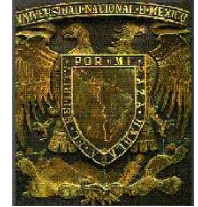

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

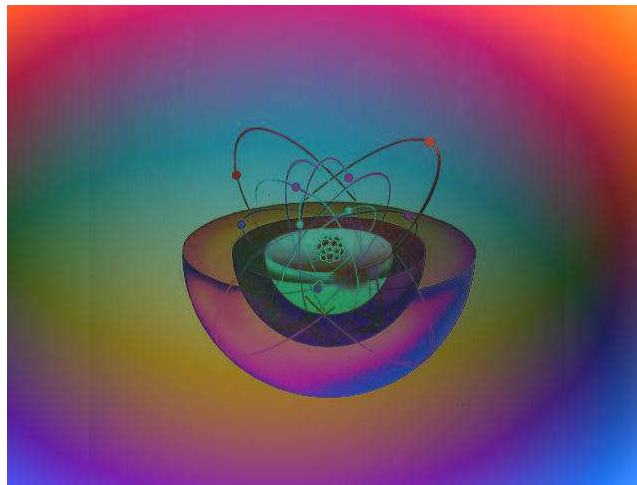


DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA



LABORATORIO DE TECNOLOGÍA DE MATERIALES

LECTURAS DE INGENIERÍA 14
TRATAMIENTOS TÉRMICOS



M. en I. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez.

CUAUTITLÁN IZCALLI 2010

CAPITULO 1

EL DIAGRAMA Fe-Fe₃C Y LOS ACEROS

1.1 DIAGRAMA HIERRO – CARBURO DE HIERRO

El sistema de aleación más importante es el hierro – carburo de hierro. La temperatura a que tienen lugar los cambios alotrópicos en el hierro esta influido por los elementos de aleación, de los cuales el más importante es el carbono. En la figura 1.1, se muestra el diagrama hierro – carburo de hierro, el diagrama muestra la porción de interés que es la parte entre el hierro puro y el compuesto intersticial carburo de hierro, Fe₃C, ya que el Fe₃C se considera un componente. La convención y la conveniencia imponen expresar la concentración en % C en lugar de % Fe₃C; 6.70% en peso de C corresponde al 100% de Fe₃C.

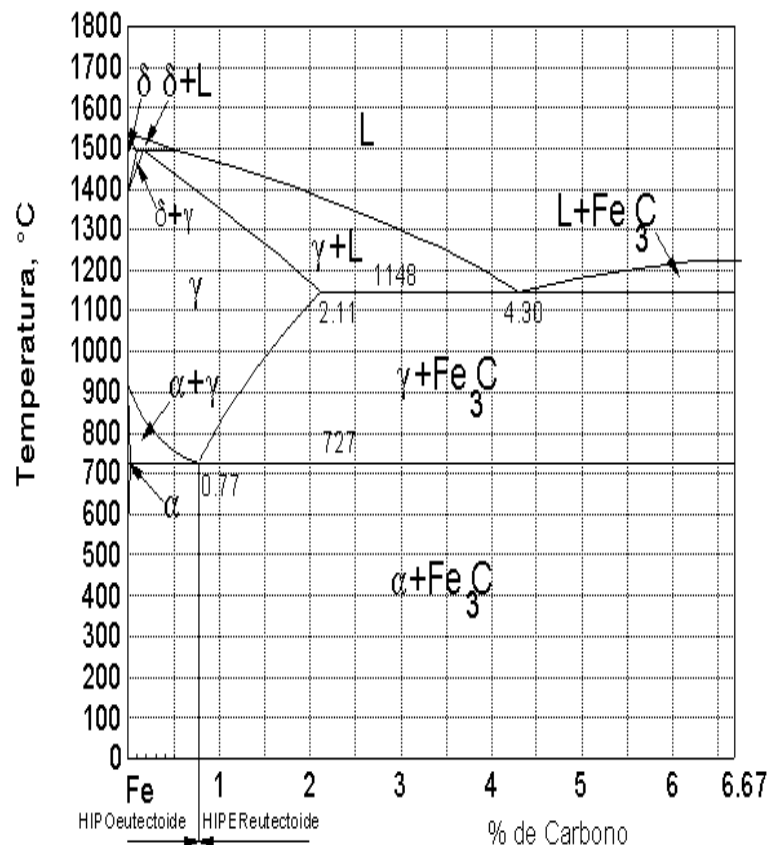


Figura 1.1.- Diagrama de equilibrio hierro - carburo de hierro.

Es importante saber que éste diagrama no es un verdadero diagrama de equilibrio, pues equilibrio implica que no hay cambios de fase con el tiempo; sin embargo, es un hecho que el compuesto Fe₃C se descompone en hierro y carbono (grafito), lo cual tomará un tiempo muy

largo a temperatura ambiente, y aun a 704°C tardaría varios años en formar grafito, por lo tanto, el carburo de hierro es una fase metaestable (que tiende al cambio).

1.1.1. Constituyentes del diagrama.

La ferrita (α) ó hierro alfa, es el nombre dado a la solución sólida α (o sea, hierro casi puro). Es una solución sólida intersticial de una pequeña cantidad de carbono disuelto en hierro α (con estructura cristalina BCC). La máxima solubilidad es 0.025% de carbono a 727°C, y disuelve sólo 0.008% de carbono a temperatura ambiente (por esto, prácticamente se considera a la ferrita como hierro α puro). Las propiedades promedio son: resistencia a la tensión, 40000 lb/pulg² (28 kg/mm²); elongación, 40 % en 2 pulg; dureza, menor que 0 R_C, ó 90 R_B. Es la estructura más suave (blanda) de todos los constituyentes del acero, muy dúctil y maleable, magnética y de pequeña fuerza coercitiva.

La ferrita puede contener pequeñas cantidades de silicio, fósforo y otras impurezas. En los aceros aleados, suelen formar soluciones sólidas con la ferrita, el níquel, manganeso, cobre, silicio, aluminio, etc.

En los aceros, la ferrita puede aparecer bajo formas muy diversas como a continuación se mencionan:

- 1 Como elemento proeutectoide que acompaña a la perlita. En este caso se presenta:
(a) En forma de cristales mezclados con los de la perlita en los aceros de menos de 0.55% de carbono, figura 1.2. (b) Formando una red o malla que limita los granos de la perlita en los aceros de 0.55 a 0.85% de carbono.*
- 2 También aparece como elemento eutectoide de la perlita, formando láminas paralelas, separadas por otras láminas de cementita.*

- 3 *En la estructura globular, propia de los aceros para herramientas recocidos a temperaturas próximas a 721°C, aparece formando la matriz que rodea a los glóbulos de cementita*
- 4 *En los aceros hipoeutectoides templados, puede aparecer también mezclada con la martensita o con los demás elementos de transición formando zonas blancas irregulares o agujas finas.*

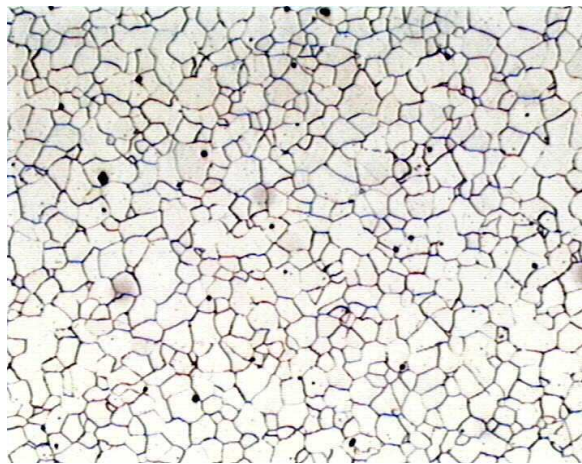


Figura 1.2.- Cristales de ferrita proeutectoide en un acero de bajo carbono

La austenita o hierro γ (en memoria del metalurgista inglés Robert Austen), es el nombre dado a la solución sólida γ (con estructura FCC). Es una solución sólida intersticial de carbono disuelto en hierro γ . La máxima solubilidad es del 2% de carbono a 1148°C (punto C). Las propiedades promedio son: resistencia a la tensión, 150000 lb/pulg² (105 kg/mm²); elongación, 10 % en 2 pulg; dureza, 40 R_C, aproximadamente. No es magnética, es blanda, muy dúctil y con tenacidad alta. Tiene gran resistencia al desgaste, siendo el constituyente más denso de los aceros.

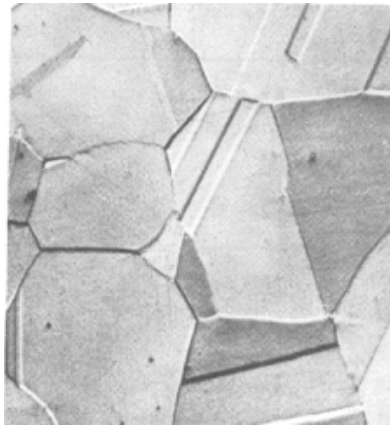


Figura 1.3.- Cristales de austenita (325X)

La austenita en los aceros al carbono, empieza a formarse a la temperatura de 727°C y a partir de la temperatura crítica superior (A_3), la totalidad de la masa del acero está formada por cristales de austenita. Aunque generalmente es un constituyente inestable, se puede obtener esa estructura a la temperatura ambiente, enfriando muy rápidamente una probeta de alto contenido de carbono o de muy alta aleación desde una temperatura por encima de A_3 .

La cementita o carburo de hierro (Fe_3C), contiene 6.67% de C por peso y 93.33% de hierro. Es un compuesto intermetálico con estructura ortorrómbica, de baja resistencia a la tensión (5000 lb/pulg² aproximadamente), pero de alta resistencia a la compresión, y una dureza superior a 68 R_C . Es la estructura más dura y frágil de los aceros y cristaliza formando un paralelepípedo ortorrómbico (estructura cristalina ortorrómbica), de gran tamaño. Es magnética a la temperatura ordinaria, pero pierde su magnetismo a la temperatura de 218 °C.

La cementita puede aparecer de las siguientes formas:

- 1. Como cementita proeutectoide en los aceros con más de 0.8% de carbono, formando una red que envuelve los granos de perlita, figura 1.4, y también en forma de agujas finas.*
- 2. Formando parte de la perlita, y en ese caso se le llama cementita perlítica o eutectoide, y toma la forma de láminas paralelas separadas por otra de ferrita.*

3. *Como cementita globular se presenta en forma de pequeños glóbulos o granos redondos dispersos en una matriz de ferrita, cuando los aceros de 0.8 a 1.4% de carbono han sufrido un recocido a temperaturas próximas a 721°C.*
4. *En los aceros hipereutectoides templados, aparece la cementita rodeada de martensita o de otros constituyentes de transición.*
5. *Como cementita terciaria, de forma alargada vermicular (forma de gusano), en las uniones de los granos de los aceros de bajo contenido en carbono (inferior a 0.25%).*

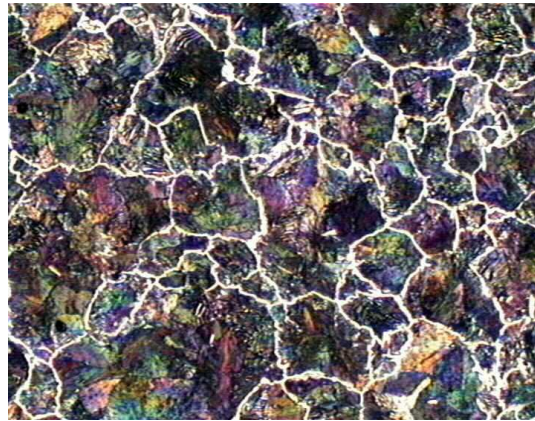


Figura 1.4.- Red de Fe₃C proeutectoide en un acero con 1.10% de carbono

La perlita ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$), es la mezcla eutectoide que contiene 0.80% de carbono y se forma a 727 °C bajo un enfriamiento muy lento o por transformación isotérmica de la austenita en la zona de los 650 a 725°C. Es una mezcla muy fina, tipo placa o laminar de ferrita y cementita. La base o matriz ferrítica blanca que forma la mayoría de la mezcla eutectoide contiene placas delgadas de cementita. Las propiedades promedio son: resistencia a la tensión, 120000 lb/pulg² (80 kg/mm²); elongación, 20 % en 2 pulg; dureza, 20 R_C, 95 – 100 R_B ó BHN 250 – 300.

La distancia interlaminar de la perlita sirve para clasificarla en: Perlita gruesa con una separación entre las láminas de unas 400µm (400 milimicras), y una dureza de 200 Brinell,

que se obtiene por enfriamiento muy lento dentro del horno. La perlita normal tiene $350\mu\text{m}$ y 250 Brinell de dureza. La perlita fina, que se obtiene cuando, se enfría dentro del horno muy rápido o cuando se deja enfriar el acero al aire, tiene 300 Brinell de dureza. Si la perlita se calienta durante algún tiempo a una temperatura un poco inferior a la temperatura crítica inferior (inferior a 727°C), la cementita adopta la forma de glóbulos incrustados en la masa de ferrita, recibiendo el nombre de perlita globular. Para observar con claridad las laminas de la perlita gruesa en el microscopio óptico, suele ser necesario emplear unos 500 aumentos.



Figura 1.5.- Perlita en un acero eutectoide

La ledeburita es la mezcla eutéctica de austenita y cementita, contiene 4.3% de carbono y se forma a 1148°C . No es un constituyente de los aceros, sino de las fundiciones. Se encuentra en las aleaciones de hierro – carbono, cuando el porcentaje de carburo de hierro aleado es superior al 25%.

En la tabla 1.1, se resumen algunas propiedades de las estructuras presentes en el diagrama hierro – carburo de hierro.

Tabla 1.1 Propiedades más importantes de las estructuras del diagrama hierro - carburo de hierro.

ESTRUCTURA	$\sigma_{\text{Máx}}$ (Psi)	DUREZA (R_C)	ϵ (%)
γ	150,000	40	10
Fe_3C	5,000	68	0
Perlita.	120,000	20	20
α	40,000	90 R_B	40

1.1.2.- Reacciones en el diagrama de fases Fe-Fe₃C

Del diagrama de equilibrio se puede ver que existen puntos importantes, en los que se llevan a cabo reacciones entre fases, a saber:

- a) *Una reacción peritética ocurre a 1495 °C entre la fase δ conteniendo 0.10 %C, y el líquido conteniendo 0.5 % C, dando como resultado fase γ conteniendo 0.18 %C, figura 1.6.*

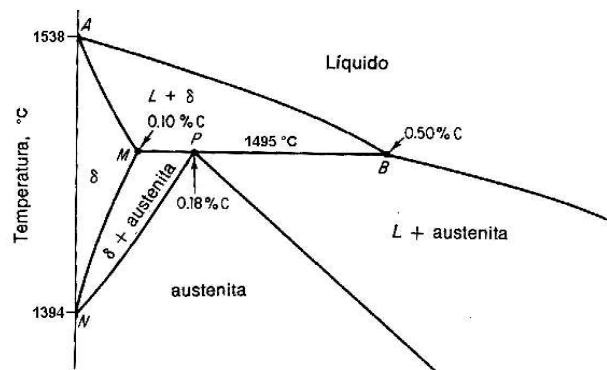
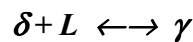
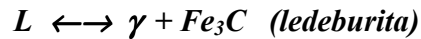
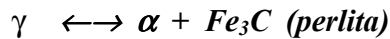


Figura 1.6.- Región delta del diagrama hierro - carburo de hierro.

- b) *Una reacción eutéctica ocurriendo a 1148 °C y una composición de 4.3 %C. A esta temperatura y composición la fase líquida esta en equilibrio con la fase sólida cementita, con 6.69 %C y austenita saturada conteniendo 2.11 %C. El producto de esta reacción se conoce como “ledeburita”.*



- c) Una reacción eutectoide ocurriendo a 727 °C y a una composición de 0.8 %C. Esta reacción se lleva a cabo en el estado sólido. Aquí la fase γ conteniendo 0.8 %C se encuentra en equilibrio con la fase α , conteniendo 0.025 %C y con la fase cementita con 6.69 %C. El producto de esta reacción se conoce como “perlita”.



1.1.3.- Temperaturas críticas de los aceros.

Al estudiar el diagrama hierro – carburo de hierro, se ha visto que existen para cada acero diferentes temperaturas, en las que el calentamiento y en el enfriamiento, muy lento ocurren transformaciones de los constituyentes microscópicos. Ahora se estudiará con más detalle esas temperaturas, que se muestran en la figura 1.7.

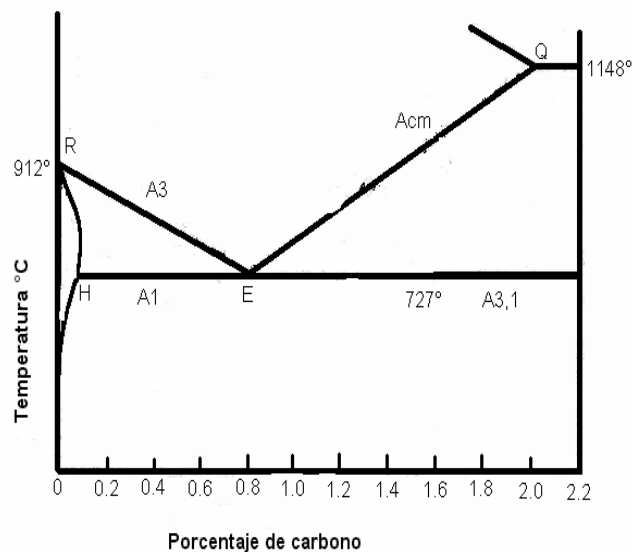


Figura 1.7.- Temperaturas críticas en los aceros.

La línea A_3 , esta formada por la unión del punto R con el punto E, a esa línea se le conoce como línea de temperatura crítica superior (y a cualquier temperatura que se encuentre en esa línea se le llama temperatura crítica superior), esta línea durante el enfriamiento marca el principio de la transformación de austenita en ferrita proeutectoide. Conforme disminuye la

temperatura (912°C a 727°C), la cantidad de carbono se incrementa hasta alcanzar la composición eutectoide.

La línea A_1 , formada por la unión del punto H con el punto E, se le conoce como línea de temperatura crítica inferior, y marca el fin de la transformación de la austenita en ferrita y perlita del lado hipoeutectoide. Esta línea se encuentra ubicada a temperatura constante de 727° C y (a esta temperatura se le conoce como temperatura crítica inferior) para cualquier composición de carbono hasta de 0.8% de carbono, en donde toda la austenita se transforma en perlita.

La línea A_{cm} , se forma al unir los puntos E y Q, y se conoce como línea de temperatura crítica superior, (del lado hipereutectoide) dicha línea parte del punto E que se encuentra a la temperatura de 727°C y con 0.8% de carbono, y llega hasta el punto Q que está a la temperatura de 1148°C y con 2% de carbono. Esta línea marca el inicio de la transformación de la austenita a cementita proeutectoide.

La línea A_{31} , se conoce como línea de temperatura crítica inferior (del lado hipereutectoide), ésta línea marca el fin de la transformación de la austenita en perlita durante el enfriamiento y se encuentra a una temperatura de 727°C, con un intervalo de composición entre 0.8% a 6.67% de carbono.

A las líneas antes mencionadas, con frecuencia se les designa con subíndices adicionales, los cuales son c ó r. En pocas palabras, estos subíndices se usan para indicar un corrimiento de las temperaturas a las cuales ocurre la transformación, debido al tiempo requerido para la difusión o precipitación, y al hecho de que es impráctico aproximarse a un calentamiento o enfriamiento infinitamente lentos.

La letra c, indica calentamiento, y denota el corrimiento de la línea con el aumento de temperatura conforme se agrega calor. La letra r, indica enfriamiento, y denota un corrimiento de la línea con la disminución de la temperatura con forme se quita calor. La posición de las líneas A_c y A_r depende de la relación de calentamiento o enfriamiento. Mientras más rápida es la relación mas lejos se separaran de las líneas básicas, que solo se aplican a las condiciones de equilibrio.

1.2.- CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS.

Un acero es una aleación de hierro (Fe) con carbono (C), con un contenido de éste último en un rango de 0.0025 hasta el 2% y pequeñas cantidades de otros elementos que se consideran como impurezas, tales como; P, S, Mn, Si, Cu, etc.

Los aceros se pueden clasificar de varias formas, describiéndose a continuación las más importantes:

- 1. Clasificación de los aceros atendiendo a su procedimiento de fabricación. Según el procedimiento de fabricación se clasifican los aceros en: aceros Bessemer, aceros Thomas, aceros Siemens (en Francia e Italia, éstos aceros se denominan aceros Martín), aceros eléctricos, aceros al crisol y hierros pudelados.*
- 2. Clasificación de los aceros atendiendo a su porcentaje de carbono. Se denominan aceros hipoeutectoides a los aceros cuyo porcentaje de carbono es inferior al del punto eutectoide; se denominan aceros eutectoides, si su porcentaje de carbono es igual al del punto eutectoide, y se denominan aceros hipereutectoides si su porcentaje de carbono es superior al del punto eutectoide. El punto eutectoide tiene un porcentaje de carbono del 0.8%.*
- 3. Clasificación de los aceros atendiendo al grado de desoxidación. Los aceros calmados son los que se han desoxidado por completo y al solidificarse no desprenden gases. Los aceros efervescentes son los que se han desoxidado incompletamente y al solidificarse desprenden abundantes gases.*
- 4. Clasificación de los aceros atendiendo a su estructura final. La clasificación se podrá hacer sin reservas, haciendo constar que se refiere a la estructura final de los aceros de un diámetro máximo de 25 mm, o el redondo equivalente en perfiles de otra sección, calentados hasta la austenitización completa y enfriados al aire. Con arreglo al constituyente predominante con que quedan los aceros en las*

condiciones antes dichas, se acostumbra clasificarlos en aceros perlíticos, aceros martensíticos, aceros austeníticos, aceros ferríticos y aceros con carburos.

5. *Clasificación de los aceros atendiendo a su composición. Según sea su composición, se pueden dividir los aceros en tres clases fundamentales a saber: aceros al carbono, aceros aleados y aceros alta aleación.*

– *Los aceros al carbono o aceros simples, están formados fundamentalmente por hierro y carbono y se dividen en:*

- *Aceros de bajo carbono. Con un contenido de carbono desde 0.025%, hasta 0.3%.*
- *Aceros de medio carbono. Con un contenido de carbono desde 0.3%, hasta 0.65%.*
- *Aceros de alto carbono. Su rango comprende desde 0.65% de carbono, hasta 2% de carbono.*

– *Los aceros aleados son los que contienen además de carbono e impurezas, elementos de aleación voluntaria como: cromo, níquel, molibdeno, vanadio, tungsteno, silicio, etc, pero con la condición de que la suma de los elementos aleantes sea menor del 5%.*

– *Los aceros alta aleación se dividen en aceros inoxidable y aceros para herramienta. Todos los aceros inoxidables contienen un mínimo de 12% de Cr, y de ellos se hablará más adelante*

– *Los aceros para herramienta son aquellos aceros especiales de alta calidad, utilizados para cortar, moldear o para dar forma a otro material. Estos aceros son duros y resistentes al desgaste, tiene excelente templabilidad, mínima distorsión durante la aplicación de algún tratamiento térmico y contienen buena dureza al rojo. Los aceros para herramienta se dividen en siete grupos de acuerdo a la clasificación desarrollada por AISI (American Iron and Steel Institute) y adoptado*

en México como Norma Oficial Mexicana (NOM), y a cada grupo se le ha asignado una letra del alfabeto; se clasifican en:

- ◆ *Templables en agua. (grupo W)*
- ◆ *Resistentes al impacto. (grupo S)*
- ◆ *Trabajo en frío. (grupos O, A y D)*
- ◆ *Trabajo en caliente. (grupo H)*
- ◆ *Alta velocidad. (grupos T y M)*
- ◆ *Para moldes. (grupo P)*
- ◆ *Propósitos especiales. (grupos L y F)*

1.2.1.- Sistemas de identificación para aceros simples y aleados.

Este sistema de identificación esta constituido por cuatro dígitos, los cuales proporcionan diferente información acerca del acero. Esta designación para los aceros simples y aleados es aceptada como norma por el American Iron and Steel Institute (AISI) y la Society of Automotive Engineers (SAE), y que en nuestro país fue aceptada como Norma Oficial Mexicana (NOM), en la tabla 1.2 se muestra dicho sistema de identificación.

Tabla 1.2.- Sistema de identificación de los aceros simples y aleados.

Elementos de aleación	Familia
C	1xxx
Ni	2xxx
Cr. – Ni.	3xxx
Cr. – Mo.	4xxx
Cr.	5xxx
Cr. – V.	6xxx
Cr. – Ni. – Mo.	8xxx
Cr. – Si.	9xxx

El sistema de identificación AISI-SAE-NOM para los distintos grados de acero indica cual es el contenido de carbono, así como algunas otras características de acuerdo a lo siguiente:

- AISI establece una categoría para los aceros dentro de un sistema de grados identificados por los dos primeros dígitos. En un grado AISI 1018, el “10” significa que este acero es un acero al carbono no resulfurado. El azufre se añade típicamente al acero para aumentar su maquinabilidad.*
- El segundo conjunto de dígitos proporciona el rango de carbono en porcentaje, dado como el nominal. Esto es, un grado identificado como 1018 significa que es un acero al carbono no resulfurado con contenido de carbono nominal de 0.18 %. Así, añadiendo el decimal después de los primeros dos dígitos, permite conocer el contenido nominal de carbono de todos los aceros en el sistema de graduación AISI.*
- Si hay una letra en el centro de la designación, tal como 12L14 o 11L17, la letra indica un elemento añadido. Para determinar el contenido de carbono, hay que añadir el decimal después del carácter alfa.*

CAPITULO 2

TRATAMIENTOS TÉRMICOS APLICABLES A LOS ACEROS

2.1.- DEFINICIÓN

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

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

Con los tratamientos térmicos se modifica la constitución del acero, modificando el estado en que se encuentra el carbono, y el estado alotrópico del hierro; se modifica la estructura variando el tamaño del grano y el reparto de los constituyentes. El estado mecánico también queda afectado por los esfuerzos a que quedan sometidos los materiales después de algunos tratamientos térmicos, principalmente después del temple.

Todos los procesos básicos de tratamientos térmicos para aceros incluyen la transformación o descomposición de la austenita. La naturaleza y la apariencia de estos productos de transformación determinan las propiedades físicas y mecánicas de cualquier acero.

2.2.- DIAGRAMAS TTT Y CCT.

Hasta principios del siglo XX, el único diagrama utilizado para el estudio de las transformaciones de la constitución de las aleaciones era el diagrama hierro –carburo de hierro. Pero en 1930, los metalurgistas Bain y Davenport, estudiando la transformación de la austenita a temperaturas constantes, desarrollaron un diagrama que denominaron TTT (diagrama de Transformación-Tiempo- Temperatura), que constituye el más valioso auxiliar para el estudio de los tratamientos térmicos. Como no es posible tomar en consideración todas las condiciones de enfriamiento que se dan en la práctica, se han seleccionado en general dos

tipos de procesos de enfriamiento, a saber: la transformación isotérmica y la transformación por enfriamiento continuo.

La transformación isotérmica significa que la transformación tiene lugar a temperatura constante. Para conseguirlo, es necesario enfriar el acero desde, la temperatura de temple (zona austenítica), tan rápido como sea posible hasta una temperatura determinada, de tal modo que al llegar a ella no se haya producido ninguna transformación, luego, se mantiene el acero a esa temperatura y se fija el tiempo hasta que se inicie la transformación y hasta que la misma haya concluido.

Los diagramas de transformación isotérmicas, no son diagramas de equilibrio. Ellas indican los cambios que ocurrirían con el tiempo como variable. Un diagrama de equilibrio no muestra cambios con el tiempo.

2.2.1.- Construcción de un diagrama TTT.

La mejor forma de entender los diagramas de transformación isotérmica es estudiando su obtención. La composición de 0.8% de carbono es la más simple de estudiar.

Los pasos que generalmente se siguen para determinar un diagrama TTT son:

- 1. Cortar un gran número de muestras. La sección transversal tiene que ser pequeña para que reaccione rápidamente a los cambios de temperatura.*
- 2. Colocar las muestras en el horno a la temperatura de austenitización adecuada (para un acero 1080 esta temperatura es de 774°C, aproximadamente). Se deben dejar a la temperatura dada por un tiempo suficiente para que toda la estructura del acero se transforme en austenita.*
- 3. Colocar las muestras en un baño de sal fundida que se mantenga a una temperatura constante subcrítica (por ejemplo 704°C), es decir, a una temperatura por debajo de la línea A_1 .*

4. *Después de variar los intervalos de tiempo en el baño de sal, cada muestra se temple en agua fría o en salmuera enfriada con hielo.*
5. *Después del enfriamiento, a cada muestra se le toma la dureza y se estudia microscópicamente.*
6. *Los pasos anteriores se repiten a diferentes temperaturas subcríticas hasta que se determinen suficientes puntos para graficar las curvas en el diagrama.*

Realmente hay interés en saber qué efectos tiene la austenita a 704°C, pero las muestras no pueden estudiarse a esa temperatura, por lo tanto, se debe relacionar de alguna manera el examen microscópico a temperatura ambiente con lo que está sucediendo a la temperatura elevada. Dos puntos deben tener en cuenta:

- *La martensita se forma sólo de la austenita casi instantáneamente a bajas temperaturas.*
- *Si la austenita se transforma a una temperatura mayor a una estructura estable a temperatura ambiente, un rápido enfriamiento no cambiará el producto de transformación. En otras palabras, si la perlita se forma a 704°C, la perlita será exactamente la misma a temperatura ambiente no importa qué tan drásticamente se temple, ya que no hay razón para que la perlita cambie.*

La figura 2.1 muestra esquemáticamente los pasos 3, 4 y 5.

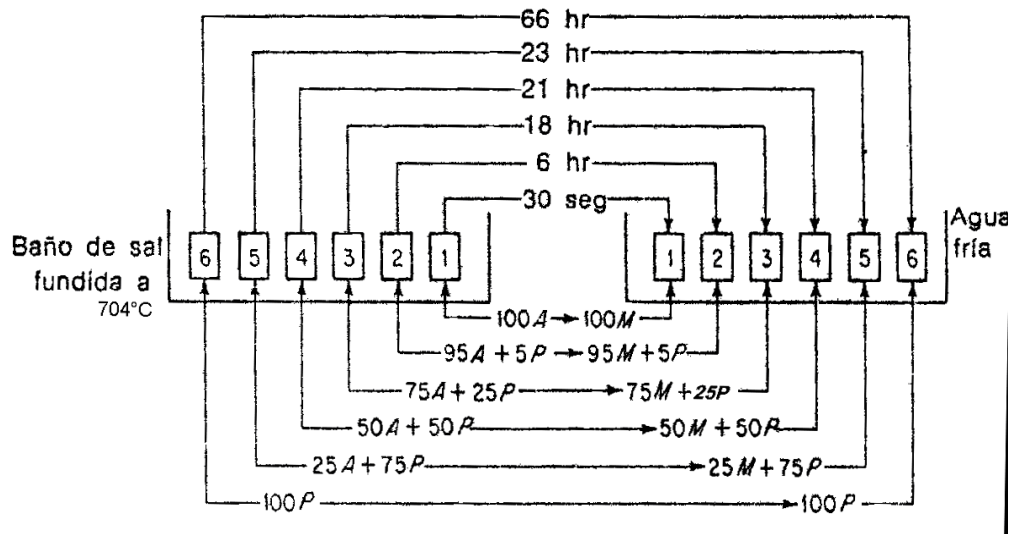


Figura 2.1.- Proceso de transformación de la austenita a 704°C, para la construcción de un diagrama TTT.

La muestra 1, después de 30 segundos a 704 °C y templada, mostró sólo martensita a temperatura ambiente. Como la martensita se forma sólo de la austenita a bajas temperaturas, significa que al final de los 30 segundos a 704 °C sólo había austenita presente y que la transformación todavía no había empezado. La muestra 2, después de 6 horas a 704 °C y templada, reveló un 95% de martensita y 5% de perlita gruesa a temperatura ambiente, significa que al final de las 6 horas a 704 °C había 95% de austenita y 5% de perlita gruesa. Empleando el mismo razonamiento anterior se pueden estudiar el avance de transformación de las muestras restantes.

Como resultado de este experimento, la representación de la transformación isotérmica de la austenita, se realiza llevando al eje de las ordenadas las temperaturas de transformación, y al eje de las abscisas los tiempos de duración de la transformación en escala logarítmica, partiendo de un tiempo muy pequeño, pero nunca de cero.

Las curvas se trazan anotando en la horizontal que pasa por cada temperatura los puntos de inicio y fin de la transformación de la austenita, y muchas veces también los de un 25% de transformación, un 50% y un 75%. Se unen todos los puntos de iniciación de la

transformación y de los del 25%, del 50%, del 75% y del fin de la transformación de la austenita. Esto se repite a diferentes temperaturas subcríticas hasta que se determinan suficientes puntos para dibujar una curva que muestra el principio de la transformación, otras curva que indique el fin de la transformación, y una curva punteada entre ambas que muestre el 50%, con esto se obtiene una serie de curvas que en general tiene forma de S, como se muestra en la figura 2.2

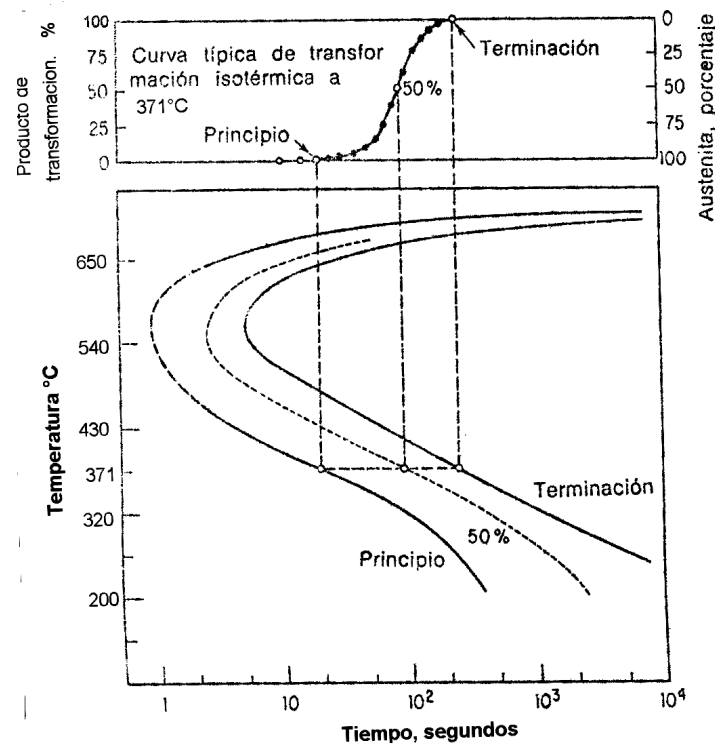


Figura 2.2.- Esquema de un diagrama TTT

Para construir un diagrama razonablemente, se requiere del estudio de más de 100 muestras.

2.2.2.- Zonas que integran un diagrama TTT.

En la figura 2.3 se muestra un diagrama TTT, de un acero eutectoide, en el cual se muestran las zonas que lo integran.

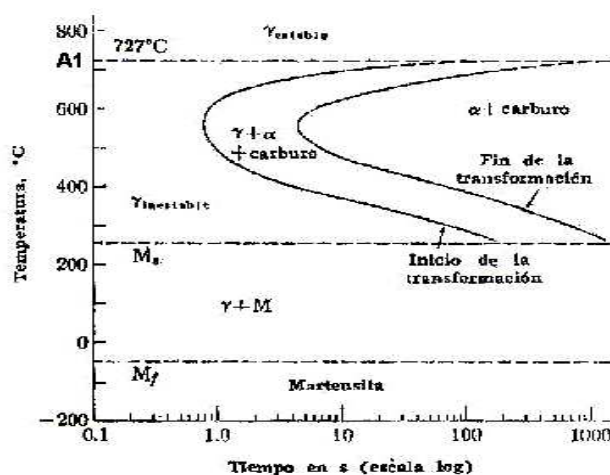


Figura 2.3.- Zonas que integran un diagrama TTT

Por arriba de A_1 , la austenita es estable. El área a la izquierda del principio de la transformación consta de austenita inestable; el área a la derecha de la línea del fin de la transformación es el producto al que se transformará la austenita a temperatura constante; y el área entre el principio y el fin de la transformación, consta de tres fases, austenita, ferrita y carburo, o austenita más el producto al que se transforma. El punto al principio de la línea de transformación más alejado a la izquierda se conoce como nariz del diagrama.

La línea recta M_S , representa la transformación de la austenita en martensita a una temperatura constante. En algunos diagramas, los datos de formación de la martensita se obtuvieron mediante una técnica metalográfica; o con la fórmula:

$$M_S = 500 - 350 * (\%C) - 40 * (\%Mn) - 35 * (\%V) - 20 * (\%Cr) - 17 * (\%Ni) - 10 * (\%Cu) - 10 * (\%Mo) - 5 * (\%W) + 15 * (\%Co) + 30 * (\%Al)$$

De acuerdo con esto, se completo el diagrama TTT con dos líneas horizontales: M_S , que representa la temperatura de inicio de la transformación de la austenita en martensita, y la otra línea, M_F , que representa la temperatura a la cual termina la transformación, las cuales dependen de la cantidad de carbono que esté presente, como se muestra en la figura 2.4.

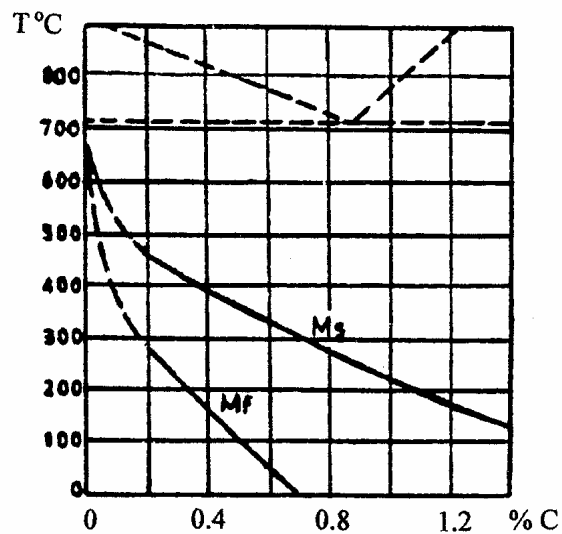


Figura 2.4.- Temperaturas de formación de la martensita en función del contenido de carbono

El efecto de los elementos aleantes (por ejemplo, Cr, Ni, Si, Mn, Mo, Ti, etc.), en el diagrama TTT, es desplazar dicho diagrama a hacia la derecha, esto se debe a que se difunden más lentamente en el hierro que en el carbono. De hecho, es fácil enfriar muchos aceros de baja aleación hasta temperatura ambiente evitando totalmente la nariz de la curva de transformación y formar así martensita.

Los diagramas de transformación isotérmica, muestran que las reacciones ocurren con lentitud a temperaturas relativamente bajas y a temperaturas cercanas a la transformación intermedias, la transformación ocurre más rápido porque hay suficiente fuerza impulsora, para ayudar a nuclear las nuevas fases y la difusión atómica es muy rápida. Con un enfriamiento extremadamente rápido, es posible evitar la nariz de la curva de transformación, y enfriar el acero hasta la temperatura ambiente sin obtener ferrita y carburo, debido a que la descomposición es sustituida por la transformación martensítica. De hecho, este es el propósito de templear el acero en las operaciones de tratamientos térmicos

2.2.3.- Transformación de la austenita en perlita.

En el producto de la transformación por encima de la región de la nariz es perlita. De 717°C a 550°C, la austenita se transforma isotérmicamente en hierro α + carburo de hierro en la forma de perlita. Si un acero se temple justo por debajo de la temperatura eutectoide, la austenita se subenfria sólo un poco. Se requieren tiempos prolongados antes de que se formen núcleos estables para la ferrita y la cementita. Después de que la perlita empieza a crecer, los átomos se difunden rápidamente, a temperaturas muy próximas al eutectoide, para formar láminas de ferrita (α) y de Fe_3C , a esta microestructura se le llama perlita gruesa.

La austenita obtenida a una temperatura menor esta sumamente subenfriada. En consecuencia, la nucleación ocurre más rápidamente. Sin embargo, la difusión es también lenta, de modo que los átomos sólo se difunden a distancias cortas. A medida que disminuye la temperatura, se forman láminas más delgadas, ya que la velocidad de difusión del carbono decrece, a esta estructura de láminas delgadas se le llama perlita fina.

Aunque las velocidades de crecimiento son menores, el tiempo total requerido para la transformación se reduce debido a la nucleación rápida. Fácilmente, se forma una perlita más fina en tiempos más cortos conforme se reduce la temperatura de transformación isotérmica hasta unos 550°C, lo cual determina la nariz de la curva TTT,

2.2.4.- Transformación de la austenita en bainita.

A una temperatura justo por debajo de la nariz del diagrama TTT (aproximadamente 550°C), y hasta la temperatura M_s , aparece un microconstituyente de ferrita y cementita, la nucleación ocurre rápidamente pero la difusión es lenta. No se detecta transformación hasta tiempos un poco mayores, y los tiempos de transformación total se incrementan debido a un crecimiento muy lento.

Además, se tiene una microestructura diferente. A bajas temperaturas de transformación, las laminillas en la perlita tendrían que ser sumamente delgadas y en consecuencia, el área límite

entre la ferrrita y las laminillas Fe_3C sería muy grande. Debido a la energía asociada con la interfase ferrita – cementita, la energía total del acero tendrían que ser muy alta. El acero puede reducir su energía interna permitiendo que la cementita se precipite como partículas discretas redondeadas en una matriz de ferrita. Este nuevo microconstituyente, o arreglo de ferrita y cementita, es llamado bainita.

Fue Bain, al estudiar la transformación de la austenita a temperatura constante, cuando enfriaba una serie de probetas desde altas temperaturas (estado austenítico) en baños de sales fundidas y observaba las estructuras obtenidas. Los discípulos de Bain llamaron bainita a este constituyente que se forma en la transformación de la austenita, cuando la temperatura del baño de enfriamiento es de 250°C a 600°C aproximadamente.

Los tiempos requeridos para que la austenita inicie y termine su transformación a bainita se incrementan y la bainita se vuelve más fina conforme la temperatura de transformación continúa decreciendo. En la bainita se aprecian dos tipos de estructuras:

- *La bainita que se forma justo por debajo de la nariz del diagrama TTT, se denomina bainita gruesa, bainita superior o bainita tipo pluma. La bainita superior de aspecto arborescente, formada en el rango de 500°C a 550°C, esta constituida por una matriz ferrítica conteniendo carburos (en los aceros al carbono, cementita). Las placas discontinuas de los carburos tienden a tener una orientación paralela a la dirección de la aguja de la propia bainita.*
- *La bainita que se forma a temperaturas más bajas se llama bainita fina, bainita inferior o bainita acicular. La bainita inferior, formada entre 250°C – 400°C, que tiene un aspecto acircular bastante parecido a la martensita. La bainita inferior esta constituida por agujas alargadas de ferrita que contiene placas delgadas de carburos. Estas pequeñas placas son paralelas entre sí y su dirección forma un ángulo de 60° con el eje de las agujas de ferrita.*

La dureza de la bainita varía desde 40 R_C (para la bainita superior), hasta 60 R_C aproximadamente (para la bainita inferior). Este incremento de dureza (como en la perlita), es el reflejo del decremento en tamaño y espaciamiento de las plaquetas de carburo conforme la temperatura de transformación disminuye, es decir, la dureza aumenta por que el carburo se está volviendo cada vez más fino y, en consecuencia, la distancia a la cual puede ocurrir el deslizamiento en la ferrita se hace más pequeño

2.2.5.- Transformación de la austenita en martensita.

Por debajo de 215°C y hasta -20°C, la austenita se transforma de una manera bastante diferente a las transformaciones isotérmicas que se mencionaron con anterioridad a la cual se le denomina martensita.

La martensita se obtiene enfriando rápidamente el acero desde la zona austenítica hasta una temperatura inferior a M_S .

Después de los trabajos de Bain y Davenport, se comprobó que la martensita es una fase que se forma como resultado de una transformación de estado sólido sin difusión. Debido a que la reacción no depende de la difusión, la reacción martensítica es atérmica, es decir, que la reacción depende sólo de la temperatura y no del tiempo.

En contraste a la transformación de nucleación y crecimiento de la perlita y la bainita, en la transformación martensítica no está involucrada ninguna difusión del carbono. Por el contrario, ocurre por el corte coordinado sistemático de la malla de la antigua fase en tal forma que la distancia que recorre un átomo es menor a un espaciado atómico, lo que significa que un átomo retiene a los mismos vecinos; en consecuencia, una transformación martensítica puede conducir solamente a cambios de la estructura cristalina, y no en la composición de las fases.

La transformación de la estructura cristalina significa que la austenita FCC. experimenta una transformación polimórfica a la martensita tetragonal centrada en el cuerpo (BCT). La celda unitaria de esta estructura cristalina es un cubo, alargado en una de sus tres dimensiones, centrado en el cuerpo; esta estructura es diferente a la ferrita BCC. Todos los átomos de carbono permanecen como solutos intersticiales en la martensita y constituyen una disolución sólida sobresaturada capaz de transformarse rápidamente en otras estructuras si se calienta a temperaturas que implican una apreciable velocidad de difusión. La mayoría de los aceros retiene la estructura martensítica casi indefinidamente a temperatura ambiente.

Por último, es de especial importancia, observar que una vez que la austenita se ha transformado en alguna de las estructuras mencionadas antes, perlita por ejemplo, no se puede transformar en otra a menos que se caliente la pieza a la temperatura de equilibrio de la austenita (por encima de 727 °C). Sin embargo, es posible transformar una muestra en una mezcla de productos de transformación si se le mantiene primero durante un momento en el intervalo de transformación de la perlita y la bainita y luego se le enfría a través del intervalo de la martensita.

2.2.6.- Diagrama CCT.

Las curvas obtenidas en los diagramas TTT, corresponden a transformaciones de la austenita a temperatura constante. Pero, como en general, los procesos de enfriamiento seguidos en los tratamientos de los aceros no son isotérmicos, sino de enfriamiento continuo, a estos diagramas se les conoce como diagramas CCT. Hay una pequeña diferencia entre la temperatura de principio de transformación determinadas gráficamente en los diagramas TTT y las comprobadas en los enfriamientos de los tratamientos térmicos.

Vamos a considerar los avances de la composición de la austenita con diferentes velocidades de reacción dadas por el enfriamiento continuo. Un temple severo evitará la nariz de la curva de transformación, con el resultado que la austenita se transforma en martensita en vez de perlita. El enfriamiento lento y continuo permite la formación de perlita; sin embargo, la primera descomposición ocurre después de un tiempo mayor (y por lo tanto, a una menor

temperatura), que el necesario en una transformación isotérmica, simplemente porque parte del tiempo se mantuvo a altas temperaturas, donde la rapidez de reacción se inició con más lentitud. Así las curvas de transformación isotérmicas se desplazan hacia abajo y a la derecha en el caso de las transformaciones durante enfriamiento continuo, como se muestra en la figura 2.5.

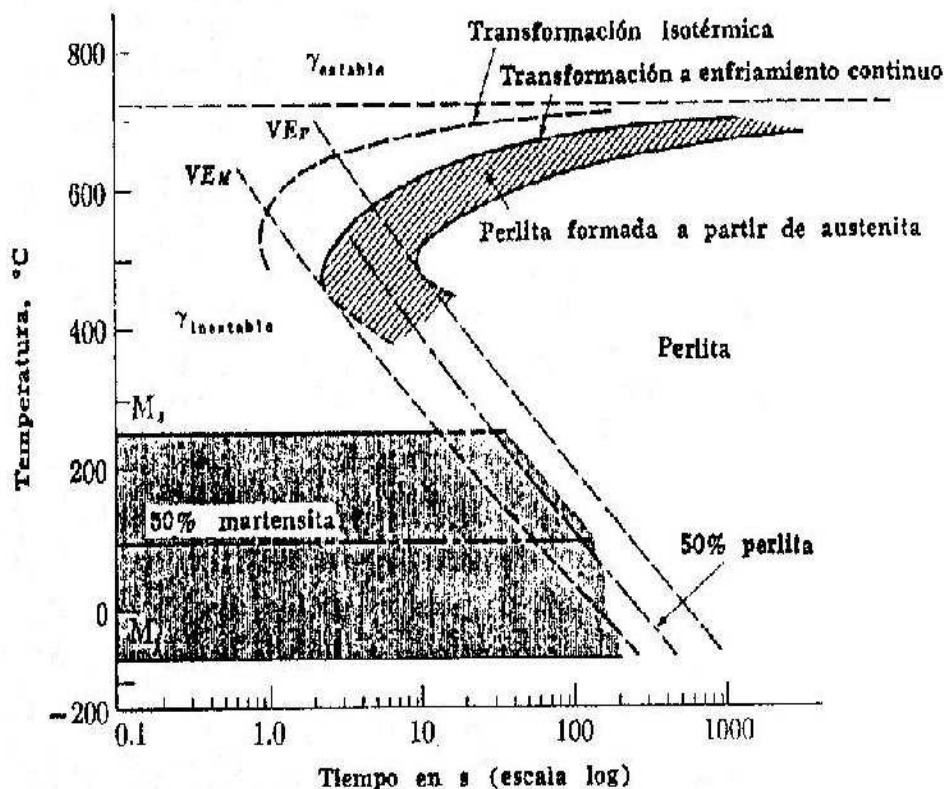


Figura 2.5.- Diagrama de transformación bajo enfriamiento continuo de un acero eutectoide

Existen dos velocidades críticas de enfriamiento para la descomposición de la austenita bajo enfriamiento continuo y se encuentran incluidas en la figura 2.5. La primera es la velocidad de enfriamiento, VE_M , la cual apenas evita la nariz de la curva de transformación; velocidades de enfriamiento más rápidas que se encuentran a la izquierda de la curva VE_M , producen sólo martensita. La segunda es la velocidad de enfriamiento VE_P , la cual no produce martensita; velocidades de enfriamiento menos rápidas, que se encuentran hacia la derecha de la curva VE_P , producen sólo perlita. En un acero eutectoide, estas dos velocidades críticas de enfriamiento son aproximadamente 1470°C/s y 35°C/s , respectivamente, en el intervalo de 750 a 500°C . Ambas velocidades son significativamente menores en cualquier acero que contenga

elementos de aleación, pues el contenido de aleantes disminuye la velocidad de la reacción $\gamma \rightarrow (\alpha + C)$.

2.3.- TEMPLE DE LOS ACEROS (TEMPLADO)

El temple es un tratamiento térmico que se aplica a los aceros y algunas aleaciones no ferrosas. Su principal finalidad es, aumentar su dureza y resistencia mecánica, aunque al mismo tiempo su ductilidad y tenacidad se ven seriamente afectadas

El temple consiste en calentar el acero por arriba de la temperatura crítica superior (sumándole de 30 a 50°C), después, hay que dejar un cierto tiempo a esa temperatura (1 hora * 25 mm ó 1 hora * 1 pulgada de espesor o diámetro), y para finalizar se enfría rápidamente, para evitar la transformación de la austenita en ferrita + carburo, figura 2.6.

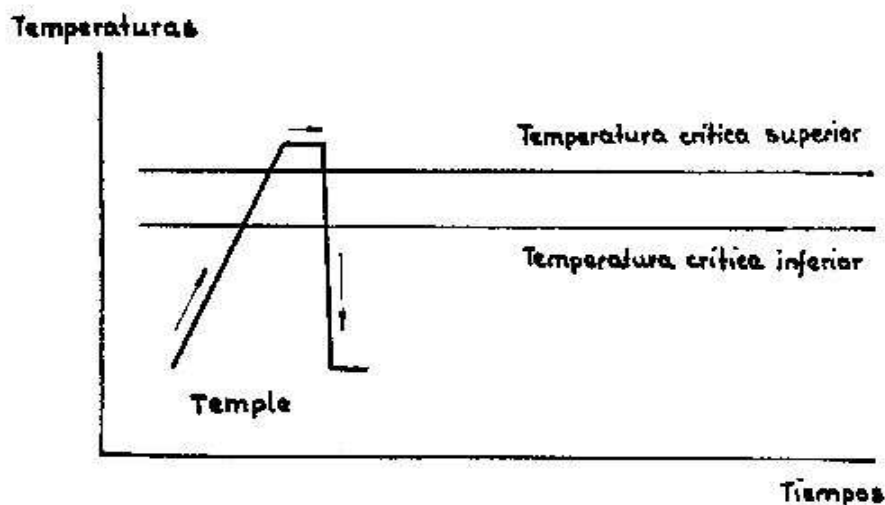


Figura 2.6.- Esquema del temple en los aceros

De esta manera, se obtiene una fase metaestable conocida como martensita con una estructura tetragonal de cuerpo centrado (BCT) que posee una alta dureza pero que es extremadamente frágil, figura 2.7.

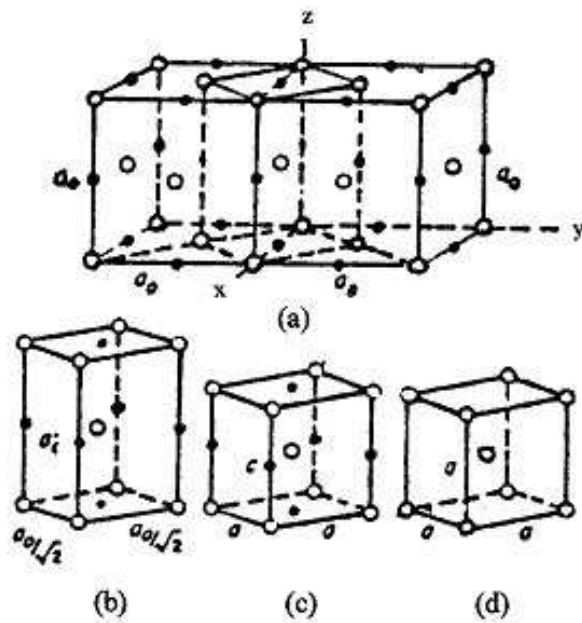


Figura 2.7.- Distorsión de Bain en la transformación martensítica de los aceros. (a) Dos celdas FCC de la Austenita mostrando una celda tetragonal; (b) Representación tetragonal de la austenita; (c) Celda Tetragonal de la martensita y (d) Celda cúbica a cuerpo centrado de la ferrita.

Vista al microscopio, Osmod describía así a la martensita: “pueden verse agujas o fibras rectilíneas aún más finas orientadas en direcciones paralelas y separadas o no por una matriz de apariencia granular o vermicular”, figura 2.8.

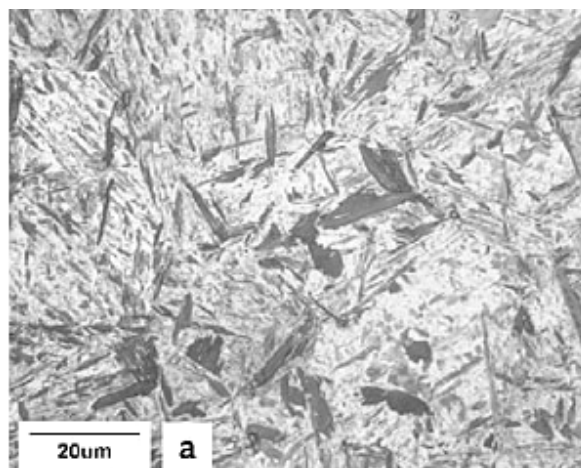


Figura 2.8.- Agujas de martensita

Para tener un buen templado, el contenido de carbono debe ser al menos, mayor o igual a 0.35%, independientemente del tipo de acero de que se trate.

2.3.1.- Medios de temple

El medio de enfriamiento más adecuado para temprar un acero es aquel que consiga una velocidad del temple ligeramente superior a la crítica. No sólo es necesario, sino que es perjudicial que la velocidad de temple sea excesivamente grande, pues se corre el peligro de producir grietas y esfuerzos, debido al desigual enfriamiento de las piezas entre la superficie y el interior de ellas. Si el enfriamiento es lento es más uniforme.

A continuación se mencionan los principales medios de temple (ordenados en forma descendente de acuerdo a la severidad con que extrae el calor), así mismo, se especifican los aceros en que son aplicables:

- ✧ *Salmuera → Acero simple.*
- ✧ *Agua → Acero simple.*
- ✧ *Aceite → Aceros aleados y de alta aleación*
- ✧ *Sales fundidas → Aceros de alta aleación*
- ✧ *Aire → Aceros de alta aleación*

Al sumergir un acero (con una temperatura alta) en un líquido, tienen lugar las siguientes etapas, como se muestra en la figura 2.9, y que posteriormente se describen.

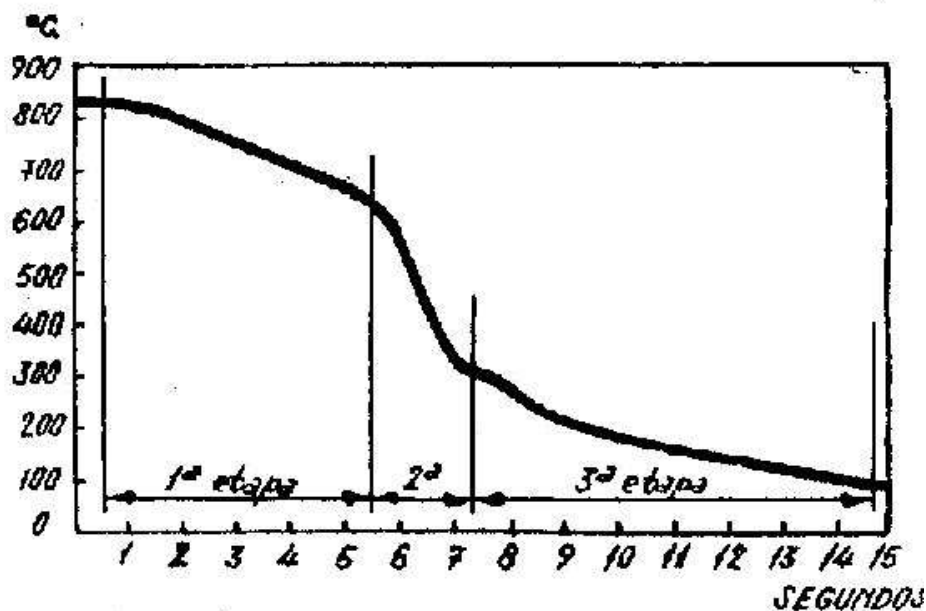


Figura 2.9.- Etapas presentes en el temple de un acero

- ❖ *Etapa I. Inmediatamente después de introducir el acero, se forma una capa de vapor que envuelve el metal y que dificulta el enfriamiento, por esta razón el enfriamiento es bastante lento. Influyen en esta etapa la temperatura del baño, la temperatura de ebullición, la conductividad de su vapor y el grado de agitación del baño, que remueve el líquido en contacto con el acero.*

- ❖ *Etapa II. Al descender la temperatura desaparece la envoltura de vapor aunque el líquido en contacto con el metal sigue hirviendo y produciendo burbujas. El enfriamiento es rápido y se denomina enfriamiento por transporte de vapor. Influye en esta etapa el calor de evaporización y la viscosidad del líquido.*

- ❖ *Etapa III. Cuando la temperatura del metal desciende por debajo de la temperatura de ebullición del líquido de temple, el enfriamiento se hace por conducción y por convección, pero como entonces la diferencia de temperatura entre el metal y el medio es pequeña, el enfriamiento es lento, dependiendo de la conductividad térmica del líquido y de su grado de agitación.*

2.3.2.- La templabilidad.

Se puede definir la templabilidad como la capacidad que tiene un acero de endurecer a profundidad por medio del temple.

Cuando un acero se temple, la velocidad de enfriamiento es máxima en la superficie y disminuye hacia el centro. La formación de martensita sólo ocurre en la parte de la pieza, donde se logró sobrepasar “la velocidad crítica” de enfriamiento. Para aceros no aleados la velocidad crítica es tan alta, que sólo se obtiene una capa relativamente delgada, aún templando en agua. El transcurso de la velocidad de enfriamiento desde la superficie hasta el centro de la pieza, está determinado por la relación entre masa y superficie y es función del diámetro de la pieza.

La figura 2.10 representa en forma esquemática la velocidad de enfriamiento en función del diámetro de una barra cilíndrica para tres tipos de acero con un templado en agua, aceite y al aire.

De la figura, se puede ver que el acero al carbono, I, templado en agua, sólo alcanza la velocidad crítica V_{CI} en una capa delgada. Después del temple este acero sólo presentará una zona muy delgada con estructura martensítica.

La velocidad crítica V_{CII} para el acero al níquel, II, es mucho más baja, de modo que aún templado en aceite, el material experimenta una transformación martensítica más profunda.

Finalmente, la velocidad crítica V_{CIII} es tan baja que el acero al Cr-Ni, III, se transformará completamente en martensita con un enfriamiento al aire.

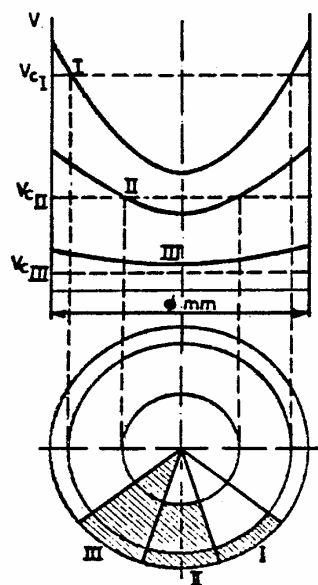


Figura 2.10.- Representación esquemática del endurecimiento de los siguientes aceros: I acero al carbono templado en agua. II: acero con 2% Ni, templado en aceite. III: acero con 1%Cr, 4 % Ni, templado al aire.

La templabilidad de un acero depende de varios factores:

1. *La velocidad crítica de enfriamiento depende de la estabilidad de la austenita y de la nucleación durante la transformación.*

2. *La estabilidad de la austenita depende principalmente de los elementos de aleación. Como también el carbono extiende la zona γ la descomposición de la austenita en α y cm se reprime cuando aumenta la concentración de carbono, de modo que la velocidad crítica disminuye.*
3. *La descomposición o transformación de la austenita, como fenómeno de nucleación y crecimiento, se ve influenciada por la presencia de límites de grano y carburos no disueltos que actúan como núcleos, aumentando la velocidad crítica de enfriamiento.*

Un calentamiento prolongado a una temperatura de austenitización alta, disolverá gran parte de los núcleos y hará crecer el grano, lo que bajará la velocidad crítica.

De lo anterior se puede concluir lo siguiente:

1. *En las mismas condiciones de templado, la profundidad de templado y la dureza máxima obtenida en un acero al carbono aumentará hasta el contenido de carbono correspondiente a la concentración eutectoide*
2. *A un contenido constante de carbono, es posible aumentar la profundidad de templado por una austenitización a temperaturas superiores*

Debido a los numerosos factores que tienen influencia sobre la templabilidad de un acero, se propusieron varios métodos para determinar experimentalmente un factor de templabilidad. Se trata de poder reproducir siempre y con toda exactitud las condiciones experimentales, como son: temperatura y tiempo de austenitización, método de templado, volumen y forma de las probetas. La prueba más conocida es la de Jominy, propuesta originalmente por Jominy y Boegehold.

2.3.3.- La Prueba Jominy.

Este ensayo normalizado, según la norma ASTM Designation A255-48T End Quench Test for Hardenability of Steel, consiste en enfriar una probeta de 1 pulg. de diámetro y 4 pulg. de largo previamente austenitizada, por medio de un chorro de agua a una presión definida por la norma, que se hace incidir en uno de sus extremos, figura 2.11. De esta forma cada punto a lo largo de la probeta, a partir de la punta templada, presentará una cierta velocidad de

enfriamiento. La dureza de la probeta se mide sobre uno de sus bordes ya rectificado, efectuando estas mediciones cada dieciseisavo de pulgada en la primera pulgada de longitud y después más espaciadas, permitiendo construir una gráfica de Dureza contra distancia desde el extremo templado, como la mostrada en la figura 2.12.

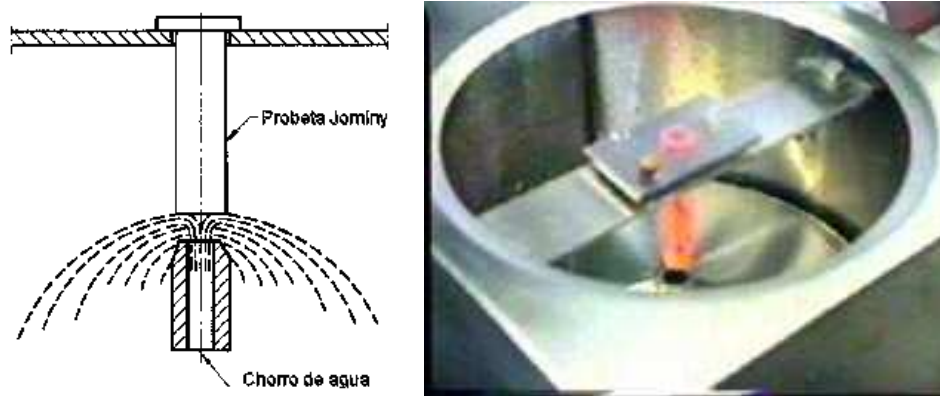


Figura 2.11.- realización de la prueba Jominy

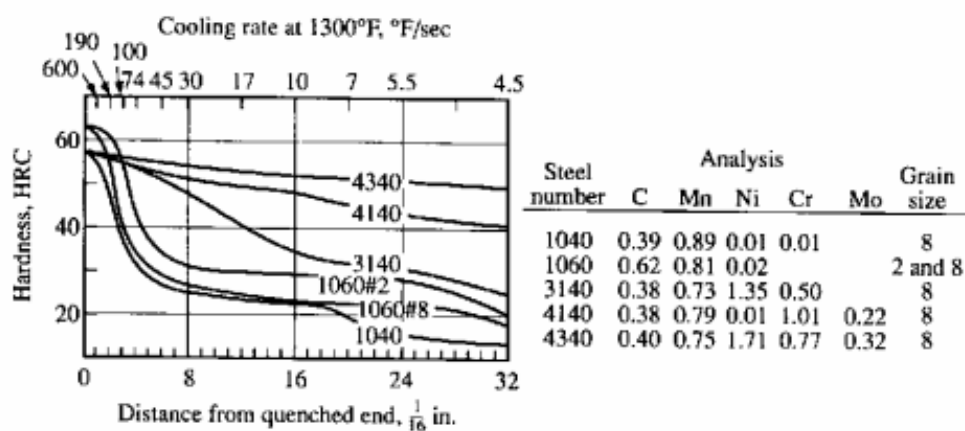


Figura 2.12.- Curvas Jominy o de Templabilidad para varios aceros.

La velocidad de enfriamiento varía a todo lo largo de la barra, siendo más elevada en el extremo templado por estar en contacto con el agua. La velocidad de enfriamiento en cualquier punto a lo largo de la barra se ha determinado con toda exactitud. La tabla 2.1 muestra los valores correspondientes. Así, este método describe el procedimiento para determinar la templabilidad de un acero.

Tabla 2.1.- Relación entre velocidad de enfriamiento y la distancia Jominy.

<i>Distancia Jominy en 16-avos de pulg.</i>	<i>Velocidad de Enfriamiento °C/s</i>
<i>1</i>	<i>315</i>
<i>2</i>	<i>110</i>
<i>3</i>	<i>50</i>
<i>4</i>	<i>36</i>
<i>5</i>	<i>28</i>
<i>6</i>	<i>22</i>
<i>7</i>	<i>17</i>
<i>8</i>	<i>15</i>
<i>10</i>	<i>10</i>
<i>12</i>	<i>8</i>
<i>16</i>	<i>5</i>
<i>20</i>	<i>3</i>
<i>24</i>	<i>2.8</i>
<i>28</i>	<i>2.5</i>
<i>36</i>	<i>2.2</i>

La templabilidad se hace aparente en el grado al cual el material se endurece cuando se temple a diferentes velocidades de enfriamiento. En la prueba de Jominy la “profundidad de endurecimiento” es la distancia a lo largo de la probeta desde el extremo templado o punta templada.

Se puede considerar que cualquier acero forma martensita en el extremo templado, por lo que la dureza en este punto está determinada exclusivamente por el contenido de carbono. Sin embargo, a una cierta distancia del extremo templado es más probable que se forme bainita o perlita en lugar de la martensita, lo que se verá reflejado en una baja en la dureza de la probeta.

Un acero aleado con una alta templabilidad, tal como un acero 4340, mantiene una curva de templabilidad más bien plana, es decir, mantiene su dureza, sin embargo, un acero al carbono simple, tal como el 1060, tiene una curva que cae rápidamente lo cual indica que tiene una templabilidad muy limitada. El poder de Endurecimiento o Templabilidad está determinado por el contenido de elementos de aleación.

Existen algunas ecuaciones que pueden utilizarse para calcular la curva Jominy y una muy conocida es la ecuación desarrollada por Just que se presenta a continuación:

$$J_{6..80} \approx 95 \sqrt{C} - 0,00276 E^2 \sqrt{C} + 20 Cr + 38 Mo + 14 Mn + 5,5 Ni + 6,1 Si + 39 V + 96 P - 0,81 K - 12,28 \sqrt{E} + 0,898 E - 13 \quad [HRC] \quad \dots\dots(2.1)$$

Donde:

J = Dureza Jominy

E = Distancia desde el extremo templado

K = Tamaño de grano ASTM de la austenita

2.3.4.- Índice de Templabilidad.

La templabilidad de un acero se designa mediante un código que indica la distancia o distancias desde el extremo templado dentro de la cual se obtiene la dureza deseada.

Por ejemplo: Un acero aleado conteniendo 0.40 % de carbono (4140) podría especificarse que tiene una templabilidad de $J_{50} = 6$, lo que significa una dureza $Rc = 50$ a una distancia de 6/16 de pulgada desde el extremo templado, figura 2.5, curva inferior.

La AISI ha establecido curvas de templabilidad máxima y mínima, conocidas como bandas de templabilidad, figura 2.13, entre las cuales debe de estar cualquier barra de acero de esa composición. En la figura, el sufijo H se establece para aquellos aceros que se compran con base a una especificación de templabilidad, siendo de importancia secundaria aspectos como la composición química, tamaño de grano, etc.

Límites de dureza para probótenos de especificación		
4140H		
Distancia J 1/16"	Máx.	Mín.
1	60	53
2	60	53
3	60	52
4	59	51
5	59	51
6	58	50
7	58	48
8	57	47
9	57	44
10	56	42
11	56	40
12	55	39
13	55	38
14	54	37
15	54	36
16	53	35
18	52	34
20	51	33
22	49	33
24	48	32
26	47	32
28	46	31
30	45	31
32	44	30

Temperaturas de tratamiento térmico recomendadas por la SAE
 *Normalizar 1 600° F
 *Austenizar 1 550° F
 *Para muestras forjadas o laminadas solamente

Banda de capacidad de endurecimiento 4140H					
C	Mn	Si	Cr	Mo	
0.37 / 0.44	0.65 / 1.10	0.20 / 0.35	0.75 / 1.20	0.15 / 0.25	

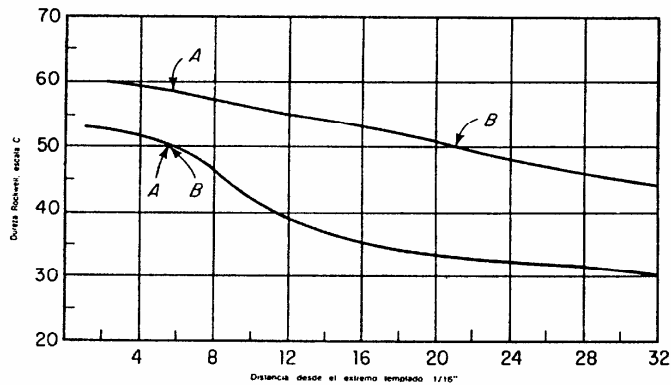


Figura 2.13.- Bandas de templabilidad para un acero 4140H

Al especificar la templabilidad de un acero pueden emplearse alguno de los dos métodos siguientes:

1.- En este primer método se especifica primero la dureza en la curva inferior, seguida de la dureza en la curva superior igualándolas a la distancia en que se encuentran:

Por ejemplo, de la figura 2.13 los puntos A denotan durezas de 50 y 58, ambas a 6/16 " por lo tanto esto se denota por:

$$J\ 50/58 = 6/16\ \text{de pulg.}$$

2.- Para un valor de dureza seleccionado, se indican las distancias primero en la curva inferior y luego en la curva superior:

$$J\ 50 = 6/16\ \text{a}\ 21/16\ \text{de pulg.}$$

2.4.- REVENIDO.

Los aceros después de templarlos suelen quedar generalmente demasiado duros y frágiles para los usos a que van a ser destinados. Estos inconvenientes se corrigen por medio del revenido ya que con este tratamiento se consigue mejorar la tenacidad de las piezas templadas, a costa de

disminuir su dureza, su resistencia mecánica y su límite elástico. También se consigue eliminar, o por lo menos disminuir, los esfuerzos internos del material, producidos a consecuencia por el temple. A veces, sin embargo, al revenir un acero de alta aleación, puede ocurrir que en lugar de disminuir la dureza, aumente. Esto es debido, a la transformación de la austenita residual en martensita y, por lo tanto, al aumentar el porcentaje de este constituyente, aumenta también la dureza.

El revenido consiste en calentar el acero a una temperatura más baja que su temperatura crítica inferior (A_1), como se muestra en la figura 2.14 enfriándolo luego generalmente al aire, aunque algunos tipos de aceros se enfrían en agua o aceite.

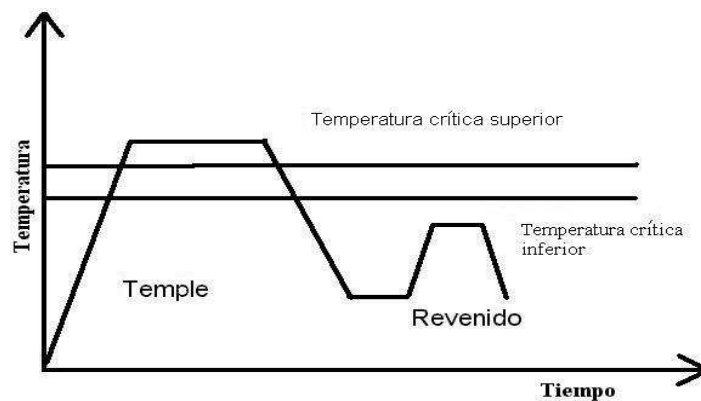


Figura 2.14.- Esquema del revenido de los aceros

Las variaciones y características que experimentan los aceros por efecto del revenido son debidas a cambios de microestructuras que consisten, principalmente, en la descomposición más o menos completa de la martensita que se había obtenido en el temple y que se transforma en otros constituyentes más estables. Recientemente, con ayuda del microscopio electrónico y de los rayos X, se han podido estudiar con más detalle todos estos fenómenos y se ha llegado actualmente a la conclusión de que el revenido se produce en tres etapas principales, como se muestra en la figura 2.15.

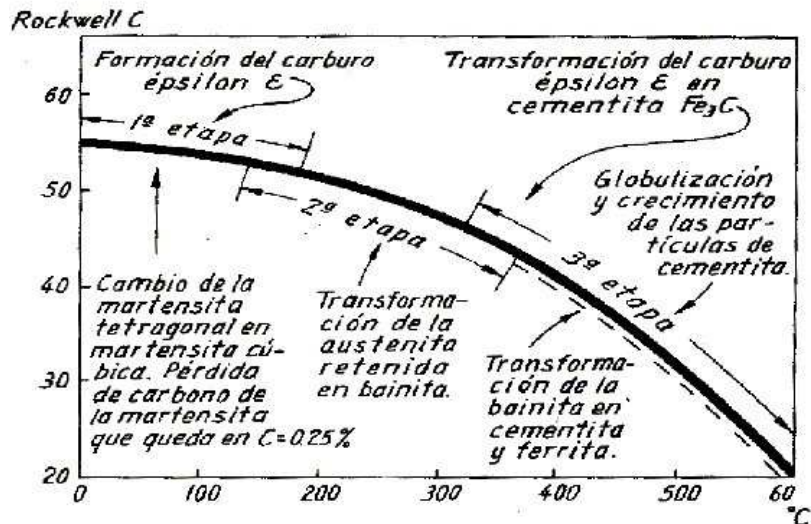


Figura 2.15 Principales etapas y transformaciones que sufren los aceros en el revenido.

La primera etapa se realiza a bajas temperaturas, inferiores a 300 °C, y en ella se precipita el carburo de hierro ϵ (épsilon). Esa precipitación se realiza en los límites de los subgranos heredados de la austenita, los cuales se siguen manifestando en la martensita. En esa fase, la formación de carburo épsilon origina, una pérdida importante de carbono en la martensita, que al final de esta fase queda aproximadamente con 0.25% de carbono y su celda tetragonal se transforma en celda cúbica

La segunda etapa sólo se presenta cuando aparece austenita retenida en la microestructura del acero templado, y en esta etapa la austenita retenida se transforma en bainita. Esa bainita, al ser luego calentada en el revenido a altas temperaturas, sufre también una precipitación de carburo de hierro con formación final de cementita y de ferrita.

En la tercera etapa el carburo épsilon (que aparece en la primera etapa), se transforma en cementita (Fe_3C). Al aumentar progresivamente la temperatura del acero, se forma primero un precipitado de cementita en los límites de las agujas de martensita y también en su interior. Luego, al aumentar la temperatura se redisuelve la cementita en el interior de las agujas, mientras se engruesa. Al continuar elevándose todavía más la temperatura, se va rompiendo la envolvente de la cementita, que se va presentando cada vez más discontinua en las zonas

límites de las antiguas agujas de martensita. Al progresar el calentamiento, la coalescencia y globulización de la cementita prosigue, y a 600°C, con grandes aumentos, ya es clara y definida, además, la matriz queda ya constituida por ferrita. Al final, la martensita se ha transformado en cementita y ferrita.

En los aceros de alta aleación se presenta una cuarta etapa, en las altas temperaturas del revenido, que corresponde a la precipitación de carburos de aleación que dan lugar a un endurecimiento secundario.

En los aceros para herramienta, con un elevado porcentaje de cromo, se acostumbra aplicar dos revenidos sucesivos después del temple, con el que eliminan los esfuerzos residuales y se evita que las herramientas terminadas queden algo frágiles

2.5.- RECOCIDO

Es un tratamiento térmico que se aplica a los aceros de medio y alto carbono y cuyos principales objetivos son:

- *Mejorar sus propiedades físicas*
- *Obtener una estructura de equilibrio*
- *Mejorar maquinabilidad*
- *Aumentar ductilidad para poder realizar operaciones de trabajo en frío*

Existen diversas variantes de este tratamiento térmico, siendo las más importantes las siguientes:

- Recocido supercrítico o total.

Este tratamiento térmico consiste en calentar el acero hipoeutectoide a 20 o 30 °C por arriba de la temperatura crítica superior (A_3), manteniéndolo durante cierto tiempo a esta temperatura para lograr un calentamiento uniforme del acero y el enfriamiento se realiza lentamente en el horno, como se muestra en la figura 2.16.

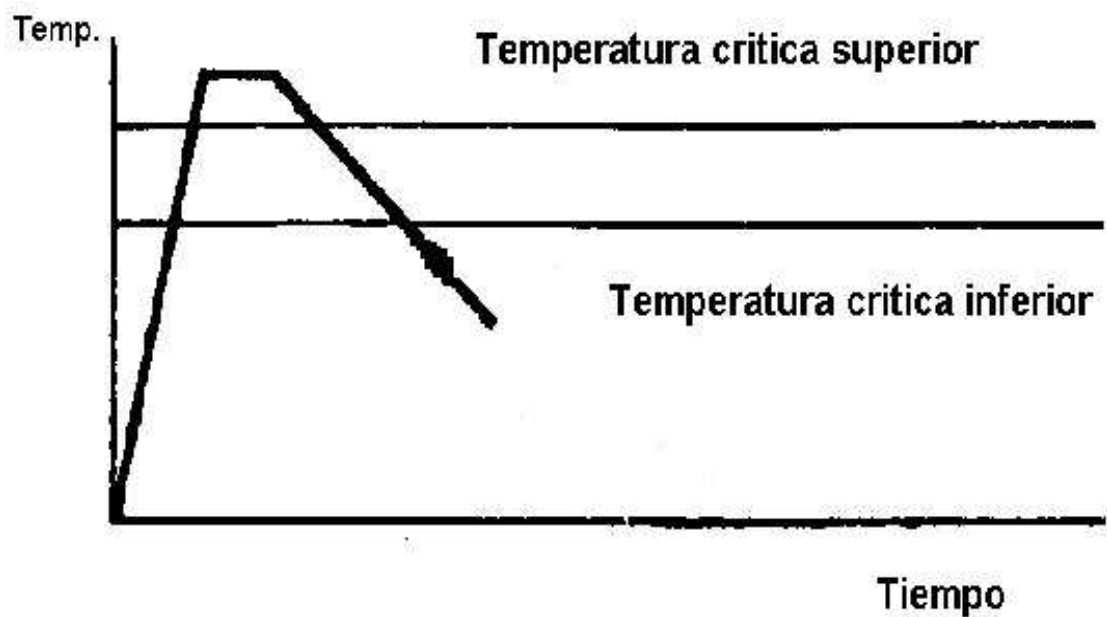


Figura 2.16.- Representación esquemática del recocido total.

La velocidad de enfriamiento durante el recocido se puede regular efectuando el enfriamiento del horno con su puerta abierta o cerrada, con el calentamiento parcial o totalmente desconectado. El enfriamiento lento, sobre todo, el de los aceros aleados, que tienen tendencia a la fragilidad, es necesario realizarlo hasta los 500 o 600 °C.

El recocido total generalmente se aplica a los productos laminados, forjados, fundiciones perfiladas, como también a los lingotes de aceros aleados.

El propósito del recocido total es refinar el grano ablandando del acero, mejorando las propiedades eléctricas y magnéticas y, en algunos casos, mejorar el maquinado.

Recocido subcrítico o incompleto.

En este recocido, el calentamiento se hace por debajo de la temperatura crítica inferior (A_1), no teniendo tanta importancia la velocidad de enfriamiento, pudiendo incluso enfriarse el acero al aire, sin que se endurezca. Por medio de este tratamiento térmico se eliminan los esfuerzos internos del material y se aumenta su ductilidad.

Para los aceros hipoeutectoides, el recocido incompleto se usa para eliminar los esfuerzos internos y para mejorar la facilidad de conformado por corte.

Para los aceros hipereutectoides el recocido incompleto se emplea, en lugar del recocido total. En estos aceros el calentamiento es por encima de A_1 y produce prácticamente una recrystalización total. Junto con esto se obtiene una perlita granular en lugar de laminar

Recocido isotérmico.

Es un tratamiento de ablandamiento que consiste en calentar el acero por encima de la temperatura crítica superior A_3 o de la temperatura crítica inferior A_1 , según sea el caso (generalmente de 740 a 880 °C) y luego enfriar hasta una temperatura de 600 ó 700 °C, que se mantiene constante durante varias horas, para conseguir la completa transformación isotérmica de la austenita y finalmente se enfría al aire, como se muestra en la figura 2.17. Este tratamiento es muy rápido y se obtienen durezas muy bajas.

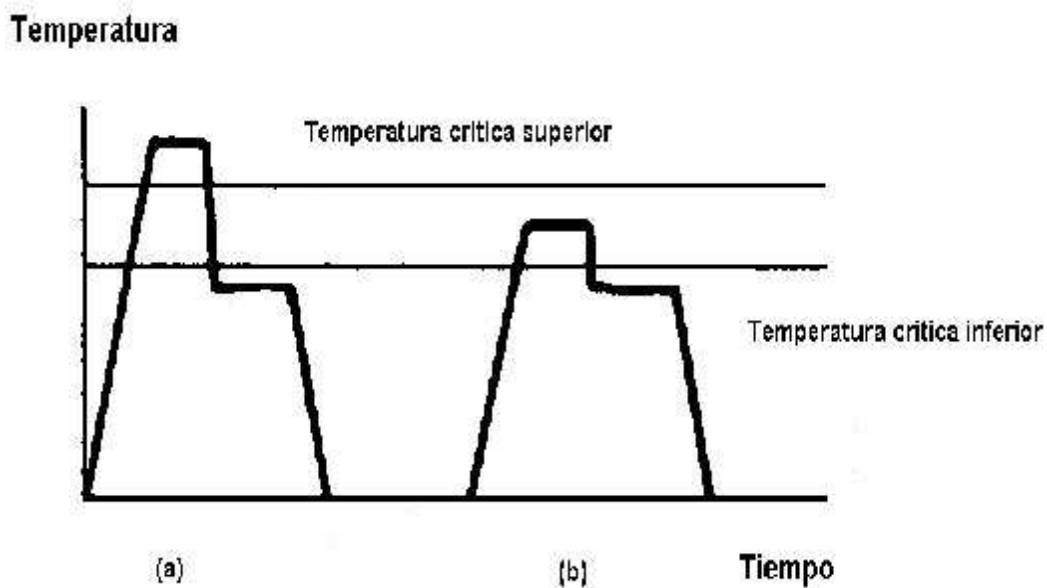


Figura 2.17.- Representación esquemática del recocido isotérmico, (a) austenitización completa, (b) austenitización incompleta.

Si la temperatura de calentamiento ha sido superior a A_3 , se denomina recocido isotérmico de austenitización completa, por que al terminar el calentamiento, el acero estar en su totalidad

formado por austenita, como se muestra en la figura 2.19. Si la temperatura del calentamiento está comprendida entre A_1 y A_3 , se denomina recocido isotérmico de austenitización incompleta, por que solamente la perlita se habrá transformado en austenita al terminar el calentamiento.

Este tratamiento térmico se emplea mucho para el recocido de aceros para herramienta de alta aleación, por durar aproximadamente la mitad del tiempo que el recocido de regeneración. También se utiliza en gran escala para recocer piezas forjadas que deben calentarse a temperaturas superiores a 700°C para la forja.

El procedimiento clásico utilizado para recocer piezas forjadas consiste en recalentar las piezas por encima de la temperatura A_1 , manteniéndolas a esta temperatura durante un cierto tiempo que depende del espesor, y después enfriarlas lentamente. En cambio, en el recocido isotérmico, se pasan las piezas directamente de la prensa o martillo, antes de que su temperatura descienda de 700°C , con un baño de sales, se mantiene el acero durante un cierto tiempo, que depende de la composición y del tamaño de la pieza y se enfría al aire. La temperatura de las sales se determina en el diagrama TTT del acero, dependiendo de la dureza que se desea obtener.

-Recocido para relevado de esfuerzos o recocido subcrítico:

Este tratamiento se aplica a los aceros que han sido sometidos a fuertes operaciones de maquinado o trabajo en frío. Es el único tipo de recocido que no implica durante el calentamiento un cambio en estructura, figura 2.18.

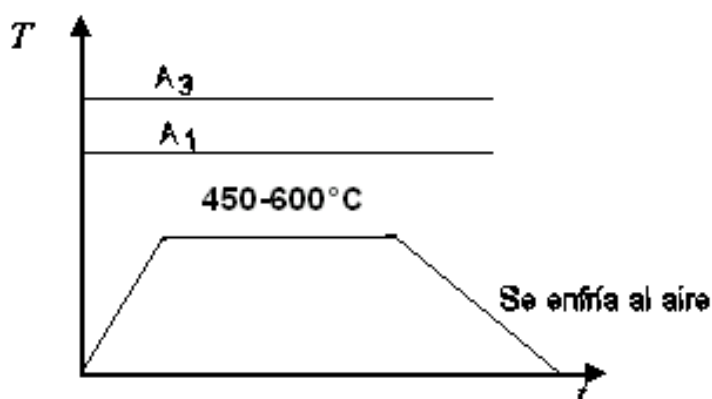


Figura 2.18.- Recocido subcrítico o relevado de esfuerzos

2.6.- NORMALIZADO

Se trata de un tratamiento térmico que se aplica a los aceros de bajo y medio (0.6% C máximo) con los objetivos siguientes.

- *Homogeneizar estructura*
- *Mejorar respuesta del acero al tratamiento de temple y revenido*
- *Mejorar propiedades físicas.*
- *Mejorar maquinabilidad.*
- *Romper estructura dendrítica de colada.*

El normalizado consiste en calentar el acero a una temperatura de 30 a 50 °C por arriba de la temperatura crítica superior, A_3 , y una vez que haya pasado todo el acero al estado austenítico (una hora x cada 25 mm de espesor o diámetro) y después, se enfría el acero al aire, como se muestra en la figura 2.19.

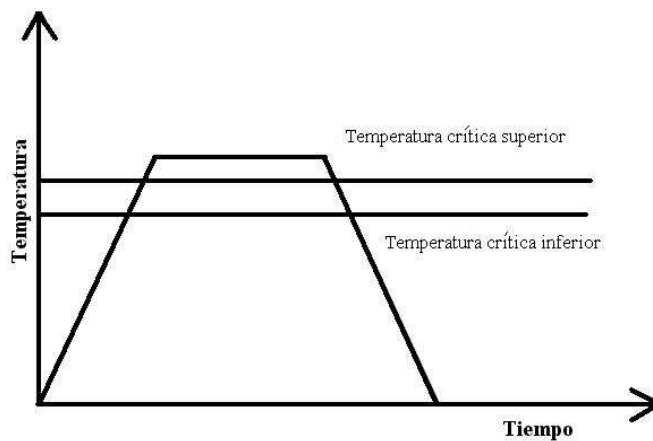


Figura 2.19.- Representación esquemática del normalizado.

La velocidad de enfriamiento es más lenta que en el temple y más rápida que en el recocido, es un tratamiento típico de los aceros al carbono, con un contenido de 0.15 a 0.5% de carbono, y rara vez se emplea en los aceros para herramienta, ni en los aceros aleados.

2.7.- GLOBULIZADO O ESFEROIDIZADO.

El globulizado es un tratamiento térmico que se aplica a los aceros de alto contenido de carbono ($\%C > 0.60\%$) y cuyos principales objetivos son:

- ❖ *Romper la red de carburo y formar un carburo esferoidal.*
- ❖ *Obtener la menor dureza posible en el acero.*
- ❖ *Optimizar la respuesta del material a operaciones de deformación plástica.*
- ❖ *Mejorar la maquinabilidad del acero.*

Pueden emplearse los siguientes métodos para la aplicación de este tratamiento térmico.

- 1) *Mantener el acero durante un tiempo prolongado a una temperatura justamente por debajo de la línea crítica inferior, como se muestra en la figura 2.20.*

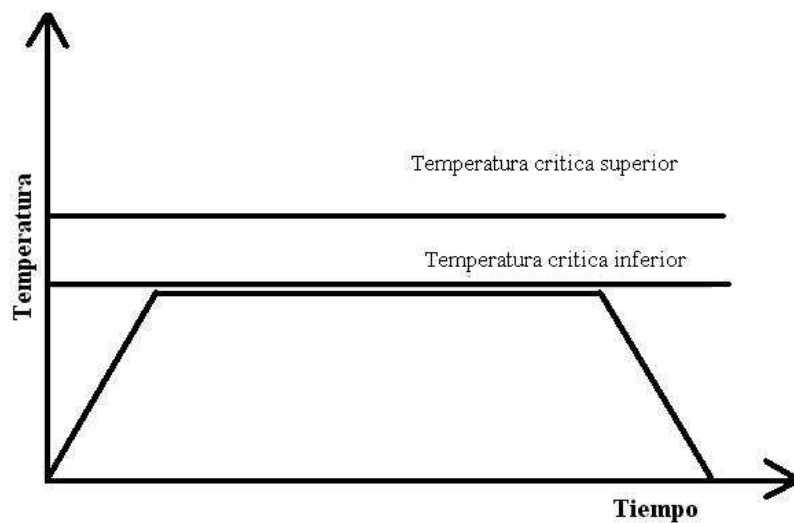


Figura 2.20.- Representación esquemática del primer método.

- 2) *Calentar y enfriar alternadamente entre las temperaturas que están justamente por encima y por debajo de la línea crítica inferior, como se muestra en la figura 2.21.*

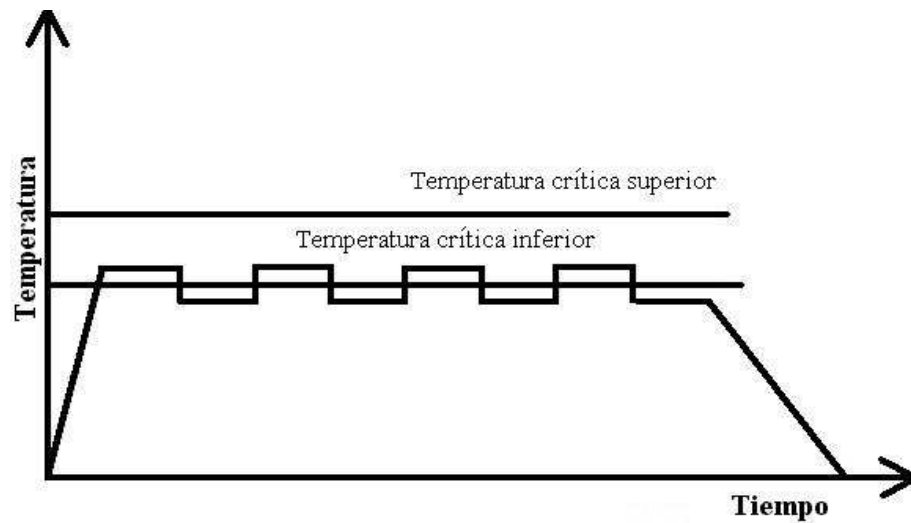


Figura 2.21.- Representación esquemática del segundo método.

- 3) *Calentar a una temperatura por encima de la temperatura crítica superior y luego enfriar muy lentamente en el horno o mantener a una temperatura justo por debajo de la línea crítica inferior, como se muestra en la figura 2.22..*

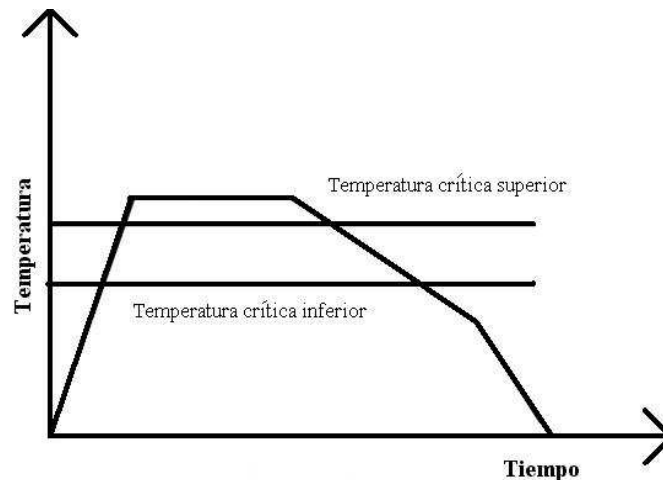


Figura 2.22.- Representación esquemática del tercer método.

Mantener durante un tiempo prolongado a temperatura elevada despedazará completamente la estructura perlítica y la red de cementita. La cementita se convertirá en esferas. Las partículas de cementita y la estructura completa se puede llamar esferoidita, figura 2.23.



Figura 2.23.- Estructura esferoíridizada de un acero con 1 % de C

La estructura esferoidizada es deseable cuando es importante una mínima dureza, una máxima ductilidad o una máxima maquinabilidad en aceros al alto carbono. Los aceros al bajo carbono rara vez se esferoidizan, porque en la condición esferoidizada son excesivamente suaves. La acción de corte tenderá a empujar el material en lugar de cortarlo, provocando excesivo calor y deterioro en la punta de la herramienta de corte. Algunas veces, los aceros al medio carbono se esferoidizan mediante recocido para obtener máxima ductilidad, para ciertas operaciones de deformación plástica.

2.8.- TRATAMIENTOS TÉRMICOS ESPECIALES

2.8.1.- Austemplado.

Es un tratamiento isotérmico, y en él, la austenita se transforma en bainita a temperatura constante.

El austemplado (también llamado austempering, temple diferido ó temple bainítico), consiste en calentar el acero a una temperatura ligeramente superior a la crítica (hasta la temperatura de austenitización), seguido de un enfriamiento rápido en un baño de sales, que se encuentra a una temperatura justo por arriba de la línea Ms, como se muestra en la figura 2.24 manteniéndose a una temperatura constante, durante un tiempo suficiente, hasta que se realice la total transformación de la austenita en bainita.

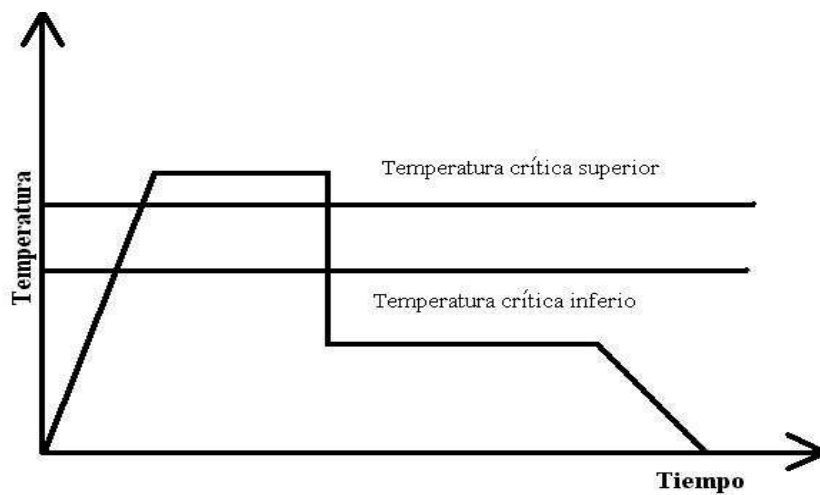


Figura 2.24.- Representación esquemática del austempleado.

La temperatura del baño, debe ser superior a la temperatura del punto M_s (iniciación de la martensita), y suele variar de 250 °C a 550 °C. En la figura 2.25, se muestra una representación esquemática del austempleado en un diagrama TTT.

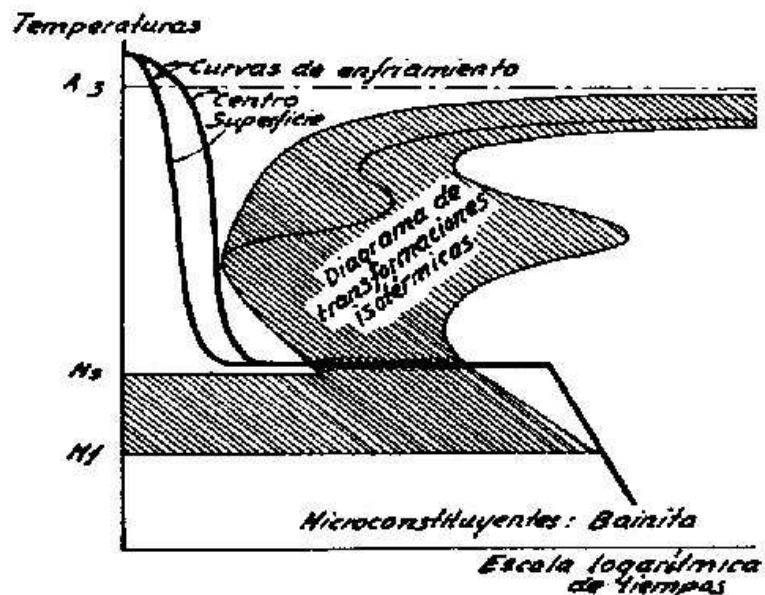


Figura 2.25.- Representación esquemática del austempleado en un diagrama TTT.

La principal ventaja del austemplado es la ausencia de esfuerzos internos y grietas microscópicas que se producen en los temples ordinarios martensíticos. Además, la tenacidad es mucho más elevada en las piezas tratadas con austemplado, que en las piezas templadas y revenidas, a pesar de tener ambas piezas la misma dureza. Cuenta con una mayor ductilidad, también hay menos distorsión y peligro de fisuras, por que el temple utilizado no es tan drástico como en el método convencional.

La principal limitación del austemplado, es el efecto del tamaño de la pieza que se trata térmicamente. Sólo son adecuadas las secciones que pueden enfriarse con suficiente rapidez para evitar la transformación a perlita, por lo tanto, se aplica a piezas de espesor menor o igual a ½ pulgada. Este espesor puede incrementarse un poco para los aceros aleados, pero entonces el tiempo para terminar la transformación a bainita puede ser excesivo.

2.8.2.- Martemplado.

Es un tratamiento isotérmico y se efectúa calentando el acero y manteniéndolo a una temperatura por arriba de la temperatura crítica superior A_3 , durante un tiempo suficiente para su completa austenitización y enfriándolo luego en un baño de sales fundidas (como se muestra en la figura 2.26, cuya temperatura suele oscilar entre 200 y 300°C y debe ser superior a la temperatura del punto M_s).

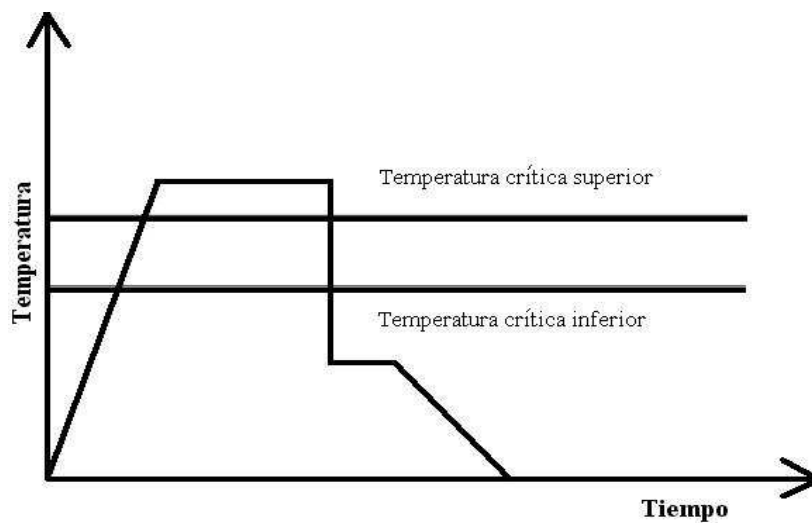


Figura 2.26.- Representación esquemática del martempleado.

El acero debe permanecer en el baño de sales el tiempo suficiente para conseguir que toda la pieza, alcance e iguale la temperatura del baño, enfriándose luego la pieza al aire. De esta forma se obtiene una estructura martensítica con muy pocos esfuerzos internos. Cuando convenga disminuir la dureza o resistencia obtenida, se debe dar posteriormente al acero un revenido, para obtener martensita revenida.

Es necesario que el enfriamiento sea suficientemente rápido para que la curva de enfriamiento no corte la nariz del diagrama TTT (como se muestra en la figura 2.27) en ningún punto, pues si lo hiciera, parte de la austenita se transformaría en otros constituyentes.

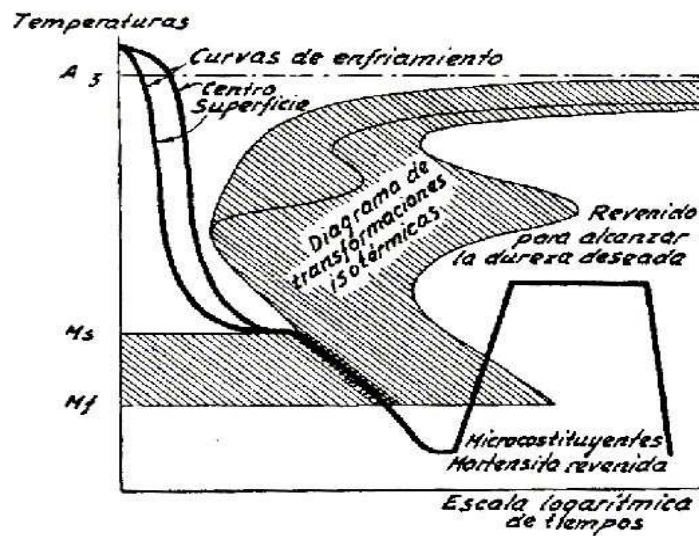


Figura 2.27.- Representación esquemática del martempleado en un diagrama TTT.

Es muy importante que la temperatura del baño sea próxima y superior a la temperatura del punto M_S , pues si fuera inferior, parte de la austenita de la periferia se transformaría en martensita antes de que el resto de la austenita del centro, y el proceso sería imperfecto. La temperatura del punto M_S , varía en algunos casos con la temperatura de austenitización.

El martempleado se emplea en la fabricación de engranes del mecanismo diferencial de automóviles, troqueles, cojinetes de bolas, etc. En realidad, este tratamiento térmico es una variante del temple interrumpido en agua y aire.

La principal ventaja, es evitar las deformaciones y tensiones internas. Su aplicación queda limitada a piezas que no sean muy grandes.

2.8.3.- Temples interrumpidos.

Este es un tratamiento de gran utilidad, en especial para los aceros para herramienta. Hay dos tipos de temples interrumpidos, que son:

Temple interrumpido en agua y aceite. En éste temple se suele enfriar generalmente en agua bajando la temperatura de la pieza hasta unos 300 ó 400 °C, enseguida y rápidamente se mete el acero en aceite, sin que antes haya tenido lugar un equilibrio de temperaturas, entre el núcleo y la superficie del acero. Este tratamiento se usa para templar herramientas de forma complicada, fabricadas con acero templado en agua, y tiene como objetivo evitar (con el enfriamiento en aceite), que las diferencias de temperaturas en el acero sean demasiado grandes durante la transformación de la austenita en martensita, lo que evita que se desarrollen esfuerzos que produzcan deformaciones y grietas. En la figura 2.28 se muestra un esquema de este tipo de temple.

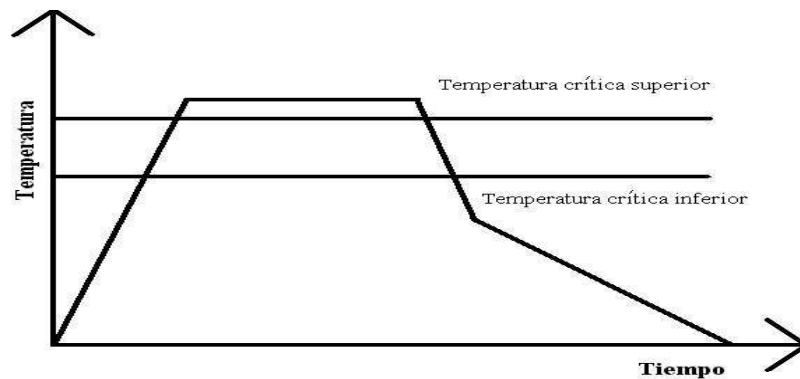


Figura 2.28.- Representación esquemática del temple interrumpido en agua y aceite

Temple interrumpido en agua y aire. Consiste en interrumpir el enfriamiento de un acero en agua, sacándolo al aire cuando la temperatura del acero haya bajado hasta unos 250°C. Esto tiene la ventaja de que se igualan las temperaturas en diferentes zonas y se evitan deformaciones y agrietamientos. También se practica en aceite y después al aire. Este tratamiento se emplea desde hace mucho tiempo para el temple de las limas. En la figura 2.29 se muestra un esquema de este tipo de temple.

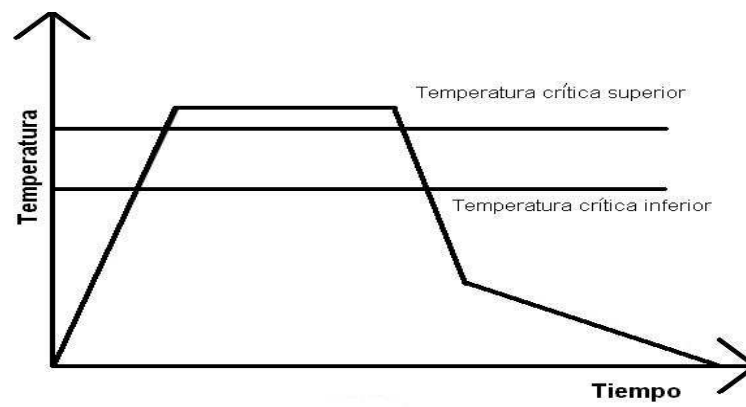


Figura 2.29.- Representación esquemática del temple interrumpido en agua y aire.