



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN



“EFECTO DE TIEMPO Y TEMPERATURA DE
REVENIDO DE LAS PROPIEDADES MECANICAS
DE UN ACERO F3/L6”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A:

RICARDO ALBERTO DELGADILLO TORRES

ASESOR: ING. FELIPE DIAZ DEL CASTILLO RODRIGUEZ

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.

1985

FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

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

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLAN

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS



DEPARTAMENTO DE
EXAMENES PROFESIONALES

DR. JAIME KELLER TORRES
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodriguez Ceballos
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS TITULADA:
"Efecto de tiempo y temperatura de revenido en las propiedades
Mecánicas de un acero F316."

que presenta el pasante: Ricardo Alberto Delgadillo Torres.
con número de cuenta: 8857708 - 1 para obtener el TITULO de:
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuatitlán Izcahil, Edo. de Méx., a 12 de enero de 1995

PRESIDENTE	Ing. M ^c . Soledad Alvarado Martinez	<i>[Signature]</i> 16/1/95
VOCAL	Ing. Enrique Cortés González	<i>[Signature]</i> 16/1/95
SECRETARIO	Ing. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez	<i>[Signature]</i> 16/1/95
PRIMER SUPLENTE	Ing. Jesús García Lara	<i>[Signature]</i> 12/1/95
SEGUNDO SUPLENTE	Ing. M ^c . del Pilar Zepeda Moreno	<i>[Signature]</i> 17/1/95

INDICE
CAPITULO 1

	Pag.
ALEACIONES HIERRO CARBONO	7
1.1.-INTRODUCCION HISTORICA	4
1.2.-CLASIFICACION DE LAS ALEACIONES	7
1.3.-DIAGRAMA HIERRO CARBONO	13
1.4.-ACEROS	17
1.5.-FUNDICIONES	20
1.6.-CLASIFICACION DE LOS ACEROS POR SU APLICACION	22
1.7.-ACEROS ESTRUCTURALES	24
1.8.-ACEROS PARA MAQUINARIA	24
1.9.-ACEROS PARA HERRAMIENTA	26
1.10.-ACEROS PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ	29
1.11.-ACEROS PARA LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION	29
CAPITULO 2	
DIAGRAMA TTT-CCT	30
2.1.-OBTENCION DEL DIAGRAMA TTT (Transformación-Tiempo-temperatura)	30
2.2.-IMPORTANCIA Y FORMA DE LOS DIAGRAMAS TTT	36
2.3.-INTERPRETACION DE LOS DIAGRAMAS TTT	39
2.4.-APLICACION DE LOS DIAGRAMAS TTT	42

2.5.-DIAGRAMA DE TRANSFORMACION DE ENFRIAMIENTO CONTINUO O DIAGRAMA CCT	43
2.6.-DIAGRAMA CCT PARA ACEROS DE COMPOSICION EUTECTOIDE	43
2.7.-INTERPRETACION DE LOS DIAGRAMAS CCT	46
2.8.-APLICACION DE LOS DIAGRAMAS CCT	49

CAPITULO 3

REVISION DE TRATAMIENTOS TERMICOS DE ACEROS	52
3.1.-INTRODUCCION	52
3.2.-TRATAMIENTOS TERMICOS	53
3.3.-TRATAMIENTOS TERMICOS SUPERFICIALES	60
3.4.-TRATAMIENTOS TERMOQUIMICOS	70

CAPITULO 4

CLASIFICACION Y PROPIEDADES DE LOS ACEROS PRA HERRAMIENTAS	74
4.1.-GENERALIDADES SOBRE ACEROS P/HERRAMIENTAS	74
4.2.-CLASIFICACION	74
4.3.-APLICACIONES	76

CAPITULO 5

TEMPLE Y REVENIDO PARA ACEROS HERRAMIENTA $F_{a/L_{c}}$	77
5.1.-INTRODUCCION	77

	Pag.
5.2.-OBTENCION DE MUESTRAS	77
5.3.-METALOGRAFIA	78
5.4.-DUREZA	86
5.5.-RESULTADOS	95

CAPITULO 6

6.1.-CONCLUSIONES	101
6.2.-BIBLIOGRAFIA	103

1.1-INTRODUCCION HISTORICA

La Metalurgia es la ciencia y la tecnología de los materiales.

El trabajador de los materiales se menciona en la Biblia y en la mitología griega y nórdica, la metalurgia considerada como arte, se ha practicado desde los más remotos tiempos.

El hombre antiguo conocía y utilizaba muchos metales nativos. El oro se usaba para hacer adornos, platos y diversos utensilios desde el año 3500 A. de C. El arte de fundir y moldear los metales, tubo un gran desarrollo, tanto entre los Egipcios como entre los Chinos. Los antiguos Egipcios sabían separar al hierro de su mineral, y que el acero tenía la propiedad de endurecerse, pero la utilización del hierro no se generalizó antes del año 1000A. de C, este metal no fue popular entre los antiguos, por su tendencia a oxidarse; preferían trabajar con oro, plata, cobre, latón y bronce.

Muy poco fue lo que se escribió acerca del procedimiento metalúrgicos hasta que Biringuccio publicó su obra Pirotecnia, en 1540 a la cual siguió De.Re Metallurgica, de Agrícola, en 1556.

En años posteriores añadieron muchos conocimientos al campo metalúrgico quienes intentaban reproducir la estructura grabada al agua fuerte del acero de Damasco.

Hasta los comienzos del último cuarto de siglo XIX, la mayoría de los investigadores sobre la estructura de los metales había sido macroscópica <a simple vista> y superficial; casi no existía esta ciencia de la estructura de los metales.

El hombre que más contribuyó en el periodo siguiente al rápido desarrollo de la Metalurgia científica fue Henry Clifton Sorby.

Sorby fue inglés aficionado a las ciencias que empezó a

estudiar los meteoritos, y luego se dedico al estudio de los metales.

En septiembre de 1964 Sorby presentó a la Asociación Inglesa para el Avance de la ciencia una memoria en que mostraba y describía fotografías microscópicas de varias clases de hierro y acero, este documento marco el comienzo de la Metalografía, el campo del conocimiento relacionado con el uso del microscopio para estudiar la estructura de los metales.

Posteriormente, en 1925 la aplicación de los rayos X y de la mecánica ondulatorio al estudio de los metales permitió profundizar en el conocimiento de su estructura y propiedades.

La metalurgia realmente no constituye una ciencia independiente, puesto que muchos de sus conceptos fundamentales se deduce de los principios físicos, químicos y cristalográficos.

En la tecnología moderna, el metalurgista ha venido adquiriendo cada vez más importancia, hace años, la inmensa mayoría de las piezas de acero se fabricaban con aceros bajo en carbono, cuya obtención y mecanización era fácil y barata, y en términos generales, solo se trataban típicamente las herramientas.

Los proyectistas eran incapaces de dar una explicación racional de las faltas de homogeneidad estructural, de los efectos superficiales, etc, y era norma común el empleo de factores de segregación muy grandes, como consecuencia de ello, las máquinas tenían un peso muy superior a la que por sus características y condiciones de trabajo les correspondía, y esta cualidad de pesadas se consideraba como un distintivo de calidad.

El cual se ha conservado, en mayor o menor grado, hasta nuestros días, pero cada vez cuenta con menos adeptos, debido a la presencia alcanzada por la industria de la aeronáutica y de la automatización.

En esta industria se ha puesto de manifiesto la impor-

tancia que tiene, en un buen diseño, la relación entre la resistencia y el peso, y esto ha llevado al desarrollo de aleaciones ligeras de gran resistencia.

En la turbina de vapor y en los reactores nucleares utilizados para la obtención de energía, las presiones y temperaturas que deben resistir son cada vez mayores, requiriendo el empleo de nuevas aleaciones.

Por tanto la metalurgia puede dividirse en dos grandes ramas, a saber:

- 1.-Metalurgia extractiva o general que estudia la obtención de los metales a partir de sus minerales comprende la obtención y afino, a partir de esos minerales, de los metales y aleaciones.
- 2.-Metalurgia física o ciencia que trata de las características físicas y mecánicas de los metales y aleaciones, estudia la influencia que en estas propiedades ejercen variables tales como :
 - a.-La composición química, es decir, los constituyentes químicos de la aleación.
 - b.-El tratamiento mecánico, atendiendo por tal cualquier operación que origine una variación de forma como puede ser laminado, estirado, estampado, conformado, etc.
 - c.-El tratamiento térmico, o influencia de la temperatura y de las velocidades de calentamiento y enfriamiento .

CAPITULO UNO
ALEACIONES HIERRO CARBONO

1.2.-CLASIFICACION DE LAS ALEACIONES

ALEACION: Material con propiedades metálicas constituido por 2 o más elementos y al menos uno de ellos tiene que ser un metal.

Las aleaciones pueden ser homogéneas (solución sólida) ó mezclas. En el primer caso, la aleación constará de una sola fase y en segundo estará formada por una combinación de varias fases, entendiéndose por fase cada parte homogénea de un sistema físicamente diferenciable de las demás. Al hablar de uniformidad de una fase de una aleación no nos referimos a la uniformidad a escala atómica, como ocurre por ejemplo al tratar de la composición de las distintas celdillas fundamentales de la red, sino a otra escala mucho mayor. Toda estructura visible al microscopio y que físicamente sea distinta de las demás puede considerarse como una fase.

En la mayoría de los elementos porosos el término fase es sinónimo de estado. Es decir, un cuerpo puede presentarse en fase sólida, líquida o gaseosa. Además las variedades alotrópicas que presentan algunos metales en estado sólido constituyen fases distintas.

Cuando la estructura cristalina de un metal se modifica existe un cambio de fase, ya que todos los tipos de estructuras cristalinas son físicamente distintas.

En el estado sólido pueden presentarse tres fases distintas :

- 1.-Metales puros
- 2.-Fases de aleaciones intermedias
- 3.-Soluciones solidas.

Si una aleación es homogénea (formada por una sola fase) en el estado sólido solo puede ser una solución sólida o un compuesto químico. Cuando la aleación es una mezcla se

compone de dos cualesquiera de las posibles que pueden co-existir en el estado sólido.

Esta mezcla puede estar formada por dos metales puros, por dos soluciones sólidas, por dos compuestos químicos o por un metal puro y una solución sólida.

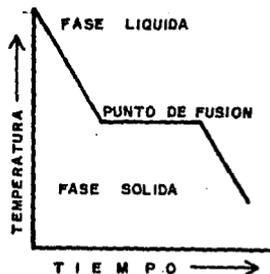
El grado de finura de la estructura también puede variar de una mezcla a otra.

1. METALES PUROS

Teniendo esto como la conservación de sus cualidades sin modificación tanto en su estructura como en sus propiedades físicas.

Ahora bien, para que se cumplan estas condiciones de equilibrio el calentamiento y el enfriamiento deben ser extraordinariamente lentos. La figura 1.1 presenta la curva de enfriamiento de un metal puro, siendo la temperatura de tramo horizontal la correspondiente al punto de fusión o solidificación.

F.1.1- CURVA DE ENFRIAMIENTO
IDEAL DE UN METAL
PURO.



a) FASES DE ALEACION INTERMEDIAS O COMPUESTOS QUIMICOS

Bajo estas dos denominaciones se conocen algunos tipos de fases sólidas, pero, dado el empleo de compuestos químicos de la aleación resulta más comprensible.

La mayoría de los compuestos se caracterizan por contar con un punto de solidificación definido, dentro de unos estrechos márgenes de temperatura, análogo a los metales puros. Por consiguiente, las curvas de enfriamiento de los metales puros y de los compuestos químicos son muy similares (véase la figura 1.1), por lo que se dice que esta curva representa una fase de fusión congruente. Con relación a los diagramas de equilibrio, de las fases de aleación intermedia, presentan una composición química comprendida entre los dos metales puros y una estructura cristalina distinta por lo general de la de éstos metales.

2-LAS TRES FASES DE ALEACION INTERMEDIA MAS CORRIENTES SON:

a.- **LOS COMPUESTOS INTERMETALICOS O VALENCIAS.** Estos compuestos están formados generalmente por metales químicamente distintos, y su manera de cambiarse obedecen a las reglas de la valencia química. Con su enlace generalmente fuerte (**IONICO O COVALENTE**), sus propiedades se asemejan fundamentalmente a la de los cuerpos no metálicos, mostrando por lo general poca ductilidad y una conductividad eléctrica pequeña, pudiendo cristalizar en estructuras complejas. Entre los que podemos señalar : $CaSe$ (Senadio de calcio), Mn_2Pb (Manganeso de plomo) y Co_2Se (Cobalto de senadio).

b.- **LOS COMPUESTOS INTERTICIALES.** Estos compuestos se forman por la unión entre los elementos de transición, como el scandio (Sc), el titanio (Ti), el tantalio (Ta), el tungsteno (W) y el hierro (Fe), con el hidrógeno, el oxígeno, el carbono, el boro y el nitrógeno. La palabra intersticial significa " *entre espacios* ", y los últimos cinco elementos tienen átomos relativamente pequeños que se acomodan en los espacios de la estructura cristalina del metal.

Ejemplo éstos son: CrN (Nitrato de cromo) y TiH (Hidrogeno de titanio).

Muchos de éstos compuestos son útiles para el

endurecimiento del acero y en las herramientas de carburo cementado.

c.- **COMPUESTOS ELECTRONICOS.** El estudio de los diagramas de equilibrio de las aleaciones al cobre, oro, plata, hierro y níquel con los metales cadmio, magnesio, estaño, zinc y el aluminio muestran semejanzas notables.

Un número de fases intermedias se forman en éstos sistemas, con estructuras cristalinas similares. Hume Rothery fue el primero en observar que éstas fases intermedias en cada sistema, existen en puntos cercanos a aquellas composiciones químicas que tienen una razón definida de número de electrones de valencia a número de átomos; por tanto se llaman compuestos electrónicos. Muchos compuestos electrónicos tienen propiedades parecidas a las de las soluciones sólidas, incluyendo un amplio intervalo de composición, alta ductilidad y baja dureza.

3.-**SOLUCIONES SOLIDAS.** Cualquier solución está constituida por dos partes : un soluto y un solvente.

El soluto es la menor parte de la solución o sea, el material disuelto, en tanto que el solvente constituye la mayor porción de la solución.

La cantidad de soluto que el solvente puede disolver es generalmente, función de la temperatura (a presión constante) y suele aumentar con el incremento de la temperatura. Una solución puede tener tres condiciones : No saturada, saturada y sobresaturada. Si el solvente se disuelve menos del soluto de la que lo podría disolver a una temperatura y presión dada, se dice que la solución es *no saturada* . Si disuelve la cantidad límite de soluto, la solución está *saturada*. Si disuelve mas soluto de lo que debería en condiciones de equilibrio, la solución está *sobresaturada*.

Una solución sólida es simplemente una solución en estado sólido y consta de dos clases de átomos combinados en un tipo especial.

Por lo general hay una diferencia considerable entre la solubilidad del soluto en una solución líquida y en una solución sólida. El soluto suele ser más soluble en el estado líquido que en el estado sólido; mas aún, cuando empieza la solidificación de la solución, la temperatura puede estar más elevada o ser inferior al punto de congelación del solvente puro.

ESTRUCTURA

Se sabe que un átomo está compuesto por un núcleo rodeado por electrones y el núcleo contiene neutrones y protones; estos últimos están cargados positivamente por lo cual el núcleo tiene una carga eléctrica neta positiva. Los electrones cargados negativamente están sujetos al núcleo mediante atracción electrostática. La magnitud de la carga eléctrica (q) de cada electrón o protón es de 1.6×10^{-19} C. La masa atómica M . Corresponde al número promedio de protones y neutrones nucleares; corresponde también a la masa medida de una cantidad de átomos igual al número de avogrado, N_A . Este número es: $N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ es el número de átomos o moléculas en un gramo mol (gr - mol).

ENLACE ATOMICO

ENLACE METALICO: los elementos metálicos tienen valencia positiva, ceden sus electrones para formar un "gas" de electrones que rodea a los átomos. Los enlaces metálicos son no direccionales, los electrones, que mantienen ligados a los átomos que no están fijos en una posición.

ENLACE COVALENTE: Los materiales ligados en esta forma comparten electrones entre dos o más de sus átomos.

Como las uniones covalentes son muy fuertes, los materiales unidos de este modo tienen poca ductilidad y escasa conductividad eléctrica.

ENLACE IONICO: Cuando en un material se encuentra presente

más de un tipo de átomo, uno de ellos puede donar electrones de una valencia a un átomo diferente, ocupando el nivel energético externo lleno y han adquirido carga eléctrica, comportándose como iones. El átomo que aportan los electrones que da con carga neta positiva y es catión, mientras que el átomo que acepta los electrones queda con carga neta negativa y es un anión. Los iones cargados opuestamente se atraen entre sí produciendo la unión iónica.

ENLACE DE VAN DER WAALS: Las uniones o enlaces son entre moléculas mediante atracciones electrostáticas débiles.

Principales características de estos enlaces es que los materiales son frágiles y malos conductores del calor y la electricidad además poseen elevados puntos de fusión y son resistentes al calor. *Ejemplo: Cerámicos, sal común etc.*

ESTRUCTURA CRISTALINA

Los materiales metálicos y cerámicos al solidificar la hacen formando un arreglo geométrico repetitivo y ordenado en tres dimensiones que recibe el nombre de estructura cristalina. Existen 7 sistemas cristalinos en los cuales puede solidificar los metales y cerámicos a saber:

SISTEMA	EJE	ANGULO O/O EJES
1.-CUBICA	$a_1 = a_2 = a_3$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
2.-TETRAGONAL	$a_1 = a_2 \neq a_3$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
3.-ORTOROMBICA	$a_1 \neq a_2 \neq a_3$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
4.-HEXAGONAL	$a_1 = a_2 \neq a_3$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
5.-ROMBOEDRICA	$a_1 = a_2 = a_3$	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120$
6.-MONOCLINICO	$a_1 \neq a_2 \neq a_3$	$2 \angle = 90$ y $1 \angle \neq 90$
7.-TRICLINICO	$a_1 \neq a_2 \neq a_3$	$2 \angle = 90$ y $1 \angle \neq 90$

De los sistemas anteriores el sistema cúbico y exagonal son, los que se presentan más comúnmente en los metales más usados en INGENIERIA.

CELDA UNITARIA: Es la unidad o conjunto de átomos más

pequeño que al repetirse en todas direcciones constituye un grano ó cristal y posee átomos en los vértices del cubo.

1.3.-DIAGRAMA HIERRO CARBONO

DIAGRAMA DE FASES O DIAGRAMA DE EQUILIBRIO

FASE: Común agregado homogéneo de materia

Algunos metales exhiben un comportamiento alotrópico (Es la característica que tiene un metal de cambiar su estructura cristalina en el estado sólido a la influencia de cambios de temperatura y presiones.)

Ejemplo:

0	----- 910°C	----- BCC HIERRO α (FERRITA)
910	-----1394°C	----- FCC HIERRO γ (AUSTENITA)
1394	-----1538°C	----- BCC HIERRO δ

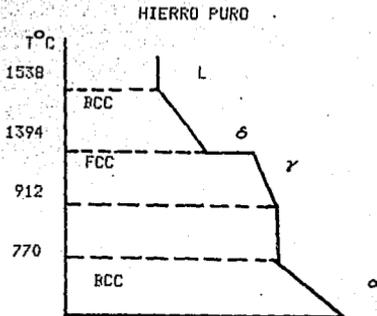


DIAGRAMA DE FASES: Es un mapa que nos muestra las fases que se encuentran presentes a la temperatura y la composición química de un sistema de equilibrio. Las variables independientes que se pueden controlar externamente a saber temperatura, composición y presión se mantiene constante.

Existen 4 tipos básicos de diagramas de equilibrio, están en función de las reacciones que se llevan a cabo a saber:

DIAGRAMA I: Completamente solubles en estado líquido y completamente solubles en estado sólido.

Ejemplo:

Son los sistemas Cu-Ni (cobre - níquel).

DIAGRAMA II: Completamente solubles en estado líquido y completamente insolubles en estado sólido.

Ejemplo:

Son los sistemas Ni-Pb (Níquel - plomo), etc.

DIAGRAMA III: Completamente solubles en estado líquido y parcialmente insolubles en estado sólido este tipo de diagrama es el más frecuente.

Ejemplo:

Son los sistemas Pb-Sn (Plomo - estaño), etc.

DIAGRAMA IV O REACCION PERITECTICA : En este tipo de diagrama aparece una reacción en la cual los sólidos se transforman en un nuevo sólido.

Ejemplo:

Son los sistemas Fe-C (Hierro carbono), etc.

COORDENADAS DE LOS DIAGRAMAS DE FASES

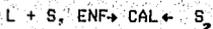
Generalmente se usa como ordenada (eje Y), la temperatura ya sea en grados celcius ($^{\circ}\text{C}$) ó grados fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$) y como abscisa (eje X) la composición química del sistema de aleaciones.

Generalmente se da como porcentajes (%) en un peso aunque algunas veces para fines de investigación se da como porcentaje en átomos.

REACCIONES ENTRE FASES EN DIAGRAMA DE EQUILIBRIO

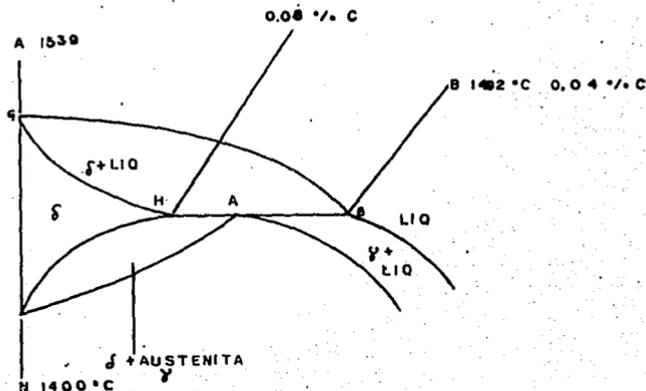
Tres son las reacciones que con más frecuencia se presentan en diagramas de equilibrio son:

1.- *PERITECTICA*: Esta reacción involucra la transformación de dos fases, una líquida y una sólida en una fase sólida siendo esta última distinta de la primera esto se da en condiciones de enfriamiento. El paso de una fase sólida a líquida o más una sólida, (Distinta de la primera) se da en condiciones de calentamiento la reacción general es:



(VER SIGUIENTE FIG.1.2)

Fig 1.2



En los aceros que tiene una reacción peritética para una temperatura 1493°C con $0.16\% \text{C}$, la reacción es :



Con el líquido teniendo $0.15\% \text{C}$, la fase δ con $0.4\% \text{C}$ y la fase γ con $0.16\% \text{C}$ estas son las composiciones de las tres fases que se encuentran en equilibrio a 1492°C .

2.- **REACCION EUTECTICA:** Esta reacción involucra la transformación de la fase líquida en dos fases sólidas en condiciones de enfriamiento sería el paso de dos fases sólidas a un líquido la reacción general es:

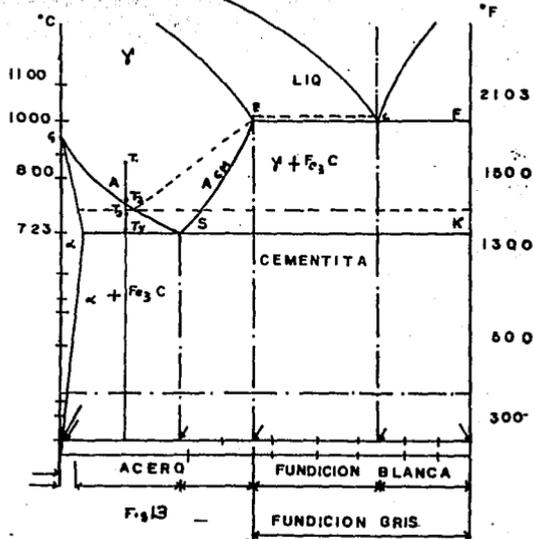


Ejemplo:

En la función para $4.3\% \text{C}$ y 1146°C tenemos la relación de: $L \text{ ENF} \rightarrow \text{CAL} + \gamma + \text{CM}$ (LEDEBURITA).

γ = AUSTENITA CM = CEMENTITA O CARBURO DE Fe

Aquí el líquido en consistencia con las dos fases sólidas tiene una composición de $4.3\% \text{C}$, la fase γ tiene $2.11\% \text{C}$ y la CM tiene $6.67\% \text{C}$. (Ver siguiente figura 1.3)



3.- REACCON EUTECTOIDE: Involucra la transformaciones en enfriamiento de una fase sólida en otras dos fases sólidas distintas entre si y distintas de la primera en calentamiento se da la transformación inversa la reacción general es :



Ejemplo:

En los Aceros para 727°C y 0.77 % C encontramos la reacción $\gamma \text{ ENF} \rightarrow \text{CAL} \leftarrow \alpha + \text{cm}$

La fase α tiene una composición de 0.025 % C, la γ de 0.77 % C y la CM de 6.67 % C.

1.4.- ACEROS

LOS ACEROS SE DIVIDEN EN

ACEROS HIPOEUTECTOIDES	$0.008 < \% C > 0.77 \% C$
ACERO EUTECTOIDES	$0.77 \% C$
ACEROS HIPEREUTECTOIDES	$0.77 \% C \leq 2.11 \% C$

CONSIDERANDO EL ENFRIAMIENTO DE UN ACERO HIPEREUTECTOIDE

Suponemos que tenemos nuestro acero en la región austenítica a una temperatura T_1 y que se ha mantenido esta para formar una fase γ .

A partir de T_1 enfriamos lentamente nuestra aleación y lo primero que observamos es que a una temperatura T_2 , aparecen los primeros embriones de fase α ó ferrita, estos embriones en equilibrio con fase γ tienen una composición dada por el punto K, podemos considerar que los granos de fase γ tienen una composición dada por A_2 igual a la composición del acero, dada por el punto Q, si continuamos enfriando el acero bajo condiciones de equilibrio, al llegar a T_3 , la fase α posee una composición dada por el punto m' , y la fase γ una composición dada por n' la cantidad relativa de cada fase es:

$$\gamma = (Q - m/n - m) \times 100 \quad \alpha = (n - Q/n - m) \times 100$$

Continuando enfriando lentamente nuestro material para T_4

a 728°C la fase gama tiene una composición de 0.89 % C y la fase α 0.025 % C su cantidad relativa es :

$$\% \gamma = (0 - 0.025/0.89 - 0.0025) \times 100$$

$$\% \alpha = (0.77 - 0/0.77 - 0.0025) \times 100$$

Nota: para T_1, T_2, T_3 y T_4 (Ver la figura 3)

DE AQUÍ SACAMOS EN CLARO LO SIGUIENTE

- 1.- Para enfriamientos lentos (en condiciones de equilibrio) el diagrama nos indica las composiciones por las que va pasando cada fase en una región bifásica.
- 2.- La composición de la fase γ varía con el enfriamiento (o con el calentamiento) de acuerdo a la curva G - S. G-S (Es la línea de temps. superiores critica)

ACERO EUTECTOIDE

En acero eutectoide a partir de la fase γ (728°C), se inicia la reacción eutectoide transformándose la γ en perlita ($\alpha + \text{CM}$) para los enfriamientos subsecuentes después de los 728°C el material ya no sufre cambio alguno por lo que la fase presente a temperatura ambiente será la "Perlita" un acero eutectoide, es decir con la composición eutectoide de 0.84 % de C, será un acero 100 % perlítico.

ACERO HIPEREUTECTOIDE

Un acero hipereutectoide enfriado desde la fase gama va a pasar por las siguientes etapas :

Durante el enfriamiento lento (en condiciones de equilibrio), el acero va a alcanzar la temperatura T que es la temperatura a la que corta la curva E' - S y este corte nos indica la formación de los primeros embriones de la fase cementita que aparece en los límites de grano de la austenita estos embriones tiene una composición 6.67 % C.

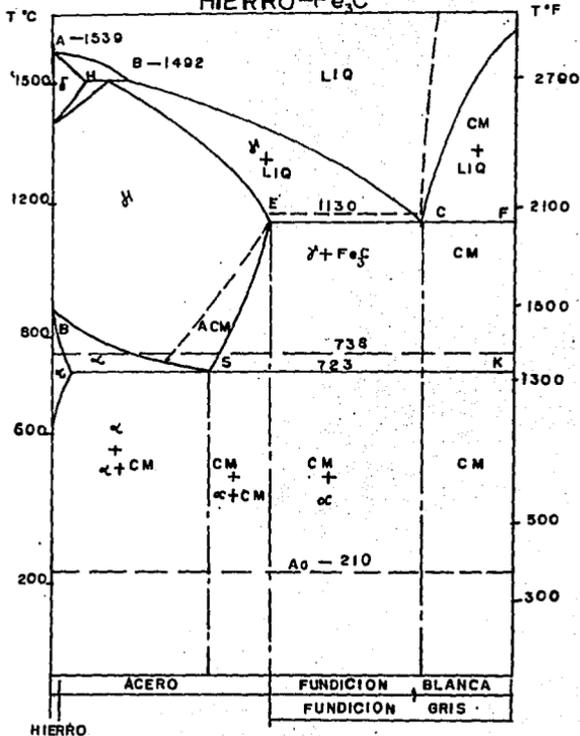
Nota: E'-S (es la línea de temperatura crítica en la zona hipereutectoide).

La Austenita a esta temperatura T practicamente no cambia su composición inicial conforme avanza el enfriamiento, los embriones de fase "CM" pasan a ser nucleos los cuales al aumentar de tamaño, provocan una disminución en la cantidad de Austenita la cual experimentará cambios en su composición dada por la curva E'-S a la temperatura T₁, la composición "Austenita" esta dada por el punto P y la composición de la "Cementita" por el punto q la cantidad relativa a esas dos fases es :

$$\% \alpha = (q - R/q - p) \times 100 \quad \% CM = (R - p/q - p) \times 100$$

(figura 1.4)

DIAGRAMA HIERRO-Fe₃C



1.5.-FUNDICIONES

Definición: Es una aleación Fe - C, con un contenido de este último en el rango de 2 - 6.7 % C y una cantidad importante de otros elementos tales como S, P, Mn, Cu sin embargo la mayor parte de hierros comerciales tiene de 2.5 hasta 4.3 % C.

Nota: S=Azufre, P=Fosforo, Mn=Manganeso y Cu=Cobre.

A diferencia de los aceros, los hierros fundidos no pueden trabajarse ni en frío ni en caliente por lo que las piezas hechas de este material, se obtienen a partir de vaciado del hierro fundido en moldes con la forma aproximada de la pieza requerida, maquinándola al final para darle las dimensiones deseadas.

Aunque los hierros fundidos son frágiles y tienen propiedades más bajas en resistencia que los aceros, son baratos y pueden fundir más rápidamente que los aceros, además poseen otras atractivas propiedades. Los hierros fundidos se clasifican de acuerdo a su estructura metalográfica siendo las variables que más afectan las siguientes: el contenido de carbono, el contenido de elementos de aleación o impurezas y rapidez de enfriamiento durante y después de la solidificación.

DESCRIPCION DE ESTRUCTURAS:

α = FERRITA: Tiene una estructura cristalina BCC esta fase en los aceros a temperatura ambiente está hasta los 723°C.

HIERRO PURO: Lo encontramos hasta 910°C, es la más blanda que se obtiene en los aceros a temperatura ambiente prácticamente se le considera como hierro puro.

PERLITA = α + CM Compuesta por dos: ferrita más cementita, en los aceros se puede encontrar como una matriz de ferrita en la cual se encuentran laminillas de cementita

en los puntos de eutectoide es cuando tenemos la mejor distribución de estas laminillas, la cual le da al acero dureza y buena ductilidad (100%) perlita su tamaño y su distribución depende de la temperatura de enfriamiento para enfriamientos lentos, perlita burda, y para enfriamientos rápidos, perlita fina.

CEMENTITA O CARBURO DE HIERRO : Tiene una estructura romboédrica su fórmula (Fe_3C), como todos los carburos poseen gran dureza es la fase más dura que aparece en los aceros, cuando no ha estado tratado, en los aceros hipoeutectoides forma parte de la perlita lo mismo sucede en los aceros eutectoides, para aceros hipereutectoides se puede encontrar en dos formas como fase aislada y como parte de la perlita en forma de laminillas metidas en una matriz de ferrítica.

AUSTENITA γ : Tiene una estructura FCC en el hierro puro, aparece a partir de los 910°C y termina 1400°C en los aceros dependiendo de la aleación la tenemos de los 723°C hasta los 1493°C .

FASE δ Tiene una estructura BCC, aparece a 1400°C y se tiene presente hasta que se funde el metal.

BAINITA = $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$: La austenita produce una estructura donde la ferrita y el hierro carburo no son laminares. La bainita presenta una microestructura plumosa o circular (parecida a las agujas).

MARTENSITA = $\alpha + \text{CH}$: La martensita produce una estructura con laminillas en forma de agujas mucho más finas que en la bainita, fase que se obtiene por un enfriamiento muy brusco a partir de la austenita, para que pueda aparecer la martensita es necesario alcanzar la temperatura M_s y para terminar el proceso tenemos que llegar a la temperatura M_f .

α = BCC FERRITA

γ = FCC AUSTENITA

δ = BCC CH = ROMBOEDRICA

PERLITA = α + CM

MARTENSITA = δ + CM

723°C TEMPERATURA EUTECTOIDE

1130°C TEMPERATURA EUTETICA

1493°C TEMPERATURA PERITECTICA

ACEROS { HIPOEUTECTOIDE 0.008 % C < % C < 0.8 % C
EUTECTOIDE % C = 0.8 100 % PERLITA
HIPEREUTECTOIDE 0.8 % < % C \leq 2 %

FUNDICIONES { HIPOEUTECTICA 2% < % C < 4.3 %
EUTECTICA 4.3 % C
HIPEREUTECTICA 4.3 % < % C \leq 6.67 %

0.025 ----- 0.4 % C BAJO

0.4 ----- 0.6 % C MEDIO

0.8 ----- 1.2 % C ALTO

1.6.-CLASIFICACION DE LOS ACEROS POR SU APLICACION

Tan importante como la clasificación química es la clasificación de los aceros por su aplicación, en esta clasificación juega un papel primordial las propiedades mecánicas de los aceros y también su composición química.

Las Normas Mexicanas para los aceros permite agruparlos, según su aplicación de la manera siguiente:

- 1.- Aceros estructurales para puentes y edificios.
NOM - B38
- 2.- Acero estructural.
NOM - B254
- 3.- Acero estructural con límite de fluencia de 29.5
NOM - B99
- 4.- Acero estructural baja aleación y alta resistencia.
NOM - B282
- 5.- Acero estructural de alta resistencia.
NOM - B285
- 6.- Acero estructural al manganeso - vanadio.
NOM - B284
- 7.- Acero estructural para locomotores y carros.
NOM - B263
- 8.- Acero estructural para barcos
NOM - B262

FORMAS DE LOS PRODUCTOS LAMINADOS : Los productos laminados de acero estructural tienen varias formas que pueden clasificarse como sigue:

PLANCHAS: Son productos laminados de sección transversal rectangular cuyo espesor va de 5.1 a 203 mm y su ancho de 203 a 3657 mm.

PERFILES ESTRUCTURALES: Son productos laminados cuya sección transversal puede tener la forma de I, H, ó C y ángulo cuya dimensión mayor debe ser de 76mm cuando menos.

BARRAS: Son productos laminados cuya sección transversal tiene forma circular, cuadrada y hexagonal de cualquier dimensión, ó bien, forma rectangular de 5.16 mm de un espesor mínimo por 152 mm máximo de ancho y secciones rectangulares de 5.04 mm de espesor mínimo y ancho que va de 152 a 203 mm.

PERFILES DE BARRA: Son formas laminadas cuya sección transversal tiene la forma de I, H, A, C y L siempre y cuando que las dimensión mayor de éstas secciones no lleguen a los 76 mm.

TUBOS: Son productos formados en caliente y soldados a tope o formados en caliente sin costura, de sección transversal anular, cuadrada ó rectangular huecas ó cualquier otra sección cerrada.

TABLAS O ESTACAS: Son productos laminados con una sección transversal de forma tal que puedan articularse varias de ellas.

1.7.-IDENTIFICACION DE LOS ACEROS ESTRUCTURALES

Debe de identificarse mediante el número de la norma y en su caso, el tipo de la calidad del acero.

Ejemplo: Acero estructural para puentes y edificios.

NOM - B38 ACIDO

NOM - B38 BASICO

NOM - B38 BESSEMER ACIDO

Este acero es equivalente al acero ASTM A7.

NOTA: NOM: Norma Oficial Mexicana.

B: Aceros Bessemer.

1.8.-ACEROS PARA MAQUINARIA

Es un poco difícil establecer una línea precisa de separación entre los aceros estructurales y los aceros para maquinaria. De hecho los aceros estructurales, todos ellos tienen extensa aplicación en la construcción de maquinaria y equipo en general, principalmente en la construcción de los chasis, soportes, etc; para todo tipo de máquinas, equipos y aparatos utilizados en la industria y muchos bienes de consumo duraderos.

Lo importante en la selección de aceros para la construcción de aparatos, equipo y maquinaria, son las propiedades mecánicas del material y, en forma secundaria, la composición química, esta composición química se vuelve muy importante más que las propiedades mecánicas, en la construcción de aparatos y equipo para las industrias de procesos especialmente en aquellos componentes o subconjuntos que debe soportar altas o bajas temperaturas o bien, que están expuestos, que puedan considerarse como corrosivos.

La presentación de las tablas de los aceros para maquinaria se hacen pues dando primeramente las propiedades mecánicas de estos materiales y en seguida la composición química de los mismos.

En la construcción de maquinaria, equipo y aparatos se emplea el acero en diferentes formas, la mayoría de ellas laminadas en caliente y algunas extruidas, estiradas ó trefiladas. Las principales formas con las que se producen estos aceros son:

Barras de diversas secciones (redondas, cuadradas, rectangulares, etc.).

Planchas de hasta 200 mm de espesor.

Láminas de muy diversos calibres o espesores.

Tubos con y sin costura, hasta de 1120 mm de diámetro.

Alambres para cables de retención y para resortes, de diversos calibres.

Por composición química, estos aceros pueden clasificarse, como ya se indicó anteriormente, en aceros al carbono, aceros aleados y aceros inoxidable.

1.9.-ACEROS PARA HERRAMIENTA

Aunque cualquier acero se puede emplear en la elaboración de herramientas, existe un grupo de aceros que por sus características dan resultados óptimos en la elaboración de diversas herramientas, a éste grupo de aceros especiales se les denomina comúnmente aceros para herramientas.

Estas características son muy variables y dependen del diseño y de la aplicación posterior de la herramienta. Las más importantes son las siguientes:

Gran capacidad de endurecer por medio del temple.

Excelente resistencia al desgaste y a la abrasión.

Baja deformación durante los tratamientos térmicos.

Resistencia al ablandamiento al calentarse.

En forma general, estos atributos son obtenidos con un alto contenido de carbono y de elementos de aleación.

Los aceros para herramientas se caracterizan por su alta calidad, la mayor parte de ellos se obtiene de hornos eléctricos y por consiguiente, tienen menos inclusiones no metálicas que los aceros aleados fabricados en hornos Siemens - Martín. Las operaciones de trabajo en caliente y de la limpieza superficial, realizadas con extremo cuidado, evitan al acero defectos internos o externos. La calidad del acero obtenido reduce al mínimo el peligro de agrietamiento durante el tratamiento térmico de pinzas de formas complicadas y también, produce una mayor tenacidad a los niveles de elevada dureza necesarios en la mayor parte de las aplicaciones de las herramientas.

El trabajo de normalización para estos aceros ha sido muy arduo, pero se han podido agrupar de la siguiente manera:

Aceros de temple en agua

Aceros en moldes

Aceros para trabajar a alta temperatura

Aceros con resistencia al impacto

Aceros de alta velocidad

Aceros para trabajo en frío

Aceros de baja aleación

Esta clasificación no es la única para los aceros llamados para herramientas, pero es la más adecuada desde el punto de vista de su utilización o aplicación.

ACEROS TENPLABLES EN AGUA: Aunque todos los aceros para herramienta son templables existe un grupo de ellos que se clasifican conforme al medio que se emplea para el enfriamiento, en la operación de templado.

Los aceros templables en agua se identifican con la letra 'W'.

ACEROS PARA MOLDES: Los moldes llamados permanentes, son realmente herramientas para trabajar otros materiales, es por esto que los aceros desarrollados especialmente para la fabricación de moldes permanentes se han clasificado como aceros para herramientas estos aceros se identifican con la letra 'P'.

ACEROS PARA TRABAJAR A ALTAS TEMPERATURAS: Los aceros para fabricar herramientas que pueden cortar metales aún cuando la temperatura de trabajo sea elevada, se les conoce como 'aceros para trabajo en caliente'.

Estos aceros se identifican por medio de la letra 'H' y existen dos variables, al cromo y al tungsteno. Los aceros para trabajar a alta temperatura admiten, en términos generales, velocidades de corte superiores a las que pueden admitir los aceros de alta velocidad.

ACEROS RESISTENTES AL IMPACTO: El nombre de estos aceros indica claramente cuales son las aplicaciones más importantes. Todo tipo de herramienta como matrices, dados, etc.; que sirven para trabajar los materiales por medio de golpes ó aplicaciones bruscas de fuerzas y presiones.

Los aceros resistentes al impacto se identifican con la letra 'S'.

ACEROS DE ALTA VELOCIDAD: Estos aceros se emplean para la fabricación de herramientas de corte de materiales, que pueden funcionar a altas temperaturas de corte.

El término alta velocidad dice poco en relación a términos absolutos, pero se toma como punto de referencia las velocidades de corte que pueden dárseles a las heramintas de corte fabricadas con aceros al carbono. Estos aceros pueden dividirse en aceros al molibdeno y aceros al tungsteno y se les identifica con las letras 'M' y 'T' respectivamente.

ACEROS TRABAJADOS EN FRÍO: Estos son los aceros que se emplean en la fabricación de dados, matrices, etc. para el trabajo de materiales en frío. Se caracterizan por un cambio adimensional extremadamente, bajo el tratamiento térmico. Generalmente se emplea al aire, su uso se limita a temperaturas debajo de los 480°C. Se les identifica con la letra 'D', en la mayoría de los casos y aquellos que además son especialmente resistentes al desgaste, se les identifica con la letra 'A'.

ACEROS DE BAJA ALEACION: Estos aceros son similares al grupo 'W', de aceros para herramienta con la adición de cromo y otros elementos para proporcionar mayor resistencia al desgaste y a la templabilidad.

Los usos típicos son variados en aplicaciones de máquinas y herramientas dónde se requiere alta resistencia al desgaste así como una buena tenacidad, por Ejemplo: rodamientos, rodillos, dados de alimentación, platos para clutch (embrague) y partes para mandril.

Estos aceros para usos especiales conocidos como baja aleación se identifican con la letra 'S'.

1.10.--ACEROS EMPLEADOS EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ: La industria automotriz que en México se ha desarrollado rápidamente en los últimos años tiene en ciertos casos necesidades muy específicas en lo tocante a la composición química de los aceros que se emplean en algunas piezas, componentes de carrocerías, chasises, suspensiones, etc.

El que la industria automotriz requiera en algunos casos de aceros de composición química especial no significa que sean éstos los únicos empleados en este tipo de construcción mecánica para ello se requiere todo tipo de aceros, incluso los estructurales. En la industria automotriz se emplean todo tipo de aceros, principalmente los aceros para maquinaria.

1.11.--ACEROS PARA LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION: En la industria de la construcción se emplean principalmente los aceros clasificados como estructurales y los aceros para cables, alambón y varilla de refuerzo para concreto.

Para las varillas no se especifica la composición química porque puede variar ampliamente de acuerdo con la materia prima que se emplea para producirla.

CAPITULO DOS
DIAGRAMA TTT - CCT

2.1.-OBTENCION DEL DIAGRAMA TTT

(Transformacion - Tiempo - Temperatura)

Cuando el acero se mantiene a alguna temperatura mínima a la cual la austenita es estable dentro de un horno ó después se saca del horno y se templea en un baño de sales ó de plomo fundido que se encuentra a alguna temperatura comprendida entre la temperatura ambiente y 715°C y se mantiene constantemente con una variación en tiempo, la cual se transformará en austenita.

La forma del diagrama TTT se tiene representada por la figura 2.1. El cuadro de la parte superior muestra el porcentaje de austenita transformada contra el tiempo de permanencia a temperatura constante.

Para un acero que ha sido austenizado, la información sobre la transformación está dada por una serie de curvas de reacción, cada una obtenida a diferente temperatura y pueden resumirse en un diagrama como el ilustrado en la parte inferior de la figura 2.1.

Este tipo de diagrama constituye el diagrama de transformación isotérmica ó curva 'S' del acero, que además muestra el tiempo requerido por la austenita para iniciar su transformación, también señala el tiempo a transcurrir para que el 50% de austenita se transforma completamente a cualquier temperatura constante en el rango cubierto por las curvas. Así los diagramas TTT de los aceros puede considerarse como un mapa en el cual se muestra la transformación que tiene la austenita en función de la temperatura y del tiempo cuando el acero es templado desde la temperatura de austenitización (hasta alguna

temperatura comprendida entre la temperatura ambiente y 715°C) y se mantiene constante con una variación en el tiempo.

CURVAS DE REACCION: Las curvas de reacción fueron obtenidas por Jhonson y Mehl basandose por ello en la velocidad de nucleación.

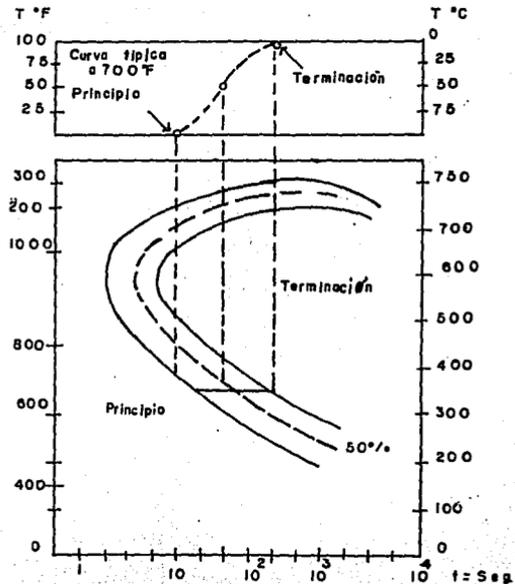


FIGURA 2.1

Diagrama que muestra como se resume las condiciones de la transformación isotérmica mediante el diagrama T - t (tomada del Atlas of Isothermal Transformation Diagrams, U.S. Steel Corporation)

La velocidad de nucleación está definida por el número de núcleos que se forman en un volumen unitario por segundo ($\text{nm}^3/\text{seg.}$), así la velocidad de nucleación es una función del tiempo y se representa con la letra "N".

La austenita durante el enfriamiento se transforma en perlita a 723°C , siendo ésta la temperatura eutécticoide.

Si se considera una temperatura apenas por debajo de la temperatura eutécticoide, la velocidad de nucleación es muy pequeña, dando lugar a la formación de unos cuantos núcleos de perlita, si se tiene una temperatura todavía menor que la anterior la velocidad de nucleación aumenta y la austenita se transforma en perlita en menor tiempo.

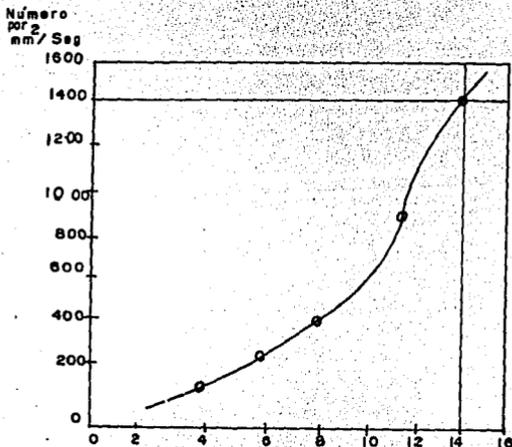


FIGURA 2.2

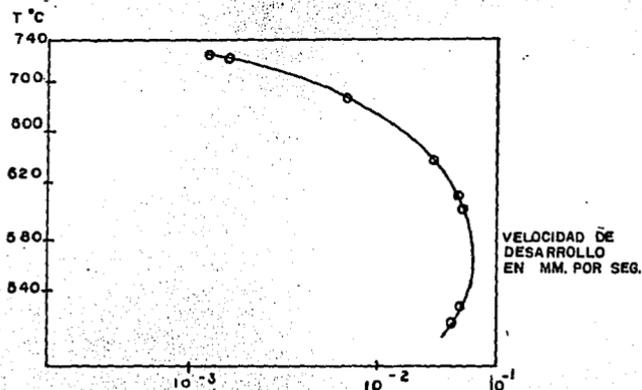
Muestra el incremento de número de núcleos de la perlita en función del tiempo.

La velocidad de nucleación (N) de la perlita en función del tiempo, acero eutécticoide transformado a 630°C (Mehl Robert F. y Dubé Arthur, Phase Transformation in Solids, Jhon Wiley and Son, Inc, New York, page 545).

La velocidad de desarrollo está definida por la letra "G" y es igual al flujo de átomos que deja la región austenítica para pasar a formar la laminilla de cementita que constituye a la perlita. La figura 2.3 muestra la curva de velocidad de desarrollo en función a la temperatura.

La velocidad de desarrollo (G) de la perlita en función de la temperatura de reacción en una aleación hierro - carbono de gran pureza de composición eutectoide (según Fryed, J.H.Jr Stansbory E. E. y Mac Elroy D.L. Trans AIME, 197, 1953, pag 219).

Fig.2.3



A temperatura justamente debajo de la eutectoide, la velocidad de desarrollo aumenta con rapidez conforme disminuye la temperatura alcanzando un máximo a 600°C y entonces de nuevo a temperatura más baja como se observa en la figura 2.3.

Considerando la velocidad de nucleación y la velocidad de desarrollo a la que se forma la perlita durante el enfriamiento en condiciones de equilibrio desde el estado austenítico y utilizando las curvas de la figura 2.2 y 2.3

junto con la ecuación 5.1 establecida por metalurgistas ingleses Jhonson y Mehl, se determina la cantidad de austenita transformada a perlita en función del tiempo, la ecuación es:

$$F(t) = 1 - e^{-(\pi/3) N G^3 t^4} \dots 5.1$$

F(t) = Fracción de austenita transformada a perlita.

N = Velocidad de nucleación.

G = Velocidad de desarrollo.

t = Tiempo.

Si los resultados que se obtienen al sustituir valores en la ecuación anterior, se grafican en una escala logarítmica de tiempo contra la fracción de austenita transformada a perlita, la curva que se obtiene es como la ilustrada por la figura 2.4 llamada curva de reacción.

La curva de reacción se obtiene prácticamente según Jhonson y Mehl de la manera siguiente; varias probetas pequeñas de acero de composición eutectoide se calientan dentro de un horno a la temperatura de austenitización hasta lograr una estructura homogénea, momentos después se puede sacar del horno y se temple en baños de sales que se encuentran a diferentes temperaturas predeterminadas (Entre la temperatura ambiente y 715°C), se mantiene dentro del baño de sales variando el tiempo de permanencia para cada temperatura, se saca del baño y se deja enfriar al aire, en seguida se prepara para el análisis metalográfico en donde se determina la cantidad de austenita transformada.

La fracción de producto de transformación de austenita a perlita aumenta conforme se incrementa el tiempo como se observa en el cuadro superior del diagrama de la figura 2.1 anteriormente citada.

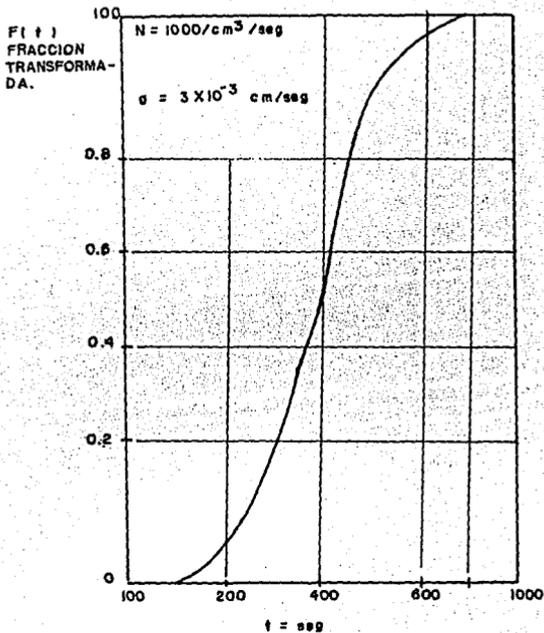


FIGURA 2.4

Curva de reacción teórica obtenida de la ecuación de Johnson y Mehl (Mehl R.F, y Dube A. Phase Transformation in Solids Jhon Wiley and Sons, Inc. New York 1951 page 545).

2.2.-IMPORTANCIA Y FORMA DE LOS DIAGRAMAS TTT

La forma de cada una de las curvas que constituyen el diagrama TTT y su posición con relación al eje del tiempo depende de la composición y tamaño de los granos de la austenita que se transforma.

Ciertos elementos de aleación cambian la curva TTT en forma característica, esto permite la clasificación de los aceros en base al tipo de curva, para los fines del presente trabajo, es suficiente indicar que un incremento en el contenido de aleación ó en el tamaño de grano austenítico siempre retarda la transformación de la austenita en otros constituyentes.

Tomando como referencia la figura 2.1 se observa que en la parte inferior existen dos líneas curvas en forma de "C", éstas reciben el nombre de curvas de transformación isotérmicas ó curvas TTT, en éste caso para un acero de composición eutectoide.

Para su análisis, la curva de la izquierda marca el inicio de la transformación de austenita a perlita, así también el tiempo necesario que debe transcurrir para que comience la descomposición de la austenita en otros constituyentes.

La curva continua de la derecha dónde marca el fin de la transformación de la austenita en perlita ó bainita, es decir, el tiempo y la temperatura necesaria para que la transformación se complete.

El área comprendida entre la curva de comienzo y fin de la transformación limita el tiempo que es necesario, para que a diferentes temperaturas constantes se efectúe la transformación completa de austenita a perlita ó bainita, en otras palabras, conforme va transcurriendo el tiempo y la temperatura permanece constante, las fases sólidas van variando desde toda la austenita hasta toda la perlita ó

bainita, según se muestra en el diagrama de izquierda a derecha.

Las curvas TTT son de gran importancia debido a la utilidad práctica que tienen, ya que en un momento dado se puede dar uso del diagrama de transformación isotérmica para efectuar algún tratamiento térmico como lo puede ser el normalizado, templado y revenido de los cuales se hablará en su oportunidad.

Conforme a lo analizado en los aceros que contienen menos de 0.8 % de C, (acero hipereutectoide) el constituyente preeutectoide se forma durante, el enfriamiento lento a temperaturas mayores de 723°C. La cantidad de ferrita preeutectoide que se precipita durante el enfriamiento esta en función directa de la cantidad de carbono presente en la aleación.

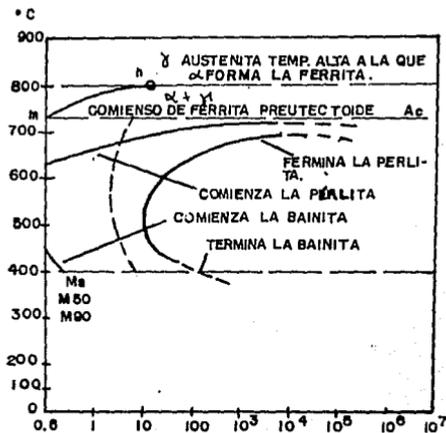


FIGURA 2.5

Diagrama de transformación isotérmica para un acero hipoeutectoide con 0.35 % Carbono y 0.37 % Manganeso.

Como se observa en la figura 2.5 el diagrama corresponde a un acero al carbono de 0.35 % C debido a la formación primaria de ferrita proeutectoide, los diagramas TTT de los aceros hipoeutectoides, aparece la línea 'mn' en la parte superior izquierda del diagrama, anterior mencionado.

En el caso de los aceros hipereutectoides, estos contienen más de 0.8 % C y menos del 2.1 % C, durante el enfriamiento lento, desde el estado austenítico el constituyente proeutectoide que se precipita es la cementita y ésta se incrementa conforme aumenta el procedimiento de carbono en la aleación.

El diagrama TTT de la figura 2.6 corresponde a un acero al carbono de 1.3 % en la parte superior izquierda se observa la línea 'mn' la cual representa el principio de la transformación de la austenita en cementita proeutectoide.

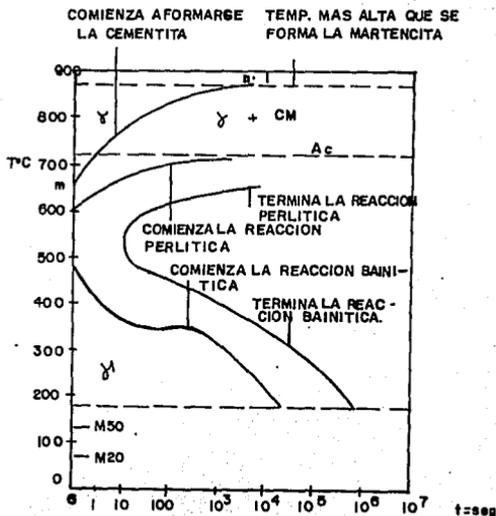


Diagrama de transformación isotérmica para un acero hipereutectoide con 1.13 % de carbono a 0.30 % de Manganeso.

2.3.-INTERPRETACION DE LOS DIAGRAMAS TTT

Estos no son difíciles de interpretar si se tiene los conocimientos básicos de como se forman dichos diagramas.

Los diagramas de Transformación - Tiempo - Temperatura, marcan los límites de transformación de la austenita en otros constituyentes, tanto del inicio como del fin de la misma. Estos límites se toman en cuenta para determinar la temperatura y tiempo necesario para realizar un proceso térmico.

Una clara identificación de las zonas de transformación ayuda bastante para el entendimiento e interpretación de los diagramas Transformación - Tiempo - Temperatura.

Para analizar un diagrama TTT, H. Holivet considera un diagrama de composición eutectoide que divide en tres zonas principales que son:

Zona superior, Intermedia e Inferior

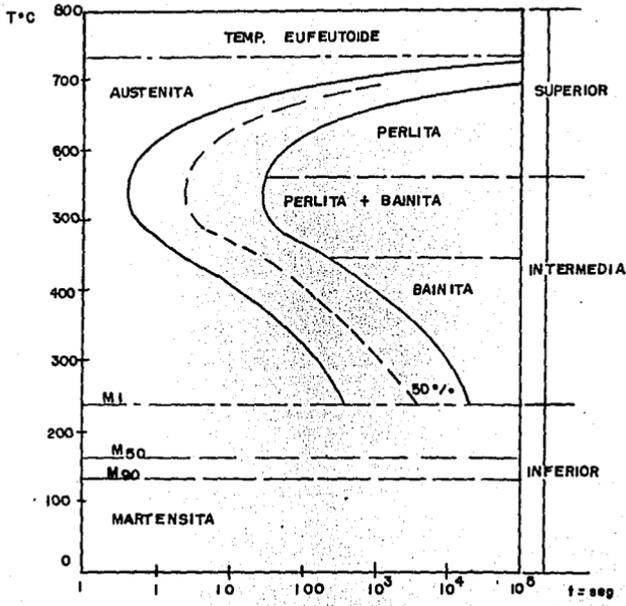


FIGURA 2.7

Diagrama completo de transformación para un acero eutectoide. Obsérvese que este acero no es una aleación hierro - carbono de gran pureza si no un acero comercial, (ASI 1060) 0.79 % de Carbono y 0.78 % de Manganeso el efecto del Manganeso se determinará. (Adaptado del Atlas of Isothermal Transformation Diagram Unitet State. Butusi Corporation Pittburgh 1961).

La zona superior comprende el intervalo de temperatura de 723°C a 580°C , rango en el cual ocurre la transformación de austenita a perlita. A una temperatura apenas por debajo pero muy cerca a 723°C ocurre muy lentamente la transformación de austenita a perlita, dando lugar a la formación de una estructura perlítica totalmente gruesa.

Si la transformación isotérmica se realiza a una temperatura menor que la anterior, por decir a 500°C , el resultado de la transformación es una estructura de perlita cada vez más fina y por consiguiente la dureza de la estructura obtenida es mayor debido al menor distanciamiento de las placas de cementita.

La zona intermedia se considera como la zona de temperatura comprendida entre 580° y 220°C ; en este intervalo generalmente ocurre la transformación de austenita en bainita.

La bainita es una estructura formada por ferrita más carburo, la diferencia que existe con respecto a la perlita es que en lugar de estar formado por placas alternantes tiene una estructura plumosa ó acircular.

En la bainita el constituyente que se forma primero a partir de la austenita es la ferrita seguida por la cementita. La dureza de la bainita es mayor en comparación con la dureza que posee la perlita, en este aumento de dureza se debe a que el carburo se está volviendo cada vez más fino.

La bainita que se forma, en un rango de temperaturas de 580°C a 450°C se conoce como bainita superior y está constituida por una serie de agujas que componen, la bainita superior, en este rango de transformación las agujas que componen la bainita se hacen cada vez más finas lo que a su vez ocasiona que la dureza sea mayor que la bainita superior.

La zona inferior contiene la fase más dura llamada martensita. En un acero de composición eutécticoide como el que realiza la región de martensita se encuentra en el intervalo a temperatura de 220°C y la temperatura ambiente.

La estructura de la martensita corresponde a una solución sólida intersticial sobresaturada de carbono en hierro con una red tetragonal centrada en el cuerpo, su microestructura se caracteriza por tener una forma tipo aguja, que en algunas ocasiones se la asemeja a un haz de pajitas por la forma que presenta al ser observada al microscopio.

La martensita se forma de manera casi instantánea y no hay periodo de nucleación.

En la formación de la martensita existe un cambio rapidísimo que consiste en la transformación de una estructura tetragonal de cuerpo centrado.

La línea 'Ms' indica la temperatura a la que se inicia la formación de la martensita a partir de la austenita y la línea 'Mf' marca la temperatura del fin de transformación de austenita a martensita.

En los aceros al carbono los diagramas TTT se desplazan de izquierda a derecha según se incrementa el contenido de carbono en la aleación hasta que alcanza 0.8% de carbono, si éste es mayor el diagrama tiende a desplazarse nuevamente hacia la izquierda.

2.4.- APLICACIONES DE LOS DIAGRAMAS TTT

Los aceros que se encuentran en el mercado poseen propiedades mecánicas diferentes, siendo ésta la base para su clasificación. La dureza, tenacidad, resistencia a la tensión, etc. son algunas de las propiedades mecánicas que

se consideran importantes en el momento de seleccionar algún material metálico como lo es el acero.

Los diagramas TTT se utilizan para realizar algunos tratamientos térmicos entre los que se puede citar el recocido, templado y revenido.

Los diagramas TTT se consideran para predecir las transformaciones que tiene la austenita en otros constituyentes durante el enfriamiento en condiciones de equilibrio. En estos diagramas se lee con toda claridad el tiempo necesario y temperatura adecuada para determinado material pueda ser tratado térmicamente.

El poder utilizar en un momento dado los diagramas TTT para los aceros al carbono, esto debe a que son los más utilizados, en los procesos.

2.5.-DIAGRAMA DE TRANSFORMACION ENFRIAMIENTO CONTINUO

(CCT)

Varios de los tratamientos térmicos efectuados en los aceros son más bien por enfriamiento continuo que por enfriamiento isotermico. Como resultado, se han desarrollado diagramas que representan la transformación de austenita a diferentes velocidades de enfriamiento. En general, el enfriamiento continuo desplaza el inicio de la transformación de la austenita hacia menores temperaturas y tiempos más prolongados.

2.6.-DIAGRAMA CCT PARA ACEROS AL CARBON DE COMPOSICION EUTECTOIDE

La figura 2.8 muestra un diagrama CCT derivado de un diagrama TTT y su relación con este último.

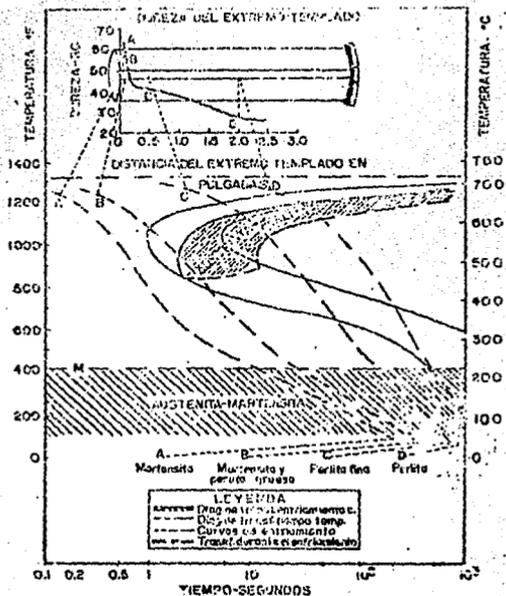


FIGURA 2.8

Correlación de las transformaciones por enfriamiento continuo e isotérmico con los datos de prueba de dureza del extremo templado de un acero al carbono eutectoide.

FALLA DE ORIGEN

También en la parte superior de la figura, se muestra una barra templada con una correspondiente curva de dureza (acero eutectoide), que se obtiene apartir del ensayo Jominy. Esta barra es templada en agua unicamente en uno de sus extremos, por lo tanto, la velocidad de enfriamiento es máxima en el extremo templado y disminuye al incrementarse la distancia desde dicho extremo.

La velocidad de enfriamiento en varias posiciones de la barra de Jominy se han medido mediante termopares, cuatro curvas se han sobrepuesto en la parte, inferior de la figura 2.8 y cada una representa una velocidad de enfriamiento diferente la cual va disminuyendo al aumentar la distancia del extremo de la barra templada.

Conforme la velocidad de enfriamiento va disminuyendo a lo largo de la barra, la austenita se transforma en microestructuras que contienen mayores cantidades de perlita.

También en la parte superior de la figura 2.8, se muestra la disminución de la dureza asociada con la transformación de la austenita a martencita, y perlita al disminuir la velocidad de enfriamiento.

Cuatro posiciones representativas A, B, C y D a lo largo de la barra se relacionan mediante las curvas de enfriamiento correspondientes de los diagramas TTT y CCT.

La austenita en una posición particular se transforma cuando su curva de enfriamiento pasa a través de la zona sombreada del diagrama CCT.

El tipo de microestructura resultante de la transformación está dado en cada zona y la microestructura final al llegar a la temperatura ambiente se indica en la parte inferior de la gráfica.

Esta relación muestra el origen de las estructuras de la barra templada y la razón por la cual hay cambios de dureza a lo largo de la misma así en el punto 'A' la dureza es alta, porque la velocidad de enfriamiento fue lo suficientemente rápida para evitar la zona de formación de perlita en el diagrama CCT y la austenita se transforma totalmente en martensita dura.

En el punto 'B' la dureza es menor debido a que la curva de enfriamiento interseca la zona de perlita y la austenita se transforma en martensita durante el enfriamiento a una temperatura mucho más baja.

La velocidad de enfriamiento en los puntos 'C' y 'D' es suficientemente lenta con la relación al diagrama CCT y permite la transformación completa en la zona de perlita.

La estructura en 'C' y 'D' es de perlita que es más gruesa, y más blanda en 'D' que en 'C'.

2.7.-INTERPRETACION DEL DIAGRAMA CCT

Los diagramas de enfriamiento continuo son los más utilizados en la industria del acero, de ahí la importancia de saber como interpretarlos. Al igual que los diagramas TTT, los diagramas CCT, marcan los límites de transformación de la austenita en otros constituyentes, de igual forma los diagramas CCT de un acero de composición

eutectoide no son útiles para aceros de bajo y alto contenido de carbono. Aunque la finalidad del estudio se refiere solamente a aceros al carbono, es bueno mencionar que dentro de la gran variedad de aceros que hay en el mercado existen aceros especiales, cuyos elementos de aleación cambian la forma de los diagramas CCT.

Entre los efectos más importantes que se pueden presentar en el diagrama de aceros aleados, está el de que la curva de nariz que existe en el diagrama CCT del acero al carbono se desplaza hacia la derecha y a la izquierda y hacia arriba ó abajo según se adicione uno ó otro elemento.

Esto ocasiona que tanto el tiempo así como la temperatura de inicio y fin de la transformación de la austenita en otros constituyentes sufran modificaciones dando como resultado diagramas totalmente diferentes en composición con los diagramas CCT de acero al carbono.

El diagrama TTT (líneas curvas punteadas), muestra en forma gráfica la diferencia que existe entre uno y otro diagrama, para un acero de composición eutectoide.

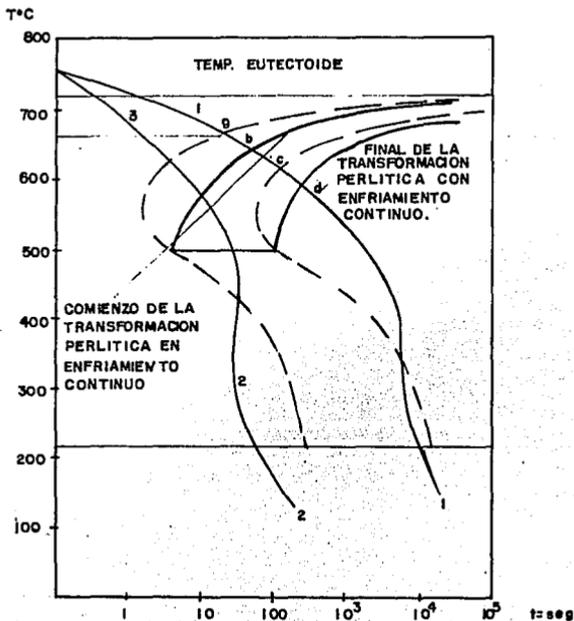


FIGURA 2.9

Relación del diagrama de enfriamiento continuo al diagrama isotérmico para un acero eutectoide (esquemático), (según el Atlas of Isothermal Transformation Diagram, United States Steel. Corporation, Pittsburgh 1951).

A continuación se presenta un ejemplo de la fig.2.9 en donde se observan las curvas número 1 y 2, las cuales representan las diferentes velocidades de enfriamiento continuo. Para el caso particular de la curva No.1 después de un tiempo de 6 segundos, se tiene que la curva 1 se interseca con el diagrama TTT (curva de inicio de transformación) generando el punto "a". A los 10 segundos la curva No.1 se interseca con el diagrama CCT (curva de inicio de transformación), generado en el punto "b". Entre los puntos 'a' y 'b' existe una variación tanto del tiempo como de la temperatura.

El punto 'b' se presenta para los diagramas CCT a mayor tiempo y menor temperatura en comparación con el punto 'a' para el diagrama TTT.

Los puntos 'a' y 'b' marcan el inicio de transformación de austenita a perlita para ambos diagramas, así en forma análoga sucede que los puntos 'c' y 'd' determinan el fin de la transformación de austenita a perlita.

2.8.-APLICACION DE LOS DIAGRAMAS CCT

Sobre el diagrama de transformación enfriamiento continuo de composición eutectoide de la figura 2.10 se muestran ciertos números de curvas que son representaciones de cómo a diversas velocidades de enfriamiento pueden producir microestructuras diferentes.

La curva '1' marca 'recocido completo' representa un enfriamiento muy lento que se obtiene usualmente enfriando las probetas (austenizadas en forma apropiada) dentro de un horno. En éste caso la transformación de la austenita se efectúa a temperaturas cercanas a la temperatura eutectoide, y la estructura final es una perlita gruesa y cercana a la pronosticada por una transformación en equilibrio.

La curva '2' marca como 'normalizado' representa un tratamiento térmico en el cual las probetas son enfriadas a una velocidad intermedia, esta velocidad de enfriamiento se obtiene cuando las probetas de acero se retiran del horno de austenitización y se dejan enfriar al aire, la estructura resultante es perlítica pero de estructura más fina que la anterior.

La curva '3' representa una velocidad de enfriamiento todavía más rápida, como podría obtenerse cuando se temple una pieza calentada al rojo directamente en un baño de aceite, lo que produce una microestructura de perlita y martensita.

La curva '5' marcada 'templado en agua' representa una velocidad de enfriamiento tan rápida que no se puede formar perlita y la estructura resultante es martensita.

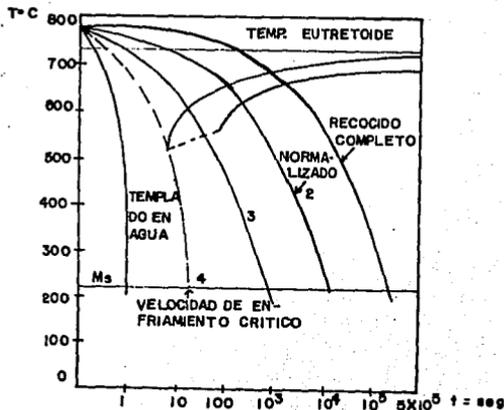


FIGURA 2.10

Variación de microestructura en función de la velocidad de enfriamiento para un acero eutectoide.

La curva '4' que se muestra por medio de trazos punteados representa la velocidad de enfriamiento crítico. Cualquier velocidad de enfriamiento más rápida que ésta produce una estructura martensítica, mientras que cualquier velocidad más lenta produce una estructura que contiene perlita.

Existen tratamientos térmicos como los indicados en la figura 2.10 que para realizarlos se hace necesario utilizar los diagramas CCT.

Si por algún motivo durante el tratamiento térmico se espera un material fuera de condiciones de tiempo y temperatura de acuerdo a lo que dictan los diagramas, los resultados a obtener no son confiables porque el producto de transformación no es el esperado, lo que ocasiona propiedades mecánicas no deseadas, razón por la cual cualquier tratamiento térmico debe realizarse bajo condiciones especificadas.

CAPITULO TRES
REVISION DE TRATAMIENTOS TERMICOS

3.1.-INTRODUCCION

Los tratamientos térmicos tienen por objeto mejorar las propiedades y características de los aceros, y consisten en calentar y mantener las piezas o herramientas de acero a temperaturas adecuadas durante un cierto tiempo y enfriarlas luego en condiciones convenientes.

De esta forma, se modifica la estructura microscópica de los aceros, por lo tanto, también sus propiedades.

El tiempo y la temperatura son factores principales y hay que fijarlos siempre de antemano, de acuerdo con la composición del acero la forma y tamaño de las piezas y las propiedades que se desean obtener.

La definición de tratamiento térmico dada en el Metals Hand Book dice así: Un tratamiento térmico es una combinación de operaciones de calentamiento y enfriamiento, de tiempos determinados y aplicados a un metal o aleación en el estado sólido en una forma tal que producirá propiedades deseadas". Todos los procesos básicos de tratamientos térmicos para aceros incluyen la transformación ó descomposición de la austenita.

La naturaleza y la apariencia de estos productos de transformación determinan las propiedades físicas y mecánicas de cualquier acero.

El primer paso del tratamiento térmico del acero es calentar el material a alguna temperatura en ó por encima, del intervalo crítico para formar austenita.

En la mayoría de los casos, la rapidez de calentamiento a la temperatura deseada es menos importante que otros factores en el ciclo del tratamiento térmico. Los materiales altamente esforzados producidos por trabajo en frío deben calentarse más lentamente que los que se hallan

libres de esfuerzos para evitar distorsión. Se puede considerar la diferencia en temperatura que tiene lugar dentro de las secciones gruesas y delgadas de artículos de sección transversal variable y siempre que sea posible, se debe tomar alguna medida para hacer más lento el calentamiento de las secciones más delgadas, de tal modo que sea posible minimizar el esfuerzo térmico y la distorsión.

Por lo general se hará menos daño al acero al utilizar una rapidez de calentamiento tan lenta como sea práctico.

3.2.-SUGESTIONES UTILES PARA EL TRATAMIENTO TERMICO

PRECALENTAMIENTO: Un paso importante en las operaciones de tratamiento térmico.

Muchas veces se pide la opinion a la pregunta:-

Es esencial incluir el precalentamiento como una de las fases de las operaciones de tratamiento térmico de herramientas y dados?

Metalúrgicamente, el precalentamiento no toma parte en la reacción de temple y considerado esto, no es un paso necesario; sin embargo, el precalentamiento es generalmente incluido en el tratamiento térmico de todos los aceros para herramientas para disminuir los riesgos normales que se presentan en el temple de éstos aceros de alta aleación.

Hay dos funciones principales en el precalentamiento. La primera de estas es reducir el choque térmico que siempre se produce cuando se coloca una herramienta fría directamente dentro del horno caliente.

La segunda función es iniciar la reacción de austenización de manera que los carburos estén en condiciones más favorables para disolverse a la temperatura alta. Esta última función es particularmente importante en el tratamiento térmico de aceros alta velocidad y de aquellos que requieran una temperatura de temple de 1100°C.

Ya que el precalentamiento reduce el Choque Térmico, es beneficioso para disminuir el peligro de distorsión excesiva, combaduras y agrietamiento.

Sirve como un medio para aliviar los esfuerzos internos generados durante las operaciones de maquinado y si el precalentamiento se lleva a cabo apenas abajo de la temperatura crítica, estas tensiones de maquinado son eliminadas antes que cualquier transformación se inicie en el acero. Emplear uno o más pasos de precalentamiento, también permite a la herramienta pasar los límites de transformación tan uniformemente como sea posible, en toda su sección transversal. Debido a que el calentamiento de aceros recocidos a una temperatura arriba de la crítica produce una disminución de volumen, es importante que las herramientas atraviesen este cambio de fase lenta y uniformemente para disminuir la distorsión.

El precalentamiento de los aceros al carbono y de baja aleación normalmente se efectúa a $650 - 700^{\circ}\text{C}$; en los aceros alto carbono-alto cromo y otros aceros altamente aleados a $650 - 790^{\circ}\text{C}$; en los aceros alta velocidad y aceros alta velocidad modificados a $815 - 870^{\circ}\text{C}$. Si no se dispone de una Atmósfera Protectora para el precalentamiento, deberá emplearse la temperatura más baja de los límites recomendados para esta operación y así reproducir el peligro de formar excesiva cascarilla y descarbonación.

Para herramientas y dados de diseño complicado y particularmente para aceros alta velocidad que son tratados en baños Líquidos (sales fundidas, etc.) es recomendable el doble precalentamiento entre $540 - 650^{\circ}\text{C}$ y $815 - 870^{\circ}\text{C}$.

Muchas veces no se dispone de un horno extra para las operaciones de precalentamiento. En estos casos se puede emplear el horno de revenido aún cuando la temperatura de éste no esté dentro de los límites deseados.

Inclusive, se pueden colocar las piezas encima de los hornos para calentarlas, siendo esto una ayuda para reducir el choque térmico. En todos los casos debe emplearse suficiente tiempo para que las piezas adquieran una temperatura uniforme.

El precalentado es una buena recomendación para templar y por lo tanto debe tomarse en cuenta en todas las operaciones de temple.

AUSTENITIZACION. - La clave para el proceso de templado.

Básicamente el proceso de austenitización controla la dureza exacta que será obtenida, el eventual cambio de medida, desarrolla la dureza al rojo y resalta muchas de las características metalúrgicas en el acero de acuerdo con su composición química. Indudablemente el paso de austenitización es la clave para la operación del tratamiento térmico.

La importancia que tiene la protección adecuada de la superficie durante la austenización no puede ser menospreciada, por lo que es una operación digna de consideración especial.

LA AUSTENITIZACION: Es una reacción que depende de la temperatura y el tiempo, aunque el más importante de éstos factores es la temperatura. Al desarrollar datos técnicos sobre tratamientos térmicos de un acero de nuevo análisis, el fabricante de aceros determina cuidadosamente los límites de temperatura en los cuales el acero debe ser tratado, empleando una actitud bastante amplia para el factor tiempo.

Como consecuencia, es difícil sobrecalentar una pieza de acero durante su austenización por demasiado tiempo a temperatura, siempre y cuando la temperatura del acero este dentro de los límites de temperaturas recomendadas.

La experiencia dice que el sobrecalentamiento generalmente ocurre como el resultado de una temperatura excesivamente alta y no por exceso de tiempo ó temperatura y que la mayoría de los problemas asociados con la

austenización resulta más bien por pocos tiempos que por tiempos excesivos de calentamiento.

Es obvio que esto señala la necesidad de un control pirométrico exacto del medio de calentamiento con un mínimo de fluctuaciones de temperatura para asegurar resultados óptimos del tratamiento térmico.

Cuando se emplean temperaturas más altas que las normales para la austenización, ya sea intencional ó inadvertidamente, el factor tiempo se vuelve más importante y los resultados finales del tratamiento térmico tienden a ser erróneos y difíciles de predecir con exactitud.

Los aceros para herramienta al carbono y de baja aleación, que son utilizados a temperaturas relativamente bajas, depende de la solución del carburo de hierro en austenita, por sus propiedades de endurecimiento.

La austenita disuelve fácilmente los carburos de hierro; por consiguiente una amplia latitud es permisible con respecto al tiempo y la temperatura en el tratamiento térmico de éstos tipos de acero.

El peligro de poco tiempo a temperatura, es disminuido considerablemente debido a la facilidad con que se disuelven los carburos y es solamente necesario asegurar que el acero esté uniformemente calentado y dentro de los límites de temperatura recomendados para obtener resultados completamente satisfactorios. El tiempo a temperatura para éstos aceros es relativamente corto, de dos a tres minutos por centímetro de espesor, aunque un tiempo mayor no es perjudicial.

Para los aceros: Los tratamientos térmicos más comunes son: *TEMPLE, REVENIDO, RECOCIDO, NORMALIZADO, GLOBULIZADO.*

TEMPLE: La estructura, dureza y resistencia, resultantes de una operación de tratamiento térmico se determinan por la rapidez de enfriamiento real obtenida del proceso de temple. Si la rapidez de enfriamiento real excede a la rapidez crítica de enfriamiento, sólo se obtendrá martensita, si la rapidez real de enfriamiento es menor que la rapidez crítica de enfriamiento, la pieza no endurecerá completamente a mayor diferencia entre las dos rapideces de enfriamiento, los productos de transformación será más blandos y la dureza menor. En este punto es necesario entender el mecanismo de eliminación de calor durante el temple.

Como ejemplo: La figura sig. muestra una curva típica de enfriamiento para un cilindro pequeño de acero, templado en agua tibia.

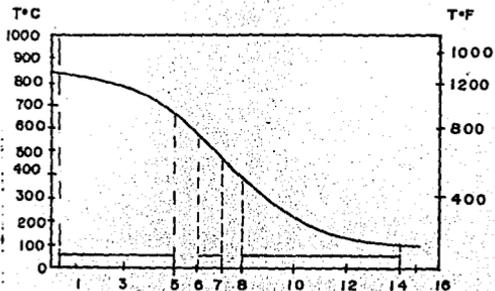


FIGURA 3.1

Curva típica de enfriamiento para un cilindro pequeño de acero templado en agua tibia. (Gulf Oil Comparison)

La rapidez de enfriamiento a cualquier temperatura puede obtenerse de la curva de enfriamiento mediante el trazado de una tangente a la curva a esta temperatura y determinando la pendiente de la tangente.

Al observar las tangentes trazadas en varios puntos de la curva de enfriamiento de la figura 3.1, resulta obvio que la rapidez de enfriamiento cambia en forma constante durante el enfriamiento.

ETAPA A: ESTADO DE ENFRIAMIENTO POR MEDIO DE UNA CAPA DE VAPOR. - En esta etapa, la temperatura del metal es tan alta que el medio de temple se vaporiza en la superficie del metal y una delgada y estable película de vapor rodea al metal caliente. El enfriamiento se efectúa por conducción y radiación a través de la película gaseosa y como las películas de vapor son pobres conductoras del calor, la rapidez de enfriamiento es relativamente lenta a través de la cuarta etapa.

ETAPA B: DE ENFRIAMIENTO POR TRANSPORTE DE VAPOR. - Esta etapa empieza cuando el metal se ha enfriado a una temperatura tal que la película de vapor ya no es estable. Lo mojado de la superficie del metal por medio de temple produce una violenta ebullición.

El calor se elimina del metal muy rápidamente como calor latente de vaporización. Esta etapa es la más rápida del enfriamiento.

ETAPA C: DE ENFRIAMIENTO POR MEDIO DEL LIQUIDO. - Esta etapa empieza cuando la temperatura de la superficie del metal alcanza el punto de ebullición del líquido en temple. Ya no se forma más vapor, de modo que el enfriamiento se efectúa por conducción y por convección a través del líquido. La rapidez de enfriamiento es la más lenta en esta etapa. Muchos factores determinan la rapidez real de enfriamiento los más importantes son el tipo de medio de temple, la temperatura del medio de temple, la condición superficial del fragmento y el tamaño y masa del fragmento.

EL TRATAMIENTO TERMICO DE TEMPLE: Consiste en llevar al acero a la zona de austenita es decir a hierro gama (γ) a esta etapa se le conoce como austenitización se mantiene un cierto tiempo a esa temperatura para hacer homogénea la microestructura para finalmente enfriarlo lo más rápidamente posible.

La rapidez óptima de enfriamiento se obtiene con aceite templados convencionales en baño a temperatura entre 60 y 90 °C . Para prevenir un aumento de temperatura en el medio durante el temple siempre es necesario proporcionar suficiente volumen del medio. En algunos casos, se insertan serpientes de enfriamiento en el tanque de temple, para controlar la temperatura del medio.

La rapidez de enfriamiento puede mejorarse y la temperatura del medio tiene que mantenerse constante por circulación del medio y agitación de la pieza. Esto quita efectivamente la película de vapor tan rápidamente como la forma, reduce la longitud de la etapa de la capa de vapor y resulta un enfriamiento más rápido.

Con esta última operación suprimimos la transformación de la austenita en ferrita + Fe_3C es decir, perlita y se obtiene en su lugar una fase metaestable que recibe el nombre de "martensita". Esta fase tiene una estructura tetragonal centrada en el cuerpo (BCT) con los átomos de carbono atrapados en sus aristas lo cual le confiere una alta dureza y resistencia y tiene forma de agujas.

Mediante un enfriamiento rápido el % de carbono se queda atrapado en los intersticios de las celdas.

Cuando el enfriamiento es lento en la fase primaria con una estructura α (BCC) más perlita pasa a formar Fe_3C ; donde los porcentajes de % C son expulsados.

MEDIOS DE TREMPLE

PARA ACEROS SIMPLES

SALMUERA Y AGUA

PARA ACEROS ALEADOS

ACEITE

ACEROS PARA ALTA ALEACION

HARTENSITICOS

(ACEROS PARA HERRAMIENTA)

(ACEROS INOXIDABLES TEMPLABLES)

ACEITES

SALES FUNDIDAS

AIRE

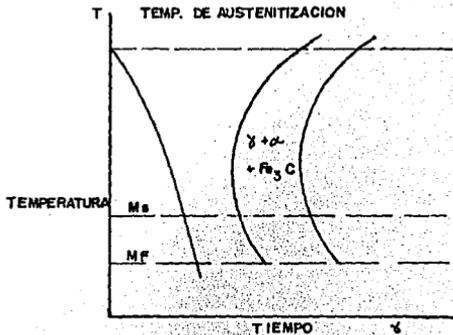


FIGURA 3.2

Solamente para piezas pequeñas donde los esfuerzos son pequeños evitando la deformación; solamente con más de 0.3 % de C. Cuando son menores del 0.3 % C solamente $\alpha + Fe_3C$ por lo tanto no existen.

ESTADO DE EQUILIBRIO DE LA MARTENSITA

METAESTABLE: Estado de pseudo equilibrio que tiene una energía libre mayor que la del estado verdadero de equilibrio, pero que no cambia espontáneamente.

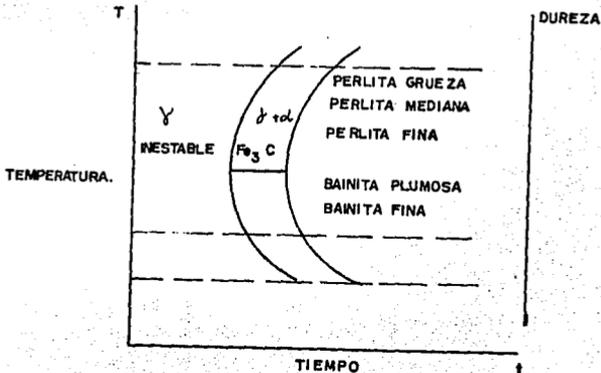
Evitando la TTT para obtener la martensita por el movimiento de las líneas TTT necesitamos cambiar: Composición Química, Átomos del Acero.

M_s .- Temperatura a la cual inicia la transformación de martensita.

M_f .- Temperatura a la cual termina la formación de martensita.

MEDIO DE TEMPLE: No existe medio de temple que demuestre estas propiedades.

FIGURA 3.3



REVENIDO: En la condición martensítica sin tratamiento térmico ulterior, el acero es demasiado frágil para la mayoría de las aplicaciones. La formación de martensita origina grandes tensiones residuales en el acero, por tanto el temple casi siempre es seguido de un tratamiento de revenido, el cual consiste en calentar el acero a alguna temperatura menor que la inferior crítica.

El propósito del revenido es liberar los esfuerzos residuales y mejorar la ductilidad y tenacidad del acero. Este aumento en ductilidad generalmente se obtiene a costa de la dureza y de la resistencia.

Es un tratamiento térmico que se aplica a los aceros previamente templados.

En general sobre el amplio intervalo de temperaturas de revenido, la dureza disminuye y la tenacidad aumenta conforme se incrementa la temperatura de revenido. Esto es cierto si la reducción de área en una prueba tensil mide la tenacidad; sin embargo la barra se utiliza como una medida de la tenacidad.

La mayoría de los aceros realmente muestra una disminución en la tenacidad de la barra muescada cuando se reviene entre 200 y 450 °C, aún cuando la pieza pierde al mismo tiempo dureza y resistencia. La razón de esta disminución en tenacidad aun no se comprende.

La variación de dureza y tenacidad de la barra muescada la temperatura de revenido mostrada en la fig. 3.4, es típica de un acero al carbono y aceros de baja aleación.

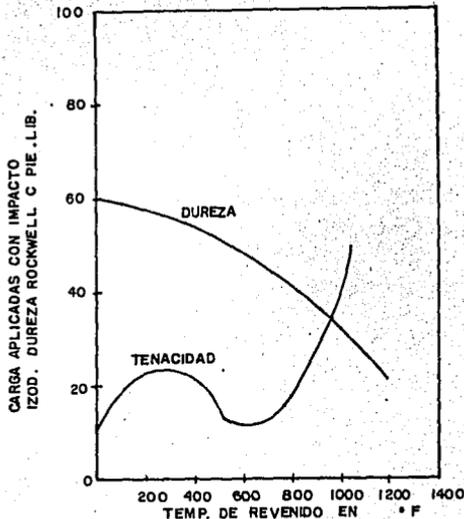


FIGURA 3.4

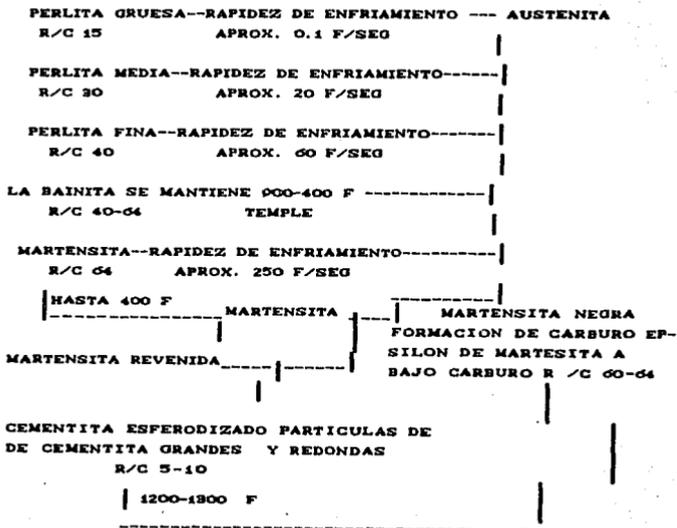
Dureza y tenacidad de la barra muescada de un acero 4140 después de revenido durante una hora a diferentes temperaturas (Tomadas del libro Suiting Heat Treatment to the Job U.S. Steel Corporation).

El intervalo de revenido de 200 a 450°C es una línea divisoria entre las aplicaciones que requieren alta dureza y aquellas que requieren alta tenacidad. Si la principal propiedad deseada es la dureza ó la resistencia al desgaste, la pieza se reviene por abajo de 93.3°C . Si el principal requisito es la tenacidad la pieza se reviene por arriba de los 450°C. Si la pieza no tiene "elevadores de tensiones" ó muescas, el cambio en ductilidad puede ser una mejor indicación de tenacidad de lo que es la prueba de la barra muescada, y el revenido en el intervalo de 200 a 260°C puede no ser perjudicial.

Las tensiones residuales se reducen en gran medida cuando la temperatura de revenido alcanza 200°C y desaparece casi completamente cuando se alcanzan los 480°C.

Cuando el acero al carbono se calienta en el intervalo de 49 y 200°C, la estructura se oscurece al ataque químico y se conoce algunas veces como martensita negra. La precipitación del carburo de transmisión puede causar un ligero aumento en dureza, particularmente en aceros alto carbono. Calentar en el intervalo de 220 y 400°C cambia el carburo épsilon a cementita ortorrómbica (Fe_3C), y la martensita de bajo carburo se hace ferrita, es una estructura BCC y cualquiera austenita retenida se transforma a bainita inferior. El revenido en el intervalo de 400 a 650 °C continúa el crecimiento de las partículas de cementita. El calentamiento en el intervalo de 650 a 750 °F produce grandes y globulares partículas de cementita.

PRODUCTOS DE TRANSFORMACION DE AUSTENITA Y MARTENSITA PARA
UN ACERO EUTECTOIDE



RECOCIDO :Consiste en calentar y mantener a una temperatura adecuada y luego enfriar a una rapidez apropiada para reducir la dureza, mejorar la maquinabilidad, facilitar el trabajo en frío, producir una microestructura deseada ó obtener las propiedades deseadas mecánicas, físicas ó otras.

Cuándo se aplica a aleaciones ferrosas, el término recocido a secas implica recocido total. Cuando se aplica a aleaciones no ferrosas, el término implica un tratamiento térmico preparado para suavizar una estructura trabajada en frío ó para suavizar una aleación endurecida por envejecimiento, dando lugar a una precipitación casi completa de la segunda fase en forma relativamente gruesa.

Cualquier proceso de recocido generalmente reducirá los esfuerzos, pero si el tratamiento se aplica solo para tal liberación, debe designarse como reductor de esfuerzo residual.

RECOCIDO: Este tratamiento consiste en calentamientos a temperaturas adecuadas, seguidos generalmente de enfriamientos lentos, las diferentes clases de recocido que se emplean en la industria se pueden clasificar en tres grupos: recocido de austenitización completa ó de regeneración, recocido subcrítico y recocidos con austenitización incompleta.

RECOCIDO DE AUSTENITIZACION COMPLETA O DE REGENERACION: En este caso el calentamiento se hace a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior y luego el material se enfría muy lentamente. Sirve para ablandar el acero y regenerar su estructura.

RECOCIDO TOTAL: Es el tratamiento térmico que se aplica principalmente a los aceros hipoeutectoides y consiste en calentar el acero a una temperatura de 30 a 50°C por arriba de la línea crítica superior A_1 , permaneciendo a esta temperatura una cuarta parte del tiempo de calentamiento y enfriamiento lento de 500 a 400°C; los aceros simples se enfrían a una tasa de 100 a 200°C por hora y los aleados de 50 a 60°C por hr., el enfriamiento posterior se hace al aire, durante el recocido se lleva a cabo la recrystalización y el afine de grano proporcionando baja dureza y mejoría en las propiedades eléctricas y magnéticas en los aceros de 0.5 a 0.8 % C se puede utilizar para mejorar la maquinabilidad.

RECOCIDO SUBCRITICO: El calentamiento se hace por debajo de la temperatura crítica inferior, no teniendo tanta importancia como 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 la ductilidad.

Se puede distinguir tres clases de recocido subcríticos;

a) Ablandamiento, b) Con acritud y c) Globular.

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 perfectamente los materiales.

RECOCIDO CONTRA ACRITUD: Se efectúa a temperaturas de 550 a 650°C, y tiene por objeto principalmente, aumentar la ductilidad de los aceros de poco contenido de carbono (menos del 0.40 %) estirados en frío. El tratamiento se suele hacer al aire.

RECOCIDO SUBCRITICO GLOBULAR: En ocasiones para obtener en los aceros al carbono y baja aleación una estructura globular de muy baja dureza, en cierto modo parecida a la que se obtiene en el recocido globular de austenitización

Nota A_1 es la línea de temps. superiores críticas.

incompleta se les somete a los aceros un calentamiento a temperaturas inferiores pero muy próximas a la crítica A_c , debiendo luego enfriarse el acero lentamente en el horno.

RECOCIDO ISOTERMICO: Son tratamientos de ablandamiento que consiste en calentar el acero por encima de la temperatura crítica superior ó inferior según los casos (generalmente de 740 a 880 °C) y luego enfriar hasta una temperatura de 600 a 700 °C, que se mantiene constante durante varias horas, para conseguir la completa transformación isotérmica de la austenita y finalmente, se enfría al aire. Este tratamiento es muy rápido y se obtienen durezas muy bajas.

El calentamiento se suele hacer con austenitización completa en los aceros hipoeutectoides y la austenitización incompleta en los aceros hipereutectoides. En cierto modo éstos tratamientos pueden considerarse como casos particulares de los recocidos de austenitización completa e incompleta.

RECOCIDO DE RECRISTALIZACION: Se aplica a los aceros que han sido trabajados en frío ya sea por laminado, forjado y estirado, etc; en este caso el acero se calienta a una temperatura inferior a la de transformación por trabajo en frío superior a la recristalización, ésta temperatura se puede calcular mediante la fórmula siguiente: $T_{rec} = 0.4 T_{fractura}$ (en temperaturas absolutas) para aceros es aproximadamente de 450°C. Debido a este tratamiento se elimina el endurecimiento del metal disminuyendo también dureza y resistencia mecánica pero incrementando a la vez la plasticidad, ductilidad y tenacidad.

NORMALIZADO: Este tratamiento consiste en calentar a temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior, seguido de un enfriamiento en aire tranquilo. Por Nota: A_c es para la zona hipoeutectoide.

medio del normalizado, se eliminan las tensiones internas y se uniformiza el tamaño de grano del acero. Se emplea casi exclusivamente para los aceros para maquinaria al carbono o de baja aleación. Este calentamiento del acero (de unos 40 a 50°C por encima de la temperatura de transformación) permanece a un tiempo igual que el recocido y se enfría posteriormente al aire. Este tratamiento refina los granos de ferrita y se rompe la red de carburos en los aceros, en la actualidad tiene mucho mayor aceptación ya que es mucho más económico y proporciona mejores resultados.

GLOBALIZADO: Es un tratamiento térmico que se aplica a aceros con bajo contenido de carbono ya que estos poseen una microestructura de ferrita y una red de carburos que los hacen bastante difícil de trabajar con con máquina, es decir de ser mecanizados. En forma esencial, es romper la red de cementita y por lo tanto forma un carburo globular o esferoidal en una matriz ferrítica, esto puede hacerse mediante tres distintas maneras que se mencionan a continuación:

- 1) Mantener al acero durante un tiempo prolongado a una temperatura justamente por debajo de la línea crítica inferior.
- 2) Calentar y enfriar en forma alternada entre las temperaturas que están justamente por encima ó por abajo de la línea crítica inferior.
- 3) Calentar a una temperatura por encima de la línea crítica inferior y enfriar muy lentamente en horno ó mantener a una temperatura justo por debajo de la de la línea crítica inferior, como ya se dijo, este tratamiento reduce la dureza y mejora la maquinabilidad de los aceros altos al carbono.

Templabilidad: Es la capacidad que tiene un acero de endurecer a profundidad.

3.3.-TRATAMIENTOS SUPERFICIALES Y TERMOQUIMICOS: Se requiere algunas veces que la superficie del acero sea dura y resistente de lo que el núcleo sea suave y tenaz tal que es el caso de ejes de engranes y levas.

Esto se consigue aplicando un tratamiento superficial en el metal de manera que las propiedades superficiales sean óptimas y se puede hacer de dos maneras: sin alteración ó con alteración de la composición química de la capa superficial por lo que en éste último caso se le conoce como: tratamiento termoquímico entre los tratamientos superficiales (sin modificación química), más comunes se tienen los siguientes:

ENDURECIMIENTO POR INDUCCION: Este proceso consiste en calentar por encima del intervalo de transformación a una capa superficial del material mediante corrientes eléctricas de alta frecuencia y luego se enfría rápidamente en agua, aire ó aceite dependiendo del tipo de acero.

En el proceso la superficie se calienta rápidamente pero el núcleo queda relativamente frío y se emplea con un acero de 0.35 a 0.55 % de carbono con lo que el acero responde al tratamiento térmico. La dureza de la superficie puede alcanzar valores de 50 a 55 R C ó más alta y en el núcleo en el orden de 30 a 35 R C después del temple conviene revenir la pieza a una temperatura de 204 a 325°C.

ENDURECIMIENTO POR FLAMA: Al igual que en el proceso anterior el de flama consiste en calentar a la temperatura adecuada el acero de manera superficial mediante una llama neutra de oxiacetileno y a continuación se enfría con un chorro de agua, el contenido de carbono de los aceros aleados es el mismo que en el proceso anterior y aunque se emplea para piezas grandes y pequeñas presentan considerables ventajas en el caso de piezas muy grandes en las que se debe endurecer determinadas superficies, tal es el caso de las guías de bancada de un torno ó la superficie de los dientes de engranes de gran tamaño.

POR CALENTAMIENTO ELECTRICO: El proceso consiste en lo siguiente, la pieza que sirve de cátodo se sumerge en un electrolito (solución acuosa de sosa) y de anodo sirve el mismo baño. Al cerrar el circuito de corriente continua alrededor del cátodo se forma una camisa de hidrógeno con una alta resistencia eléctrica lo que contribuye a la creación de una alta temperatura y un calentamiento rápido de la superficie del metal, la pieza así calentada se enfría (se temple en el mismo electrolito al desconectar la corriente) para calentar la pieza se aplica una corriente de C.D. de 220 a 300 V y una densidad de corriente de 4 a 6 A/cm² de la superficie de calentamiento.

3.4.-TRATAMIENTOS TERMOQUIMICOS

Los tratamientos termoquímicos implican una alteración en la composición química en la capa superficial del metal tratado debido a la difusión de átomos de un medio circundante hacia el interior del metal y depende de varios factores: temperatura, concentración del medio, concentración inicial del metal, etc.

Como el control de las variables anteriores es relativamente sencillo los tratamientos termoquímicos se utilizan cuando se requiere asegurar una determinada profundidad y solidificación de la capa dura. El carbono y el nitrógeno son los elementos más importantes para lograr una alta dureza del acero requiriéndose de entrada un acero con bajo contenido de carbono casi siempre menor del 0.25%.

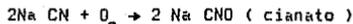
Los tratamientos termoquímicos más importantes son: cementación, carbonitruración, cianurado, carburización, y boración.

CEMENTACION EN CAJA: En este proceso se calienta la pieza en contacto con compuestos carburantes sólidos de diversas clases por ejemplo, carbon vegetal, huesos calcinados en polvo; alquitrán, carbon de bario, sodio y calcio utilizados especialmente carbon vegetal y carbonato de bario. La profundidad de la corteza y la rapidez del proceso dependen en parte de la temperatura del horno, la cual durante la operación es del orden de 900 a 950°C/hr.

CARBORIZACION CON GAS: En la cementación con gas que ha sido perfeccionada hasta lograr un proceso económico y suficiente, especialmente para grandes cantidades de piezas, se calientan las mismas en gases carburantes tales como: metano, propano y monóxido de carbono. Las temperaturas de operación y el espesor de la corteza endurecida son casi las mismas de la carburación en caja, por ejemplo: después de 4 horas a 435°C el espesor de la corteza va de 1 a 1.7 mm, se debe mencionar que se obtiene un mejor control sobre la profundidad de la capa endurecida.

CEMENTACION CON BAÑOS SALINOS: Cianuración ó cementación básica aún en estos días de grandes cambios no se puede desechar los baños salidos para el tratamiento termoquímico del hierro y acero en modernas instalaciones, la secuencia química del baño de cementación no está en un 100% aclarada ya que las investigaciones se limitan al desarrollo de las soluciones acuosas, diferenciaremos en general los baños que contienen unicamente cianuro y aquellos que se componen de cianuro más activador.

CIANURACION



EL MONOXIDO DE CARBONO REACCIONA CON EL HIERRO Fe MIENTRAS QUE EL NITROGENO SE DIFUNDE.

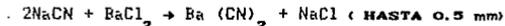
CEMENTACION: También este proceso es conocido como carburación ó carburización, es el procedimiento más antiguo de saturación de la superficie del o con carbono, o sea, es un proceso de adición de carbono a la superficie del acero exponiendolo a la acción de agentes carburantes ó cementantes, sólidos, líquidos y gaseosos efectuados éstos por arriba de la temperatura de transformación.

En condiciones de operación estandar conocidas con la superficie a una concentración fija de carbón se puede predecir la forma del gradiente con razonable exactitud como una función del tiempo transcurrido, después de esto se somete el material a temple y generalmente se reviene a una temperatura en el rango de 150 a 232°C. para la eliminación de las tensiones profundizadas en el temple se puede decir que en el gradiente de calor obtenido en aceros simples ó aleados es similar sin embargo debido a que la templabilidad de éstos últimos es mayor la dureza que se puede obtener a una profundidad.

CEMENTACION



CON BANOS ACTIVADOS CON CLORURO DE BARIO (CEMENTACION LIQUIDA)



(SE DIFUNDE EN LA SUPERFICIE DE LA SUPERFICIE DE LA PIEZA)

La cementación en sales fundidas produce una penetración rápida de carbono y un contenido relativamente bajo de nitrógeno en la corteza, por el contrario la corteza cianurada contiene mucho más nitrógeno, que tambien es un agente endurecedor.

Aunque la profundidad de las piezas cementadas en líquidos puede ser algo mayor de 0.5 mm, el espesor de la corteza cianurada no suele exceder de 0.25 mm.

NITRURACION: El endurecimiento superficial por nitruración la pieza mecanizada y tratada térmicamente se coloca en un ambiente nitrogenado, generalmente amoníaco (NH_3), las piezas nitruradas se colocan en un recipiente hermético a través del cual se proporciona en forma continua la atmósfera de nitruración, mientras que la temperatura se eleva y se mantiene entre 496 y 565°C , el ciclo de nitruración es muy largo dependiendo de la dureza superficial deseada, por ejemplo: un ciclo de 60 horas da lugar a una profundidad de la corteza de aproximadamente 0.6 mm a 523°C , como se puede observar las temperaturas usadas son mucho menores que en los procedimientos anteriores, además como la pieza debe ser enfriada rápidamente el proceso evita la deformación que se produce en enfriamientos bruscos. El endurecimiento es el resultado de la reacción del nitrógeno disociado, del amoníaco con los elementos de aleación del acero para formar nitrógeno. Para obtener una dureza máxima se emplean aceros denominados "nitrallo" que contienen aluminio, como elemento de aleación, sin embargo el acero como el 4140 proporciona buenos resultados endureciéndose frecuentemente por nitruración.

PRECIPITACION: El tratamiento térmico de precipitación se lleva a cabo por los siguientes puntos:

- 1.- Se calienta a la aleación a una temperatura tal que en la que haya una sola fase, es decir donde tengamos una solución sólida.
- 2.- A continuación se enfría rápidamente ya sea con agua fría ó con agua en ebullición, esto da como resultado una solución sólida sobresaturada, en este caso el cobre, y la aleación queda relativamente blanda, por último se lleva a cabo el endurecimiento en el cual se precipita el exceso de Cu en forma de partículas submicroscópicas que van a actuar como obstáculos a los movimientos de las dislocaciones y por tanto se va a endurecer el metal.

CAPITULO CUATRO

CLASIFICACION DE LOS ACEROS PARA HERRAMIENTA

4.1.-GENERALIDADES

La variedad de los aceros que se producen están constituidos por diversos elementos como son: carbono, silicio, cromo, níquel, wolframio, vanadio, molibdeno y cobalto, que en cantidades adecuadas forman toda la gama de aceros grado herramienta y grado maquinaria.

Lo más importante en la selección de aceros en la construcción de aparatos, equipo y maquinaria, son las propiedades mecánicas del material y, en forma secundaria, la composición química. Esta composición química se vuelve muy importante, más que las propiedades mecánicas, en la construcción de aparatos y equipos para las industrias de procesos, especialmente en aquellos componentes o subconjuntos que deban soportar altas o bajas temperaturas o bien estar expuestos a medios que pueden considerarse como corrosivos.

En la construcción de maquinaria, equipo y aparatos se emplea el acero en diferentes formas, la mayoría de ellas laminadas en caliente y algunas extruídas, estiradas ó trefiladas.

4.2.-CLASIFICACION

El método de identificación y tipo de clasificación de los aceros para herramientas adaptado por AISI (American Iron and Steel Institute), tiene en cuenta el método de templado, aplicaciones, características particulares y aceros de industrias específicas. Los aceros para herramienta que más se utilizan se han agrupado en siete grupos y cada grupo ó subgrupo se le ha asignado una letra del alfabeto, como sigue:

GRUPO	SIMBOLO Y TIPO
Templables en agua	W
Resistentes al impacto	S
Para trabajo en frío	O Templable en aceite. A Mediana aleación y templable en aire. D Alto carbono, alto cromo.
Para trabajo en caliente	H (H1-H19, incluso, base cromo, H20-H39, base incluso tungsteno, H40-H59, incluso base molibdeno).
Alta velocidad	T Base tungsteno. M Base molibdeno.
Para moldes	P Aceros para moldes (P1-P19, incluso, bajo carbono, P20- P39, incluso, otros tipos).
Propósitos específicos	L Baja aleación. F Carbono-tungsteno.

En la mayoría de los casos, la selección de un acero para herramienta no se limita a un solo tipo ó a una serie particular para resolver en forma funcional un problema concreto de herramientas. Aunque muchos aceros para herramienta se utilizan para cualquier trabajo, se consideran según la productividad esperada, la facilidad de fabricación y el costo. El último análisis, lo que determina la selección adecuada es el costo por pieza unitaria hecha por la herramienta.

4.3.-APLICACIONES

La mayoría de las aplicaciones de los aceros para herramienta que se utiliza para hacer piezas de maquinaria, puede dividirse en varias operaciones: corte, cizallado, formado, estirado, extrusión, laminado ó golpeado.

Una herramienta puede tener un solo borde de corte, como la herramienta usada un torno ó un cepillo mecánico, ó cuando tiene dos ó mas bordes de corte continuo, como una broca ó un machuelo.

Cuando la principal función del acero para herramienta es cortar, aquel debe tener alta dureza, así como buena resistencia al calor y al desgaste.

Las herramientas cizalladoras que se emplean en cizallas, punzones ó matrices ensambladoras requieren alta resistencia al desgaste y tenacidad regular.

Los dados para estirado y extrusión se caracterizan por un resbalamiento sustancial entre el metal que se forma y la herramienta.

La tenacidad para soportar las presiones hacia afuera y la resistencia al desgaste es la más importante en troqueles para extrusión en frío.

La característica más importante en las herramientas de golpeo es la alta tenacidad.

CAPITULO CINCO

TELPLE REVENIDO PARA ACEROS HERRAMIENTA Fa/ L₀

5.1.-INTRODUCCION

El objetivo de realizar un estudio práctico de un acero para hta. como lo es el Fa/L₀, es conocer directamente los cambios que presenta su microestructura al ser sometida a diferentes tratamientos térmicos y que finalmente son los responsables de los cambios que existen en las propiedades mecánicas, como lo son, la dureza, tenacidad, ductilidad, etc.

Este estudio práctico solo se enfoca a los tratamientos térmicos de temple y revenido.

Otro de los objetivos principales es el observar la microestructura que posee el acero antes y después del tratamiento térmico aplicado.

Se hace énfasis en que la practica realizada no fue exhaustiva y únicamente estuvo enfocada al estudio y observación de los cambios de dureza y microestructura que experimenta el acero después del tratamiento térmico de temple y los cambios de dureza que experimenta después del tratamiento térmico de revenido.

5.2.-OBTENCION DE MUESTRAS

- Tramo de barra de acero Fa/L₀ de 2.00 cm ϕ (0.85") de ϕ , de dichas barras se cortaron 29 probetas de 2.54 cm ϕ (1") de longitud y todas de la misma longitud con el mismo diametro.
- Máquina cortadora de disco marca BUEHLER LTD de 1 HP, y de 12 Amp.
- Lija de carburo de silicio de diferentes tamaños de grano (Núm. 220,400 y 600).
- Reactivo químico (Nital 4 % y Picral)
- Microscopio , guantes de asbesto y pinzas.

5.3.-PREPARACION DE PROBETAS PARA ANALISIS METALOGRAFICO

a) Corte de la probeta: Este se realiza de preferencia con disco para corte de metal 225 x 3 x 25.4 mm, en una máquina de corte para obtener una superficie plana. El corte se realiza lentamente para evitar el calentamiento de la pieza.

b) Pulido basto y fino: Se pule la probeta con lija de carburo de silicio de diferentes tamaños de gran, comenzando por la del número 220, y terminando con la lija del número 600, para obtener una superficie de acabado o desbaste fino, se recomienda que al realizar el cambio de la lija (del N.ºm. 200 al 220 etc.), la probeta se gira a 90° y pulir hasta que el nuevo sentido de pulido borre al anterior.

c) Pulido a espejo: Este se hace normalmente en un paño que se encuentra sobre un disco rotatorio, durante la operación de pulido se agrega alúmina así, como agua para evitar un posible calentamiento y poder obtener una superficie totalmente pulida.

d) Se ataca con algún reactivo químico por ejemplo nital al 2% ó 4%, durante un periodo corto de tiempo de 4 a 15 segundos según sea el tipo de estructura a observar.

e) Se observa al microscopio.

De las 29 probetas inicialmente cortadas se tomó una de ellas para observar los constituyentes que forman al acero, tal y como se observa en el microscopio, es decir sin tratamiento térmico, alguno.

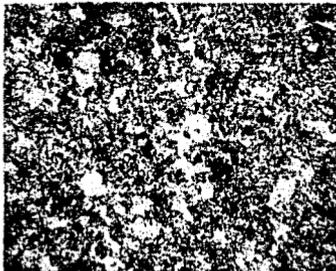


fig 5.1 (ferrita y perlita) a 400 Aumentos.

Después de preparar la probeta para análisis metalográfico, esta se coloca en el microscopio, observándose que la microestructura esta formada por ferrita y perlita ($\alpha + \text{Ca}$) como se muestra en la micrografía (fig.5.1), para obtenerla se atacó la probeta con nital al 4 % durante 10 seg., se colocó al microscopio y se observó a 400 aumentos, en ésta las partes oscuras muestran a la ferrita y las zonas claras a la perlita.

El acero en éstas condiciones posee menor dureza en comparación con el acero que ha recibido algún tratamiento térmico.

TRATAMIENTO EXPERIMENTAL DE TEMPLE

El acero después del tratamiento térmico del temple cambia la estructura a martensita, dando lugar a que exista un aumento en dureza.

La estructura de martensita que posee el acero al carbono Fe/L_c se muestra en la fotografía de la figura 5.2.

En éste caso tomamos solo una foto, para después conocer la dureza transversal, en seguida se colocaron 25 piezas dentro del horno y de 5 en 5 se fueron colocando hasta alcanzar diferentes temperaturas y se mantuvieron éstas temperaturas durante una variación de tiempos para lograr obtener una estructura totalmente homogénea, e inmediatamente después se sacaron del horno procediendo a enfriarlas drásticamente en aceite.

A continuación se pulió una de las caras de las probetas templadas, se atacó con nital al 4 % durante 9 seg. y se observó al microscopio la estructura como se muestra en la figura 5.2.

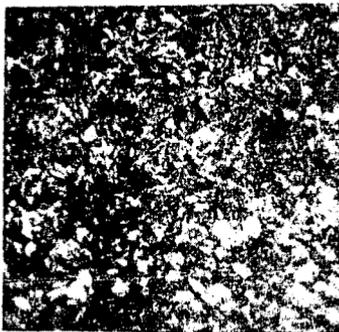


Figura 5.2 (martensita) a 400 aumentos.

TRATAMIENTO EXPERIMENTAL DE REVENIDO

Después del tratamiento térmico del temple se revinieron 25 piezas del acero Fe/Ls, éstas se calentaron a diferentes temperaturas y diferentes tiempos con el objeto de encontrar la microestructura deseada.

Se comenzó con las primeras 5 piezas las cuales se revinieron a una temperatura de 200°C, la cual se mantuvo hasta que las piezas fueron sacadas una por una a diferentes tiempos. La primera probeta se sacó a los 15 minutos, la segunda a los 30 min., la tercera a los 45 min., la cuarta a los 60 min. y la quinta a 75 min.

Después se vuelve a pulir cada una de ellas por el extremo ó cara con las diferentes lijas de carburo de silicio hasta obtener una superficie casi lisa, después se hace el cambio a la pulidora, a la cual se le agrega alúmina como o para obtener una superficie espejo, a continuación se eligió la pieza de 75 min. la cual fue atacada con picral.



Fig.5.3 (martensita revenida + ferrita)
T = 200°C , t = 75 min. a 400 aumentos.

A continuación se tomaron otras cinco muestras teniendo a una temperatura de 300°C , éstas también previamente templadas, con esto se sacaron cada una de ellas, la primera a 15 minutos, la segunda a 30 minutos, la tercera a 45 minutos, la cuarta a 60 minutos y la quinta a 75 minutos. Se siguió el mismo procedimiento que en los pasos anteriores, lijar con carburo de silicio, pulir con alumina para obtener una superficie espejo, después un ataque de dos a tres segundos con nital al 4 % para poder observarlos al microscopio, de dónde seleccionamos las piezas de 45 min. y la de 75 min. (fig.5.4y5.5) ya que fueron las que presentaron un mejor aspecto, aumentando la martensita y principios de carburo.

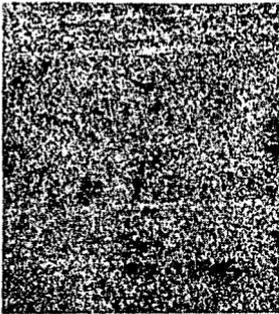


Fig.5.4 (martensita y principios de carburo)

$T = 300^{\circ}\text{C}$, $t = 45$ min.
a 400 aumentos.



Fig.5.5 (martensita revenida + carburo)

$T = 300^{\circ}\text{C}$, $t = 75$ min.
a 400 aumentos.

Se tomaron otras cinco piezas y se colocaron en el horno a una temperatura de 400°C, éstas también previamente templadas y revenidas en aceite. La primera pieza se dejó a esta temperatura 15 min., la segunda a 30 min., la tercera a 45 min., la cuarta a 60 min., y la quinta a 75 min. Se lijaron con carburo de silicio y alumina para obtener una superficie espejo, después se atacaron con nital al 4 % durante un tiempo de 2 a 3 segundos para poder observarlas al microscopio. Se seleccionó la pieza de 75 min. por tener una estructura más homogénea, en la cual encontramos martensita revenida + carburo.



Fig.5.6(martensita revenida + carburo)
T = 400°C , t = 75 min. a 400 aumentos.

A continuación se colocaron otras cinco piezas en el horno a una temperatura de 500°C , éstas también previamente templadas y revenidas en aceite. La primera pieza se dejó a esta temperatura 15 min., la segunda a 30 min., la tercera a 45 min., la cuarta a 60 min., y la quinta a 75 min. Se lijaron con carburo de silicio y alumina para obtener una superficie espejo, después fueron atacadas de 2 a 3 segundos por nital al 4 % para poder observarlas al microscopio. Se seleccionó la pieza de 75 min, donde observamos martensita revenida y carburo.



Fig.5.7(martensita revenida y carburo)
 $T = 500^{\circ}\text{C}$, $t = 75$ min. a 400 aumentos.

Se tomaron otras cinco piezas y se colocaron en el horno a una temperatura de 600°C , éstas también previamente templadas y revenidas en aceite. La primera pieza se dejó a ésta temperatura 15 min., la segunda a 30 min., la tercera a 45 min., la cuarta a 60 min. y la quinta a 75 min. Después se lijaron con carburo de silicio y alúmina para obtener una superficie espejo, después se atacaron con nital al 4 % por un tiempo de 2 a 3 segundos para poderlas observar al microscopio. Se seleccionó la pieza de 75 min. Aquí se formó martensita revenida y carburo.

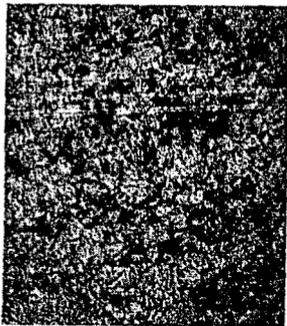


Fig. 5.8 (martensita revenida + carburo)
 $T = 600^{\circ}\text{C}$, $t = 75$ min. a 400 aumentos.

5.4.-DUREZA

Finalmente se tomaron todas las probetas y se pulió una de las caras de cada una de ellas para poder utilizar la máquina de dureza Rockwell normal o estándar. Se determinó la dureza transversal de cada una de las piezas.

Los resultados de dureza transversal después y antes del temple y revenido se muestran en la figura 5.9.

Antes del temple

1)



dureza ↔ 1 D2 R/B

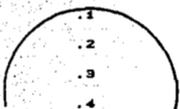
dureza ↔ 2 D2 R/B

dureza ↔ 3 D2 R/B

dureza ↔ 4 D1 R/B

Con temple

2)



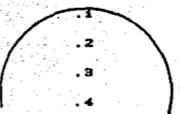
dureza ↔ 1 56.5 R/C

dureza ↔ 2 60 R/C

dureza ↔ 3 65 R/C

dureza ↔ 4 64 R/C

3)



dureza ↔ 1 64 R/C

dureza ↔ 2 64.5 R/C

dureza ↔ 3 64.5 R/C

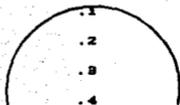
dureza ↔ 4 65 R/C

TEMLADAS Y REVENIDAS

Revenida

$T = 200^{\circ}\text{C}$, $t = 15 \text{ min.}$

4)



dureza \leftrightarrow 1 55 R/C

dureza \leftrightarrow 2 60 R/C

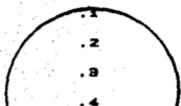
dureza \leftrightarrow 3 60 R/C

dureza \leftrightarrow 4 60 R/C

Revenida

$T = 200^{\circ}\text{C}$, $t = 30 \text{ min.}$

5)



dureza \leftrightarrow 1 57.5 R/C

dureza \leftrightarrow 2 62 R/C

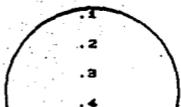
dureza \leftrightarrow 3 62 R/C

dureza \leftrightarrow 4 62.5 R/C

Revenida

$T = 200^{\circ}\text{C}$, $t = 45 \text{ min.}$

6)



dureza \leftrightarrow 1 55 R/C

dureza \leftrightarrow 2 60 R/C

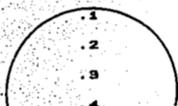
dureza \leftrightarrow 3 60 R/C

dureza \leftrightarrow 4 60 R/C

Revenida

T = 200°C , t = 60 min.

7)



dureza ↔ 1 58.5 R/C

dureza ↔ 2 59 R/C

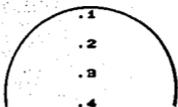
dureza ↔ 3 59 R/C

dureza ↔ 4 59 R/C

Revenida

T = 200°C , t = 75 min.

8)



dureza ↔ 1 51 R/C

dureza ↔ 2 60 R/C

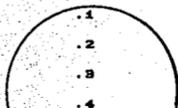
dureza ↔ 3 60 R/C

dureza ↔ 4 60 R/C

Revenida

T = 300°C , t = 15 min.

9)



dureza ↔ 1 44 R/C

dureza ↔ 2 54.5 R/C

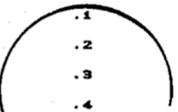
dureza ↔ 3 54 R/C

dureza ↔ 4 60 R/C

Revenida

T = 300°C , t = 30 min.

10)



dureza ↔ 1 69 R/C

dureza ↔ 2 69 R/C

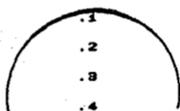
dureza ↔ 3 60 R/C

dureza ↔ 4 58 R/C

Revenida

$T = 300^{\circ}\text{C}$, $t = 45 \text{ min}$

11)



dureza \leftrightarrow 1 48 R/C

dureza \leftrightarrow 2 58 R/C

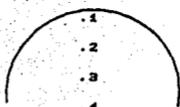
dureza \leftrightarrow 3 58 R/C

dureza \leftrightarrow 4 57 R/C

Revenida

$T = 300^{\circ}\text{C}$, $t = 60 \text{ min}$.

12)



dureza \leftrightarrow 1 42 R/C

dureza \leftrightarrow 2 55 R/C

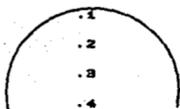
dureza \leftrightarrow 3 56.5 R/C

dureza \leftrightarrow 4 56.5 R/C

Revenida

$T = 300^{\circ}\text{C}$, $t = 75 \text{ min}$.

13)



dureza \leftrightarrow 1 55 R/C

dureza \leftrightarrow 2 55 R/C

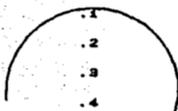
dureza \leftrightarrow 3 55.5 R/C

dureza \leftrightarrow 4 55.5 R/C

Revenida

$T = 400^{\circ}\text{C}$, $t = 15 \text{ min}$.

14)



dureza \leftrightarrow 1 52 R/C

dureza \leftrightarrow 2 58 R/C

dureza \leftrightarrow 3 58 R/C

dureza \leftrightarrow 4 59 R/C

Revenida

$T = 400^{\circ}\text{C}$, $t = 30$ min.

15)



dureza \leftrightarrow 1 54 R/C
dureza \leftrightarrow 2 53.5 R/C
dureza \leftrightarrow 3 55 R/C
dureza \leftrightarrow 4 54.5 R/C

Revenida

$T = 400^{\circ}\text{C}$, $t = 45$ min.

16)

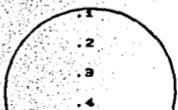


dureza \leftrightarrow 1 20 R/C
dureza \leftrightarrow 2 43 R/C
dureza \leftrightarrow 3 49 R/C
dureza \leftrightarrow 4 50 R/C

Revenida

$T = 400^{\circ}\text{C}$, $t = 60$ min.

17)

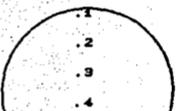


dureza \leftrightarrow 1 52.5 R/C
dureza \leftrightarrow 2 53 R/C
dureza \leftrightarrow 3 53.5 R/C
dureza \leftrightarrow 4 53.5 R/C

Revenida

$T = 400^{\circ}\text{C}$, $t = 75$ min.

18)

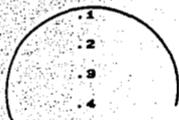


dureza \leftrightarrow 1 42 R/C
dureza \leftrightarrow 2 47.5 R/C
dureza \leftrightarrow 3 51 R/C
dureza \leftrightarrow 4 51 R/C

Revenida

$T = 500^{\circ}\text{C}$, $t = 15 \text{ min.}$

19)



dureza \leftrightarrow 1 55 R/C

dureza \leftrightarrow 2 55 R/C

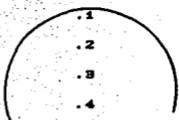
dureza \leftrightarrow 3 55 R/C

dureza \leftrightarrow 4 56.5 R/C

Revenida

$T = 500^{\circ}\text{C}$, $t = 30 \text{ min.}$

20)



dureza \leftrightarrow 1 52.5 R/C

dureza \leftrightarrow 2 53.5 R/C

dureza \leftrightarrow 3 52.5 R/C

dureza \leftrightarrow 4 52.5 R/C

Revenida

$T = 500^{\circ}\text{C}$, $t = 45 \text{ min.}$

21)



dureza \leftrightarrow 1 52.5 R/C

dureza \leftrightarrow 2 52.5 R/C

dureza \leftrightarrow 3 51.5 R/C

dureza \leftrightarrow 4 52.5 R/C

Revenida

$T = 500^{\circ}\text{C}$, $t = 60 \text{ min.}$

22)



dureza \leftrightarrow 1 49 R/C

dureza \leftrightarrow 2 48 R/C

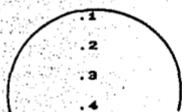
dureza \leftrightarrow 3 50 R/C

dureza \leftrightarrow 4 50 R/C

Revenida

$T = 500^{\circ}\text{C}$, $t = 75 \text{ min.}$

23)



dureza ↔ 1 43 R/C

dureza ↔ 2 50 R/C

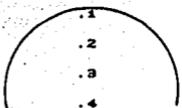
dureza ↔ 3 50 R/C

dureza ↔ 4 51 R/C

Revenida

$T = 600^{\circ}\text{C}$, $t = 15 \text{ min.}$

24)



dureza ↔ 1 49 R/C

dureza ↔ 2 49 R/C

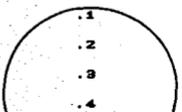
dureza ↔ 3 49 R/C

dureza ↔ 4 48 R/C

Revenida

$T = 600^{\circ}\text{C}$, $t = 30 \text{ min.}$

25)



dureza ↔ 1 47 R/C

dureza ↔ 2 47 R/C

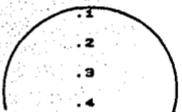
dureza ↔ 3 47 R/C

dureza ↔ 4 47 R/C

Revenida

$T = 600^{\circ}\text{C}$, $t = 45 \text{ min.}$

26)



dureza ↔ 1 47 R/C

dureza ↔ 2 47 R/C

dureza ↔ 3 47 R/C

dureza ↔ 4 47 R/C

Revenida

$T = 600^{\circ}\text{C}$, $t = 60 \text{ min.}$

27)



dureza \leftrightarrow 1 45 R/C

dureza \leftrightarrow 2 45 R/C

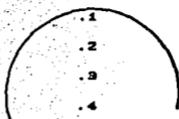
dureza \leftrightarrow 3 45 R/C

dureza \leftrightarrow 4 45 R/C

Revenida

$T = 600^{\circ}\text{C}$, $t = 75 \text{ min.}$

28)



dureza \leftrightarrow 1 45 R/C

dureza \leftrightarrow 2 45.5 R/C

dureza \leftrightarrow 3 45 R/C

dureza \leftrightarrow 4 45.5 R/C

ACERO DE COMPOSICION Fe-Ld PROBETAS DE 0.85" x 1" DE LONG.

No	PROBETA TRATAMIENTO TERMICO	TEMPERATURA °C	TIEMPO DUREZA		PROMEDIO DUREZA X
			Min.	R C	
1	-O-	-O-	-O-	RB 92,92,92,91.	91.75
2	Templada	815	20	56.5,60,65, 64.	61.4
3	Templada	815	20	64,64.5,63, 65.	64.13
4	Revenida A.	200	15	55,60,60,60.	62.25
5	Revenida A.	200	30	57.5,62,62, 62.5.	61.00
6	Revenida A.	200	45	55,60,60,60.	58.75
7	Revenida A.	200	60	58.5,59,59, 59.	51.5
8	Revenida A.	200	75	51,60,60,60.	57.75
9	Revenida A.	300	15	49,59,59,60.	56.75
10	Revenida A.	300	30	63,63,60,58.	61.00
11	Revenida A.	300	45	48,58,58,57.	55.25
12	Revenida A.	300	60	42,55,56.5, 54.5.	52.00
13	Revenida A.	300	75	55,55,55.5, 55.5.	55.25
14	Revenida A.	400	15	52,53,53,53.	52.75
15	Revenida A.	400	30	54,53.5,55, 54.5.	54.25
16	Revenida A.	400	45	29,43,49,50.	42.75
17	Revenida A.	400	60	52.5,53, 53.5,53.5.	53.12
18	Revenida A.	400	75	42,47.5,51, 51.	47.87
19	Revenida A.	500	15	55,56,56, 56.5.	55.87
20	Revenida A.	500	30	52.5,53.5, 52.5,52.5.	52.75

No	PROBETA TRATAMIENTO TERMICO	TEMPERATURA °C	TIEMPO DUREZA		PROMEDIO
			Min.	R/C	DUREZA X
21	Revenido A.	500	45	52.5,52.5,	52.25
				51.5,52.5.	
22	Revenido A.	500	60	44,48,50,50.	48.00
23	Revenido A.	500	75	43,50,50,51.	48.5
24	Revenido A.	600	15	49,49,49,48.	48.75
25	Revenido A.	600	30	47,47,47,47.	47.00
26	Revenido A.	600	45	47,47,47,47.	47.00
27	Revenido A.	600	60	45,45,45,45.	45.00
28	Revenido A.	600	75	45,46.5,46,	45.75
				45.5.	

TABLA 5.1

5.5.-RESULTADOS

Resultados de dureza antes y despues del tratamiento térmico de temple y revenido .

Los resultados de dureza que se obtienen para las diferentes probetas, una vez que se ha realizado el tratamiento térmico de revenido en cada una de ellas, esta dado en la columna de Dureza R C de la tabla 5.1.

Las curvas de revenido que se dibujan en las siguientes figuras apartir de los resultados de la tabla anterior y de la aplicación utilizadas en el tratamiento térmico de revenido.

Como se observa en la curva de revenido, entre más alta sea la temperatura para aplicar el tratamiento de revenido, mayor sera la disminución de dureza.

Quando solamente sea necesario disminuir e eliminar la tensiones internas sin variar la dureza de la pieza después del templado, el tratamiento de revenido se realiza a baja temperatura.

Para seleccionar adecuadamente la temperatura de revenido a aplicar, hay que tomar en cuenta el tipo de

acero el cual puede ser alto o bajo carbono, en el caso de los aceros aleados hay que tomar en cuenta la composición de la aleación.

El comportamiento de las propiedades mecánicas en el acero al carbono durante el tratamiento térmico de revenido, es el siguiente:

- a) Dureza: Esta disminuye proporcionalmente con el aumento de la temperatura al aplicar el revenido.
- b) Tenacidad: Aumenta conforme disminuye la dureza.
- c) Ductilidad: Aumenta conforme disminuye la dureza.
- d) Resistencia tensil: Disminuye conforme la dureza desciende.

En lo que respecta al tratamiento térmico de recocido el análisis experimental no se efectuó por las siguientes causas:

CURVA DE REVENIDO (Disminución de dureza)

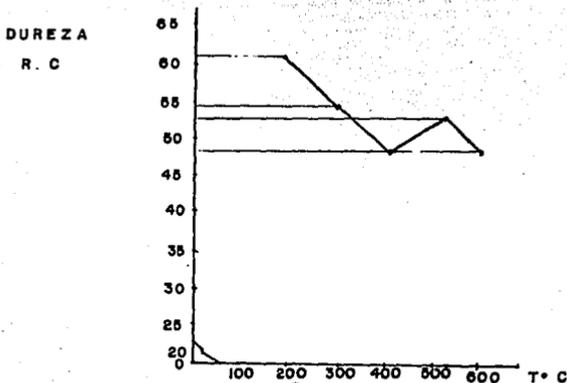


Fig.5.10

Tomando las primeras lecturas en un tiempo de 15 min.

Nota: Tomando cada una de las temperaturas utilizando solo en el tiempo de 15 min, y se sacaron el promedio de cada una de las probetas para su mejor utilidad.

La variación de dureza del acero Fa/Ls templada y revenida en aceite a diferentes temperaturas son mostradas en la tabala 5.1.

CURVA DE REVENIDO (Disminución de dureza)

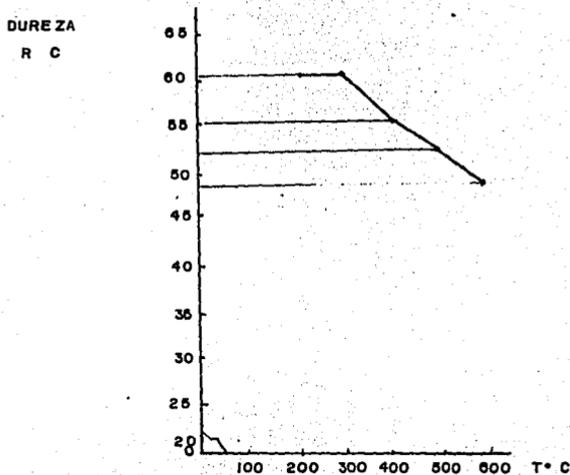


Fig.5.11

Variación de la dureza del Acero Fa/Ls templada y revenida en aceite a diferentes temperaturas tomando el grafica en el tiempo de 30.min, de la tabla 5.1.

CURVA DE REVENIDO (Disminución de dureza)

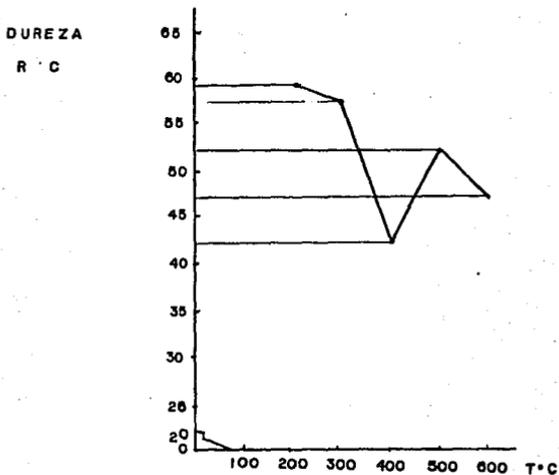


fig.5.12

Variación de la dureza del Acero Fa/Ls templada y revenida en aceite adiferentes temperaturas, tomando el grafica, en el tiempo de 45 min, de la tabla 5.1.

CURVA DE REVENIDO (Disminución de dureza)

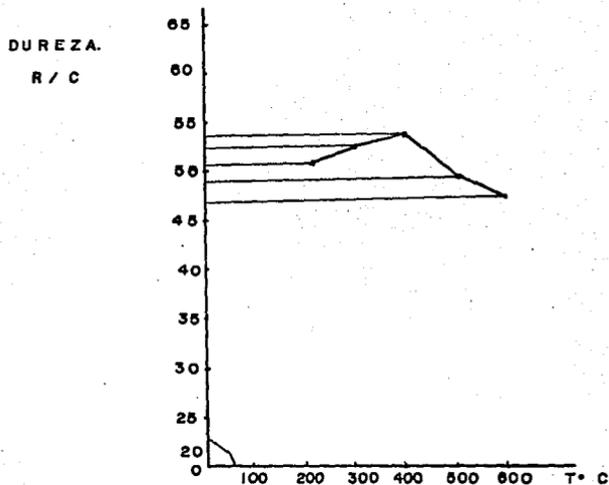


fig.5.13

Variación de la dureza del Acero Fa/Ls templadas y revenidas en aceite a diferentes temperaturas tomando el gráfico, en el tiempo de 60 min, de la tabala 5.1.

CURVA DE REVENIDO (Disminución de dureza)

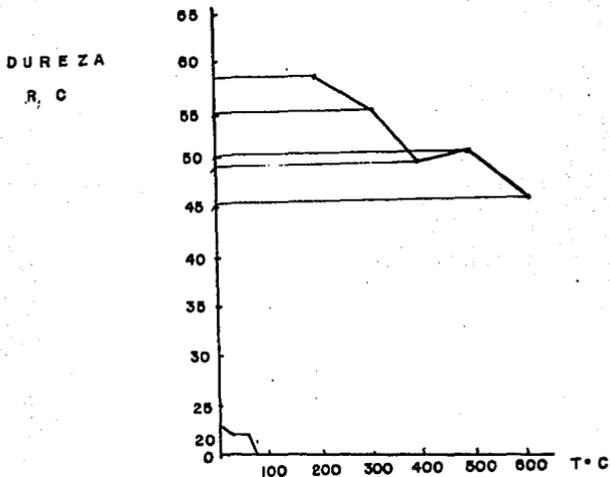


Fig.5.14

Variación de la dureza del acero Fa/Ls templada y revenida en aceite a diferentes temperaturas tomando el grafico en el tiempo de 75 min. de la tabla 5.1.

CAPITULO SEIS

6.1.-CONCLUSIONES

- La tesis desarrollada aparte de ser interesante, pasa a formar parte de los cimientos teóricos para el estudio de los aceros grado herramienta para propósitos generales.

- En ésta, se analizan los cambios que existen en las propiedades mecánicas cuando el acero se somete a algún tratamiento térmico de temple y revenido.

- Se describe la secuencia a seguir para realizar el tratamiento térmico en piezas de acero Fa/Ls considerando factores como son : la composición del material, el tamaño y forma del mismo. En base a éstos factores se selecciona tanto la temperatura como el tiempo de permanencia de la pieza a tratar en el horno.

- Se cuenta además con gráficas que se utilizan prácticamente, en donde se seleccionan las temperaturas adecuadas para realizar cualquier tratamiento térmico del material.

- Es necesario respetar las condiciones de tiempo y temperatura establecidas para cualquier composición al realizar un tratamiento térmico con la finalidad de obtener las propiedades mecánicas deseadas, con lo que se consigue la confiabilidad en la pieza durante el trabajo.

- En general el tratamiento térmico es una serie de operaciones de calentamiento y enfriamiento aplicados a una pieza de acero, con el fin de modificar sus propiedades, como son : dureza, tenacidad, resistencia, ductilidad, etc.

- Actualmente el tratamiento térmico es una realidad, ya que es uno de los procesos que ha alcanzado una gran aplicación en los aceros debido a que los resultados que se

obtienen se cuentan con las propiedades de resistencia al desgaste, resistencia a la tracción, resistencia al impacto, etc.

- Un tratamiento térmico realizado fuera de la descripción no alcanzará las propiedades mecánicas deseadas, con lo que disminuye mucho la vida (horas de trabajo) de la pieza tratada térmicamente.

6.1 BIBLIOGRAFIA

- MATERIALES DE INGENIERIA Y SUS APLICACIONES
AUTOR: RICHARD A. FLINN, Y OTROS
ED: MCGRAW-HILL TERCERA EDICION

- METALOGRAFIA FISICA PARA INGENIEROS
AUTOR: ALBERTO GUY
ED: FONDO EDUCATIVO INTERAMERICANO

- TRATAMIENTOS TERMICOS DE LOS ACEROS
AUTOR: GEORGE F. Y OTROS
ED: DOSSAT

- LA CIENCIA E INGENIERIA DE MATERIALES
AUTOR: DONALD R. ASKELAND
ED: IBEROAMERICA

- INTRODUCCION A LA METALURGIA FISICA
AUTOR: SYDNEY H. AVNER
ED: MCGRAW-HILL

- TRATAMIENTOS TERMICOS DE LOS ACEROS
AUTOR: H. ESTUDREMAN
ED: URMO, S.A. DE EDICIONES

- METALLOGRAPHY PRINCIPLES AND PRACTICE
AUTOR: GEORGE F. VANDER VOORT
ED: MCGRAW-HILL

- METALURGIA GENERAL
AUTOR: MICHEL A. J. BERNARD , Y OTROS
ED: FONDO EDUCATIVO INTERAMERICANO, S. A.

- TRATAMIENTOS TERMICOS DE LOS ACEROS
AUTOR: JOSE APRAIZ BARREIRO
ED: DOSSAT, S.A.

- METALS HANDBOOK
NINTH EDITION
VOLUMEN 9
METALLOGRAPHY AND MICROSTRUCTURES.