

FUNDAMENTOS DE LOS TRATAMIENTOS TERMICOS DE LOS ACEROS

Las propiedades de un material metálico dependen en gran medida de la naturaleza, tamaño y distribución de sus microconstituyentes.

A continuación se indican los diversos microconstituyentes que forman las estructuras de los aceros, como así sus principales características y propiedades.

1. Ferrita: Es una solución sólida de carbono en hierro α , cuya máxima solubilidad es 0.025%C a 723°C y 0.007%C a temperatura ambiente. Puede contener pequeñas cantidades de: silicio, fósforo y otras impurezas. En los aceros aleados puede disolver además: Ni, Mn, Cu, Si, Al, etc pudiendo obtenerse con un porcentaje de carbono de 0.04 a 0.05; es decir que prácticamente se la puede considerar como hierro puro (Fe α).

Es una solución sólida intersticial en la que los átomos de carbono ocupan los puntos medios de aristas paralelas $\cdot(0,0,1/2)$ o equivalentes (centro de las caras que unen), cristalizando en el sistema cúbico centrado en el cuerpo (parámetro 2.85 a 2.90 Å). Es el constituyente más blando, dúctil y maleable de los aceros. Tiene una resistencia a la tracción de alrededor de 28 Kg/mm², un alargamiento de 35% y una dureza BHN de 90 unidades. Es magnética y de pequeña fuerza coercitiva, perdiendo su magnetismo aproximadamente a los 775°C.

2. Austenita: Solución sólida intersticial de carbono en hierro γ . Se encuentra en los aceros calentados por encima de la temperatura A3 o Acm con una solubilidad máxima de 1.7% de carbono a 1.135°C. Al descender la temperatura disminuye la solubilidad del carbono en el hierro hasta que, a la temperatura del punto A1 (Fig. 1) sólo disuelve 0.88% de carbono. Por debajo de esta temperatura se descompone en ferrita y cementita, (perlita). Se la puede retener a temperatura ambiente mediante un temple enérgico, especialmente en presencia de elementos de aleación. Su resistencia a la tracción es de 88 a 105 kg/mm² y su alargamiento de un 10 a 30%. Es no magnética, pero muy dúctil y tenaz y de elevada resistencia al desgaste aún con durezas poco considerables. Dureza 40 Rc.

3. Cementita: Es un carburo de hierro (Fe₃C) que contiene 6.67% de carbono y 93.33% de hierro. Cristaliza formando un paralelepípedo ortorrómbico, de parámetros: a = 4.5235 Å, b = 5.0888 Å y c = 6.7431 Å. Los átomos de carbono están situados intersticialmente, rodeando seis átomos de hierro a cada uno de carbono.

Es el constituyente más duro y frágil de los aceros al carbono (HRc 68). Es magnética a la temperatura ambiente, pero pierde su magnetismo a 218°C. Este carburo ortorrómbico es inestable y de composición bastante variable. El hierro puede sustituirse hasta un máximo de aproximadamente 15% por Mn. o Cr: (Fe.Cr)₃C o (Fe.Mn)₃C y en menor extensión por el V, Mo, W, Ni y Co (tanto menor cuanto mayor es la diferencia de tamaño con el hierro).

Hay índices que indican que el contenido de carbono puede variar y el N (nitrógeno) puede sustituirlo.

4. Perlita: Constituyente eutectoide de 0.88% C, formado por láminas alternadas y paralelas de ferrita y cementita proveniente de la descomposición de la austenita en enfriamiento lento al pasar los 721°C. Contiene aproximadamente 13% de cementita y 87% de ferrita y tiene una resistencia a la tracción de 80 kg/mm² y un alargamiento de 15% aproximadamente.

La finura de estas láminas y la separación de las mismas dependen de la velocidad de enfriamiento e influye sobre las propiedades mecánicas.

La separación entre láminas sirve para clasificarla en:

- ☐ perlita gruesa de dureza 200 HBN (15 Rc).
- ☐ perlita normal de dureza 220 HBN (20 Rc).
- ☐ perlita fina de dureza 300 HBN (32 Rc).

Transformación de la austenita

Transformación eutectoide.

La austenita es una solución sólida que durante el enfriamiento va variando su composición hasta tener la del eutectoide; en este punto se descompone transformándose en perlita, siendo la perlita un eutectoide formado por ferrita y cementita. Es decir, que aquella fase única (solución sólida) se desdobra en dos. La perlita es un microconstituyente de equilibrio estable. En determinadas condiciones la descomposición de la austenita puede originar estructuras metaestables. Todos los tratamientos térmicos de los aceros están basados en esta transformación, es decir, en este desdoblamiento de la austenita.

Existen dos formas de realizar los tratamientos:

- con enfriamiento continuo
- a temperatura constante

En el primer caso la transformación se hace en forma rápida y sucesiva a distintas temperaturas porque el material va a pasar por ellas durante el enfriamiento. La variable del proceso es la velocidad de enfriamiento. El resultado de la transformación se cambia variando su velocidad.

En cambio, en la transformación a temperatura constante, la variable del proceso es la temperatura. Según a qué temperatura mantengamos la aleación para que se produzca la transformación, obtendremos distintos productos resultantes de esa transformación. Digamos que en última instancia después del proceso siempre vamos a obtener los constituyentes ferrita y cementita, pero éstos se presentarán morfológicamente en forma distinta, es decir con un aspecto diferente. Estos aspectos diferentes con que se presentan involucran distintas propiedades.

Antes de comenzar a hablar de la transformación en sí, veremos primero qué es un tratamiento térmico y cuáles son fundamentalmente los factores termodinámicos que intervienen en el proceso.

Un **tratamiento térmico** es un proceso constituido por uno o más ciclos térmicos (calentamientos y enfriamientos) que se hacen seguir a un metal o aleación en estado sólido, mediante los cuales se modifica su estado estructural con el fin de dotarlo de propiedades deseables.

Puede observarse en un diagrama de equilibrio cualquiera, la posibilidad de que exista una transformación en estado sólido, es decir que una aleación sea susceptible o no de tratamiento térmico. Viendo el tipo de transformación, se puede saber qué tratamiento térmico es posible aplicar.

Toda modificación estructural implica cierta transformación y para que esas transformaciones estructurales se cumplan, tiene que producirse en el metal o aleación un proceso físico complejo.

En un metal o aleación, se distinguen dos tipos de estructuras:

1) **La estructura cristalográfica** que es muy poco modificable, pudiendo solamente quedar afectada por distorsiones en la red. Un metal que normalmente cristaliza en el sistema cúbico por ejemplo, no puede cristalizar en el sistema hexagonal mediante un tratamiento térmico, si ya de por sí no presenta una variedad alotrópica que cristalice en el sistema hexagonal.

2) **La estructura granular** que comprende tamaño, forma y distribución de los granos. Esta es la que se modifica profundamente en el tratamiento térmico. Toda modificación involucra una serie de cambios energéticos, pues es necesario que se destruya una estructura para formarse otra.

Para hacer desaparecer una estructura y aparecer otra, **deben seguirse todos los pasos de la transformación**, se empezará por una germinación donde se forman los primeros cristalitas elementales de la nueva estructura que se van redisolviendo y formando constantemente, hasta que esa germinación se estabiliza constituyéndose en nucleación. Estos núcleos de la nueva estructura van creciendo hasta que absorben todos los cristales de la estructura anterior. Para que todo esto se produzca, la transformación tiene que evolucionar en el sentido de la disminución de la energía libre. Al mismo tiempo para que comience a producirse debe haber una energía de activación; es decir que para que la estructura pase a un estado de energía inferior, tiene que adquirir primeramente cierta energía de activación.

Se sabe que en un sistema cada partícula tiene su energía propia (energía interna que es suma de la energía libre más la energía termo entrópica de la partícula) y si bien, estadísticamente existe una energía media del sistema, específicamente hay una distribución de Gauss; hay una serie de partículas que tienen una energía muy por debajo de la media (son las menos), otras muy por encima de la media (también son pocas) y otras que tienen energía media que son las que están en mayor cantidad. Las partículas con energía interna mayor que la media, posiblemente ya tienen una energía de activación suficiente para formar granos elementales de la nueva estructura. Si bien la energía media es constante, su distribución fluctúa. Así, las agrupaciones que se forman en el punto donde en un momento hay energía que facilita el proceso, se destruyen y aparecen en otro lado y así van produciéndose y desapareciendo - sucesivamente, debido a las fluctuaciones mencionadas. Estas agrupaciones inestables son los gérmenes.

Si se disminuye la energía del sistema, evidentemente hay más partículas que tienen esa energía mayor que corresponde a la transformación. Entonces esos gérmenes que antes se formaban y se destruían ahora se estabilizan y empiezan a crecer y los que antes eran gérmenes inestables se transforman en los núcleos de la nueva estructura que se va a producir. Además, para que un germen se convierta en núcleo y comience a crecer debe poseer un tamaño mayor que un valor determinado, o sea un radio mayor que el radio crítico de nucleación.

En este proceso de nucleación, al seguir bajando la temperatura, se está favoreciendo la transformación y cada vez habrá más partículas que van teniendo la energía de activación suficiente para transformarse en la nueva estructura.

Los núcleos van aumentando de tamaño, y éste constituye el proceso de crecimiento. Vemos pues que tienen que darse las condiciones termodinámicas necesarias, primero para que se produzca la **nucleación** y después el **crecimiento** de los granos de la nueva estructura. Además, para que esto ocurra, tiene que intervenir otro factor muy importante, que es la difusión.

Por ejemplo: En nuestro caso particular de una estructura homogénea como la austenita que se desdobra en dos estructuras, se requiere precisamente la concentración de los átomos de un tipo y de otro separadamente. Esa concentración separada de los átomos para formar la ferrita y la cementita involucra una migración, un movimiento para que los átomos se concentren, formen su red propia y precipiten. Esta migración se denomina difusión. Entonces

la **difusión**, la **nucleación** y el **crecimiento** son los tres factores que se pondrán en juego para poder explicar en forma elemental los procesos de transformación.

La transformación de la austenita puede realizarse con enfriamiento continuo o con un enfriamiento brusco hasta una temperatura fija a la cual se mantiene el material hasta su transformación completa. Esta última se denomina isotérmica.

Por ser más fácilmente entendible se estudiará primeramente la transformación en forma isotérmica, y luego la transformación continua (como si estuviera integrada por una sucesión de transformaciones isotérmicas de pequeña duración).

Los símbolos con que designaremos a las temperaturas críticas están dados en el diagrama de la Fig. 1.

La línea que representa el comienzo del proceso de separación de la ferrita es la A_3 , también llamada temperatura crítica superior de los aceros hipoeutectoides. La línea A_{cm} , es la de temperatura crítica superior de los aceros hipereutectoides, o sea la temperatura del comienzo de separación de la cementita.

La línea A_1 es la horizontal eutectoide, o temperatura crítica inferior. Indica la temperatura de finalización de la precipitación de ferrita y de la cementita. Estos constituyentes que precipitan antes que el eutectoide se denominan ferrita y cementita proeutectoides. A su vez es la temperatura de precipitación del constituyente eutectoide: la perlita. Por debajo de la temperatura A_1 no tenemos fase α en estado de equilibrio.

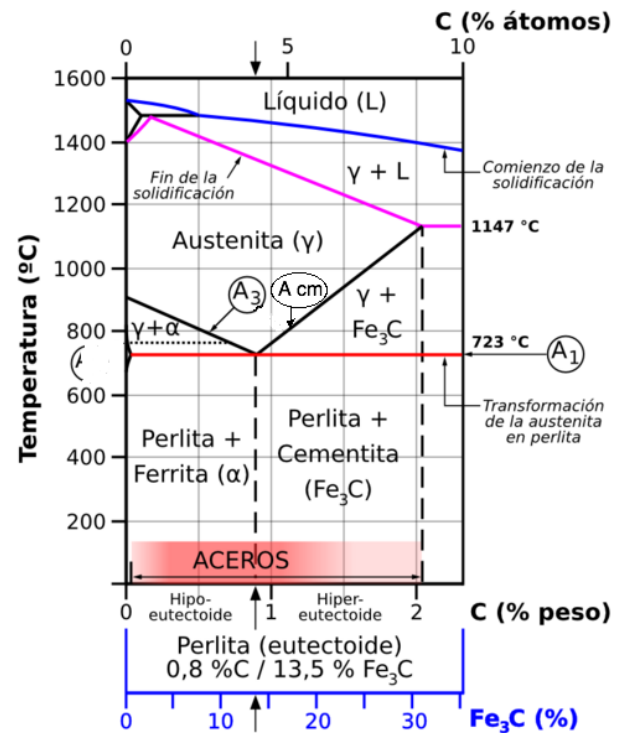


Figura 1.-

Transformación isotérmica.

Si tomamos varias probetas similares de un acero y las calentamos simultáneamente a una temperatura por encima de la crítica superior, obtendremos estructuras íntegramente austeníticas.

Una vez que la temperatura se ha homogeneizado las colocamos rápidamente a distintas temperaturas, todas ellas inferiores a A_1 . Las mantenemos un tiempo prolongado y luego las retiramos. Cada probeta ostentará una estructura proveniente de la transformación de la austenita a una temperatura particular y en forma isotérmica. Efectuando la observación metalográfica veremos que las transformaciones de la austenita realizadas a distintas temperaturas arrojan estructuras metalográficas diferentes y por ende propiedades mecánicas también diferentes. Por otra parte, estas transformaciones no son instantáneas: presentan un período de incubación y luego un período de transformación. La duración de estos dos períodos varía también con la temperatura de transformación.

Las **variables** que rigen la estructura metalográfica, el tiempo de incubación y el tiempo de transformación son dos:

- 1) La fuerza impulsora de la nucleación.
- 2) La velocidad de difusión.

A su vez estos dos factores dependen de la temperatura a la cual se efectúa la transformación.

La velocidad de nucleación depende del grado de subenfriamiento, y es directamente proporcional a él. Se entiende por subenfriamiento a la diferencia entre la temperatura crítica superior y la temperatura de transformación. Consideremos por ej: que la temperatura crítica es 750° y nosotros hemos efectuado la transformación a 680° .

La estructura estable a 750°C tenía una determinada energía libre; la estructura estable a 680°C tiene una energía libre menor, pues la transformación va a evolucionar en el sentido de la disminución de la energía libre del sistema, es decir que existe un delta de energía $\Delta F = F(750^{\circ}) - F(680^{\circ})$ y cuanto más grande es éste (ΔF) mayor es la diferencia de energía y mayor va a ser la fuerza impulsora de la nucleación. En consecuencia, más corto será el tiempo de incubación y con mayor rapidez se realizará la transformación.

Cuando se pasa desde 750°C a 680°C todavía se tiene retenida la estructura que corresponde a 750°C que evidentemente está en desequilibrio. Tiene pues que evolucionar hacia el equilibrio que corresponde a la nueva temperatura. Para transformarse, los átomos que están en esta estructura tienen que ubicarse en las posiciones de la nueva, o sea que tienen que difundir. Por lo tanto el otro factor que influye notablemente es la difusión. Esta será tanto mayor cuanto más elevada sea la temperatura pues hay mayor movilidad atómica.

Por lo tanto, estos dos factores, nucleación y difusión dependen en forma opuesta de la temperatura. Cuando se realiza la transformación a temperaturas elevadas, la caída de temperatura es pequeña y por lo tanto la nucleación de ese proceso va a ser también pequeña, mientras que la difusión va a ser tanto mayor cuanto más elevada sea la temperatura, pues hay mayor movilidad atómica.

Es decir que, a altas temperaturas la transformación se realiza con un período de incubación largo y una velocidad de reacción lenta, porque la nucleación es pequeña. Si bien la difusión es grande, se carece de la energía para nuclear la nueva estructura.

A medida que va disminuyendo la temperatura, con una difusión importante todavía, la nucleación va aumentando de tal forma que cada vez se va haciendo el período de incubación más corto y la velocidad de transformación más rápida. Bajando aún más la temperatura la fuerza impulsora de la nucleación aumenta pero la difusión disminuye. Si bien se tiene la energía para realizar el proceso, los átomos todavía no han llegado a su lugar, y por lo tanto vuelve la reacción otra vez a un largo período de incubación y una baja velocidad de transformación.

Representando el proceso en un sistema de ejes, tiempo-temperatura, siendo T_c la temperatura crítica, se observa que la transformación, adopta aproximadamente el tipo de curva de la Fig. 2, curva característica en forma de C, correspondiendo la curva de la izquierda al principio de transformación y la de la derecha al fin de la misma.

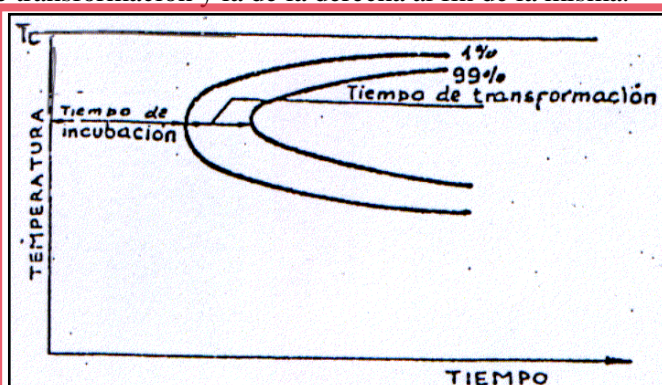


Figura 2.-

Para cada temperatura se tiene un período de incubación y una velocidad de transformación, o sea un tiempo para que comience y otro para que se complete la transformación. El período de incubación va disminuyendo hasta una determinada temperatura (nariz de curva) y paralelamente disminuye también el tiempo de reacción. En general hay desfase entre la temperatura que corresponde al menor tiempo de incubación y la que corresponde al menor tiempo de transformación. Pasado el mínimo, el período de incubación comienza otra vez a crecer en razón de que se invierte la preponderancia de los factores que influyen, volviéndose nuevamente a un período largo de incubación, esta vez por falta de difusión con una disminución de la velocidad de la transformación. Esto no es privativo de la transformación que sufre la austenita de los aceros. En cualquier otro caso en que partiendo de una solución sólida, se obtiene un eutectoide, se tendrá este tipo de transformación.

En el proceso de transformación se tiene un constituyente (austenita) que se desdobra en otros dos, ferrita y cementita. El aspecto de la estructura va a cambiar según cual sea el constituyente que rige la transformación: la cementita o la ferrita. A una determinada temperatura, en la transformación rige un constituyente y a temperatura más baja el otro. Según sea uno u otro, aparecen las distintas estructuras metalográficas.

A altas temperaturas la gran movilidad atómica permite la difusión del carbono dentro de la austenita para concentrarse y originar una lámina de cementita. Por lo tanto la que rige la nucleación es la cementita pues es la que se separa primero. La ferrita que va precipitando después se va acomodando a la forma que adopte la cementita, y las estructuras que se obtienen de esa transformación se llaman estructuras **perlíticas**. Con transformaciones a temperaturas más bajas, la cementita no puede separarse, pues la velocidad de difusión del carbono en la austenita es ya ínfima, entonces pasa a regir la nucleación la ferrita, cambiando la morfología de la estructura. Las estructuras que provienen de este segundo tipo de transformación son las llamadas **estructuras bainíticas**. Después a menores temperaturas no puede separarse ni uno ni otro constituyente, la fuerza impulsora de la nucleación es muy grande, dada la gran diferencia de temperatura y la difusión prácticamente nula, de tal manera que la estructura se transforma sin difusión y en forma casi instantánea, dando estructuras del tipo **martensítico**. Estos son los tres mecanismos de la transformación de la austenita (perlítico, bainítico y martensítico).

Transformación de la austenita en perlita.

Se dijo que en la transformación de la austenita a elevadas temperaturas es la cementita la que primero precipita y dirige la nucleación. A esas temperaturas hay una gran difusión. En consecuencia en la austenita (solución sólida de carbono en hierro γ) el carbono migra fácilmente y se va concentrando en las zonas donde va a precipitar. Cuando llega a tener la energía suficiente, precipita en forma de laminillas dentro del grano de austenita, comenzando siempre por el límite de grano (zona de mayor energía libre). El cristal de cementita crece en forma alargada y siguiendo la dirección de ciertos planos de cristalización de la austenita que favorecen el crecimiento. Esa dirección es la que provoca la menor distorsión en la red del cristal de austenita. Evidentemente si el carbono migra para precipitar, en su entorno deja al hierro con muy poca concentración en carbono, favoreciendo así la transformación del hierro γ en hierro α , y entonces lateralmente se van formando las laminillas de ferrita (Fig. 3).

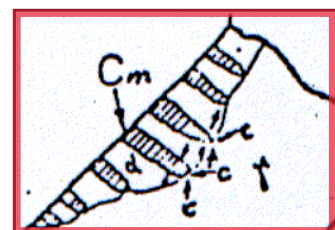


Figura 3.-

Este crecimiento se produce sucesivamente en forma laminar, y su estructura depende de la temperatura a la cual se realiza. Cuando se efectúa a elevada temperatura un núcleo de transformación puede absorber varios granos de austenita y a menor temperatura para un mismo grano de

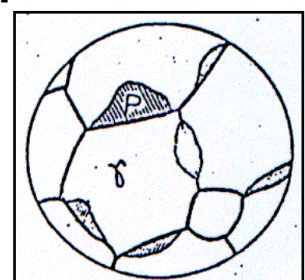


Figura 4.-

austenita habrán más núcleos, formándose varios conglomerados de perlita, de láminas paralelas.

Es decir que en un grano de austenita, si se tienen varios de perlita, estos estarán orientados en distintas direcciones, pero el grano proveniente de un mismo núcleo mantendrá sus láminas paralelas (Fig. 4). El mecanismo de la recrystalización es el mismo que el de la cristalización y cuando los granos del nuevo constituyente se tocan se detiene el crecimiento.

Cuanto mayor es la cantidad de carbono disuelto en la austenita, más estable es ésta. Al precipitar el carbono se favorece la transformación de la austenita en perlita. La temperatura a la cual se hace la transformación juega un papel importante no sólo sobre la nucleación y la difusión, sino también directamente sobre la velocidad de nucleación y del crecimiento. A medida que bajamos la temperatura de transformación se van obteniendo estructuras de laminillas cada vez más finas, hasta que llega un momento en que la laminilla es tan fina que ya no se puede observar al microscopio óptico. Esta estructura de perlita sumamente fina (láminas cortas y muy finas) se denomina estructura **sorbítica**.

Transformación de la austenita en bainita.

Si se sigue bajando la temperatura de transformación se llegan a obtener laminillas tan pequeñas que no alcanzarán a una línea de celdillas elementales. Entonces cambia el constituyente que rige la nucleación del proceso y comienza a actuar el otro elemento de la estructura, o sea la ferrita. En este momento, la difusión disminuye aún más y la fuerza impulsora de la nucleación va actuando con mayor intensidad, favoreciendo con esto en primera instancia, la transformación del hierro γ en hierro α .

Se transforma la austenita en ferrita sobresaturada en carbono. Entonces, en principio se distorsiona la red porque el hierro no puede disolver tanto carbono, y luego para destensionarse tiene que precipitar la cementita.

Es decir que: primero comienza por transformarse el Fe_γ en Fe_α . La ferrita así formada se encuentra sobresaturada en carbono y lo elimina precipitando bajo la forma de cementita. Esto es posible, pues si bien a esta temperatura el carbono ya no podía difundir dentro de la austenita, sí lo hace en la ferrita, pues la gran tensión de sobresaturación de ésta lo impulsa a hacerlo.

Como consecuencia de que el proceso es conducido por la formación de la ferrita, aparecen las **estructuras bainíticas**. Pero, puesto que la transformación se hace cada vez a más bajas temperaturas la precipitación de la cementita se hace más difícil porque si bien la nucleación es cada vez mayor, la menor difusión restringe más el proceso. A grandes rasgos es posible distinguir dos tipos de estructuras: la **bainítica superior** y la **bainítica inferior**.

La **bainítica superior** (troostita) que se produce a temperaturas inmediatamente inferiores a las de la formación de la sorbita, es una estructura que se asemeja más (por su continuidad) a las estructuras perlíticas y es en cierto modo laminar (laminar plumosa) porque permite la formación de la ferrita y alrededor de ella la precipitación de las láminas de cementita en forma de pluma. A medida que se disminuye la temperatura la separación de la cementita se hace más difícil, debido a que la difusión es cada vez menor.

Se llega así a una temperatura en que se forman agujas de ferrita, pero el carbono no puede difundir y precipita dentro y sobre la misma aguja. Es decir que se tiene una aguja de ferrita que por efecto del subenfriamiento y de la poca difusión crece en el sentido de la menor oposición, siguiendo ciertas direcciones cristalográficas dentro de la austenita que se está transformando. Esas direcciones preferenciales son doce, equivalentes entre sí y se entrecruzan formando ángulos de 60° dentro de la red de la austenita. En ellas, la nueva estructura llamada

bainita inferior encuentra menos esfuerzo para crecer, formando las agujas en zig-zag características, con las inclusiones de cementita dentro de ellas, Fig. 5.



Fig. 5 a. Bainita superior



b. Bainita inferior

Transformación martensítica.

A muy bajas temperaturas, la austenita se transforma en ferrita sobresaturada en carbono que no puede expulsar, tensionando la red, que por ello se **hace tetragonal**.

Es decir que la red de ferrita al quedar deformada debido a la inserción de esos átomos de carbono que no puede expulsar, da lugar a una estructura inestable que es la **estructura martensítica**.

Para toda transformación que se inicie por debajo de una temperatura crítica que llamaremos M_s , la austenita se transforma en martensita y esta transformación progresa si el enfriamiento continúa, es decir que a cada temperatura inferior a M_s corresponde un % de austenita transformada en martensita.

Esta transformación difiere fundamentalmente de la perlítica y la bainítica en que no requiere incubación ni nucleación sino que se produce instantáneamente cuando el subenfriamiento origina la formación del nuevo constituyente.

El mecanismo se explica por un cizallamiento o corrimiento de determinados planos de la austenita que transforma la red centrada en las caras, en centrada en el cuerpo, conservando en su sitio los átomos de carbono. Como éstos no se adaptan a la nueva red la deforman en tetragonal. Esto produce un aumento de energía que debe ser compensado con un mayor subenfriamiento para que la transformación progrese. Por esto es que la transformación de la austenita en martensita es solamente continua y nunca isotérmica.

A mayor cantidad de carbono, mayor distorsión de la red (mayor tetragonalidad) y en consecuencia necesitaremos mayor subenfriamiento. Por esto M_s disminuye con el aumento del % de C del acero.

Dada la forma en que se produce la transformación martensítica, la estructura aparece en forma de láminas o agujas que se producen en la red de la austenita por el cizallamiento de planos en direcciones equivalentes que están entre sí en ángulos de 60° . La martensita es pues estructuralmente una solución sobresaturada de C en $Fe\alpha$.

La red cúbica centrada en el cuerpo sólo puede admitir al C en solución mediante una fuerte distorsión de la red. Esta distorsión es tanto mayor cuanto mayor sea el % de carbono

y es la responsable de la elevada dureza y resistencia de la martensita, (de 40 a 68, Rockwell "C" y de 125 a 250 kg/mm², según el % de carbono).

Es notable observar cómo la sola distorsión de la red, producida por menos de un 1% de carbono, transforma la ferrita, que es el constituyente más blando de los aceros, en el más duro después de la cementita.

Mientras que las transformaciones *perlítica* y *bainítica* pueden realizarse isotérmicamente (principio y fin de la transformación a la misma temperatura), la transformación *martensítica* no puede realizarse isotérmicamente pues quedaría incompleta. Por ello, debe ser realizada en forma continua (con variación de temperatura). De ahí que existan las temperaturas M_s y M_f de principio y fin de transformación. Es decir, que no es posible transformar completamente la estructura austenítica en martensítica, si no se alcanza la temperatura final M_f .

La temperatura M_s es fija para cada acero, para cada composición y no depende de la velocidad de enfriamiento. Existen fórmulas que permiten calcularla a partir de la composición. En cambio la temperatura final M_f va a depender también de la velocidad de enfriamiento, pudiendo estar debajo de la temperatura ambiente.

El constituyente de transformación final es entonces la *martensita* que no se obtiene isotérmicamente. Si se enfría la aleación hasta una temperatura por debajo de M_s y se la mantiene constante, por ejemplo: a una temperatura que corresponde al 50 % de transformación se obtendrá sólo un 50% de martensita y el resto es austenita que no se transformó. Al pasar a otra temperatura menor, es decir, que corresponde a otro porcentaje de transformación, se presenta el siguiente problema:

Si se detiene la transformación a la temperatura que corresponde a un 50% de transformación y se la deja un tiempo, se produce una estabilización de la austenita y cuando se sigue enfriando para lograr la transformación completa necesitará mayor subenfriamiento, que si se hubiera hecho en un solo paso. Por ello M_f no es una temperatura fija, depende de la velocidad de enfriamiento y a mayor velocidad de enfriamiento mayor temperatura M_f . Es decir el final de la transformación se produce a más alta temperatura y la austenita que queda sin transformar (austenita retenida) es menor, pudiendo ser casi nula. La variabilidad de M_f con la velocidad de enfriamiento se debe pues al proceso de estabilización de la austenita que se superpone a la transformación.

Hay otros factores que pueden influir en la estabilización de la austenita como son los elementos de aleación, de los que se hablará más adelante.

Curvas de transformación de los aceros "T.T.T" (tiempo- temperatura - transformación)

■ Aceros Eutectoides

Estas curvas presentan la forma de las de la Fig. 6. Siendo T_c temperatura crítica, que para este caso es A_1 ; pues se trata de un acero eutectoide. Se tiene una curva de principio de la transformación y una de final, correspondiente a la transformación perlítica, y otras dos

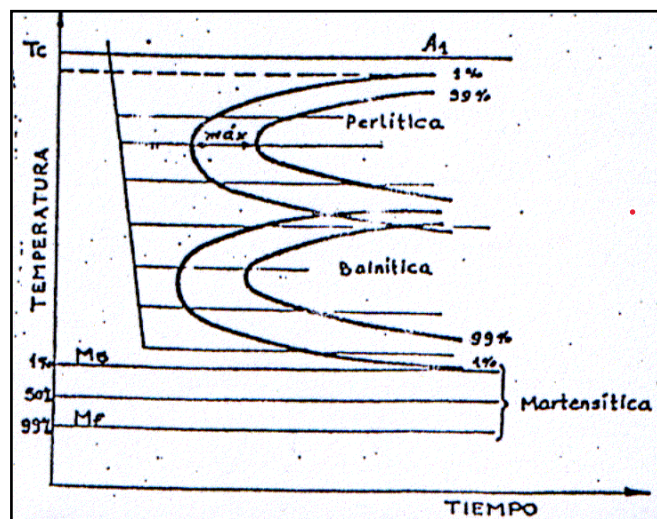


Fig. 6: Diagrama TTT

curvas una de principio y otra de fin de transformación, que corresponde a la transformación bainítica. Finalmente y a más baja temperatura se tiene la transformación martensítica, con una temperatura de principio M_s y una de fin de la transformación M_f .

El comienzo de la transformación martensítica está a una temperatura y la terminación a otra.

Resumiendo:

Como resultado de las transformaciones isotérmicas realizadas a diferentes temperaturas, se obtienen las siguientes estructuras:

- ✓ perlita gruesa
- ✓ perlita fina
- ✓ perlita sorbítica
- ✓ bainita superior
- ✓ bainita inferior
- ✓ martensita.

■ **Caso de aceros no eutectoides.**

Estos aceros tienen ferrita o cementita en exceso (hipoeutectoides o hipereutectoides), es decir tienen constituyentes proeutectoides (que precipitan antes que el eutectoide en un enfriamiento normal).

Los constituyentes proeutectoides comienzan a precipitar a la temperatura A_3 (temperatura crítica superior). Luego a la temperatura A_1 se separa la perlita.

Entre la temperatura crítica A_1 y A_3 o A_c se van a tener: (Fig.7)

(austenita + ferrita) o (austenita + cementita)

Es decir que a temperatura elevada se separan los elementos proeutectoides, pero en la transformación isotérmica a temperaturas menores y a partir de la nariz de la curva (menor tiempo de incubación) la velocidad de transformación impide la separación de dichos elementos, que quedan disueltos en la austenita, la cual se transforma siguiendo el mismo proceso que se estudió anteriormente, como si su composición química correspondiera a la perlita.

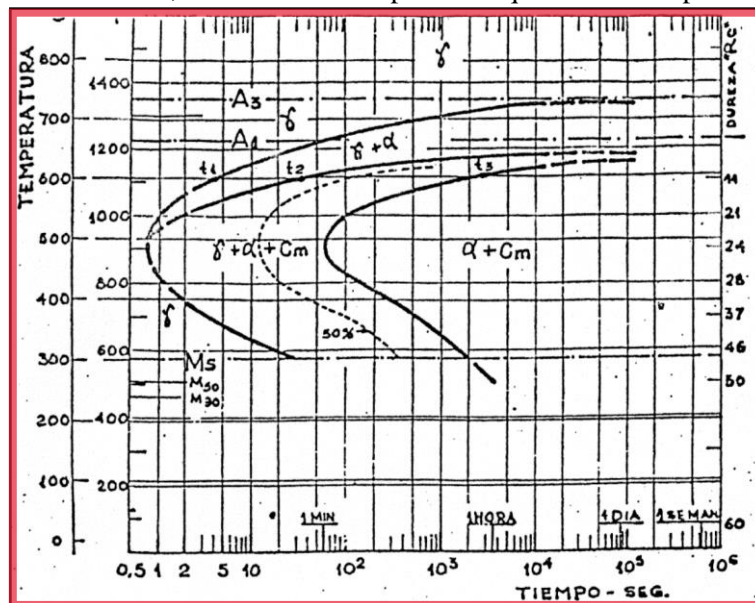


Fig. 7

Análisis de las curvas T.T.T.

Las curvas T.T.T. vistas anteriormente, en general se entrelazan y superponen en mayor o menor grado según la influencia que ejerzan sobre ellas los elementos de aleación.

Veamos como se interpretan estas curvas y cómo se utilizan.

Supongamos por ejemplo la curva del tipo de la Fig. 8 la que generalmente suele traer una línea intermedia punteada, que representa el 50% de transformación. Se tienen las distintas zonas de los productos de transformación: perlita, perlita + bainita, bainita y martensita, cada una de las cuales tiene distintas propiedades. Además suelen presentar a la derecha, una escala de durezas Rockwell "C".

Si por ejemplo que se desea obtener un acero con una dureza de 40 RC, a la que corresponde 530°C. Hacia el lado izquierdo se tiene γ y entre las curvas de principio y fin se

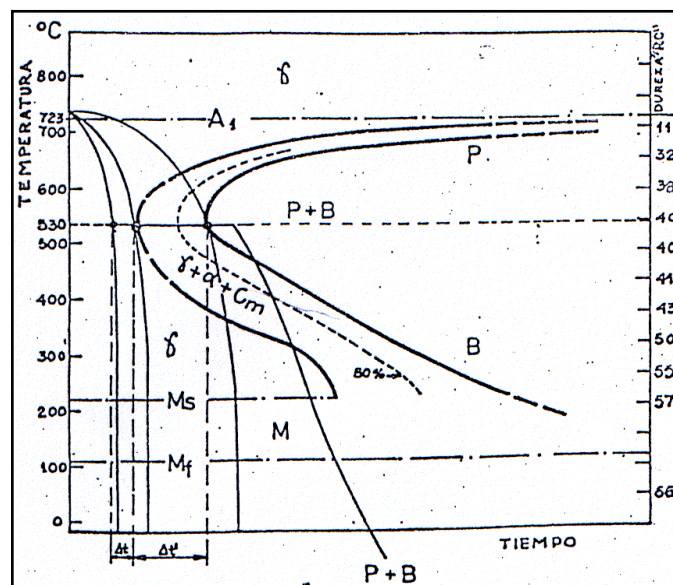


Fig. 8

tiene $\gamma + (\alpha \text{ y } cm)$. Sobre el diagrama se trazan (en algunos ya vienen trazadas) distintas velocidades de enfriamiento. Se elige una velocidad de enfriamiento que permita alcanzar la temperatura de 530°C antes de tocar la curva de comienzo de transformación. Se toma un baño isotérmico, cuya masa sea suficiente como para que no varíe la temperatura al introducir la pieza.

En caso contrario debe tenerse en cuenta este efecto. Se llega a la temperatura de 530°C, se espera el tiempo de incubación Δt para cortar la curva y comenzar la transformación que dura un tiempo $\Delta t'$. Para más seguridad de que se realice la transformación se puede dejar pasar un tiempo un poco mayor, a partir del cual se enfría, sin tener en cuenta la velocidad de enfriamiento, pues toda la austenita está transformada. La estructura que se obtiene es perlita+bainita.

Esta curva nos dice:

1°) A qué temperatura hay que realizar la transformación isotérmica para lograr una determinada dureza y estructura que estará acompañada por una determinada resistencia, alargamiento, límite de fluencia, etc.

2°) A qué velocidad hay que enfriar, previo a la transformación y antes que eso, si es posible la transformación, pues hay aceros en los que la transformación se realiza en forma inmediata a

temperaturas más altas por más rápido que enfriemos. Una curva de este tipo es la que se esquematiza en la Fig. 9. Se observa que la nariz de la curva desaparece.

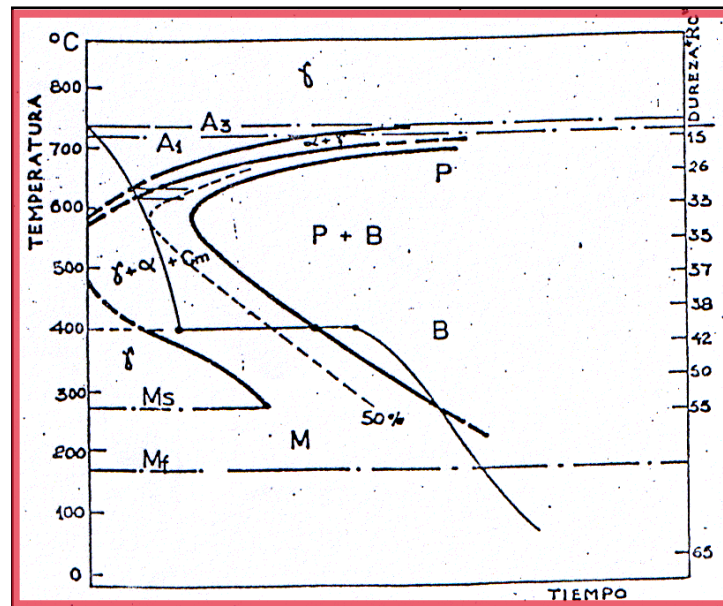


Fig. 9

Tomemos por ejemplo como temperatura de transformación 400°C (Fig. 9). Vemos que al enfriar a esa temperatura, por más rápido que lo hagamos, no podremos evitar de cortar la curva de comienzo de transformación. Se va a formar, entonces, una mezcla de constituyentes: ferrita, perlita y bainita. Se tiene el constituyente puro, cuando hasta la temperatura de tratamiento no se ha transformado nada de austenita, pero en cuanto se corta la curva de transformación, es lo mismo que si se realizaran pequeñas transformaciones isotérmicas a distintas temperaturas.

Veamos una curva más detallada, tal como la de la Fig. 10. Se tendrán dos temperaturas críticas, superior A_3 e inferior A_1 . Se enfría la aleación, por ejemplo hasta 600°C, y se la coloca en el baño isotérmico. Transcurre un tiempo 1-2, período de incubación y se llega a la línea inicial de separación de la ferrita. De 2 a 3, se separa la ferrita en exceso de la austenita y de 3 a 4 se transforma el resto de la austenita en perlita.

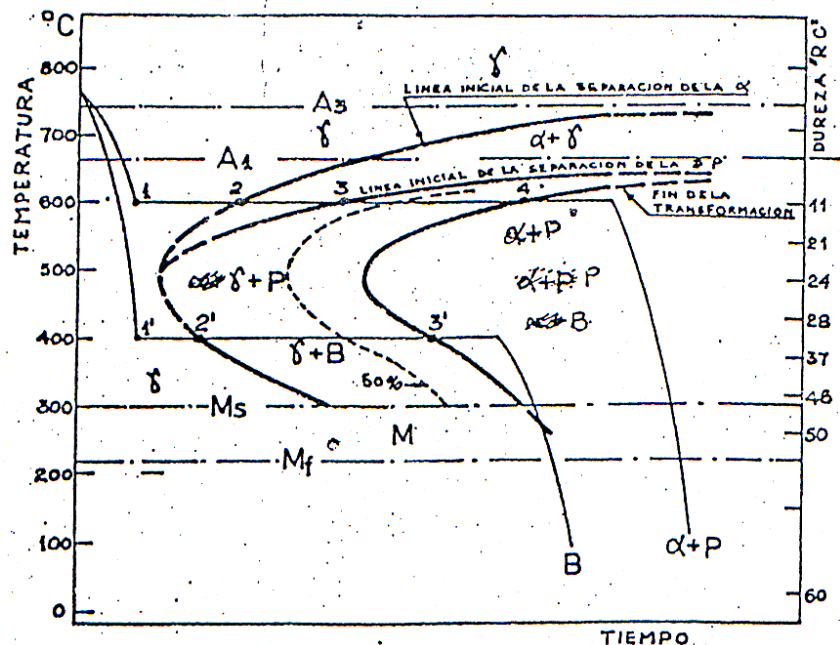


Fig. 10

A partir de 4 se deja transcurrir un tiempo más, para seguridad de que la transformación sea total y se enfría obteniéndose ferrita + perlita.

Si se efectúa otro tratamiento por ejemplo una transformación a 400°C, se enfría la aleación austenizada hasta el punto (1'), y se introduce en el baño isotérmico: de 1' a 2' se tiene

el período de incubación y, al tocar la curva de comienzo de la transformación en 2', empieza a transformarse la austenita en bainita la que prosigue hasta 3'. Luego se enfría y se obtiene bainita solamente. Lo que se ha hecho es retener la austenita hasta el punto 2'.

Es decir que el problema es estudiar las curvas y buscar una velocidad de enfriamiento adecuada para retener la austenita hasta donde sea necesario, y luego transformarla. Evidentemente esta transformación, con respecto a la transformación continua seguida del revenido, produce un tensionado mucho menor en el material.

Influencia de los elementos de aleación en el proceso.

Los elementos de aleación influyen en el proceso, ya sea acelerando o retardando la transformación o el período de incubación, pero ello depende de la forma como estos elementos de aleación se encuentren en el acero.

Hay elementos que se disuelven en la austenita, que es el constituyente de partida en estas transformaciones. Estos elementos estabilizan la austenita y retardan su descomposición. Otros elementos se disuelven en la ferrita. Estos estabilizan la ferrita y catalizan su formación o sea que acortan los tiempos de incubación y transformación.

Los elementos formadores de carburos, en cambio, influyen menos en los tiempos de incubación de la austenita. Su influencia se ejerce en los tiempos de transformación. Retardan el fin de la transformación.

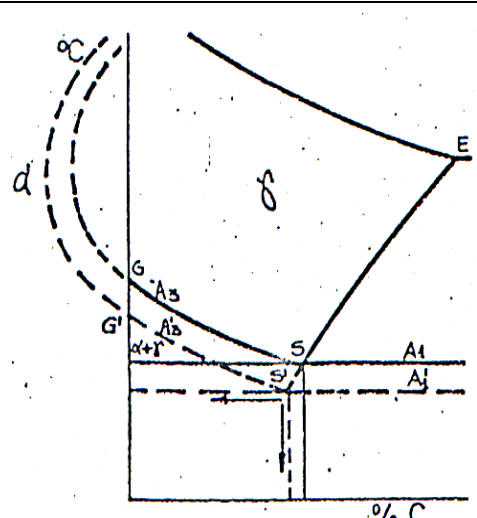
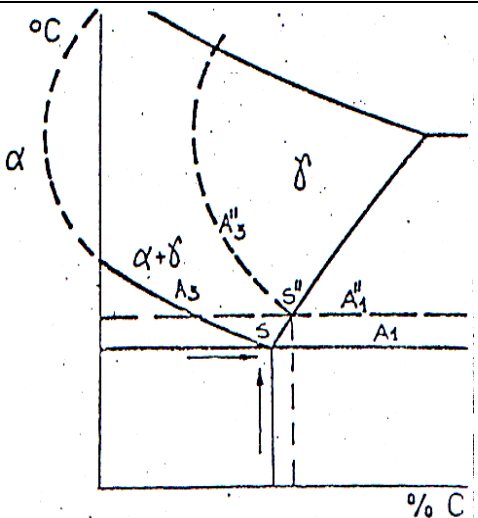
Acción que ejercen sobre el diagrama de equilibrio.

Consideremos el diagrama Hierro-Carbono (Fig. 11). El agregado de elementos de aleación que se disuelven en la austenita retardan la transformación, que se producirá a menor temperatura desplazando el punto S (eutectoide), hacia abajo y hacia la izquierda, (punto S'). Las líneas A_3 y A_1 se van a desplazar hacia las temperaturas decrecientes, A'_3 y A'_1 . (Fig. 11)

En cambio los elementos que se disuelven en la ferrita la estabilizan y por lo tanto amplían el campo de $\alpha + \gamma$, reduciéndose el de γ . Es decir que la transformación se va a realizar a mayor temperatura y las líneas A_3 y A_1 , se van a desplazar hacia las temperaturas crecientes A''_3 Y A''_1 . Por lo tanto el punto S (eutectoide) se desplazará hacia arriba y hacia la derecha, punto S". (Fig. 11).

Influencia de los Elementos de Aleación

	Solubles en la austenita (γ)			Solubles en la ferrita (α)		
	N°	Elemento	Solubilidad	N°	Elemento	Solubilidad
Elementos Aleantes	7	Níquel (Ni)	Ilimitada	4	Cromo (Cr)	Ilimitada
	5	Manganeso	Ilimitada	1	Vanadio (V)	Ilimitada
	6	Cobalto (Co)	Ilimitada	6	Cobalto (Co)	75 %
	4	Cromo (Cr)	12 %	3	Molibdeno	37.5 %
				7	Aluminio (Al)	36 %
				2	Tungsteno(W)	33 %
				7	Silicio (Si)	18 %
				7	Níquel (Ni)	10 %
	N°: número de orden que marca la tendencia a formar carburos.					
	Nota: la solubilidad indicada puede variar con el contenido de carbono.					

Acción sobre el diagrama de equilibrio	Estabilizan la austenita (amplían su campo) Disminuyen la temperatura y concentración del eutectoide.	Estabilizan la ferrita (amplían su campo). Elevan la temperatura y concentración del eutectoide.
	 <p>Fig. 11</p>	 <p>Fig. 11</p>

El desplazamiento de la curva S hacia la derecha involucra un mayor tiempo de incubación, lo que permite utilizar velocidades de enfriamiento menores. Por ello los aceros aleados se templen en aceites, y los aceros al carbono en agua.

Las impurezas insolubles (inclusiones) actúan como factores de nucleación y por lo tanto aceleran la germinación. En consecuencia en los aceros con muchas inclusiones las curvas se van a desplazar hacia la izquierda, favoreciendo también la velocidad de transformación.

Salvo la perlita de enfriamiento normal que aparece en el diagrama Fe-C, todas las otras estructuras son inestables, más propiamente **metaestables**, por cuanto estas estructuras no se transforman espontáneamente con el tiempo, sino que tienen un grado de estabilidad dentro de un ámbito más o menos pequeño de temperatura. En cuanto se aumente la temperatura, existe la posibilidad de que evolucionen hacia las estructuras más estables.

En general; toda estructura es estable a temperaturas menores que la de su formación.

Influencia de los Elementos de Aleación en el Diagrama TTT

	Solubles en la austenita (γ)	Solubles en la ferrita (α)
Acción sobre la Transformación Perltica	a) Obstaculizan la difusión b) Estabilizan la austenita	a) Elevan la temperatura de transformación. b) Aumentan la difusión en la γ . c) Fuerte tendencia a formar carburos complejos.
	<u>Consecuencias:</u> Desciende la temperatura de nucleación de la cementita. Aumenta el tiempo de incubación	<u>Consecuencias:</u> La mayor difusión es contrarrestada por la tendencia a la formación de carburos y como éstos son en general

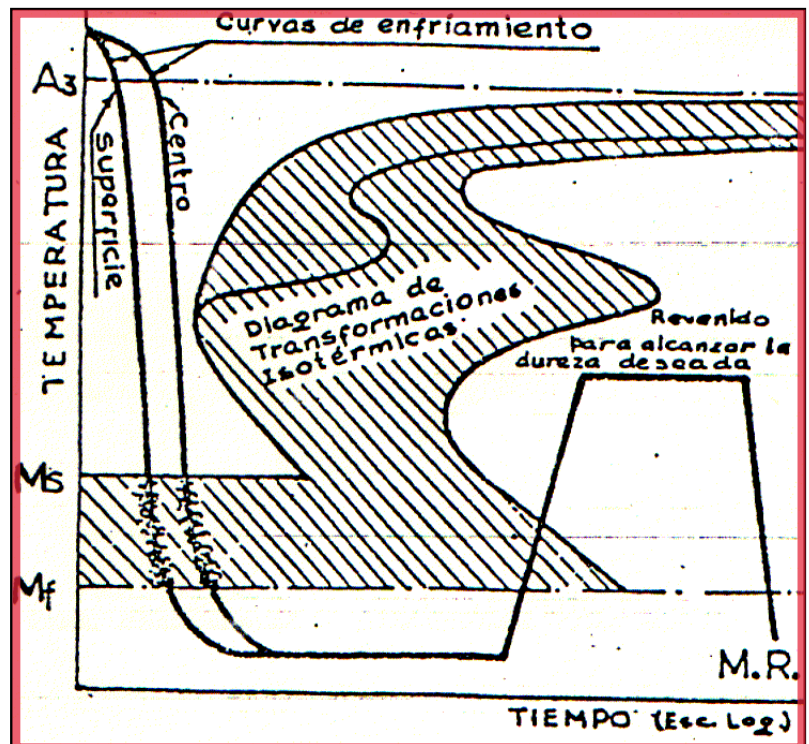
	y de transformación. La curva T.T.T. se desplaza hacia abajo y hacia la derecha, o sea que la formación perlítica se produce con mayor tiempo de incubación a más baja temperatura y más lentamente.	más complejos que la cementita, se retarda la nucleación con lo cual aumenta el tiempo de incubación y el de transformación. Las curvas T.T.T. se desplazan muy levemente hacia arriba y hacia la derecha.
Acción sobre la Transformación Bainítica	<p>a) La dificultad de difusión debida a los elementos aleantes se agrava por el efecto de la baja temperatura.</p> <p><u>Consecuencias:</u> Se necesita mayor energía de activación o sea mayor fuerza impulsora de la nucleación (mayor subenfriamiento). En la curva T.T.T. tienden a separarse los vértices de la transformación perlítica y bainítica, con análogo tiempo de incubación o menores en la perlita (efecto de la difusión)</p>	<p>a) Los elementos aleantes al disolverse en la ferrita dificultan la separación del carbono. b) Poca difusión debido a la baja temperatura.</p> <p><u>Consecuencias:</u> Mayor subenfriamiento para nuclear la ferrita. La curva T.T.T. se desplaza a más baja temperatura destacándose de la perlita. Habitualmente el desplazamiento es menor. La influencia sobre la nucleación de la ferrita es menos marcada que la ejercida sobre la separación de los carburos a partir de la ferrita formada, en consecuencia, se ensancha la zona bainítica de la curva S.</p>

Tratamientos isotérmicos y continuos.

Tomemos una curva S típica tal como la de la Fig. 12. Cuando se realiza el temple continuo, se calienta la pieza por encima de la temperatura crítica y luego se la enfría en el medio correspondiente. Este enfriamiento debe realizarse con una velocidad mayor que la crítica, es decir que no toque la curva S, para que no se produzca ninguna transformación antes de llegar a la temperatura M_s , que es la de comienzo de transformación en la martensita.

Fig. 12

Una vez templada se le da un ligero calentamiento denominado revenido para obtener las propiedades deseadas.



Enfriamiento Continuo

En general suele haber una diferencia de temperatura entre la superficie y el centro de la pieza. Es decir que cuando se baja la temperatura, la superficie se va a enfriar más rápido que el centro y se tendrán en realidad dos curvas de enfriamiento, una correspondiente al centro (la más lenta) y la otra a la Superficie. Esto crea en la pieza un problema de tensiones, debido a que la transformación de la austenita en martensita produce una expansión que ocurre en distinto momento en la superficie que en el centro.

Al desfase debido a las diferentes temperaturas se le superpone otro debido a la contracción que se produce en el enfriamiento. Todo esto da lugar a una combinación de esfuerzos internos que producen el gran tensionado de la red.

El tratamiento que resuelve este inconveniente, es decir, que procura que la pieza, cuando sufre esos cambios de volumen, esté a temperatura uniforme, es el martempering.

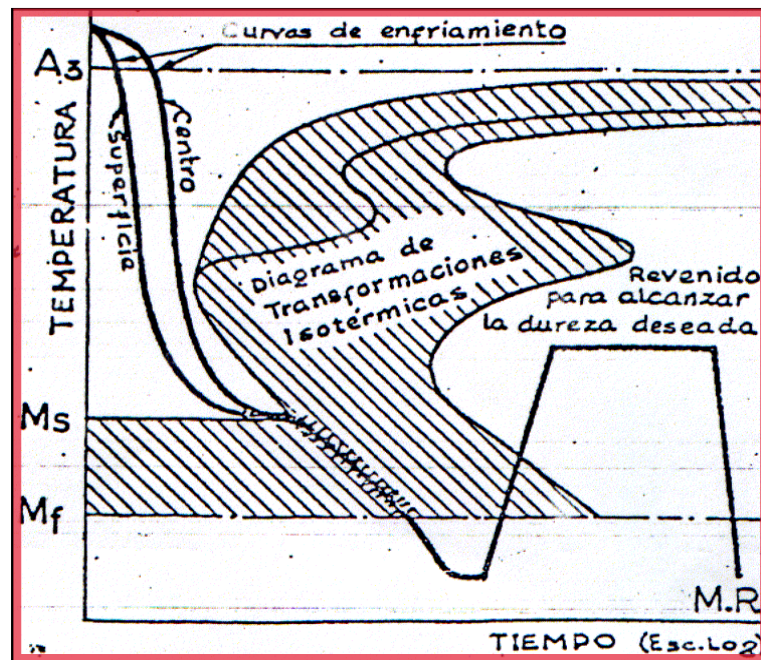


Fig. 13

+ Martempering.

Consiste en calentar el acero hasta la temperatura de austenización (encima de la crítica) y luego enfriar la pieza con una determinada velocidad en un medio cuya temperatura sea algo superior a la M_s, dejarla un tiempo hasta que el centro y la superficie se estabilicen, pues la curva lo permite, y luego enfriar (Fig. 13). En esta forma el enfriamiento brusco se efectúa ya con la pieza a temperatura uniforme, y las dilataciones y contracciones serán soportadas por todo el volumen de la pieza al mismo tiempo. Este enfriamiento no debe ser muy lento, pues M_f va bajando cada vez más y se corre el riesgo de tener austenita retenida. En efecto cuanto más lento sea el enfriamiento mayor será el efecto de la estabilización de la austenita cuyo mecanismo se superpone al proceso de transformación martensítica. La estructura que se obtiene es martensítica. Luego, se practica el revenido.

+ Austempering

Consiste en la transformación de la austenita en forma isotérmica (Fig. 14). Generalmente a la derecha del diagrama se da una tabla de durezas. Estas son las que se obtienen con las transformaciones isotérmicas a cada una de las temperaturas. Se austeniza la pieza y se templea luego en baños de sales fundidas (nitritos, nitratos, etc) a 200 - 400°C.

En este tratamiento en general no es necesario el revenido posterior, a lo sumo se puede realizar a muy bajas temperaturas para eliminar tensiones que se puedan crear en el enfriamiento posterior por cambios de forma en la pieza. La estructura que se obtiene es bainítica. Se aplica a piezas que deban resultar con durezas de 35 a 55 Rc. Las propiedades de tenacidad y resistencia a la fatiga que se obtienen son superiores a las producidas con una martensita revenida de la misma dureza, debido a la homogeneidad de la estructura.

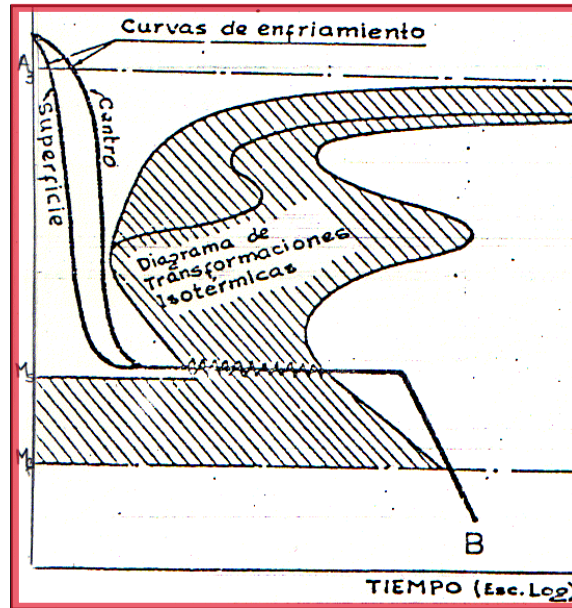


Fig.14

Recocido isotérmico.

Es muy frecuente realizar el recocido isotérmico, pues ofrece la ventaja de ser mucho más rápido que el recocido normal de enfriamiento lento.

En un recocido normal el enfriamiento es muy lento, generalmente dentro del horno. En los aceros muy aleados, hay que regular la velocidad de enfriamiento para lograr bajas durezas (Fig. 15).

En este tratamiento la pieza se enfría rápidamente hasta una cierta temperatura manteniéndola constante durante el tiempo que tarde la transformación y luego se puede enfriar hasta la temperatura ambiente en la forma deseada. Una vez producida la transformación ya no hay más variación de dureza. Puede haber solamente un tensionado por enfriamiento rápido. No es necesario por lo tanto dejar enfriar la pieza en el horno, ni tampoco al aire, basta con ponerlo, por ejemplo, en cal o arena.

El tiempo que tarda el recocido es el que tarda en realizarse la transformación representada por el segmento horizontal comprendido entre las 2 curvas S a la temperatura del tratamiento.

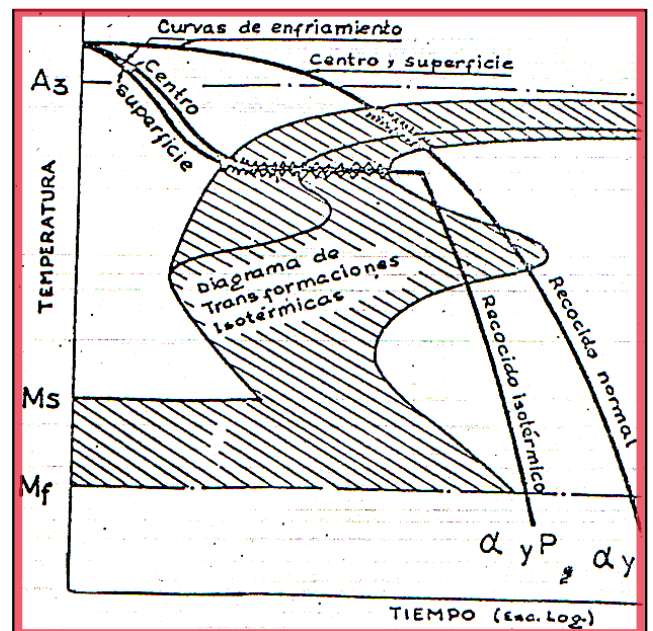


Fig. 15