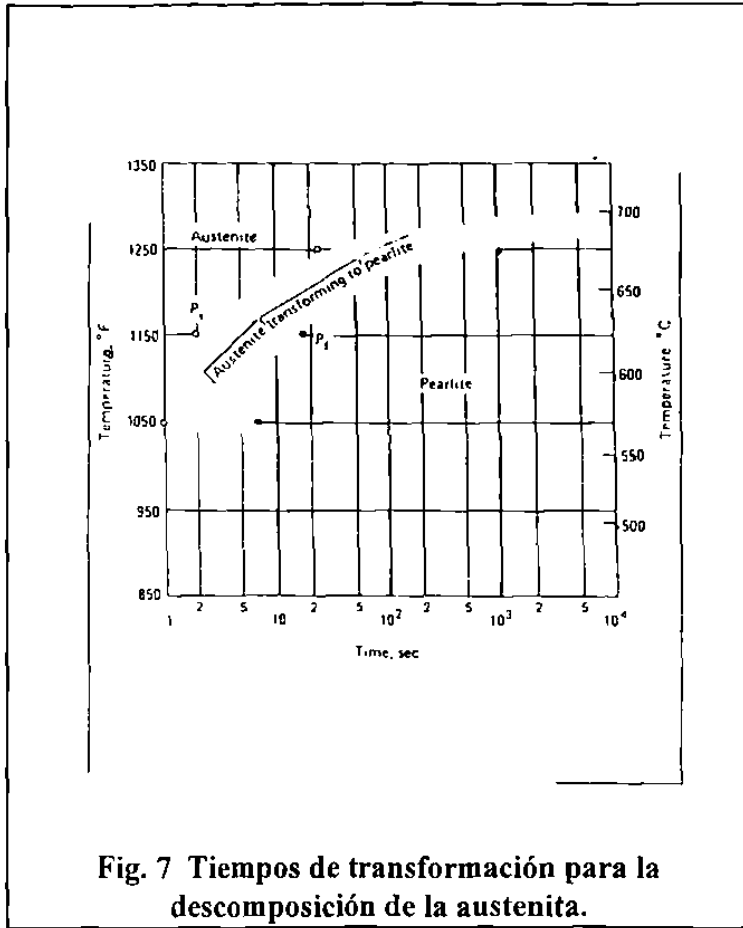


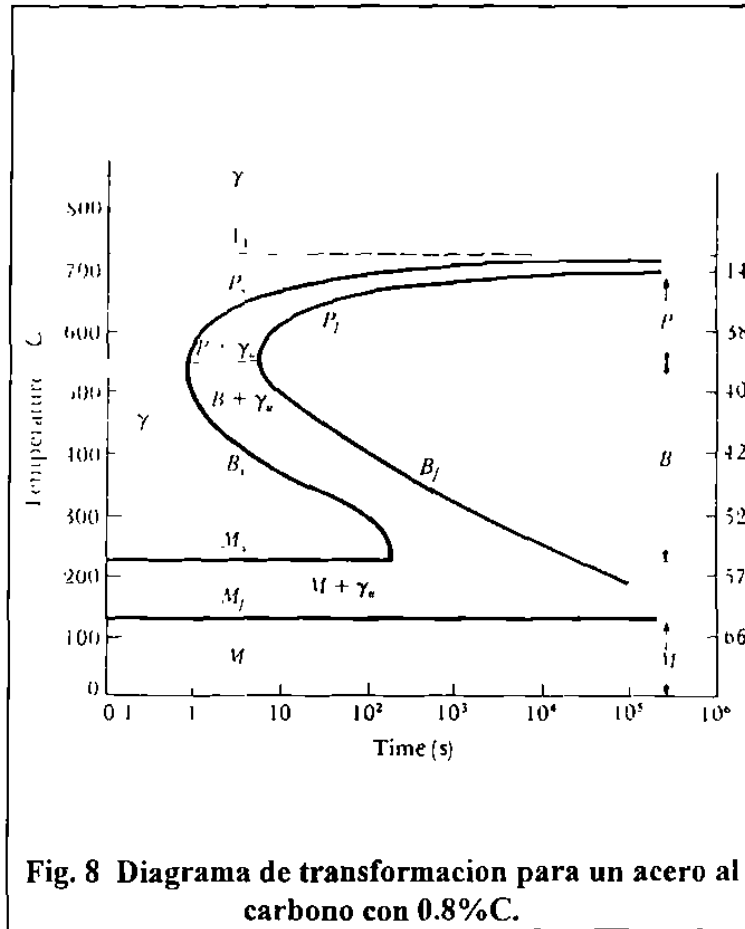
Fig. 7 Tiempos de transformación para la descomposición de la austenita.

En el diagrama de fases hierro - cementita se observa que a 725°C la probeta tiene una microestructura austenítica en condiciones de equilibrio. Cuando la pieza se enfría por abajo de 725°C , la austenita tiene una alta inercia para cambiar a perlita. Sin embargo la facilidad con la cual la austenita puede transformarse a perlita viene cada vez a menos conforme es mas baja la temperatura. Hay que recordar que al aumentar la temperatura se incrementa la velocidad de reacción, y al bajar la temperatura se reduce la velocidad de reacción. La mayor cantidad de austenita que sea enfriada por abajo de 725°C , los átomos de carbono se moverán con mas dificultad. Esto es, hay dos formas opositoras durante la transformación de la austenita. Una es el incremento de inercia de la austenita para transformarse en perlita (nucleacion). La otra es el decremento de la habilidad de la austenita para transformarse, a temperaturas por abajo de la temperatura critica, y decremento en la movilidad de los átomos de carbono, es decir, velocidad de crecimiento bajo.

En la figura 7 se observa que a la temperatura de 675°C . la austenita no tiene prisa en transformarse, por otra parte, la temperatura es lo suficientemente alta para permitir una fácil difusión a los átomos de carbono y después de un tiempo suficientemente grande la transformación será completa, formándose perlita gruesa. La difusión de los átomos de carbono es mas difícil a 565°C , la tendencia de la austenita para transformarse es suficientemente alta, pero como los átomos de carbono no se pueden mover fácilmente, por lo tanto la perlita formada es extremadamente fina.

1.5.10 Bainita. El proceso que permite a la austenita transformarse isotérmicamente puede ser llevado hasta temperaturas mas bajas de 565°C . A bajas temperaturas sin embargo la inercia de la austenita para transformarse y la poca movilidad de los átomos de carbono, hace que no se transforme a perlita, en lugar de esta transformación se obtiene otro producto que se llama Bainita. Dependiendo de la temperatura de formación, ésta microestructura varia desde una mezcla fina de ferrita y cementita hasta agujas no visibles de ferrita y cementita.

En la fig 8, el lado izquierdo de la curva abajo de la rodilla, indica el inicio de la formación de la bainita y el lado derecho indica el final de transformación. La temperatura a la cual se forma ésta microestructura es entre 525 y 275°C, para el acero eutectoide.



1.5.11 Martensita. Enfriamiento a temperaturas por abajo de 275°C, se obtiene otro producto de transformación que se le llama martensita. La estructura de la martensita es muy similar a la de la bainita formada a bajas temperaturas. Esto es, tiene apariencia de agujas.

En la figura 9 se observan las microestructuras de la bainita y de la martensita. La martensita es llamada martensita acicular, lo que significa aspecto de agujas.

Las propiedades de dureza, tenacidad, ductilidad y resistencia a la tensión, son dependientes del porcentaje de carbono y de los productos de transformación que contiene el acero. Es posible obtener un amplio rango de dureza en el acero, mediante el control de la cantidad de ferrita, perlita, bainita, cementita y martensita obtenida. Cada fase contribuye a la dureza del acero. Esta contribución depende al a cantidad de fase presente. La dureza depende del porcentaje de carbono y del tratamiento térmico.

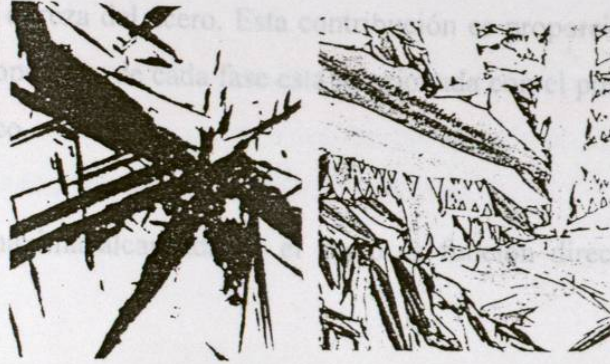


Fig. 9 Microestructura acicular de la bainita inferior y de la martensita.

Las curvas de transformación a martensita no pueden dibujarse (M_s y M_f), porque la formación de la martensita no depende de un intervalo de tiempo a una temperatura dada, pero si comienza a formarse cuando se alcanza una temperatura definida. La transformación continua hasta la línea M_f . Si el enfriamiento es interrumpido la transformación de la martensita también se interrumpe.

la curva mostrada en la fig 8 es llamada diagrama de transformación isotérmica, diagrama tiempo-temperatura-transformación, o simplemente curva TTT.

1.5.12 Propiedades de los productos de la transformación. Como se ha visto en las transformaciones del acero, la austenita se transforma a perlita gruesa, perlita fina o bainita, pero si el acero es hipoeutectoide, este puede contener ferrita con perlita, bainita o martensita. En los aceros hipereutectoides, éstos contienen cementita con perlita, bainita o martensita.

Las propiedades de dureza, tenacidad, ductilidad y resistencia a la tensión, son dependientes del porcentaje de carbono y de los productos de transformación que contiene el acero. Es posible obtener un amplio rango de dureza en el acero, mediante el control de la cantidad de ferrita, perlita, bainita, cementita y martensita obtenida. Cada fase contribuye a la dureza del acero. Esta contribución es proporcional a la cantidad de fase presente. La proporción de cada fase esta relacionada con el porcentaje de carbono y el tratamiento térmico.

La dureza máxima alcanzada en el acero es función directa del porcentaje de carbono.

CAPITULO 2

TRATAMIENTOS TÉRMICOS MAS USADOS

los tratamientos térmicos mas usados son: el recocido. Temple, normalizado, cementado, nitrurado, temple en baño de sales, temple en baño de plomo, etc. En la figura 10 se representan gráficamente los más importantes.

2.1 RECOCIDO

Con éste nombre se conocen varios tratamientos cuyo objetivo principal es ablandar el acero; otras veces también se desea además regenerar su estructura o eliminar tensiones internas. Consiste en calentar a temperaturas adecuadas, seguidos generalmente de enfriamientos lentos. Los diferentes tipos de recocido que se emplean en la industria se pueden clasificar en tres grupos: recocidos con austenización completa, recocidos subcríticos y recocidos con austenización incompleta.

2.1.1 Recocido de autenizacion completa o de regeneración: En este caso el calentamiento se hace a una temperatura ligeramente mas elevada que la critica superior y luego el material se enfría muy lentamente. Sirve para ablandar el acero y regenerar su estructura.

2.1.2 Recocido subcritico: El calentamiento se hace por debajo de la temperatura critica 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.

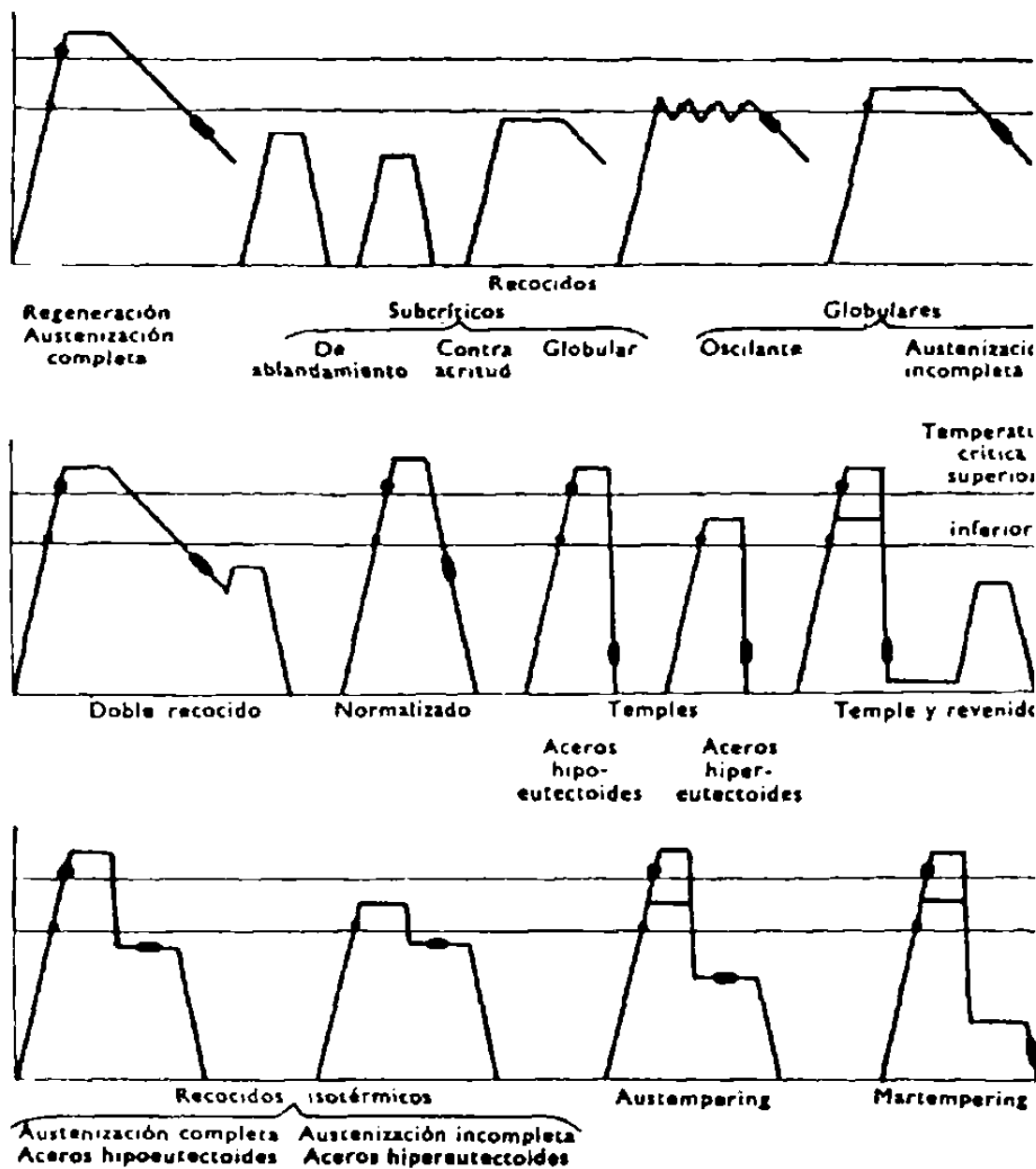


Fig. 10 Esquema de los tratamientos térmicos más empleados. Los puntos y zonas negras señalan las temperaturas de transformación del acero.

2.1.2.1 Recocido de ablandamiento: Su principal objetivo 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 fácilmente las piezas. El proceso consiste en calentar el acero hasta una temperatura, que siendo inferior a la crítica A_{c1} , 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 éste tratamiento, suelen ser algunas veces demasiado elevadas para el mecanizado.

2.1.2.2 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 de 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 poliedricos mas dúctiles que los primitivos, que permiten estirar o laminar nuevamente el material sin dificultad. El enfriamiento se suele hacer al aire.

2.1.2.3 Recocido subcritico globular: En ocasiones para obtener en los aceros al carbono y de baja aleación una estructura globular de baja dureza, en cierto modo parecida a la que se obtiene en el recocido globular de austenización incompleta, se le somete a los aceros a un calentamiento a temperaturas inferiores pero muy próximas a la crítica A_{c1} , debiendo luego enfriarse el acero lentamente en el horno.

2.1.3 Recocidos de austenización incompleta (globulares): Son tratamientos que se suelen dar a los aceros al carbono o aleados , de mas de 0.50% de carbono , para ablandarlos y mejorar su maquinabilidad. Consisten en calentamientos prolongados a temperaturas intermedias entre la crítica superior y la 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

hipereutectoides, que la cementita y los carburos de aleación adopten una disposición mas o menos globular que da para cada composición una dureza muy inferior a cualquier otra microestructura, incluso la perlita laminar.

Algunas 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 la mayoría) se emplean temperaturas ligeramente superiores a Ac_1 . Al primero de estos tratamientos se le suele llamar recocido globular oscilante y el segundo se le llama recocido globular de austenización incompleta.

2.2 NORMALIZADO

Este tratamiento consiste en un calentamiento a temperatura ligeramente mas 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 corregir 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.

2.3 TEMPLE

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

2.4 REVENIDO

Es un tratamiento que se da a las piezas de acero que han sido previamente templadas. Con este tratamiento, que consiste en un calentamiento a temperatura inferior a la crítica A_{c1} , se disminuye la dureza y resistencia de los aceros templados, se eliminan las tensiones creadas en el temple y se mejora su tenacidad, quedando el acero con la dureza o resistencia deseada.

2.5 TRATAMIENTOS ISOTÉRMICOS DE LOS ACEROS

Reciben este nombre ciertos tratamientos, en los que el enfriamiento de las piezas no se hacen 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 estudios realizados sobre la curva "S" de los aceros, se han desarrollado éstos tratamientos, que se usan en la actualidad para el temple de los troqueles, herramientas, engranajes, muelles, etc. Se obtiene de esta forma una gran tenacidad, pequeñas deformaciones y se elimina el riesgo de grietas y roturas. También se emplea con gran éxito un tratamiento de ésta clase, que recibe el nombre de recocido isotérmico, para el ablandamiento de los aceros.

2.5.1 Austempering o transformación isotérmica de la austenita en la zona de 250 a 600°C: Este tratamiento consiste en calentar el acero a una temperatura ligeramente mas elevada que la crítica superior y luego enfriarlo rápidamente en plomo o sales fundidas, a temperaturas comprendidas entre 250 y 600°C, permaneciendo el acero en el baño a ésta temperatura durante el tiempo suficiente para que se verifique la transformación completa de la austenita en otros constituyentes a temperatura constante.

Un tratamiento de esta clase, denominado "patenting", se aplica desde hace mucho tiempo para la fabricación de alambres de alta resistencia, que se conocen generalmente con el nombre de "cuerda de piano". En este caso el enfriamiento se suele hacer en baño de plomo, quedando el acero con una tenacidad y ductilidad excepcionales.

2.5.2 Martempering: Es un tratamiento que ha comenzado a desarrollarse también recientemente. Es un temple escalonado en el que el material caliente, a una temperatura ligeramente mas elevada que la critica superior, se enfría en un baño de sales, también caliente, a temperaturas comprendidas entre 200 y 400°C, permaneciendo las piezas en el baño, durante un tiempo que debe controlarse cuidadosamente y que debe ser suficiente para que iguale la temperatura en toda la masa, antes de que en ninguna parte de ella se inicie la transformación de la austenita, y luego se enfría al aire. De esta forma se consigue que la transformación de toda la masa del acero se verifique casi al mismo tiempo, evitándose desiguales y peligrosas dilataciones que ocurren en los temples ordinarios, en los que las transformaciones de las distintas zonas del material ocurren en momentos diferentes.

2.5.3 Recocidos isotérmicos: Son tratamientos de ablandamiento que consisten en calentar el acero por encima de la temperatura critica superior o inferior según los casos (generalmente de 740 a 880°C) y luego enfriar hasta una temperatura de 600 a 700°C, mantienedose constante durante varias horas, para conseguir la completa transformación isotérmica de la austenita, y finalmente se enfría al aire. Este enfriamiento es rápido y se obtienen durezas muy bajas. El calentamiento se suele hacer con austenización completa en los aceros hipoeutectoides y austenización incompleta en los aceros hipereutectoides. En cierto modo éstos tratamientos pueden considerarse como casos particulares de los recocidos de austenización completa e incompleta.

2.6 TEMPLE SUPERFICIAL

Se ha desarrollado éste procedimiento en el que se endurece únicamente la capa superficial de las piezas. El calentamiento se puede hacer por llama o por corrientes inducidas de alta frecuencia, pudiéndose regular en ambos casos perfectamente la profundidad del calentamiento y con ello la penetración de la dureza. Una vez conseguida la temperatura de temple, se enfría generalmente en agua.

2.7 TRATAMIENTOS EN LOS QUE HAY CAMBIO DE COMPOSICIÓN

En esta clase de tratamientos, además de considerar el tiempo y la temperatura como factores fundamentales, hay que tener también en cuenta el medio o atmósfera que envuelve el metal durante el calentamiento y enfriamiento. Estos tratamientos se suelen utilizar para obtener piezas que deben tener gran dureza superficial para resistir el desgaste y buena tenacidad en el núcleo. Los tratamientos pertenecientes a este grupo son: Cementación. Cianuración, Sulfinización y Nitruración.

2.7.1 Cementación: Por medio de este tratamiento se modifica la composición de las piezas, aumentando el contenido en carbono de la superficie, obteniéndose después, por medio de temple y revenido, una gran dureza superficial.

2.7.2 Cianuración: Es un tratamiento parecido a la cementación, en el que el acero absorbe carbono y nitrógeno en la zona superficial, quedando luego esa zona periférica muy dura después de un temple final.

2.7.3 Sulfinización: Es un tratamiento que se da a los aceros a 565°C aproximadamente en baño de sales de composición especial y que se mejora extraordinariamente la resistencia al desgaste. Esa mejora se consigue por la

incorporación de azufre a la superficie de las piezas de acero sin que con ello se aumente mucho la dureza.

2.7.4 Nitruración: Es un tratamiento de endurecimiento superficial a baja temperatura, en el que las piezas de acero templadas y revenidas, al ser calentadas a 500°C en contacto con una corriente de amoníaco, que se introduce en la caja de nitrurar, absorben nitrógeno, formándose en la capa superficial nitruros de gran dureza, quedando las piezas muy duras sin necesidad de ningún otro tratamiento posterior.

2.8 FINALIDADES DEL TRATAMIENTO TÉRMICO

El tratamiento térmico del acero es generalmente aplicado para lograr alguno de los siguientes objetivos:

- Eliminar esfuerzos inducidos por el trabajo en frío o por enfriamiento no uniforme de metales calientes.
- Refinar el tamaño de grano de aceros trabajados en caliente, los cuales pudieron haber incrementado el tamaño de grano.
- Obtener una estructura de grano apropiado
- Disminuir la dureza e incrementar la ductilidad
- Incrementar la dureza y la resistencia al desgaste
- Incrementar la tenacidad, esto es producir un acero que tenga ambos alta resistencia a la tensión y buena ductilidad, es decir alta resistencia al impacto.
- Mejorar la maquinabilidad
- Mejorar las propiedades de corte en aceros de herramientas
- Mejorar las propiedades eléctricas
- Modificar las propiedades magnéticas

CAPITULO 3

EQUIPO UTILIZADO EN LOS TRATAMIENTOS TERMICOS

3.1 HORNOS PARA TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Los hornos para tratamientos térmicos varían en tamaño, diseño, modo de calentamiento, etc. Por lo tanto no es posible tener una clasificación precisa. Hay hornos en los cuales se usa un combustible y la carga esta expuesta a los gases de la combustión, mientras que en otros la carga se calienta indirectamente, éste es la cámara de combustión está separada de la carga. Hay hornos que se calientan por resistencias eléctricas.

La asociación de equipo para calentamiento industrial, clasifica los equipos en : estufas y hornos. Esta separación se hace en base de la temperatura de operación; si la temperatura de operación llega a 600°C es una estufa, pero si la temperatura de operación es mayor de 600°C, se llama horno. Esta separación basada en la temperatura de operación es relacionada con el modo de calentamiento. Hay básicamente tres modos de transmisión de calor, que son: conducción, convección y radiación. En el tratamiento térmico industrial, éstos modos de calentamiento pueden ser usados en forma individual o combinada.

Conducción.- La conducción de calor en un sólido, tal como lo es una pieza o herramienta, es debido a la influencia de un gradiente de temperatura y sin apreciable desplazamiento de las partículas. Si la temperatura de la superficie de una pieza es elevada, el calor fluye al centro de la misma por un mecanismo molecular. La conducción de calor involucra la transferencia de energía cinética de una molécula a otra en una reacción en cadena. El calor fluye continuamente hasta que se logra el equilibrio térmico.

El tiempo depende de la conductividad térmica del metal en cuestión, pero en general la velocidad de conducción de calor en los metales es relativamente rápida.

En la mayoría de los procesos de tratamientos térmicos la conducción de calor juega un papel mínimo en la transferencia de calor desde la fuente a la pieza de trabajo, pero es el modo único de transferencia de calor de la superficie al centro de la pieza. Una excepción a la regla es : sales fundidas, metales fundidos y cama fluidizada, en estos el medio de calentamiento está en contacto directo con la superficie de la pieza.

Convección.- Involucra el calentamiento a través de un líquido o un gas. El movimiento del fluido puede ser debido a la diferencia de densidad ocasionada por la diferencia de temperatura; a la cual se le llama convección natural o también puede producirse por medios mecánicos y se le llama convección forzada, en éste método se utilizan abanicos o propelas.

En el revenido del acero es común la aplicación del calentamiento por convección. La estufa que se utiliza en el revenido del acero opera eficientemente a los 480°C; por arriba de esta temperatura decrece la eficiencia de la transferencia de calor por convección.

Radiación.- Un cuerpo emite energía radiante en todas direcciones por medio de ondas electromagnéticas, el rango de longitud de onda varia de 4 a 7 micrómetros. Cuando ésta energía toca otro cuerpo, algo de la energía es absorbida e incrementa el nivel de actividad molecular, produciendo calor. Algo de la energía es reflejada, la cantidad de la energía absorbida depende de la emisividad de la superficie de la pieza reflectora; si dos piezas de metal, una caliente y otra fría, colocadas en una cámara aislada; la caliente se enfría y la fría se calienta. El intercambio de energía se lleva a efecto hasta que ambas piezas lleguen al equilibrio o sea, hasta que alcancen la misma temperatura. La transferencia de calor por radiación está relacionada directamente con la emisividad. La cual es igual a la razón de perdida de calor por unidad de área de la superficie a una temperatura dada a la razón de perdida de calor por unidad de área de un

cuerpo negro a la misma temperatura. El significado práctico es que cuando la carga es colocada en el horno y expuesta a un calor radiante, su razón de calentamiento depende de su superficie; una pieza altamente reflejante (acero inoxidable pulido), absorbe menor cantidad de calor que una pieza oxidada.

Tipos de hornos:

- Hornos no - continuos
- Hornos continuos
- Hornos de sales fundidas
- Hornos de metales fundidos
- Hornos de cama fluidizada
- Hornos de atmósfera controlada
- Hornos al vacío

3.1.1 Hornos no - continuos: Estos hornos se utilizan por carga, es decir se cargan las piezas y se procede a efectuar el ciclo de tratamiento térmico. Los hay de tipo campana, de piso, de fosa, retorta o mufla. Y pueden ser calentados por combustible o eléctricamente. Ver figura 11.

3.1.2 Hornos continuos: En este tipo de hornos la carga entra por un extremo y sale por el otro. Se usa para cargas continuas de alta producción de piezas similares.

Hay hornos de: banda, empuje, rotatorio, rodillos, etc.. Ver figura 12.

3.1.3 Hornos de sales fundidas: Estos hornos tienen las siguientes ventajas:

- Hay sales fundidas que se oxidan a 500°C.
- Las piezas no se oxidan en sales fundidas.
- Una pequeña capa de sales fundidas protege a las piezas de la oxidación y evita el enfriamiento.
- Una amplia variedad de sales fundidas permite cambiar la composición química de las sales.

La principal ventaja de los hornos de sales fundidas es la posibilidad de calentar piezas en sales fundidas por la mayoría de los metales. Las sales fundidas son un medio de calentamiento que permite la producción de piezas de alta calidad, pero que es más caro que el calentamiento en piezas de diseño completo.

Tipos de baños de sales fundidas: La forma más simple de baños de sales fundidas, es un crisol el cual se calienta eléctricamente o mediante la combustión de un combustible. Las sales deben de ser de baja temperatura de fusión, por lo general de 175 a 345°C. Al incrementarse la temperatura de fusión de las sales, es necesario equipo más sofisticado. En la figura 13 se muestran hornos de sales, calentados internamente o externamente.

Si el crisol que contiene las sales fundidas se calienta internamente, el crisol que contiene las sales fundidas se calienta internamente. Si el crisol que contiene las sales fundidas se calienta externamente, el crisol que contiene las sales fundidas se calienta externamente.

La temperatura de fusión de las sales fundidas (líquido) se puede incrementar incrementando la temperatura de fusión de las sales fundidas.

Los hornos de sales fundidas se calientan por radiación, pero los de tipo continuo se calientan por convección. La eficiencia de los hornos de sales fundidas es mucho mayor que en los hornos convencionales.

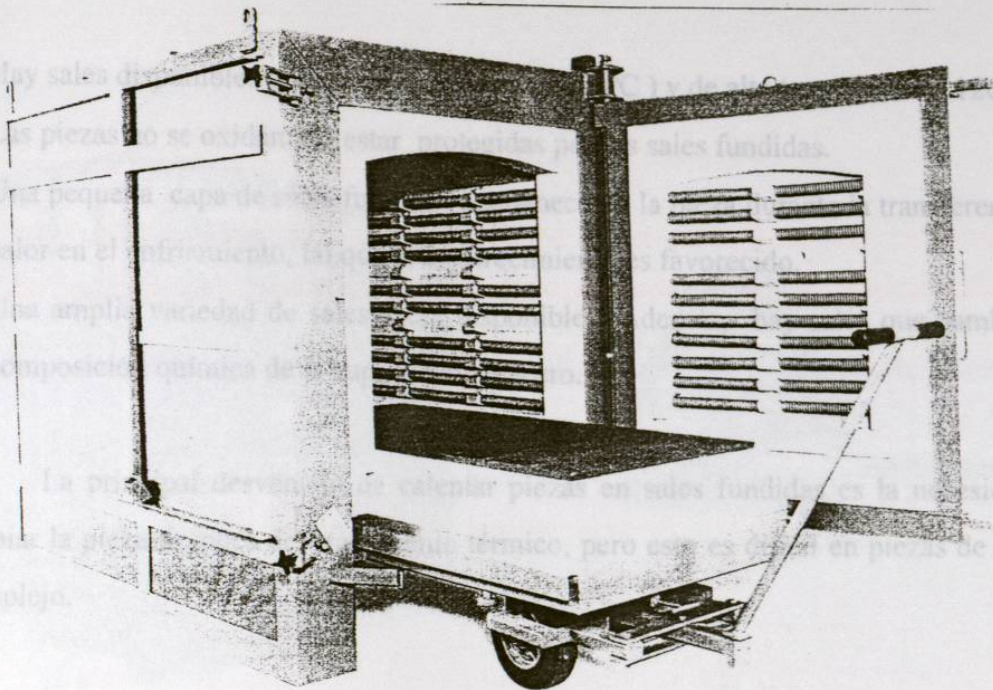


Fig. 11 Horno tipo no-continuo

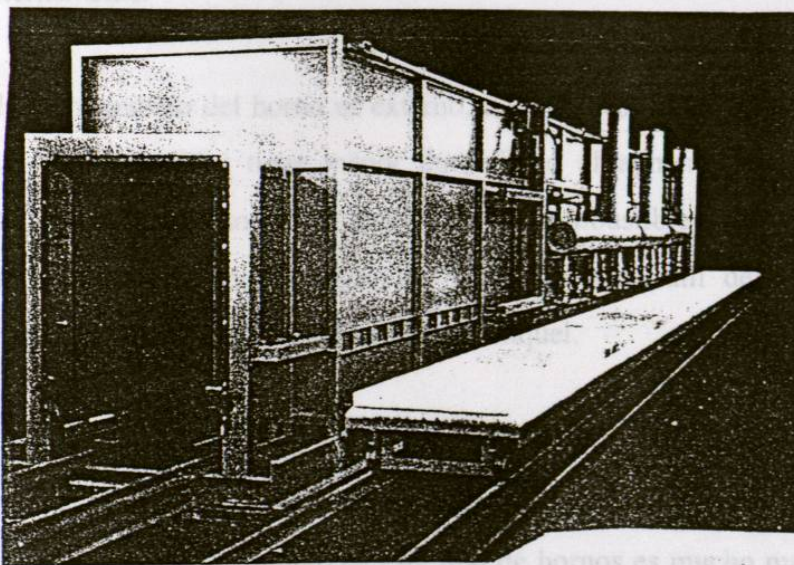


Fig. 12 Horno tipo continuo

3.1.3 Hornos de sales fundidas: Estos hornos tienen las siguientes ventajas:

- Hay sales disponibles para baja temperatura (175°C) y de alta temperatura (1260°C)
- Las piezas no se oxidan por estar protegidas por las sales fundidas.
- Una pequeña capa de sales fundidas permanece en la pieza durante la transferencia de calor en el enfriamiento, tal que el endurecimiento es favorecido.
- Una amplia variedad de sales están disponibles. Además, hay sales que cambian la composición química de la superficie del acero.

La principal desventaja de calentar piezas en sales fundidas es la necesidad de limpiar la pieza después del tratamiento térmico, pero esto es difícil en piezas de diseño complejo.

Tipos de baños de sales fundidas: La forma mas simple de baños de sales fundidas, es un crisol el cual puede ser calentado por medios eléctricos o mediante la combustión de un combustible. Las sales deben de ser de baja temperatura de fusión, por lo general de 175 a 345°C. Al incrementarse la temperatura de fusión de las sales, es necesario equipo mas sofisticado. En la figura 13 se muestran hornos de sales, calentados interna o externamente.

Si el calentamiento del horno es externo, tiene la desventaja de que el crisol que contiene las sales fundidas tiene menor durabilidad al aumentar la temperatura de operación. Si el calentamiento es por medio de un combustible (gas o liquido), su temperatura de operación no es mayor de 900°C. La vida útil del crisol se puede incrementar si se utiliza un acero aleado al cromo -níquel.

Los hornos de baños de sales fundidas calientan por conducción y radiación, pero los de tipo de electrodos (inmersos y sumergidos), también calientan por convección. por tanto, la razón de calentamiento en este tipo de hornos es mucho mayor que en los hornos convencionales.

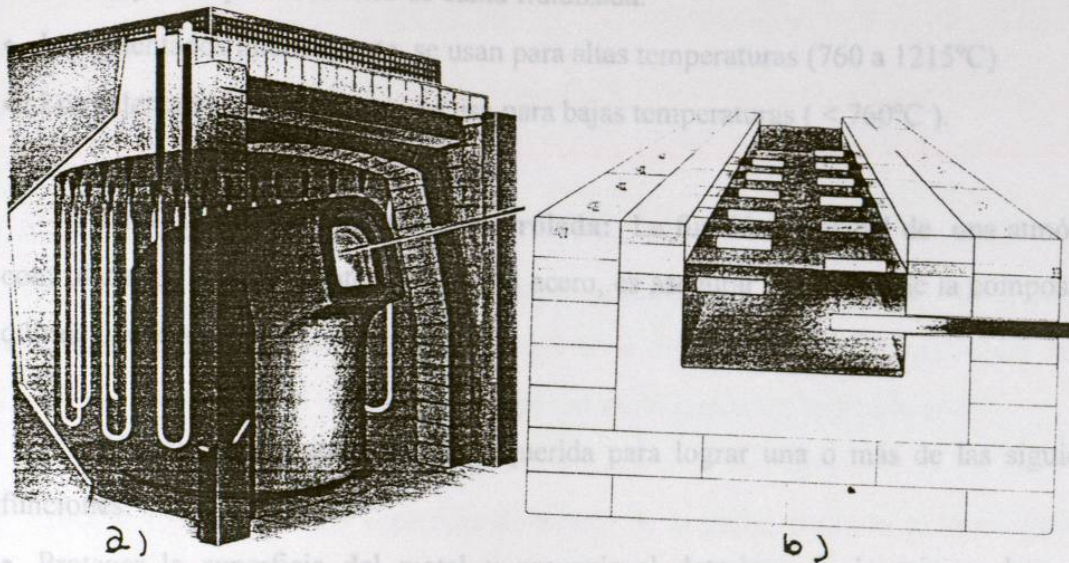


Fig. 13 Hornos de sales a) calentado externamente
b) calentado internamente

3.114 Hornos de metales fundidos: Este tipo de hornos ya son obsoletos por las siguientes razones:

- El plomo fundido es pesado por lo tanto las piezas de acero flotan.
- El plomo se adhiere al acero, el cual dificulta la acción de enfriamiento y causa problemas de limpieza.

3.1.5 Hornos de cama fluidizada: En estos hornos el calentamiento del metal se lleva a efecto por medio de partículas móviles inertes, generalmente óxido de aluminio; estas partículas son suspendidas por los gases de la combustión de la mezcla aire - combustible que fluyen a través de la cama. Las piezas son inmersas en la cama

fluidizada, y ésta actuara como si fuera un líquido. Las piezas se calientan diez veces más rápido por éste método comparándolo con un horno de calentamiento convencional.

Hay dos tipos de hornos de cama fluidizada:

- Los calentados internamente, se usan para altas temperaturas (760 a 1215°C)
- Los calentados externamente, se usa para bajas temperaturas (< 760°C).

3.1.6 Horno de atmósfera controlada: La función principal de una atmósfera controlada, en el tratamiento térmico del acero, es asegurar el control de la composición química de la superficie.

Básicamente la atmósfera es requerida para lograr una o más de las siguientes funciones:

- Proteger la superficie del metal y prevenir el deterioro de la misma durante el tratamiento térmico. Es decir obtener un “ endurecimiento limpio “, por su puesto la atmósfera no solo elimina la formación de óxido, sino que también previene la perdida de carbono de la superficie de la pieza, debido a la reacción entre las fases metal - gas.
- Para limpiar la superficie del metal o prevenir manchado por oxidación, debido a superficies contaminadas.
- Para activar reacciones con la superficie del metal y así mejorar propiedades químicas o físicas. Los procesos de carburizado, carbonitrurado y nitrurado son ejemplos donde el carbono y/o nitrógeno son tomados por el acero y lograr incrementar la dureza del acero.

Tipos de atmósfera: Fundamentalmente, hay seis clases de gases usados en atmósferas controladas para el tratamiento térmico del acero. En todos los casos, estos gases son generados fuera del horno, posteriormente son introducidos a la cámara. Para lograr la protección se requiere condiciones muy cuidadosas de control. Pocas de estas atmósferas solamente son utilizadas para el tratamiento térmico de aceros para herramientas. Los tipos de atmósferas utilizadas son :

- Gas exotérmico
- Gas endotérmico
- Nitrógeno
- Amonia disociada
- Hidrógeno, helio y argón
- Atmósfera de vapor

3.1.7 Hornos al vacío: En éste tipo de hornos, el calentamiento es al vacío y representa un nuevo desarrollo en el campo de la metalurgia, pero en particular en los tratamientos térmicos. El tratamiento térmico al vacío puede ser utilizado en :

- Prevenir reacciones en la superficie de trabajo de la pieza, como lo es la oxidación o decarburación.
- Quitar contaminantes superficiales, como lo son películas de óxidos.
- Agregar sustancias en la superficie de trabajo, como es el carburizado, el nitrurado, etc.
- Eliminar sustancias contaminantes de los metales, mediante , el efecto desgasificante del vacío; para eliminar el oxígeno, hidrógeno, etc.

Los tratamientos térmicos en hornos al vacío son: templado, revenido, recocido y alivio de esfuerzos .

En los hornos al vacío, fig 14, conseguir un vacío completo es virtualmente imposible.

Una atmósfera estándar al nivel del mar es de 760 mm. de mercurio. los grados de vacío usados en la mayoría de los tratamientos térmicos es 1/760 de una atmósfera. Bajo éstas condiciones, la cantidad de aire original remanente en la cámara de trabajo es aproximadamente 0.1%.

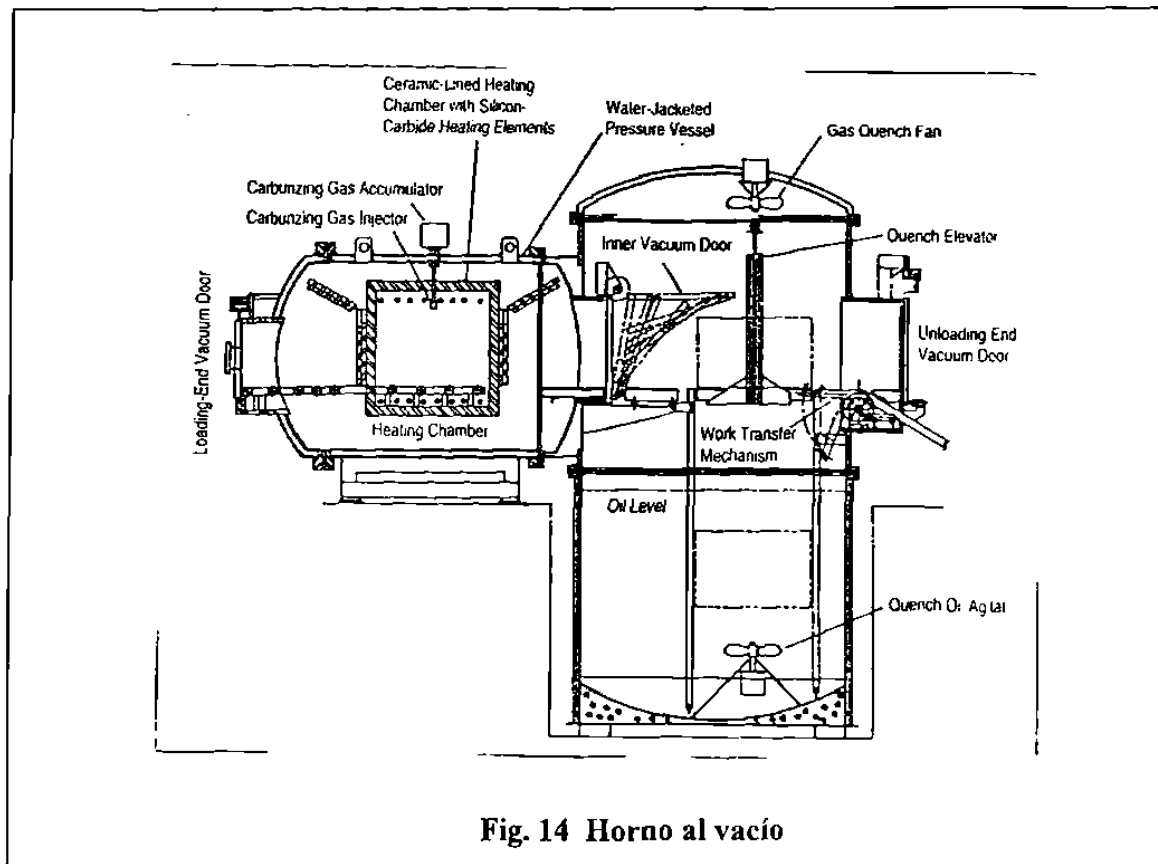


Fig. 14 Horno al vacío

3.2 MEDIOS DE ENFRIAMIENTO

Muchos medios de enfriamiento pueden ser usados para obtener resultados específicos según el tratamiento térmico. Muchos de ellos están incluidos en la siguiente lista:

- Agua
- Salmuera
- Soluciones cáusticas
- Soluciones polémicas
- Aceites
- Sales fundidas

- Metales fundidos
- Aire
- Gases
- Horno

La capacidad de enfriamiento del agua no agitada es tomada arbitrariamente como “1” ; ver tabla 1 la velocidad de enfriamiento de otros medios es comparada con este valor.

Tabla 1: Efecto de la agitación sobre la efectividad del enfriamiento.

CAPACIDAD DE ENFRIAMIENTO			
Circulación o agitación	Aceite	Agua	Salmuera
Sin	.25-.30	.90-1.0	2.0
Poca	.30-.35	1.0-1.1	2.0-2.2
Media	.35-.40	1.2-1.3	-----
Alta	.40-.50	1.4-1.5	-----
Muy alta	.50-.80	1.6-2.0	-----
Violenta	.80-1.1	4	5

Las soluciones de salmuera y sosa cáustica (usualmente son del 5 al 10 % en agua). Estos son los medios de enfriamiento más severos, y si son agitados violentamente tienen una capacidad de enfriamiento de 5, por éste motivo son preferidos en lugar del agua. Su desventaja es la corrosividad sobre el equipo.

3.3 DUROMETROS

Introducción: A pesar de que parece fácil comprender lo que se entiende por dureza y de ser esta una de las magnitudes que con mas frecuencia se miden, es también una de las propiedades de la materia sobre las que existen mayor confusión, habiendo a veces cierta dificultad para definirla con claridad y exactitud.

No se puede medir la dureza utilizando una unidad absoluta: las cifras que se manejan son siempre empíricas y se refieren únicamente a un medio particular de medida. En la actualidad existen muchos métodos para medir la dureza, que pueden clasificarse, según el procedimiento que se emplee, en tres grupos:

1. - Los que miden la dureza mineralógica, o la dureza que oponen los cuerpos a ser rayados.
2. - Los que miden la dureza elástica o al rebote.
3. - Los que miden la resistencia que oponen los cuerpos a la penetración. Esta clase de dureza es la que mas frecuentemente se mide y puede ser determinada estática o dinámicamente, es decir, se puede ejercer la presión progresivamente o por medio de un golpe.

El ensayo de penetración consiste en aplicar y comprimir progresivamente sobre una pieza un penetrador de forma determinada, bajo la acción de una carga estática conocida. Y la dureza de la pieza depende de la resistencia que ofrece la pieza a ser deformada. una huella pequeña es indicativa de un material duro, una huella grande de un material suave.

Los ensayos más comunes para medir la resistencia a la penetración son:

1. - Ensayo Rockwell

2. - Ensayo Brinell
3. - Ensayo Vickers
4. - Ensayo Knoop

En todos los ensayos de penetración, dos son los factores a considerar:

1. - Penetrador
2. - Carga

3.3.1 Ensayo Rockwell: Este tipo de ensayo es el más usado en el mundo, ya que resulta muy práctico, por utilizar un aparato de lectura directa. Este método determina la dureza en función a la profundidad de penetración. En general, la magnitud de la penetración disminuye al aumentar la dureza del material.

La prueba Rockwell se hace aplicando dos cargas a una pieza y midiendo la profundidad de la penetración lograda en la pieza entre la primera carga, o carga menor y la segunda carga o carga mayor.

Tipos de máquinas Rockwell:

1. - Rockwell normal
2. - Rockwell superficial
3. - Rockwell carga ligera
4. - Rockwell micro
5. - Rockwell macro

Con ésta variedad de máquinas se trata de cubrir todas las necesidades en pruebas de dureza. Aún cuando la Rockwell normal y superficial, fig 15, son las únicas estandarizadas.

Este ensayo utiliza dos tipos de indentadores o penetradores ver fig. 16:

1. - Indentador esfero cónico de diamante con ángulo entre caras de 120° y .2 mm de radio en la punta.
2. - Indentador de bola de acero endurecido o de carburo de tungsteno con diámetros de 1/16", 1/8", 1/4" y 1/2".

Las cargas utilizadas son:

Carga menor:

- 1.- 3 kg. Para Rockwell superficial
- 2.- 10 kg. Para Rockwell normal

Carga mayor:

- 1.- 12, 27 o 42 kg. Para Rockwell superficial
- 2.- 50, 90 o 140 kg. Para Rockwell normal

Por lo tanto la carga total aplicada en el ensayo es igual a la carga menor más la carga mayor.

Carga total:

- 1.- 15, 30 o 45 kg. Para Rockwell superficial
- 2.- 60, 100 o 150 kg. Para Rockwell normal

Los cinco penetradores y las tres cargas nos dan quince combinaciones, de las cuales cada una de ellas, nos representa una escala Rockwell. En las tablas 2 y 3 se dan las escalas de Rockwell normal y Rockwell superficial y en la tabla 7 se da una información general sobre los ensayos de dureza Rockwell.

Debido a las muchas escalas Rockwell, el numero de dureza debe especificarse mediante el símbolo HR seguido de la letra que designa la escala y precedido de los

números de dureza; por ejemplo, 82 HRB significa una dureza Rockwell de 82 medida en la escala B (bola de 1/16" y 100 kg. de carga).

Tabla 2 Escalas de dureza Rockwell normal

ESCALA	CARGA MAYOR Kg.	PENETRADOR	APLICACIONES MATERIALES
A	60	Cono de diamante	Materiales muy duros. Carburos de tungsteno, etc.
B	100	Bola 1/16 plg.	Materiales de dureza media, Aceros de medio y bajo carbono, Latón, Bronce, etc
C	150	Cono de diamante	Aceros templados y revenidos, Aleaciones endurecidas
D	100	Cono de diamante	Aceros cementados
E	100	Bola de 1/8 plg.	Hierro vaciado, Aleaciones de aluminio y magnesio
F	60	Bola 1/16 plg.	Bronce y Cobre recocido
G	150	Bola 1/16 plg.	Bronce al berilio y Bronce fosforado
H	60	Bola de 1/8 plg.	Placa de aluminio
K	150	Bola de 1/8 plg.	Hierro vaciado y Aleaciones de aluminio
L	60	Bola de 1/4 plg.	Plásticos y Metales suave como el plomo
M	100	Bola de 1/4 plg.	Igual que la escala L
P	150	Bola de 1/4 plg.	Igual que la escala L
R	60	Bola de 1/2 plg.	Igual que la escala L
S	100	Bola de 1/2 plg.	Igual que la escala L
V	150	Bola de 1/2 plg.	Igual que la escala L

La carátula del durometro tiene tres escalas:

1. - Una con números negros que se utiliza en todas las pruebas de Rockwell normal que utilicen penetrador de diamante. Cada división equivale a una penetración de .002 mm.
2. - Una con números rojos que se utiliza en todas las pruebas de Rockwell normal que utilicen penetrador de bola.. Cada división equivale a una penetración de .002 mm.

2. - Una con números rojos que se utiliza en todas las pruebas de Rockwell normal que utilicen penetrador de bola.. Cada división equivale a una penetración de .002 mm.
3. - Una con números verdes que se utiliza en todas las pruebas de Rockwell superficial. Cada división equivale a una penetración de 0.001 mm.

Tabla 3 Escalas de dureza Rockwell superficial

Escala	Penetrador	Carga, kg
15N	Cono de diamante	15
30N	Cono de diamante	30
45N	Cono de diamante	45
15T	Bola de 1/16 plg.	15
30T	Bola de 1/16 plg.	30
45T	Bola de 1/16 plg.	45
15W	Bola de 1/8 plg.	15
30W	Bola de 1/8 plg.	30
45W	Bola de 1/8 plg.	45
15X	Bola de 1/4 plg.	15
30X	Bola de 1/4 plg.	30
45X	Bola de 1/4 plg.	45
15Y	Bola de 1/2 plg.	15
30Y	Bola de 1/2 plg.	30
45Y	Bola de 1/2 plg.	45

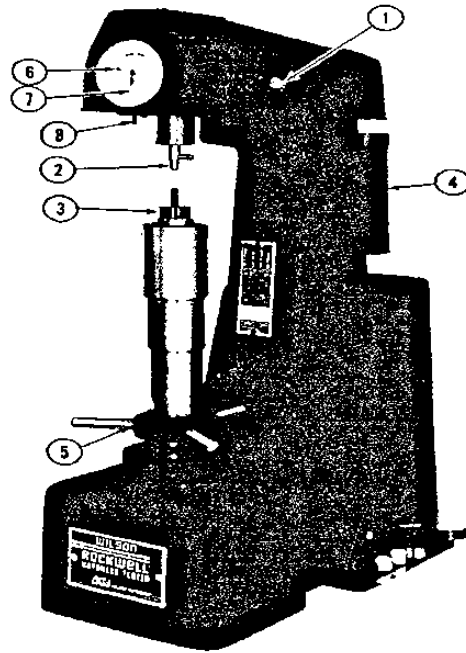


Fig. 15 Durometro Rockwell

partes: 1.- Aplicador de carga 2.- Penetrador
 3.- Yunque 4.- Pesas 5.- Volante 6.- Carátula
 7.- Indicador 8.- Ajuste a cero

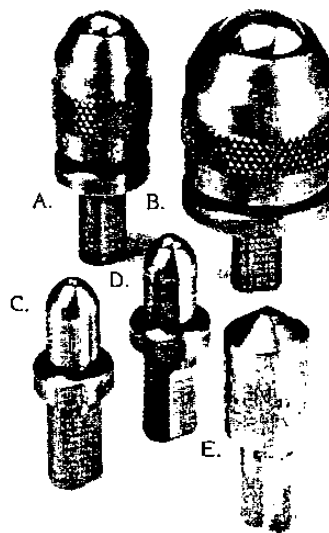


Fig 16 Penetradores Rockwell

a) bola 1/4", b) bola 1/2", c) bola 1/16"
 d) bola 1/8", e) diamante.

3.3.2 Ensayo Brinell: este ensayo determina la dureza en función al área de impresión. Este ensayo consiste en aplicar y comprimir progresivamente sobre una superficie plana y lisa del material a ensayar, una bola de material muy duro, manteniendo la presión durante un cierto tiempo para que se produzca una impresión o huella en forma de casquete esférico. Después se mide el diámetro de la huella con un pequeño microscopio de mano y se halla la dureza Brinell dividiendo la carga que ha actuado sobre la bola por la superficie de la huella. Esta superficie se calcula en función del diámetro de la huella producida.

La dureza Brinell se calcula por la siguiente formula:

$$HB = \frac{2L}{(\pi D) \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$$

donde:

L = carga de prueba en kg.

D = diámetro de la bola en mm

d = diámetro de la huella en mm

Por lo general no se necesita hacer el cálculo, ya que hay tablas para convertir el diámetro de la huella en el número de dureza Brinell, ver tabla 8.

Los diámetros utilizados en la bola son de 10, 5, 2.5, 1.25 y .625 mm. (tabla 5). Pero la más usual es la de 10 mm, para que sea mas fácil la lectura del diámetro de la huella. En la actualidad existen lectores ópticos que facilitan la medición de la huella.

Las cargas utilizadas para bola de 10 mm son:

3000 Kg. Para metales ferrosos y un tiempo de aplicación de carga de 10 seg.

Y 500 Kg. Para metales no ferrosos y 30 seg. de aplicación.

Para que la prueba se pueda considerar válida es necesario que se cumpla la condición de $.25 D < d < .5 D$. También para que los resultados sean precisos y comparables la relación L/D^2 se ha normalizado para diferentes metales, ver tabla 4.

Tabla 4 Relación L/D^2 para diferentes metales

Metal	L/D^2
Acero	30
Aleaciones de cobre	10
Aleaciones de aluminio y cobre puro	5
Aleaciones de plomo y estaño	1

Tabla 5 Cargas y bolas que pueden utilizarse en los ensayos Brinell

Diámetro de la bola en mm	Relación L/D^2			
	30	10	5	2.5
	Carga L			
10	3000	1000	500	250
5	750	250	125	62.5
2.5	187.5	62.5	31.2	15.6
1.25	46.9	15.6	7.81	3.91
.625	11.7	3.91	1.953	.977

El número de dureza Brinell seguido por el símbolo HB indica condiciones de prueba estándar (bola de 10 mm, carga de 3000 kg. Y 10 seg. de aplicación).

Para otras condiciones, el número de dureza y el símbolo HB se complementan por números que indican las condiciones de prueba en el siguiente orden: diámetro de la bola, carga y duración de la carga; ejemplo, 75 HB 10/500/30 indica una dureza Brinell de 75 medida con una bola de 10 mm de diámetro y una carga de 500 kg. Aplicada por 30 seg.

El número de dureza Brinell cuando se usa bola de acero endurecido está limitado a 500 HB aproximadamente. Conforme el material a prueba sea mas duro, hay tendencia a que la bola se deforme y las lecturas no sean exactas. Para poder probar durezas hasta 650 HB aproximadamente es recomendable usar una bola de carburo de tungsteno.

3.3.3 Ensayo Vickers. Este ensayo determina la dureza en función al área de impresión. En esta prueba el instrumento utiliza un indentador piramidal de diamante de base cuadrada, con ángulo entre caras opuestas de 136° . El rango de carga está generalmente entre 1 y 120 kg.

El ángulo de 136° fue elegido para que las cifras Vickers coincidan con las Brinell. Esto ocurre hasta 250 unidades, pero a partir de ésta cifra la dureza Vickers es siempre algo superior a la Brinell. La diferencia al principio es pequeña, pero es bastante grande para durezas elevadas. Esto es debido a la deformación de la bola.

Como resultado de la forma del penetrador, la impresión sobre la superficie de la pieza será un cuadrado. De ésta huella se determina el valor promedio de sus diagonales, por medio de un microscopio que tenga una retícula graduada. Por lo general, hay tablas para convertir la diagonal promedio al número de dureza Vickers o por medio de la fórmula:

$$HV = \frac{1.854 L}{d^2}$$

donde:

L = carga aplicada en kg.

d = longitud promedio de las diagonales en mm

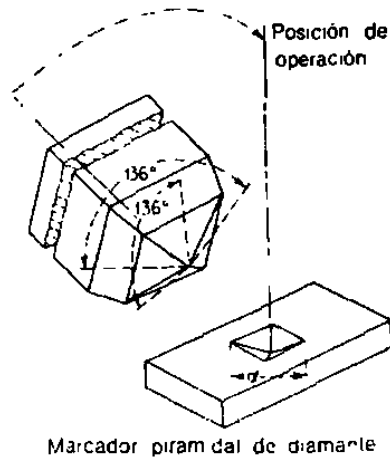


Fig. 17 Indentador Vickers

3.3.4 Ensayo de microdureza. Este tipo de ensayo se utiliza para determinar la dureza de constituyentes de estructuras, utilizando cargas entre 1 y 1000 gr.

Hay 2 tipos de penetradores empleados en la prueba de microdureza: la pirámide de diamante Vickers de base cuadrada de 136° , descrita anteriormente y el indentador Knoop de diamante alargado.

3.3.4.1 Ensayo Knoop: Este ensayo utiliza un indentador de forma piramidal que produce una impresión en forma de diamante, y tiene diagonales largas y cortas a una razón aproximada de 7:1. La forma piramidal empleada tiene incluidos ángulos longitudinales de $172^\circ 30'$ y ángulos transversales de 130° .

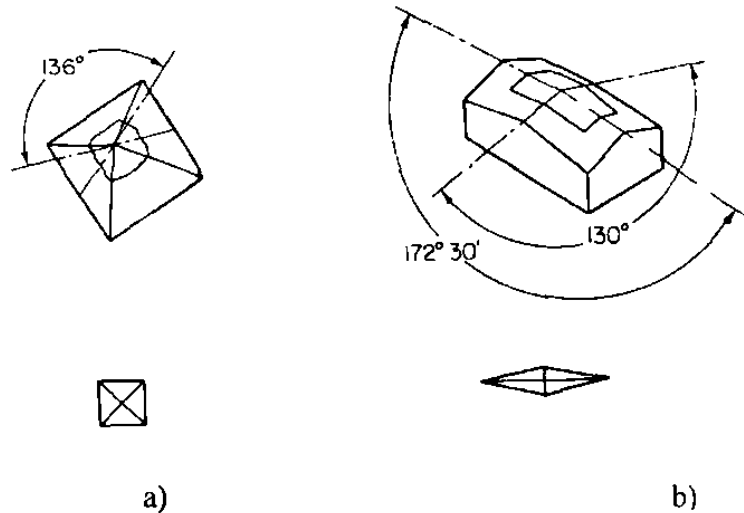
El número de dureza Knoop es el resultado de dividir la carga entre el área de impresión. Por lo general se utilizan tablas para convertir la diagonal mayor a dureza Knoop (HK), o mediante la fórmula siguiente:

$$HK = \frac{14.229 L}{d^2}$$

donde

L = carga aplicada en kg.

d = longitud de la diagonal mayor en mm



**Fig 18 a) penetrador e impresión de diamante Vickers
b) penetrador e impresión de diamante Knoop.**

3.3.5 Factores que afectan la exactitud de una prueba de dureza:

1. - Estado del indentador: el achatamiento de la bola de acero producirá errores en los números de dureza, en cuyo caso la bola debe ser revisada frecuentemente para detectar cualquier deformación permanente y debe descartarse cuando ocurra tal deformación. Los penetradores de diamante deben revisarse en busca de cualquier señal de astillamiento.

2. - Exactitud de la carga aplicada: el probador debe aplicar cargas dentro del intervalo establecido con errores mínimos. Las cargas mayores a la cantidad recomendada no deben ser utilizadas.
3. - Carga aplicada con impacto: además de producir lecturas de dureza incorrectas, el impacto puede dañar los penetradores de diamante. El uso de amortiguadores mecánicos o hidráulicos aseguran la aplicación gradual de la carga.
4. - Condición de la superficie de la muestra: la superficie de la muestra sobre la cual se va a tomar la lectura de dureza debe ser plana y representativa del material en buen estado. Cualquier orificio, grasa, pintura, óxido, etc. Debe ser esmerilado o pulido.
5. - Espesor de la muestra: la muestra debe ser lo suficientemente gruesa de modo que no aparezca alguna protuberancia sobre la superficie opuesta a la de impresión. El espesor de la muestra recomendado es de por lo menos 10 veces la profundidad de la impresión.
6. - Localización de las impresiones: las impresiones deben estar al menos 2.5 diámetros de distancia del borde de la muestra y separadas al menos 5 diámetros cuando se utilicen bolas para la prueba de dureza.
7. - Uniformidad del material: si hay variaciones estructurales y químicas en el material, a mayor área de impresión más exacta será la lectura de la dureza promedio. Para una dureza promedio verdadera para el material, es necesario tomar muchas lecturas si el área de impresión es pequeña.
8. - Forma de la muestra: se logra mayor exactitud cuando la superficie a probar es plana y perpendicular al eje vertical del indentador. Una muestra larga debe sujetarse adecuadamente de tal forma que no se ladee. Una pieza en forma cilíndrica debe probarse en un yunque en V para evitar que la pieza gire y dañe el penetrador. Si se hace una prueba Rockwell a una pieza cilíndrica menor de una pulgada de diámetro, la lectura observada debe ser ajustada por un factor de corrección, ver tabla 6.

Tabla 6 Factores de corrección de dureza Rockwell para piezas cilíndricas

Escala C, D, A	Diámetro de piezas (plg.)						
	1/4	3/8	1/2	5/8	3/4	7/8	1
80	.5	.5	.5	0	0	0	0
70	1.0	1.0	.5	.5	.5	0	0
60	1.5	1.0	1.0	.5	.5	.5	.5
50	2.5	2.0	1.5	1.0	1.0	.5	.5
40	3.5	2.5	2.0	1.5	1.0	1.0	1.0
30	5.0	3.5	2.5	2.0	1.5	1.5	1.0
20	6.0	4.5	3.5	2.5	2.0	1.5	1.5

Escala B, F, G	Diámetro de piezas (plg.)						
	1/4	3/8	1/2	5/8	3/4	7/8	1
100	3.5	2.5	1.5	1.5	1.0	1.0	.5
90	4.0	3.0	2.0	1.5	1.5	1.5	1.0
80	5.0	3.5	2.5	2.0	1.5	1.5	1.5
70	6.0	4.0	3.0	2.5	2.0	2.0	1.5
60	7.0	5.0	3.5	3.0	2.5	2.0	2.0
50	8.0	5.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0
40	9.0	6.0	4.5	4.0	3.0	2.5	2.5

Tabla 7 Información general sobre ensayos de dureza

Ensayo	Método	Fuerza	Indentador	Norma ASTM	Método de medición
Rockwell	Normal	60, 100, 150 kg	Diamante Y bola	E 18	Penetración
Rockwell	Superficial	15, 30, 45 kg	Diamante Y bola	E 18	Penetración
Rockwell	Carga Ligera	3, 5, 7 kg	Diamante Pequeño	N/s	Penetración
Rockwell	Macro	500 a 3000 kg	Bola 5, 10 mm	E 103	Penetración
Micro Dureza	Vickers	5 a 2000 gr.	Diamante 136°	E 384	Área
Micro Dureza	Knoop	5 a 2000 gr.	Diamante 130°*172°30'	E 384	Área
Micro Dureza	Rockwell Micro	500a 1000 gr.	Diamante Pequeño	N/S	Penetración
Micro Dureza	Dinámico	.01 a 200 gr.	Diamante Triangular	N/S	Penetración
Brinell	Óptico	500 a 3000 kg	Bola 5, 10 mm	E 10	Área
Brinell	Penetración	500 a 3000 kg	Bola 5, 10 mm	E 103	Penetración
Shore	Normal	822 (a) 4550 (d) gr.	Diamante 350(a), 300(d)	D 2240	Penetración
Shore	Micro	257 (a) 1135 (d) gr.	Diamante 350(a), 300(d)	N/S	Penetración
Irhd	Normal	597 gr.	Bola 2.5 mm	D 1415	Penetración
Irhd	Micro	15.7 gr.	Bola . .395 mm	D 1415	Penetración

Tabla 8 Equivalencias aproximadas entre la resistencia y la dureza.

Brinell 3000 kgs.			Vickers.	Rockwell				Shore	M O H S	R.T. Ksi.
Huella d(mm)	Bola std.	Bola WC		HRC 150 kg	HRD 100 kg	HRA 60 kg	Sup. 30N			
2.35	-	682	737	61.7	72.0	82.2	79.0	84	-	-
2.40	-	653	697	60.0	70.7	81.2	77.5	81	-	-
2.45	-	627	667	58.7	69.7	80.5	76.3	79	8.0	323
2.50	-	601	640	57.3	68.7	79.8	75.1	77	-	309
2.55	-	578	615	56.0	67.7	79.1	73.9	75	-	297
2.60	-	555	591	54.7	66.7	78.4	72.7	73	7.5	285
2.65	-	534	569	53.5	65.8	77.8	71.6	71	-	274
2.70	-	514	547	52.1	64.7	76.9	70.3	70	-	263
2.75	495	-	539	51.6	64.3	76.7	69.9	-	-	259
	-	495	528	51.0	63.8	76.3	69.4	68	-	253
2.80	477	-	516	50.3	63.2	75.9	68.7	-	-	247
	-	477	508	49.6	62.7	75.6	68.2	66	-	243
2.85	461	-	495	48.8	61.9	75.1	67.4	-	-	237
	-	461	491	48.5	61.7	74.9	67.2	65	-	235
2.90	444	-	474	47.2	61.0	74.3	66.0	-	7.0	226
	-	444	472	47.1	60.8	74.2	65.8	63	-	225
2.95	429	429	455	45.7	59.7	73.4	64.6	61	-	217
3.00	415	415	440	44.5	58.8	72.8	63.5	59	-	210
3.05	401	401	425	43.1	57.8	72.0	62.3	58	-	202
3.10	388	388	410	41.8	56.8	71.4	61.1	56	-	195
3.15	375	375	396	40.4	55.7	70.6	59.9	54	6.5	188
3.20	363	363	383	39.1	54.6	70.0	58.7	52	-	182
3.25	352	352	372	37.9	53.8	69.3	57.6	51	-	176
3.30	341	341	360	36.6	52.8	68.7	56.4	50	-	170
3.35	331	331	350	35.5	51.9	68.1	55.4	48	-	166
3.40	321	321	339	34.3	51.0	67.5	54.3	47	-	160
3.45	311	311	328	33.1	50.0	66.9	53.3	46	-	155
3.50	302	302	319	32.1	49.3	66.3	52.2	45	6.0	150
3.55	293	293	309	30.9	48.3	65.7	51.2	43	-	145
3.60	285	285	301	29.9	47.6	65.3	50.3	42	-	141
3.65	277	277	292	28.8	46.7	64.6	49.3	41	-	137
3.70	269	269	284	27.6	45.9	64.1	48.3	40	-	133
3.75	262	262	276	26.6	45.0	63.6	47.3	39	-	129
3.80	255	255	269	25.4	44.2	63.0	46.2	38	-	126
3.85	248	248	261	24.2	43.2	62.5	45.1	37	5.5	122
3.90	241	241	253	22.8	42.0	61.8	43.9	36	-	118
3.95	235	235	247	21.7	41.4	61.4	42.9	35	-	115
4.00	229	229	241	20.5	40.5	60.8	41.9	34	-	111

Tabla 8 (continuación) equivalencias aproximadas entre la resistencia y la dureza.

Brinell3000kg		Rockwell						S H O R E	M O H S	R.T. Ksi:
Huella d(mm)	Bola std.	Diamante		Balin		Superficial				
		HRD 100kg.	HRA 60kg.	HRB 100Kg	HRE 100kg.	30N	30T			
4.05	223	40	60	97	-	41	80.5	33	-	108
4.10	217	39	60	96	-	40	80.0	32	-	105
4.15	212	38	59	95	-	39	79.0	31	-	102
4.20	207	37	59	94	-	38	78.5	31	-	100
4.25	202	37	58	93	110	37	78.0	30	-	98
4.30	197	36	58	92	110	36	77.5	29	-	96
4.35	192	35	57	91	109	35	77.0	28	5.0	94
4.40	187	34	57	90	109	34	76.0	28	-	92
4.45	183	34	56	89	109	33	75.5	27	-	90
4.50	179	33	56	88	108	32	75.0	27	-	88
4.55	174	33	55	87	108	31	74.5	26	-	86
4.60	170	32	55	86	107	30	74.0	26	-	84
4.65	166	32	54	85	107	30	73.5	25	-	82
4.70	163	31	53	84	106	29	73.0	25	-	81
4.75	159	31	53	83	106	28	72.8	24	-	79
4.80	156	30	52	82	105	27	71.5	24	-	77
4.85	153	-	-	81	105	-	71.0	23	-	76
4.90	149	-	-	80	104	-	70.0	23	4.5	75
4.95	146	-	-	79	104	-	69.5	22	-	74
5.00	143	-	-	78	103	-	69.0	22	-	72
5.05	140	-	-	76	103	-	68.0	21	-	71
5.10	137	-	-	75	102	-	67.0	21	-	70
5.15	134	-	-	74	102	-	66.0	21	-	68
5.20	131	-	-	73	101	-	65.0	20	-	66
5.25	128	-	-	71	100	-	64.0	-	-	65
5.30	126	-	-	70	100	-	63.5	-	-	64
5.35	124	-	-	69	99	-	62.5	-	-	63
5.40	121	-	-	68	98	-	62.0	-	-	62
5.45	118	-	-	67	97	-	61.0	-	-	61
5.50	116	-	-	65	96	-	60.0	-	-	60
5.55	114	-	-	64	95	-	59.0	-	-	59
5.60	112	-	-	63	95	-	58.0	-	-	58
5.65	109	-	-	62	94	-	58.0	-	-	56
5.70	107	-	-	60	93	-	57.0	-	-	55
5.75	105	-	-	58	92	-	55.0	-	-	54
5.80	103	-	-	57	91	-	54.0	-	-	53

CAPITULO 4

CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS

4.1 MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN

4.1.1.- Según el porcentaje de carbono.

- a).- Aceros de bajo carbono: hasta 0.30% de carbono
- b).- Aceros de medio carbono: de 0.30 a 0.60% de carbono
- c).- Aceros de alto carbono: arriba de 0.60 y hasta 2% de carbono

4.1.2.- Según su uso. Generalmente se refiere al uso final que se le dará al acero

- a).- acero para maquinas
- b).- acero para herramientas
- c).- acero estructural
- d).- acero para resortes
- e).- acero inoxidable

4.1.3.- Según su composición química. Este método de clasificación es el más ampliamente utilizado. Las especificaciones para los aceros representan los resultados del esfuerzo conjunto de la AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE (AISI) y de la SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS (SAE).

4.2 IDENTIFICACIÓN ACEROS DE MAQUINARIA

La AISI y la SAE establecieron un sistema numérico de cuatro o cinco dígitos como sistema de identificación.

Para los aceros tipo maquinaria, el primero de los dígitos indica el tipo a que pertenece el acero, de este modo, 1 indica un acero al carbono; 2 un acero al níquel, 3 un acero al cromo - níquel, etc. En el caso de un acero de aleación simple, el segundo dígito indica el porcentaje aproximado del elemento de aleación especial. Los dos o tres últimos dígitos dividiéndolos entre cien dan el contenido medio de carbono. Así un acero 2520 indica un acero al níquel de aproximadamente 5% de níquel y 0.20% de carbono. En las tablas 9 y 10 se dan las composiciones químicas de algunos aceros tipo maquinaria.

En algunos aceros de cuatro dígitos va una letra (L o B), insertada en medio. La letra L indica plomo y la B indica boro, los cuales se le agregan al acero para mejorar su maquinabilidad.

Los números básicos para la serie de cuatro dígitos de los diversos grados de aceros tipo maquinaria, con porcentajes aproximados de elementos de identificación son :

-
- 10XX ACEROS AL CARBONO
 - 11XX ACEROS AL CARBONO , ALTO AZUFRE, BAJO FÓSFORO
 - 12XX ACEROS AL CARBONO, ALTO FÓSFORO, ALTO AZUFRE
 - 13XX ACERO AL MANGANESO
 - 40XX ACERO AL MOLIBDENO
 - 41XX ACERO AL CROMO- MOLIBDENO
 - 43XX ACERO AL NIQUEL-CROMO -MOLIBDENO
 - 51XX ACERO AL CROMO (0.8-1.0% Cr)
 - 52XXX ACERO AL CROMO 1.03% Cr
 - 86XX ACERO AL NIQUEL-CROMO-MOLIBDENO
 - 98XX ACERO AL NIQUEL-CROMO-MOLIBDENO
-

Tabla 9 Composición química de algunos aceros al carbono.

A.I.S.I. SAE	%C	%Mn	%P max	%S max
ACEROS ORDINARIOS AL CARBONO				
1010	0.08-0.13	0.30-0.60	0.04	0.05
1020	0.18-0.23	0.30-0.60	0.04	0.05
1035	0.32-0.38	0.60-0.90	0.04	0.05
1045	0.43-0.50	0.60-0.90	0.04	0.05
1060	0.55-0.65	0.60-0.90	0.04	0.05
1074	0.70-0.80	0.50-0.80	0.04	0.05
ACEROS AL CARBONO DE ALTA MAQUINABILIDAD				
1115	0.13-0.18	0.60-0.90	0.04	0.08-0.13
12L14	0.15 MAX	0.80-1.20	0.04-0.09	0.25-0.35

Tabla 10 Composición química de algunos aceros de maquinaria

A.I.S.I.	%C	%Mn	%Ni	%Cr	%Mo	TIPO
3115	0.13-0.18	0.40-0.60	1.10-1.40	0.55-0.75		Aceros al Cr-Ni
4140	0.38-0.43	0.75-1.00		0.80-1.10	0.15-0.25	Acero al Cr-Mo
4320	0.17-0.22	0.45-0.60	1.65-2.00	0.40-0.60	0.20-0.30	Acero Cr-Ni-Mo
4340	0.38-0.43	0.60-0.80	1.65-2.00	0.70-0.90	0.20-0.30	Acero Cr-Ni-Mo
52100	0.95-1.10	0.25-0.45		1.30-1.60		Acero al Cr
8620	0.17-0.24	0.60-0.95	0.35-0.75	0.35-0.65	0.15-0.25	Acero Cr-Ni-Mo
9840	0.38-0.43	0.70-0.90	0.85-1.15	0.70-0.90	0.20-0.30	Acero Cr-Ni-Mo

4.3 IDENTIFICACIÓN ACEROS DE HERRAMIENTA:

El sistema de identificación de estos aceros, esta constituido por una letra mayúscula y uno o dos dígitos.

La letra nos puede indicar :

- El medio de templado
- Aplicaciones del acero
- El elemento de aleación especial
- Características especiales

Mientras que los dígitos solo indican, que son aceros de diferente composición química, pero del mismo grupo.

Los aceros para herramientas que mas se utilizan se han agrupado en siete grupos y a cada grupo o subgrupo se le ha asignado una letra del alfabeto como sigue:

GRUPO	SÍMBOLO Y TIPO
Temple al agua	W
Resistentes al impacto	S
Trabajo en frío	O templable en aceite A mediana aleación y templable en aire D alto carbono, alto cromo
Trabajo en caliente	H (H1-H19, incluso, base cromo; H20-H39, incluso, base tungsteno; H40-H59, incluso, base molibdeno)
Alta velocidad	T base tungsteno M base molibdeno
Moldes	P aceros para moldes (P1-P19, inclusive, bajo carbono, P20-P39, inclusive, otros tipos.
Propósitos específicos	L baja aleación F carbono-tungsteno

Tabla 11 Composición química de algunos aceros de herramienta

TIPO	%C	%Mn	%Si	%Cr	%Ni	%V	%W	%Mo
W1	0.60-1.40							
S1	0.50			1.50			2.5	
S5	0.55	0.80	2.00					0.40
O1	0.90	1.00		0.50			0.50	
A2	1.00			5.00				1.00
D2	1.50			12.00				1.00
D4	2.25			12.00				1.00
H12	0.35			5.00		0.40	1.50	1.50
H13	0.35			5.00		1.00		1.50
T1	0.70			4.00		1.00	18.00	
M2	0.90			4.00		2.00	6.00	5.00
L6	0.70			0.75	1.50			0.25
P4	0.07			5.00				
P20	0.30			1.25				0.25

4.4 IDENTIFICACIÓN DE ACEROS INOXIDABLES

Un sistema de numeración de tres dígitos se utiliza para identificar los aceros inoxidable. Los dos últimos no tienen significado específico, pero el primero indica el grupo como sigue:

DESIGNACIÓN DE LA SERIE	GRUPOS
2xx	Cromo-Niquel-Manganeso; no endurecibles Austeníticos, no magnéticos.
3xx	Cromo-Niquel; no endurecibles Austeníticos, no magnéticos.
4xx	Cromo; endurecibles, martensíticos, magnéticos.
4xx	Cromo; no endurecibles, ferríticos, magnéticos.
5xx	Cromo; bajo Cromo, resistentes al calor.

Tabla 12 Composición química de algunos aceros inoxidable

TIPO	%C	%Mn	%Si	%Cr	%Ni	OTROS
302	0.15 max	2.00 max	1.00 max	17.00-19.00	8.00-10.00	
316	0.08 max	2.00 max	1.00 max	16.00-18.00	10.00-14.00	2.00-3.00 Mo
410	0.15 max	1.00 max	1.00 max	11.50-13.50	3.50 max	
420	0.15 max	1.00 max	1.00 max	12.00-14.00		
405	0.08 max	1.00 max	1.00 max	11.5-14.5	0.50 max	0.10-0.30 Al
430	0.12 max	1.00 max	1.00 max	14.00-18.00	0.50 max	

4.5 SISTEMA DE NUMERACIÓN UNIFICADO (UNS)

Los aceros al carbono y los aceros aleados establecidos por la AISI o la SAE tienen ahora una nueva designación , establecida por la ASTM ; que es el SISTEMA DE NUMERACIÓN UNIFICADO (ASTM E 527 Y SAE J1086) . En la tabla 13 se dan las correspondencias de la UNS con la SAE y la AISI .

El sistema UNS consiste de una letra (prefijo), seguida por cinco dígitos. la letra (prefijo) G indica acero al carbono o aleado grado estándar. mientras el prefijo H indica que el acero tiene habilidad de endurecimiento . los primeros cuatro dígitos de la UNS corresponden a los grados estándar de la SAE- AISI , pero el último dígito (diferente al cero), significa que el acero tiene una composición química especial; puede ser plomo, boro. etc. si el ultimo dígito es (seis) significa que el acero fue fabricado en un horno eléctrico mediante una técnica especial. el termino de acero al carbono no significa que el acero no contenga elementos de aleación. sin embargo hay restricciones estrictas en las cantidades . el acero es considerado al carbono si, el % del carbono no excede del .40 % o cuando el contenido máximo de los siguientes elementos es: 1.65 %

de manganeso, 0.60 % de silicio, 0.60 % de carbono. el boro puede ser añadido al acero al carbono para mejorar su habilidad de endurecimiento. En todos los aceros al carbono hay pequeñas cantidades de elementos de aleación que se consideran como residuos, tales como el níquel, cromo, molibdeno. la existencia es inevitable porque estos provienen de las materias primas usadas en la fusión.

también hay designación UNS para los aceros inoxidable y para los aceros tipo herramienta; en los primeros se utiliza el prefijo S y en los tipo herramienta el prefijo T.

Tabla 13 Equivalencia entra las normas, A.I.S.I., SAE y UNS.

UNS	SAE-AISI
G10200	1020
G10350	1035
G10450	1045
G10600	1060
G10740	1074
G11150	1115
G12144	12L14
G31150	3115
G41400	4140
G43200	4320
G43400	4340
G52980	52100
G86200	8620
G98400	9840
T72301	W1
T41901	S1
T41905	S5
T31501	O1
T30102	A2
T30402	D2
T30404	D4
T20812	H12
T20813	H13
T12001	T1
T11302	M2
T61206	L6
T51604	P4
T51620	P20

Tabla 13 (continuación) Equivalencia entra las normas, A.I.S.I., SAE y UNS.

S30200	302
S31600	316
S41000	410
S41600	416
S43100	431
S42000	420
S44000	440
S40500	405
S43000	430

CAPITULO 5

ACEROS DE MAQUINARIA

Introducción: Estos aceros son utilizados, en la fabricación de partes de maquinas, como levas, engranes, sujetadores, tornillos, flechas, piñones, cuchillas de corte con alta tenacidad, etc.

Para su identificación se usa un sistema numérico de 4 o 5 dígitos, de los cuales, el primer dígito, indica el tipo de acero. cuando en esta primera posición aparece el numero 1, indica que es un acero común y corriente, al carbono y cuando aparece del numero 2 en adelante, indica que es un acero aleado y va a tener cierta cantidad de cromo, níquel, vanadio y molibdeno. pero por muy alto porcentaje de estos elementos, que contenga el acero, no pasa de un 5%. por eso el costo de estos aceros, es significativamente mas bajo que el de los aceros tipo herramienta.

Los aceros de bajo carbono, como el 1020, 3115, 4320, 8620, son especialmente usados para obtener una superficie dura y un núcleo suave, para lograr resistencia al desgaste en la superficie y máxima tenacidad en el núcleo. para lograr estas características a estos aceros, se les da primero, un carburizado y después temple y revenido.

En cambio, los aceros que contienen de 0.35% de carbono en adelante, ya reaccionan al temple directo y se pueden obtener durezas de 45 a 55 hrc, como en los aceros 1045, 4140 y 9840.

5.1 ACERO DE MAQUINARIA 1020

Composición química: 0.18 a 0.23 C, 0.30 a 0.60 Mn, 0.040 P max, 0.050 Smax.

Características: El más ampliamente usado, de algunos grados similares conteniendo 0.20% C. disponible en una variedad de formas. excelente forjabilidad y soldabilidad. hasta un contenido de 0.23% C, no se necesita precalentar o poscalentar, al soldar estructuras. la maquinabilidad de este acero es pobre. es usado como acero carburizado.

PRACTICA RECOMENDADA DE TRATAMIENTO TERMICO:

Normalizado: calentar a 925⁰C y enfriar al aire.

Recocido: calentar a 870⁰C. enfriar lentamente. preferentemente dentro del horno.

Templado: para ser endurecido, primero debe de carburizado superficialmente, usando un medio liquido, sólido o gaseoso. la mayoría de las mezclas gaseosas, utilizan un rango de temperatura de 870 a 955⁰C. la profundidad de penetración, depende del tiempo y de la temperatura. la mayoría de los hornos utiliza el limite superior de temperaturas, sin afectar, excesivamente el horno. con el advenimiento del carburizado al vacío, temperaturas de 1095⁰C son usadas, para lograr una penetración, en la mitad del tiempo, que usando 955⁰C.

Endurecimiento Después De Carburizar: se puede hacer usando, uno de los 3 procedimientos:

- Enfriar directamente, en agua o salmuera, desde la temperatura de carburizado.
- Después de que el ciclo de carburizado, es terminado, bajar la temperatura del horno a 845⁰C, para un ciclo de difusión. enfriar, al agua o en salmuera.
- Enfriar lentamente hasta la temperatura ambiente, después de carburizar. recalentar hasta 815⁰C. enfriar en agua o salmuera.

Revenido: muchas piezas carburizadas y templadas, pueden ser usadas en servicio, sin revenirlas. sin embargo es buena practica revenir a 150⁰C por un poco mas de 1 hora, si se permite sacrificar un poco la dureza.

SECUENCIA DE PROCESAMIENTO RECOMENDADA:

- **Normalizado**
- **Maquinado burdo**
- **Maquinado fino**
- **Carburizado**
- **Bajar temperatura para ciclo de difusión**
- **Templado**
- **Revenido**
- **Rectificado (no removiendo mas de 10% de capa carburizada por lado).**

En las figuras 19, 20, 21 y 22 se da informacion graficada de los tratamientos térmicos de éste aceros.

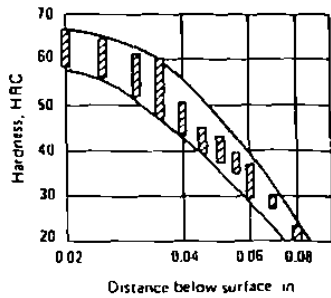


Fig.19 Acero 1020: Carburización líquida

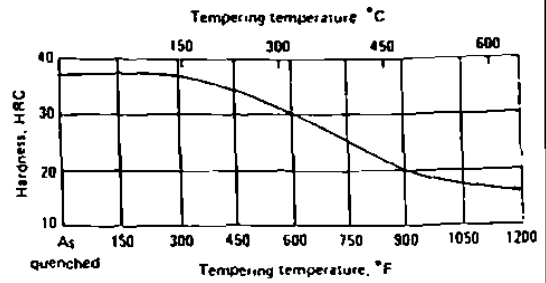


Fig 20 Acero 1020: Dureza vs. temperatura de revenido.

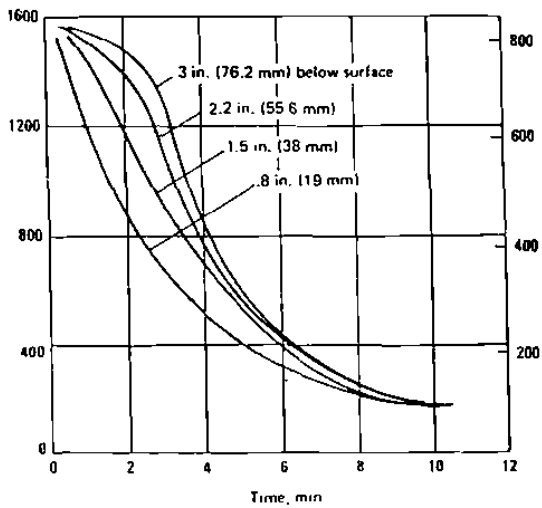


Fig 21 Acero 1020: Templado en agua. Efecto de masa en las curvas de enfriamiento al templar en agua.

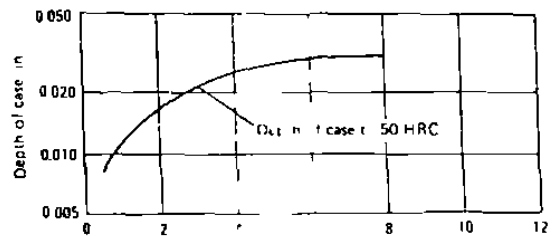
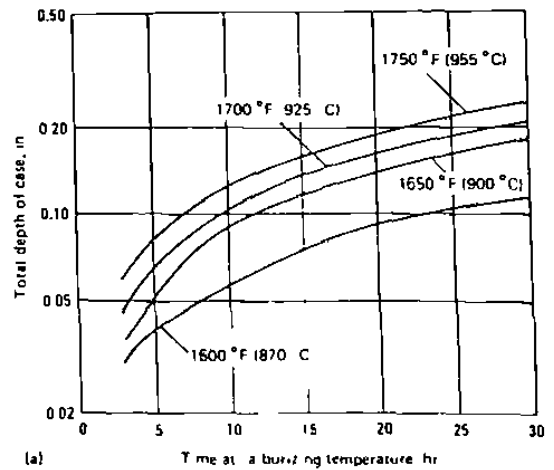


Fig 22 Acero 1020: Carburización líquida. Efecto de temperatura-tiempo en la capa endurecida.

5.2 ACERO DE MAQUINARIA 1045.

Composición química: 0.43 a 0.50 C, 0.60 a 0.90 Mn, 0.040 P max, 0.050 S max

Características: Es el mas usado de los aceros de medio contenido de carbono. disponible en una amplia variedad de formas. excelente forjabilidad. se maquina fácilmente. responde bien al tratamiento termico.

PRACTICA RECOMENDADA DE TRATAMIENTO TERMICO:

Normalizado: Calentar a 900°C . enfriar al aire

Recocido: Calentar A 845°C . enfriar en el horno a una razón que no exceda 28°C por hora hasta 650°C .

Templado: Austenitizar a 845°C . Templar en agua o salmuera. Enfriar al aceite piezas que tengan una sección abajo de 1/4" de espesor.

Revenido después del templado: La dureza del acero templado, es al menos de 55 HRC, pero la dureza puede ser modificada hacia abajo, por medio de un revenido adecuado.

Revenido después del normalizado: Para secciones gruesas, normalizar por la practica convencional. esto dará por resultado una estructura de perlita fina. una temperatura de revenido arriba de 540°C es luego aplicada. resultando resistencias mecánicas un poco mas altas que las que se obtienen en un proceso de recocido.

En las figuras, 23, 24 y 25 se da informacion graficada de los tratamientos térmicos de éste aceros.

SECUENCIA DE PROCESAMIENTO RECOMENDADA:

- Normalizado
- Recocido si es necesario
- Maquinado burdo
- Austenitizado
- Templado
- Revenido
- Maquinado fino

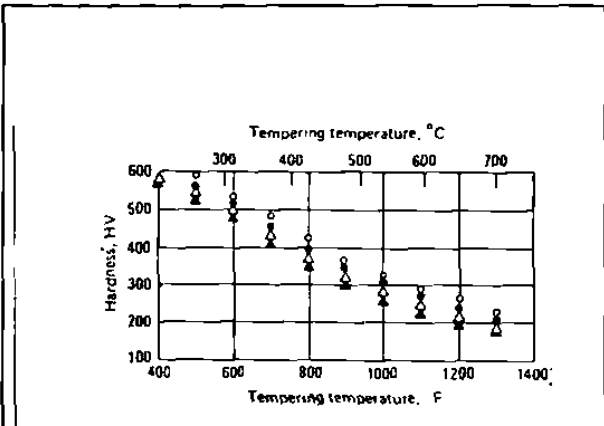


Fig 24 Acero 1045: Dureza vs. temperatura de revenido.

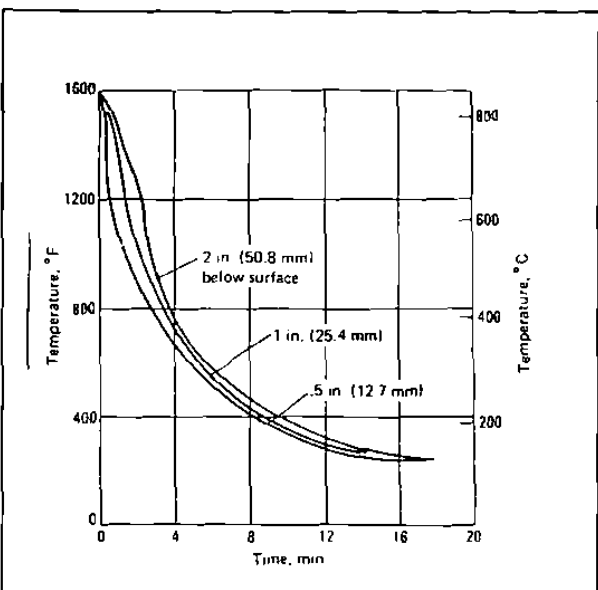


Fig 23 Acero 1045: Masa y sección vs. velocidad de enfriamiento en aceite.

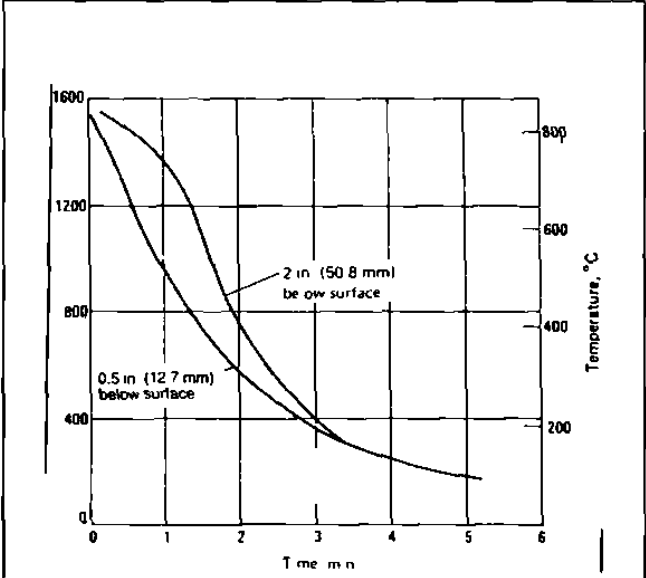


Fig 25 Acero 1045: Masa y sección vs. velocidad de enfriamiento en agua.

5.3 ACERO DE MAQUINARIA 4140.

Composición química: 0.38 a 0.43 C, 0.75 a 1.00 Mn, 0.035 P max, 0.040 S max, 0.15 a 0.30 Si, 0.80 a 1.10 Cr, 0.15 a 0.25 Mo.

Características: Este acero, esta entre los mas ampliamente usados, de los aceros aleados de medio carbono. Relativamente no es caro, considerando la alta capacidad que tiene de endurecerse. La forjabilidad es muy buena, pero la maquinabilidad solo es buena y la soldabilidad es pobre, porque es susceptible de agrietarse durante la soldadura.

PRACTICA RECOMENDADA DE TRATAMIENTO TERMICO:

NORMALIZADO: Calentar a 870⁰C, y enfriar al aire.

Recocido: Para una estructura predominantemente perlítica, calentar a 845⁰C y enfriar rápidamente a 755⁰C y luego enfriar de 755 a 665⁰C, a una razón que no exceda 14⁰C por hora; o calentar a 845⁰C, enfriar rápidamente a 675⁰C, y mantener por 5 horas. Para una estructura predominantemente esferoidal, calentar a 750⁰C y enfriar a 665⁰C a una razón que no exceda 6⁰C por hora; o calentar a 750⁰C, enfriar rápidamente a 675⁰C y mantener por 9 horas.

Templado: Austenitizar a 855⁰C, y enfriar al aceite.

Revenido: recalentar después del templado, para obtener la dureza requerida.

Nitrurado: El 4140 responde al proceso de nitrurado con gas amoniaco, resultando una capa delgada y muy dura. La porción exterior esta compuesta por nitruro épsilon. Este constituyente no solo proporciona una superficie resistente a la abrasión, sino que

incrementa, como en un 30%, la resistencia a la fatiga de componentes, tales como flechas. Un ciclo de procesamiento que incluye el nitrurado es:

- Maquinado burdo
- Austenitizar a 845⁰C
- Templar en aceite
- Revenir a 620⁰C
- Maquinado final
- Nitrurado a 525⁰C por 24 horas, usando amoniaco disociado al 30%; o nitrurar a 525⁰C por 5 horas con una disociación de amoniaco de 25%, luego a 565⁰C por 20 horas con una disociación de amoniaco de 75 a 80%.

SECUENCIA DE PROCESAMIENTO RECOMENDADA:

- **Normalizado**
- **Recocido**
- **Maquinado burdo**
- **Austenitizado**
- **Templado**
- **Revenido**
- **Maquinado final**
- **Nitrurado (opcional).**

En las figuras 26 y 27 se da informacion graficada de los tratamientos térmicos de éste aceros.

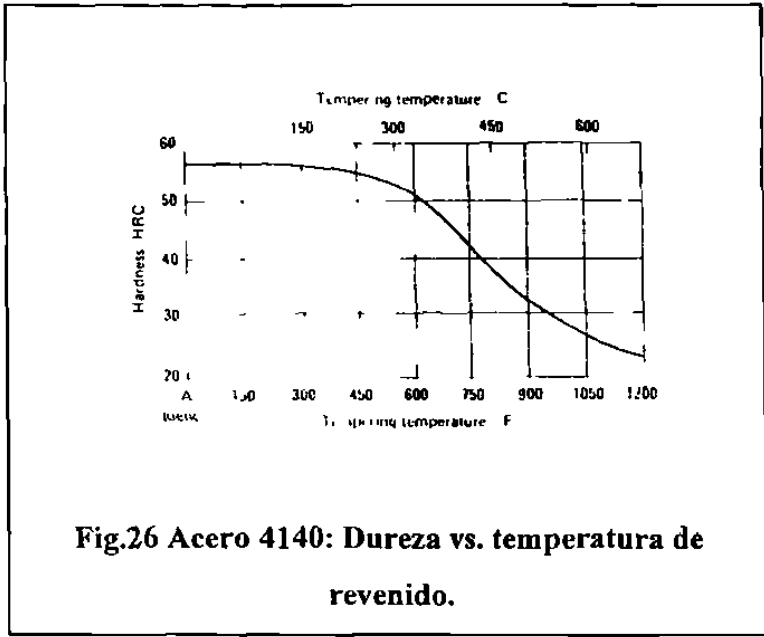


Fig.26 Acero 4140: Dureza vs. temperatura de revenido.

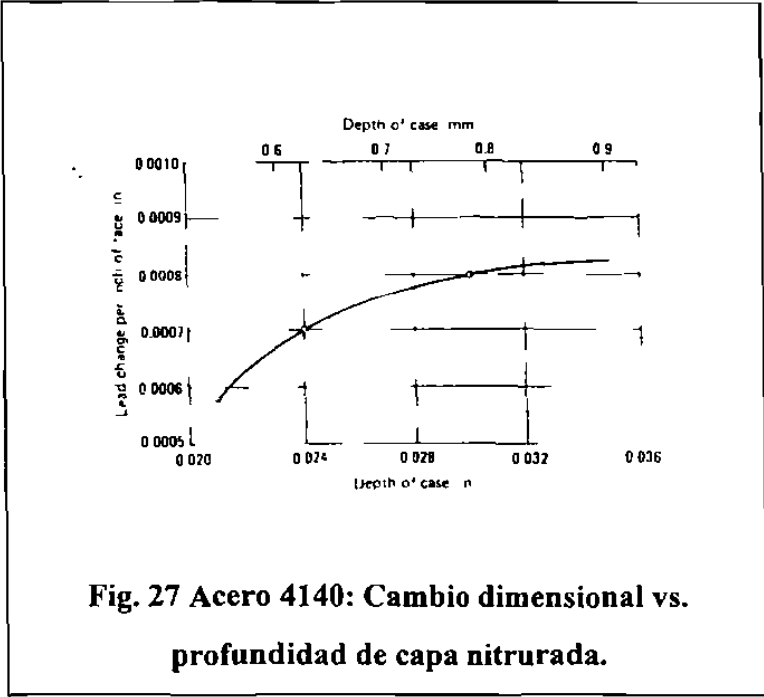


Fig. 27 Acero 4140: Cambio dimensional vs. profundidad de capa nitrurada.

5.4 ACERO DE MAQUINARIA 8620.

Composición química: 0.18 a 0.23 C, 0.70 a 0.90 Mn, 0.035 P max, 0.040 S max, 0.15 a 0.30 Si, 0.80 a 1.10 Cr, 0.15 a 0.25 Mo, 0.40 a 0.70 Ni, 0.40 a 0.60 Cr.

Características: Usado como un acero con superficie endurecida, ya sea por carburizado o por carbonitrurado. La dureza después de templado es de 37 a 43 HRC. Tiene relativamente alta capacidad para endurecerse. Excelente forjabilidad y soldabilidad. La maquinabilidad es buena.

PRACTICA RECOMENDADA DE TRATAMIENTO TERMICO:

Normalizado: Calentar a 925°C y luego enfriar al aire

Recocido: Una estructura con alta maquinabilidad, se puede obtener normalizando o calentando a 885°C , enfriando rápidamente a 660°C , y manteniendo por 4 horas. otra técnica es calentar a 790°C , enfriar rápidamente a 660°C y mantener por 8 horas.

Carburizado: Este acero puede ser carburizado, por medios sólidos líquidos o gaseosos. El rango de temperaturas usado es de 870 a 925°C , por un tiempo que va a depender del espesor deseado.

Carburizado gaseoso:

- Carburizar a 925°C , con una atmósfera gaseosa, con un potencial de carbono de 0.90, por 4 horas.
- Reducir la temperatura a 845°C , reduciendo el potencial de carbono a cerca del eutectoide y difundir por 1 hora.
- Templar en aceite.
- Revenir por 1 hora a 150°C .

Este ciclo da una capa endurecida de 0.050 in. Mayores profundidades, se obtienen con ciclos mas prolongados.

Carbonitrurado: Para obtener superficies duras y poca penetración, son a menudo carbonitruradas a 845⁰C en una atmósfera carbonosa con una adición de 10% de amoniaco. Las piezas son enfriadas en aceite directamente de la temperatura de carbonitrurado. Usando una temperatura de carbonitrurado de 845⁰C, es posible obtener una capa de .012 in. En cerca de 45 min.

Revenido: Revenir todas las piezas carburizadas o carbonitruradas a 150⁰C y no se perdera dureza en la capa dura. Si algún decremento en la dureza puede ser admitido, la tenacidad puede ser incrementada reviniendo a temperaturas mas altas que 260⁰C.

SECUENCIA DE PROCESAMIENTO RECOMENDADA:

- Normalizado
- Recocido (si se requiere)
- Maquinado burdo
- Maquinado semifinal, dejando la pieza con una pequeña sobremedida, para después del carburizado rectificar un 10% de capa endurecida. En la mayoría de los casos, las piezas carbonitruradas, son completamente terminadas en este paso.
- Carburizar o carbonitrurar y templar.
- Revenido

En las figuras 28 y 29 se da informacion graficada de los tratamientos térmicos de éste aceros.

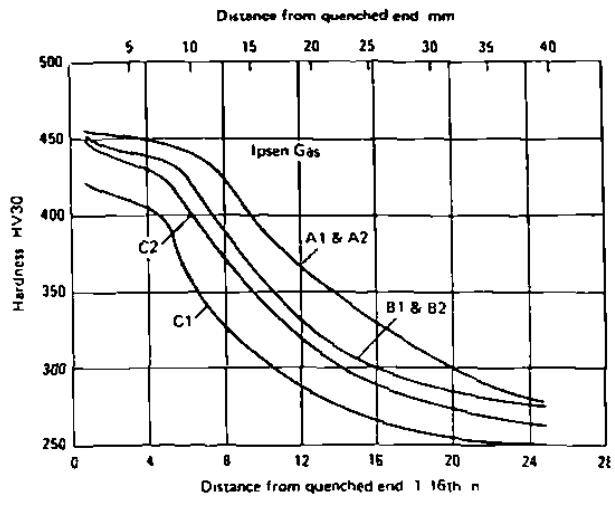


Fig. 28 Acero 8620: Temperatura de austenización vs. profundidad de endurecimiento.

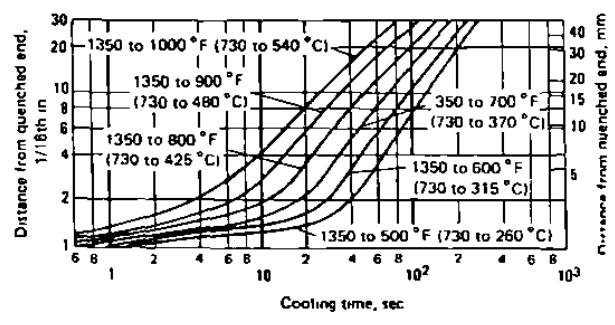


Fig. 29 8620: tiempo de enfriamiento vs. profundidad de endurecimiento.

CAPITULO 6

RESULTADOS

Tabla de resultados obtenidos en las pruebas realizadas a varios aceros tipo maquinaria. Temple y Revenido.

Temperatura de Revenido (°C)

	150	200	250	300	350	400	500
Acero	Durezas (HRC)						
1020	36	33	31	28	25	22	19
1045	58	56	53	51	48	44	34
4140	54	52	50	48	46	43	38
8620 *	62	60	58	55	52	47	38

(*) Acero Carburizado

Tabla de datos teóricos de temperaturas de Revenido vs Dureza

Temperaturas (°C)

	150	200	250	300	350	400	500
Acero	Durezas (HRC)						
1020	38	35	33	31	27	24	20
1045	56	55	53	51	48	43	33
4140	56	55	54	53	50	46	34
8620 *	60	58	56	53	50	45	36

CAPITULO 7

CONCLUSIONES

Los resultados de los tratamientos térmicos, que en esta tesis estamos presentando, sobre los diferentes aceros, son validos para una cierta composición química y para ciertos parámetros bien definidos (horno, temperatura, tiempo).

Hicimos una gran cantidad de tratamientos térmicos, en aceros tipo maquinaria, tipo herramienta y tipo inoxidable, y encontramos unas pequeñas variaciones en la respuesta al tratamiento térmico. Esto ocasionado porque se usaron aceros de diferentes marcas comerciales, y en ellos, se encontró, que la composición química, aun estando dentro de la norma, variaba de uno a otro.

Las pruebas se realizaron en hornos eléctricos de diferentes tamaños, y aquí, también se vio que la respuesta al tratamiento térmico, depende del tamaño del horno y si este utiliza o no ventilación forzada. Aquí recomendamos hacer una caracterización de los hornos, para poder lograr los resultados deseados.

Otras observaciones que vimos al hacer los tratamientos térmicos, es que si a las piezas, no se les maquinaba algo de acero superficial, no respondían y no daban alta dureza. la causa de esto, es que el acero en la superficie viene decarburado, con cascarilla y con una composición química pobre. Por esto es recomendable, que cuando se compre un trozo de acero, para fabricar una pieza, lo primero que hay que hacer, es eliminar material de todas sus caras. la cantidad que hay que eliminar depende del espesor de la pieza.

dimensiones	material a eliminar en mm
-------------	------------------------------

hasta 16 mm	----- 2 mm
de 16 a 40 mm	----- 3 mm
de 40 a 63 mm	----- 4 mm
de 63 a 80 mm	----- 5 mm
de 80 a 100 mm	----- 6 mm
de 100 a 125 mm	----- 7 mm
de 125 a 160 mm	----- 8 mm
de 160 a 250 mm	----- 12 mm
de 250 a 315 mm	----- 16 mm
de 315 a 400 mm	----- 20 mm
de 400 a 500 mm	----- 25 mm

en las pruebas de tratamientos térmicos, se observó, que algunos aceros, tienen mas susceptibilidad que otros a la oxidación y a la decarburación a alta temperatura, por lo cual, estos se pueden meter desnudos dentro del horno para su tratamiento térmico, aun cuando el horno no sea al vacío o de atmósfera controlada. dentro de estos aceros, están el O1, 4140, 9840 y W1. en cambio otros aceros como el D2, H13, inox. 420, inox. 431, necesitan protección, si es que el horno no es de atmósfera controlada o al vacío. Esta protección puede consistir en empaquetamiento con material no reactivo o forrando las piezas con lamina (espesor de .002 pulg.) de titanio o de acero inoxidable.

También algo que se tiene que tomar muy en cuenta, es el diseño de la pieza, en la cual se deben evitar los cambios bruscos de sección y los concentradores de esfuerzos.

Si se toman en cuenta, la selección del acero, un maquinado apropiado, un buen diseño de pieza, un seguimiento adecuado del tratamiento térmico y el uso del medio de enfriamiento recomendado, todo esto es vital para lograr una pieza que va a cumplir satisfactoriamente con la aplicación final.

BIBLIOGRAFÍA:

1. Donald R. Askeland. LA CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES. Ed. Interamericana. USA, 1992
2. José Apráiz Barreiro. TRATAMIENTO TÉRMICO DEL ACERO. Ed. Madrid. Madrid, 1990
3. ASM Internacional. TRATAMIENTO TÉRMICO DEL ACERO. Volumen 4. USA, 1990.
4. ASM Internacional. PROCESOS Y MATERIALES AVANZADOS. USA, 1996
5. Sidney H. Avner. INTRODUCCIÓN A LA METALURGIA FÍSICA. Ed. Mc. Graw Hill. USA, 1990
6. Flinn y Trojan. MATERIALES DE INGENIERÍA Y SUS APLICACIONES. Ed. Mc. Graw Hill. USA, 1990
7. James Shackelford. CIENCIA DE MATERIALES PARA INGENIEROS. Ed. Prentice Hall. USA 1992
8. The Journal Of Thermal Technology. INDUSTRIAL HEATING. USA, 1996
9. William Smith. FUNDAMENTOS DE LA CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES. Ed. Mc. Graw Hill. USA, 1991
10. Thornton y Colangelo. CIENCIA DE MATERIALES PARA INGENIERÍA. Ed. Prentice Hall. USA, 1991
11. Totten, Bates and Clinton. HANDBOOK OF QUENCHANTS AND QUENCHING TECHNOLOGY. ASM Internacional. USA, 1993
12. Van Vlack. MATERIALES PARA INGENIERÍA. Ed. C.E.C.S.A. USA. 1990
13. Robert Wilson. METALURGIA Y TRATAMIENTO TÉRMICO DE LOS ACEROS PARA HERRAMIENTA. Ed. Mc. Graw Hill. Inglaterra, 1990

RESÚMEN AUTOBIOGRÁFICO

RICARDO CALVO ALTAMIRANO

Candidato para el grado de

Maestro en Ciencias con especialidad en Diseño Mecánico

Tesis: SECUENCIA DE PROCESAMIENTO DE ACEROS DE MAQUINARIA

Campo de Estudio: Ciencias Exactas

Biografía:

Datos Personales: Nacido en Monterrey, Nuevo León, el 21 de Noviembre de 1958, hijo de Antonio Calvo Altamirano (finado) y Sara Altamirano Guillén.

Educación: Egresado de la Universidad Autónoma de Nuevo León, grado obtenido; Ingeniero Mecánico Electricista en 1981 con Mención Honorífica, generación 1977- 1981

Experiencia Profesional: Maestro de tiempo completo de la Universidad Autónoma de Nuevo León desde 1990. Maestro por horas de 1983 - 1990.

