

Tratamientos Térmicos del acero

El tratamiento térmico del acero tiene como objetivo principal lograr las propiedades físicas y mecánicas necesarias mediante la obtención de microestructuras adecuadas. Para ello se debe tener en cuenta la relación entre material y procesos.

DIAGRAMAS DE TRANSFORMACIÓN

Los diagramas TTT o de transformación isotérmica permiten asociar a cada temperatura de transformación una microestructura con características físicas relativamente homogéneas ya que los datos para su construcción se obtienen de probetas pequeñas donde la temperatura puede llegar a ser uniforme antes de iniciarse la transformación de la austenita, Fig. 1. Para obtener dichos diagramas para cada aleación específica se usan técnicas metalográficas, dilatométricas, de macro y microdureza, etc. Aquellos que corresponden a transformaciones isotérmicas tienen su utilidad principal en estudios de carácter básico. En las aplicaciones tecnológicas se recurre a los diagramas de Enfriamiento Continuo, o sea que las transformaciones no ocurren a temperatura constante sino que se producen durante el enfriamiento, generando microestructuras características de la velocidad de enfriamiento.

El diagrama de enfriamiento continuo es muy semejante al de transformación isotérmica y con respecto a este está desplazado hacia menores temperaturas y hacia tiempos mayores. Esto ocurre porque el material permanece un mayor tiempo a altas temperaturas, influyendo esto en la velocidad de nucleación y tiempo de incubación, dado que al ser menor el ΔT se retarda la transformación. En la Fig. 1 se muestra el diagrama TTT con transformación isotérmica y en la Fig. 2 el de enfriamiento continuo obtenidos experimentalmente para un acero de baja aleación, donde se pueden ver los desplazamientos relativos entre ambos diagramas.

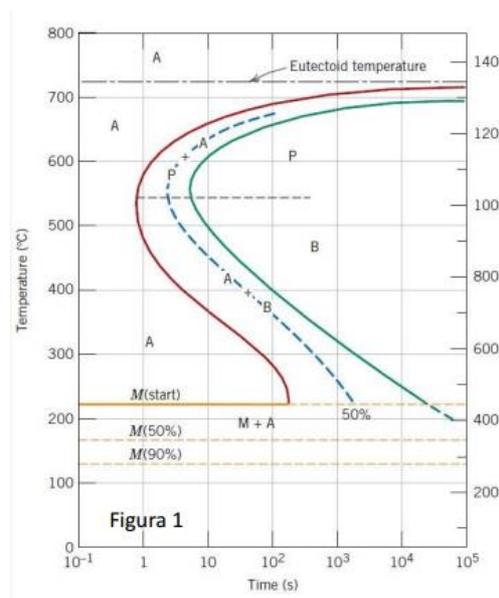


Figura 1. Diagramas de transformación con enfriamiento isotérmico para un acero eutectoide..

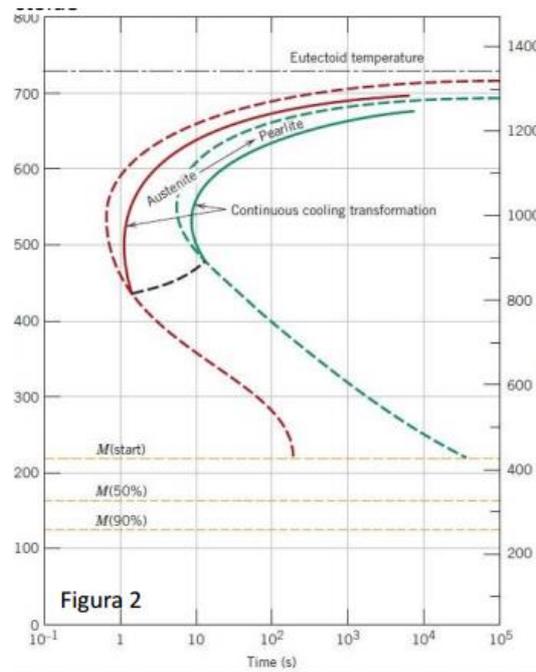


Figura 2. Superposición de diagramas de transformación con enfriamiento isotérmico y continuo para un acero eutectoide.

TRATAMIENTO TÉRMICO DE LOS ACEROS (Sin cambio de composición química)

Volumétricos:

Calentamiento y mantenimiento a temperatura.

La velocidad de calentamiento depende principalmente del medio utilizado que puede proveer la energía: llama directa, sales o metales fundidos, radiación (en vacío), láser o inducción y en cada caso la velocidad máxima puede estar limitada por la generación de distorsiones y por el tamaño de los componentes.

Durante el calentamiento continuo se producen cambios estructurales tendientes a alcanzar el estado de equilibrio. Para los aceros hipoeutectoides la disolución de carburos comienza en Ac1. Para los hipereutectoides comienza en Ac1 y termina en Ac_m, aunque en estos aceros usualmente se trata de no poner todos los carburos en solución para evitar crecimiento de grano. Los carburos se disuelven más rápidamente cuanto menor sea la concentración de aleantes estabilizadores de carburos, tales como Cr, V, Ti y Mo.

El tiempo de mantenimiento a temperatura está determinado por la composición química y el tamaño del componente ya que es necesario obtener austenita de composición homogénea y con un tamaño de grano lo más fino posible.

RECOCIDO DEL ACERO

Teniendo en cuenta el material y las propiedades mecánicas que interesa obtener, así

como también, considerando razones económicas, se han establecido varios tratamientos de recocido que se adaptan a la mayoría de los requerimientos de la industria.

Por recocido se entiende el calentamiento del acero por encima de las temperaturas de transformaciones de fase con un enfriamiento posterior lento. Debido al enfriamiento lento el acero se acerca al equilibrio estructural y de fase. Como consecuencia de esto, después del recocido se obtienen las estructuras indicadas en el diagrama Fe-CFe3:

- ferrita más perlita en los aceros hipoeutectoides
- perlita en el acero eutectoide y
- perlita más cementita en los aceros hipereutectoides.

Después del recocido el acero tiene **baja resistencia y dureza**, pudiendo ser mecanizado o deformado nuevamente. Durante el recocido total hay recristalización de fase, que afina el grano y elimina la estructura Widmanstätten¹ del acero. Al recocido se someten las piezas fundidas, forjadas y laminadas, disminuyendo la dureza y resistencia, lo cual mejora la facilidad de elaboración por corte. Al mismo tiempo, afinando el grano, eliminando las tensiones internas y disminuyendo la heterogeneidad estructural, el recocido contribuye al aumento de la plasticidad y viscosidad en comparación con las obtenidas después de fundido, forjado o laminado. Por estas razones el recocido, en algunos casos, por ejemplo, para muchas piezas fundidas de gran tamaño, es el tratamiento térmico final.

Se distinguen los siguientes tipos de recocido:

Recocido total (hipercrítico) de austenización completa o de regeneración: se calienta el acero hipoeutectoide en 30°- 50° por encima de Ac3, se mantiene durante cierto tiempo a esta temperatura para lograr un calentamiento total del metal con la austenización adecuada, seguido por un enfriamiento lento en el horno de forma tal que la transformación ocurra completamente en el extremo de la alta temperatura de la curva TTT, en la zona de la perlita gruesa.

En general, el recocido puede dividirse en tres etapas:

1) Recuperación.- En esta primera etapa el material recupera sus propiedades físicas, como son: conductividad térmica, conductividad eléctrica, resistividad, etc. Las propiedades mecánicas no cambian.

2) Recristalización.- En esta segunda etapa, los materiales trabajados en frío sufren

¹ Es una estructura acicular, grosera, típica de los aceros en bruto de colada; proporciona fragilidad y, por lo tanto es indeseable. La ferrita aparece rodeando los granos y a partir de ella se desarrollan las agujas o ramificaciones características de dicha estructura. Se originan por altas temperaturas de coladas, en el aporte y zonas afectadas por el calor en soldaduras, o durante transformaciones en estado sólido, cuando la velocidad de enfriamiento es demasiado alta para permitir la formación de ferrita intergranular.

una recristalización, en la que aparece un nuevo juego de granos libres de deformación. Desaparece la dureza y la resistencia adquirida por el trabajo en frío y se recupera la ductilidad.

3) Crecimiento de grano.- En esta tercera etapa los granos grandes crecen a expensas de los granos pequeños, teniendo como objetivo lograr un tamaño de grano homogéneo y no que en realidad se desee que crezca el grano.

Durante el calentamiento por encima del A_{c3} se forma austenita en la interfase ferrita-cementita. Por eso, durante el calentamiento hasta $30^\circ - 50^\circ$ por encima de A_{c3} el número de centros de nucleación es suficientemente grande y los granos de austenita son finos. Un aumento excesivo de la temperatura de calentamiento por encima de A_{c3} provoca el crecimiento del grano de austenita, lo que empeora las propiedades del acero.

En fábricas metalúrgicas la velocidad de calentamiento generalmente se toma igual a 100° por hora, la duración del calentamiento a esta temperatura puede variar en amplios límites: de 0.5 a 1 hora por 1 tonelada de metal a calentar. 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.

Los fines de este tratamiento son: ablandar el acero, regenerar su estructura o en el caso de los aceros al carbono de bajo o mediano contenido de carbono, mejorar la maquinabilidad.

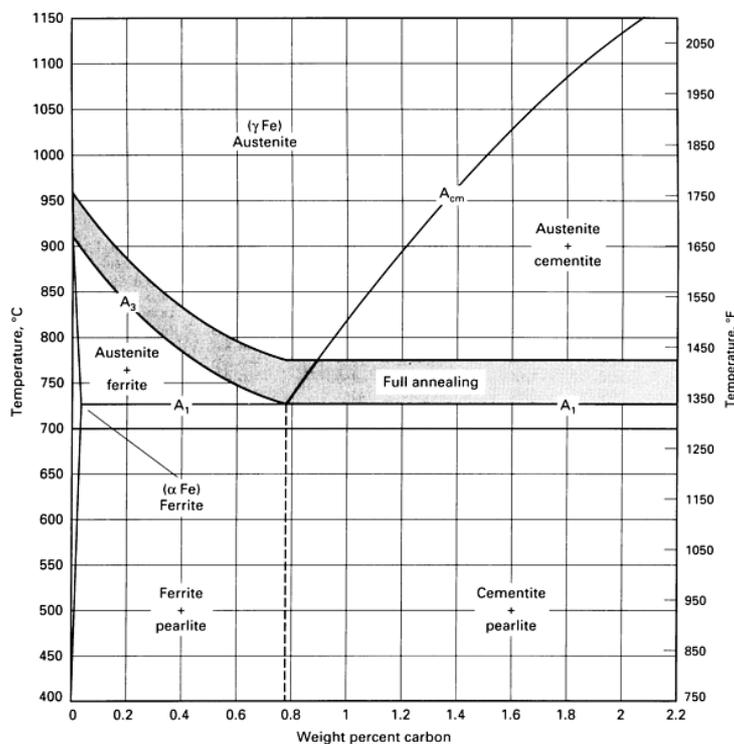


Figura3. Rango típico de un recocido.

Al recocer aceros hipereutectoides, la austenización debe realizarse sólo ligeramente por encima de la temperatura eutectoide, de otro modo, durante el enfriamiento se formaría una red de cementita frágil en los límites de grano de la austenita y el material sería frágil. Es mucho más frecuente el uso del recocido de globulización en este tipo de aceros.

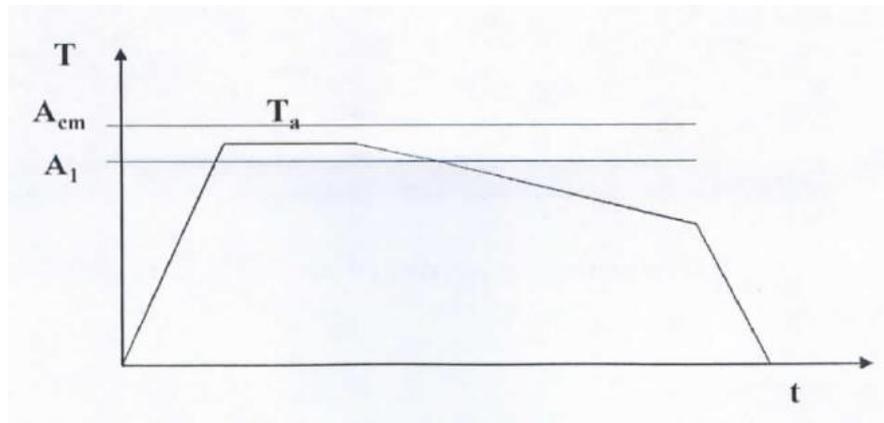


Figura 4. Recocido de aceros hipereutectoides.

Los aceros hipoeutectoides recocidos están constituidos por ferrita proeutectoide de tamaño de grano relativamente grueso en una proporción cercana a la que indica el equilibrio, y perlita gruesa. Todo esto conduce a una dureza baja, uno de los objetivos de este tratamiento.

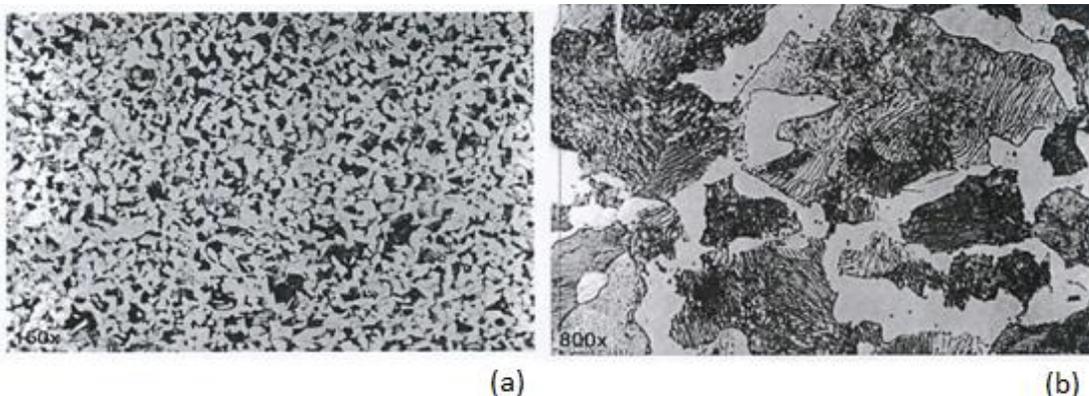


Figura 5. a) Estructura de un acero 0.3%C recocido y b) Estructura de un acero 0.5%C recocido.

Como el enfriamiento de la masa total del horno se realiza simultáneamente con el material, el recocido supone un enfriamiento muy lento y por lo tanto es el que más se asemeja en su desarrollo a las condiciones requeridas en el diagrama hierro-carbono.

La diferencia de este tratamiento con el normalizado, en los aceros hipoeutectoides, radica esencialmente en que durante el normalizado el enfriamiento se realiza al aire y por lo tanto a mayor velocidad y en forma menos controlada.

En los recocidos hipercríticos se suele usar una velocidad de enfriamiento de 15 a 30°C/hora con lo cual se obtiene una microestructura de carburos laminares que facilita el mecanizado en los aceros hipoeutectoides de mediano carbono y en aceros de baja aleación.

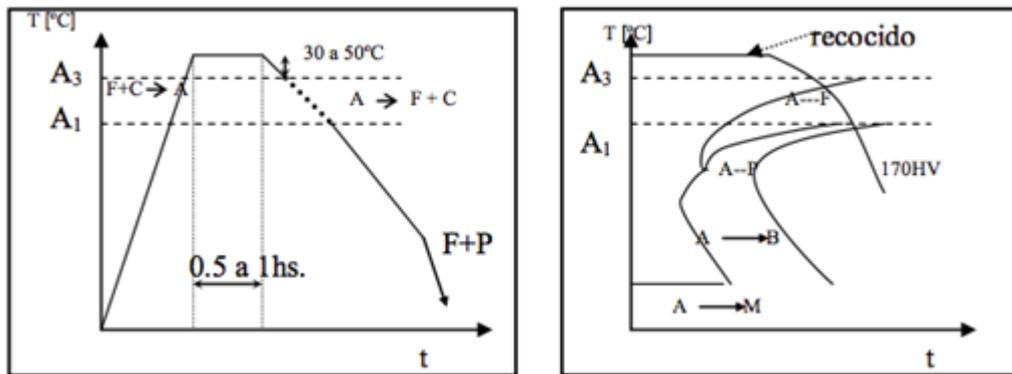


Figura 6. Recocido total.

El enfriamiento lento, sobre todo de los aceros aleados, que tienen tendencia a la fragilidad de revenido, es necesario realizarlo hasta los 500°- 600°C. Después de la descomposición de la austenita en la zona perlítica, el enfriamiento posterior puede ser acelerado e incluso realizado al aire libre. Esto reduce la duración del tratamiento y la posibilidad del desarrollo de la fragilidad del revenido.

Fragilidad de revenido: separación de carburos de la martensita por los bordes de grano, o por la separación de carburos, nitruros, fosfuros, etc. por los límites de grano.

Al recocido completo generalmente se someten los productos laminados, forjados, fundiciones perfiladas como también los lingotes de aceros aleados (para disminuir la dureza y facilitar su desbaste antes del laminado).

Recocido isotérmico: El acero aleado es calentado de la misma manera que para el recocido normal logrando la austenización completa o parcial según se quiera una microestructura con carburos de forma laminar o globular respectivamente.

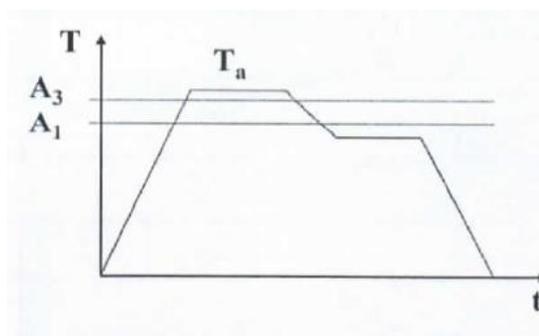


Figura 7. Ciclo térmico del recocido isotérmico para aceros hipoeutectoides.

Luego su enfriamiento es relativamente rápido (en otro horno) hasta una temperatura por debajo de A_{c1} , generalmente hasta 50°-100° bajo dicho punto. A esta temperatura se realiza la exposición isotérmica, necesaria para la descomposición total de la austenita, después de lo cual se efectúa su enfriamiento relativamente rápido al aire libre.

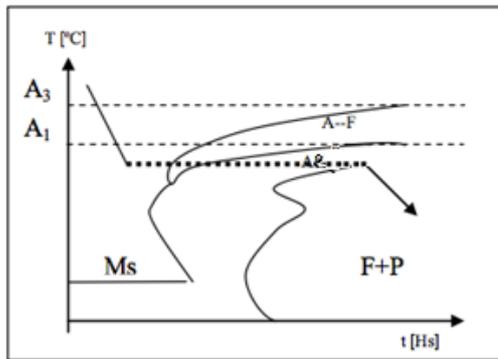


Figura 8. Recocido isotérmico sobre Curva TTT de aceros hipoeutectoides.

Con ese tratamiento se disminuye la duración del proceso, sobre todo para los aceros aleados, que son enfriados lentamente para conseguir la disminución requerida de la dureza. Para el máximo aceleramiento del recocido, la temperatura de exposición isotérmica es conveniente elegirla próxima a la temperatura de estabilidad mínima de la austenita sobreenfriada en la zona perlitica. Otra ventaja del recocido isotérmico es que se obtiene una estructura más homogénea, ya que durante la exposición isotérmica la

temperatura en toda la sección se equilibra y la transformación en todo el volumen del acero transcurre con igual grado de subenfriamiento. Este tratamiento es sobre todo útil para los productos laminados, forjados y otras piezas brutas de pequeñas dimensiones. Además, facilita el mecanizado de aceros aleados y al carbono, de mediano y alto Carbono.

Comparación del ciclo de enfriamiento de un recocido total común y de uno isotérmico

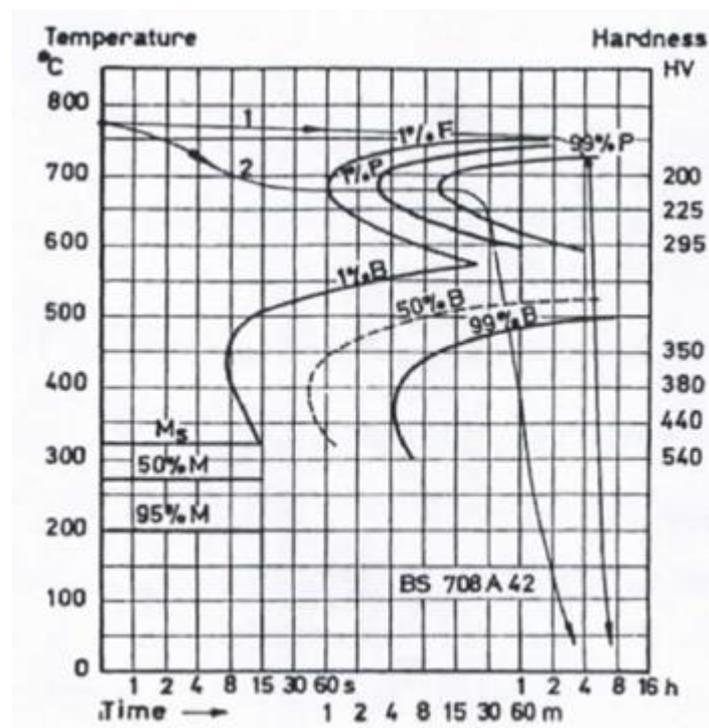


Figura9. Diagrama TTT para acero B S 708A42 (Bofors R O 952). Las curvas de enfriamiento representan un recocido completo (1) y un recocido isotérmico (2).

Patentado: es un tratamiento isotérmico que se emplea para la producción de alambres de alta resistencia en aceros al carbono (0.5 a 1.1%C), denominados cuerda de piano.

Después de la austenización a la temperatura $A_{c3} + (30-50^{\circ}\text{C})$ el enfriamiento se efectúa en plomo fundido o en sales derretidas hasta la temperatura $450-600^{\circ}\text{C}$ (en dependencia de la composición del acero). Luego, a esa temperatura se da mantenimiento isotérmico para la descomposición total de la austenita sobre enfriada, formando una delgada mezcla ferrito-carbúrica: sorbita, que posee una alta plasticidad. Por eso después del patentado se realiza el estirado en frío del alambre (trefilado). El patentado junto con el ulterior endurecimiento (por deformación en frío haciéndolo pasar por las hileras) permite obtener un alambre de alta resistencia: $300-450 \text{ kgf/mm}^2$ para el acero con $0,6-0,8\%$ de C. Tan alta resistencia se explica por la presencia de una mezcla dispersa ferrito-carbúrica y por una alta densidad de las dislocaciones como resultado de la deformación plástica (endurecimiento por deformación en frío).

Recocido incompleto - Recocido de esferoidización o de globulización:

El recocido incompleto o de globulización se diferencia del recocido total en que el acero es calentado hasta una temperatura cercana a A_{c1} (mayor o menor) que se mantiene un tiempo adecuado o bien se la hace oscilar por encima y por debajo de A_{c1} , y finalmente se enfría muy lentamente.

El máximo ablandamiento se obtiene con una microestructura en la que se busca globulizar los carburos laminares de la perlita, la cual es muy adecuada para mejorar la plasticidad de modo que aumente la maquinabilidad y la capacidad de deformación en frío mediante estampado, laminado o procesos similares, aunque puede presentar problemas en operaciones de mecanizado por arranque de viruta debido a que el material se comporta como pastoso. La dureza que se obtiene es aún menor que la del recocido de regeneración.

Como se trata de disminuir el tiempo de permanencia a temperatura, por razones económicas se debe imponer un ciclo térmico adecuado. En la figura se muestran esquemáticamente los siguientes ciclos térmicos usados en recocidos de esferoidización:

Clasificación:

- Subcrítico: $T = A_1 - 50^{\circ}\text{C}$.
- Intercrítico-hipercrítico de austenización parcial: $T = A_1 + 50^{\circ}\text{C}$.
- Oscilante: la temperatura oscila varias veces entre $A_1 - 50^{\circ}\text{C}$ y $A_1 + 50^{\circ}\text{C}$.

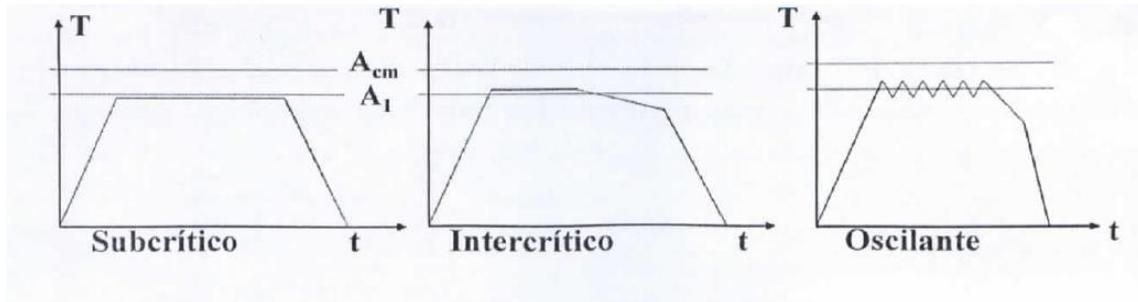


Figura 10. Distintos tipos de recocido incompleto.

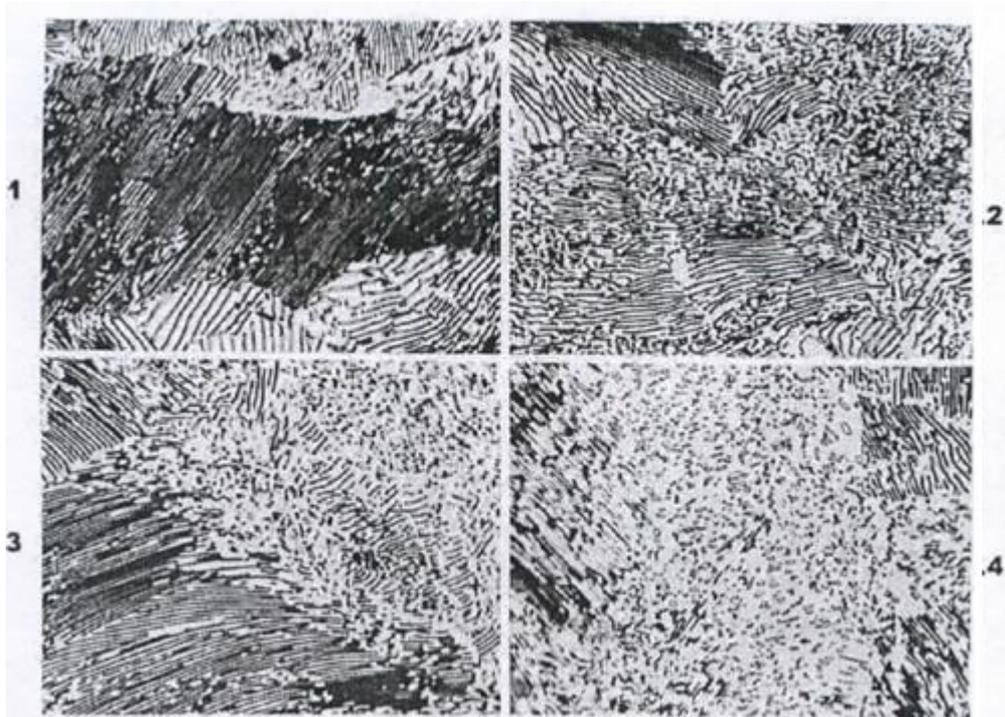


Figura 11. Esferoidización de un acero de 0,8%C a 650°C: (1) 0h, (2) 4h, (3) 16h, (4) 64h.

- La **deformación plástica** previa de la perlita acelera fuertemente el proceso, aunque es evidente que no siempre se puede aplicar. Además de acelerar la difusión, la deformación plástica previa crea quiebres y escalones en las láminas de cementita de la perlita. La esferoidización comienza preferencialmente en esas zonas.

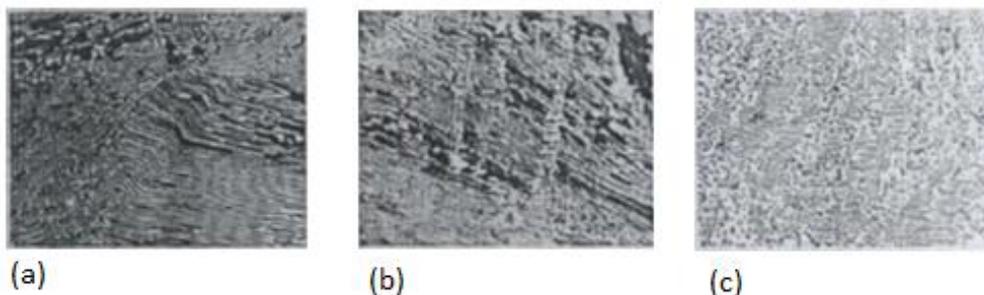


Figura 12. Influencia de la deformación en la esferoidización de un acero de 0,8%C. a) Perlita deformada al 20%, atacada con picral, X1000, b) Perlita deformada al 20%, mantenida a 650°C durante 15h., atacada con picral, X1000 y c) Perlita deformada al 40%, mantenida a 700°C durante 4h., atacada con picral, X1000

Cuando se hace el recocido de un acero con microestructura formada por ferrita y perlita, luego de algún tiempo a temperatura la mayoría de las láminas de cementita se van engrosando en ambos extremos y si el recocido continúa se puede llegar a producir la separación de los extremos dando lugar a la formación de esferoides. Este proceso es controlado por la difusión del carbono y la fuerza impulsora de la reacción deriva de la energía de superficie carburo-ferrita. Esta descripción es válida pero no es general, porque también se pueden producir carburos de morfología esferoide partiendo de una microestructura austenítica que contiene los centros de nucleación necesarios para que se pueda iniciar el crecimiento de los carburos.

Si la temperatura de recocido es menor a A_1 , recocido subcrítico, no tiene importancia la velocidad de enfriamiento luego de terminado el recocido, ya que no produce ningún cambio de fase que afecte las propiedades mecánicas.

Si la temperatura de recocido es unos pocos grados superiores a A_1 (hasta 50°C) el recocido se denomina intercrítico o hipercrítico de austenización parcial y en este caso si se efectúa un enfriamiento lento, la microestructura resultante es también principalmente de tipo esferoide, particularmente si la temperatura de recocido supera sólo en unos pocos grados a la temperatura de A_1 .

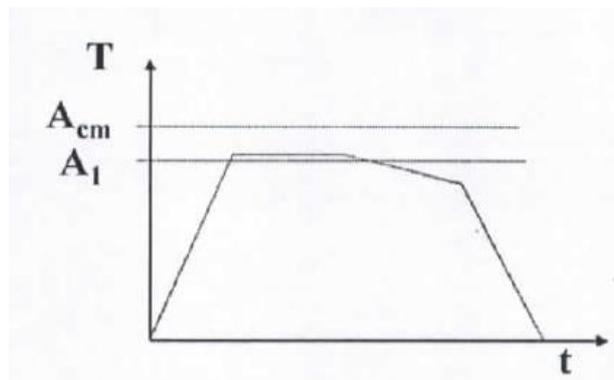


Figura 13. Recocido hipercrítico de austenización parcial.

La perlita se esferoidiza rápidamente a esa temperatura debido a:

- La mayor solubilidad del C en la austenita.
- El mayor coeficiente de difusión del C en la austenita a temperaturas por encima de la A_1 que en la ferrita pero a una temperatura por debajo de A_1 .
- La mayor energía de interfase $\gamma/\text{Fe}_3\text{C}$ respecto de la $\alpha/\text{Fe}_3\text{C}$.

En el recocido de globulización intercrítico, si bien el tratamiento es más rápido que el subcrítico, por las razones expuestas requiere de un muy buen control del horno utilizado y además de una puesta a punto del ciclo térmico que puede diferir para distintos aceros.

Velocidad de enfriamiento: en general no se superan los $10^\circ\text{C}/\text{h}$. En el caso del

tratamiento intercrítico no debe ser mayor a 6 °C/h.

Aplicaciones: se usa sólo en aceros de más de 0,4 %C. La aplicación principal se da en aceros de medio y alto C que deban ser sometidos a operaciones de conformado muy severas como recalado, extrusión en frío, laminado de roscas, o bien a operaciones de mecanizado intensivo.

Si la temperatura de austenización es muy superior a A_1 la cantidad de carbono en solución también será mayor y es probable que durante el enfriamiento los carburos precipiten en forma laminar.

Cuando estamos a una temperatura menor a A_1 , a la que se produce la precipitación y/o cambio de morfología de los carburos, determina en parte el tipo de microestructura a obtenerse y cuanto más cerca se esté de la temperatura A_1 , más gruesos serán los carburos obteniendo una estructura de mínima dureza.

A medida que la temperatura de transformación desciende por debajo de A_1 , la microestructura tendrá más carburos en forma laminar y resultará relativamente de mayor dureza (por falta de difusión).

Una regla práctica muy importante a tener en cuenta cuando se realiza un recocido de esferoidización es: austenizar a temperaturas no superiores en 50°C a A_1 y transformar a temperaturas no menores en 50°C a A_1 .

La esferoidización de los aceros al carbono y de baja aleación con contenido de carbono en el rango de 0.5 a 0.8% (hipoeutectoides), puede facilitarse haciendo el recocido en dos etapas. La primera calentando a una temperatura inferior a A_1 , en aproximadamente 25°C, y la segunda a temperatura superior a A_1 para luego enfriar en forma controlada. En la primera etapa se forman carburos esferoides que no llegan a disolverse en la segunda etapa y durante el enfriamiento controlado promueven la formación de más carburos esferoides en lugar de laminares.

En los aceros hipereutectoides el recocido incompleto se emplea en lugar del recocido total. Dichos aceros deben ser recocidos a una temperatura superior a A_1 con el objeto de esferoidizar la cementita localizada en los bordes de grano, en un tiempo razonable. Así mismo es difícil obtener un resultado aceptable cuando se parte de una microestructura con mucho carburo intergranular. En esos casos se puede facilitar la esferoidización (recocido de esferoidización) efectuando un tratamiento previo de normalizado que permite obtener una dispersión más fina de carburos.

La velocidad de enfriamiento desde la temperatura de recocido a través de la zona de transformación puede ser de 5 a 6°C por hora, con lo cual se logra una óptima maquinabilidad y capacidad de deformación en frío.

El recocido subcrítico de ablandamiento o de alivio de tensiones está destinado a eliminar o aliviar las tensiones internas que aparecen en el material que ha sido fuertemente mecanizado o sometido a cualquier otro proceso de deformación en frío,

por ejemplo, en las fundiciones de forma compleja. El proceso consiste en calentar el acero a una temperatura inferior a Ac1 pero lo más cerca posible a ésta y enfriar lentamente. Se destacan los siguientes objetivos de dicho tratamiento:

-Disminuir las tensiones residuales generadas por procesos previos: conformado, soldadura, tratamiento térmico, etc. Esta disminución es muy importante para:

1. Disminuir las tensiones totales actuantes sobre una pieza.
2. Evitar fenómenos de rotura diferida causados por el H o bien algún tipo de corrosión bajo tensión.
3. Aumentar la estabilidad dimensional en servicio.
4. Optimizar algunas propiedades físicas.

-Sus aplicaciones son muchas y diversas. Una muy utilizada es en el caso de cordones de soldadura. Como este proceso en general deja al material con altos niveles de tensiones residuales y con cambios microestructurales importantes en la zona afectada por el calor (ZAC) de la soldadura, muchas veces es necesario el relevamiento de tensiones.

Recocido contra acritud: es similar al anterior y se aplica en las industrias que trabajan en chapa y alambre. Tiene por objeto aumentar la ductilidad de los aceros de poco contenido de carbono (menos de 0.40% de carbono) estirados en frío. Con el calentamiento se destruye la cristalización alargada de la ferrita, apareciendo nuevos cristales poliédricos más dúctiles que los primitivos que permiten estirar o laminar nuevamente el material sin dificultad. El enfriamiento comúnmente se hace al aire.

Recocido de homogeneización: cuando los granos del policristal tienen un gradiente de composiciones (el componente de mayor punto de solidificación se encuentra en su mayoría en el centro de cada granito y el otro en la periferia). Para conseguir una estructura homogénea, se necesita efectuar un tratamiento de calentamiento y mantenimiento a temperaturas cercanas a la línea del solvus o de solubilidad parcial, seguido de un enfriamiento lento. A este tratamiento se lo denomina recocido de homogeneización.

NORMALIZADO DEL ACERO

Se obtiene perlita más fina y abundante que en el recocido. Se usa principalmente para refinar el tamaño de grano en piezas que han sido deformadas en caliente o en frío, y de esta forma se reduce la posibilidad de formación de grietas y distorsiones en el tratamiento de temple. También permite obtener una microestructura de grano más fino y carburos laminares que facilitan las operaciones de mecanizado por arranque de viruta. En la figura 14 se observa el ciclo térmico seguido durante el normalizado.

La refinación del tamaño de grano se produce principalmente por las dos causas siguientes:

a) recristalización debido a la deformación en frío previa

b) transformaciones de fase que se producen durante el calentamiento al atravesar los puntos críticos A_{c1} y A_{c3} , y durante el enfriamiento al atravesar los puntos críticos A_{r3} y A_{r1} respectivamente.

Estas dos causas pueden actuar conjuntamente y el resultado final dependerá principalmente del grado de deformación y de la composición química del acero. El normalizado también permite reducir la estructura en bandas debido a la heterogeneidad química (microsegregación) heredada de la solidificación. La reducción o eliminación de las bandas facilita el mecanizado y permite obtener mejores resultados en los tratamientos térmicos posteriores.

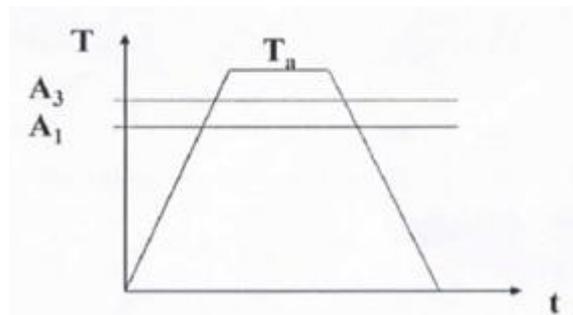


Figura 214. Ciclo térmico del normalizado.

En las piezas obtenidas por fundición, el normalizado permite modificar y refinar la estructura dendrítica dando como resultado mejores propiedades mecánicas.

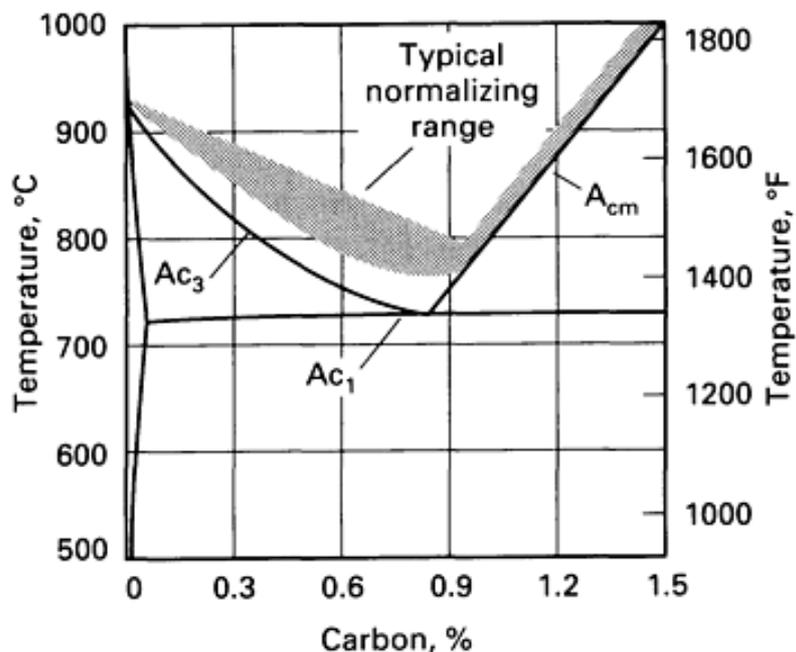


Figura 315. Rango típico de un normalizado.

El normalizado se aplica principalmente a los aceros al carbono y de baja aleación y el rango de temperaturas depende del contenido de carbono. Para los aceros hipoeutectoides la temperatura debe pasar el punto crítico A3, de 50° a 80°C. Para los aceros hipereutectoides, el rango de temperatura es más extenso y varía entre 50°C por encima de A1 y algunos grados por encima de Ac_m. En todos los casos el enfriamiento se realiza en aire en calma. Durante el calentamiento y posterior normalizado a temperatura superior a Ac₃ se produce la disolución más o menos total de los carburos y la redistribución del carbono en la austenita. Luego durante el enfriamiento, la austenita se transforma en ferrita y carburos generando una microestructura de grano más fino.

Un acelerado enfriamiento al aire libre conduce a la descomposición de la austenita a temperaturas más bajas, lo que aumenta la dispersión de la mezcla ferrito-cementítica (para ciertos aceros de alta aleación el enfriamiento al aire libre en esencia es un temple, para disminuir la dureza en este caso, después de la normalización se realiza el revenido a 600-650°C). Además, se elimina en parte la separación de ferrita en los aceros hipoeutectoides y de cementita excesiva en los aceros hipereutectoides, lo que aumenta la resistencia y dureza del acero normalizado en comparación con el acero recocido.

Para los aceros pobres en carbono la normalización, como operación más sencilla, se emplea en lugar del recocido. Aumentando un poco la dureza, la normalización garantiza la obtención de una superficie más limpia durante el corte.

Para los aceros con 0.3% aproximadamente de carbono la normalización se emplea en lugar del temple y del revenido a alta temperatura. Las propiedades mecánicas serán más bajas, pero la operación de normalizado es más sencilla y produce menor deformación de la pieza en comparación con la obtenida durante el temple.

Para los aceros altos en carbono (hipereutectoides) el normalizado se emplea para eliminar la red cementítica que puede surgir durante un enfriamiento lento desde la temperatura superior a Ac_m.

En la figura 16 se observa el efecto del normalizado sobre la estructura.

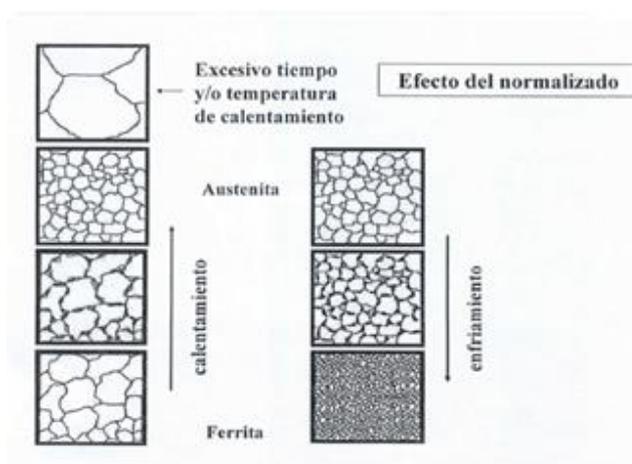


Figura 46. Efecto del normalizado sobre la estructura.

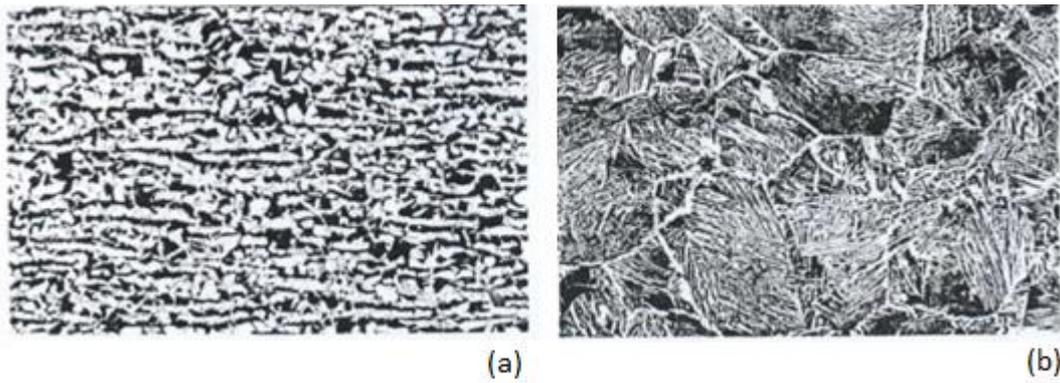


Figura 517. Influencia de la temperatura en el normalizado. Estructura resultante del normalizado (a) a una temperatura correcta (900 °C) y (b) a una temperatura muy alta (1150 °C). Se nota la diferencia de morfología de la ferrita, además de una estructura mucho más gruesa en el caso de la temperatura alta.

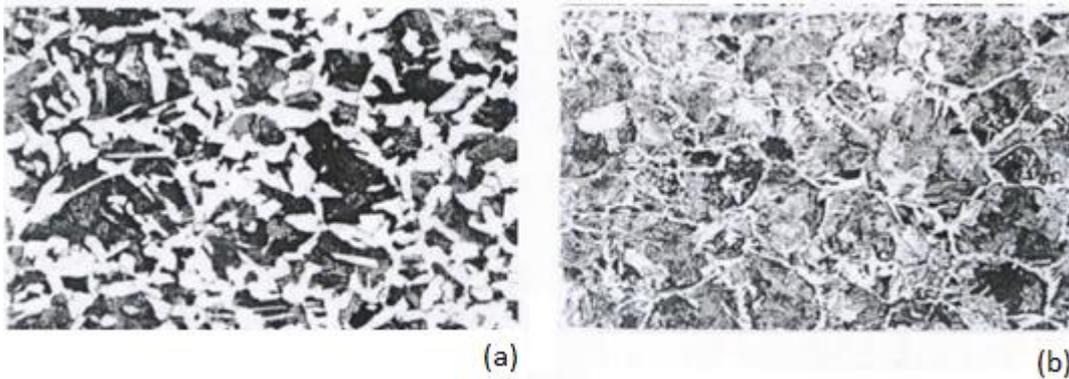


Figura 18. Estructura de recocido (a) y de normalizado (b) para un acero de 0,4%. En el recocido se nota una mayor fracción de ferrita y además una morfología más gruesa de en la misma.

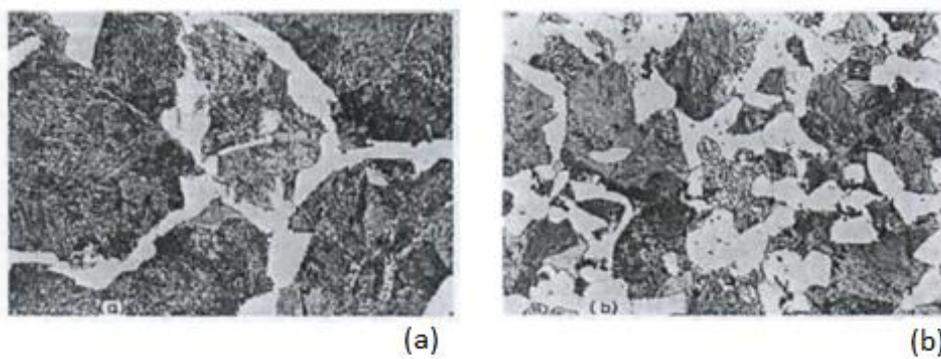


Figura 19. Efecto refinador del normalizado. Estructura de (a) forjado a alta temperatura (tamaño de grano G=3) y (b) normalizado (tamaño de grano G=6). Acero de 0,5%C.

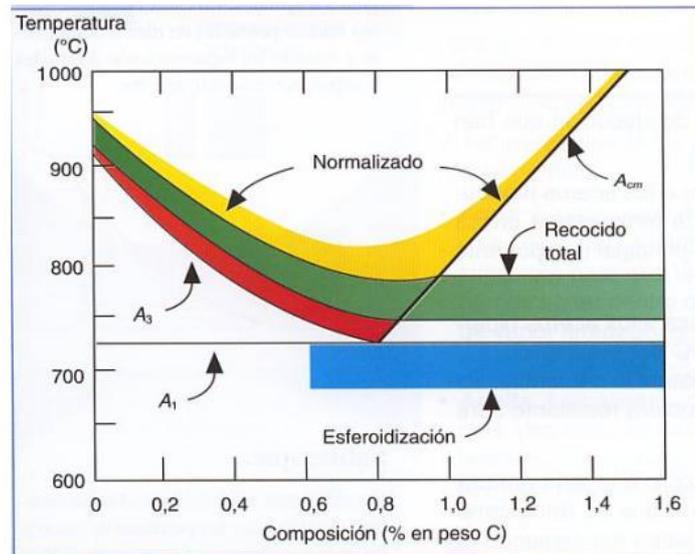


Figura 60. Rangos de temperatura de los tratamientos térmicos de aceros.

TEMPLE DIRECTO

Consiste en enfriar rápidamente desde el estado austenítico, de modo de suprimir en lo posible las transformaciones de fase por procesos térmicamente activados y lograr microestructuras de tipo acicular, tales como martensita o bainita inferior.

Una propiedad muy importante en este punto es la templabilidad del material. En la figura 21 se observa el ciclo térmico del temple.

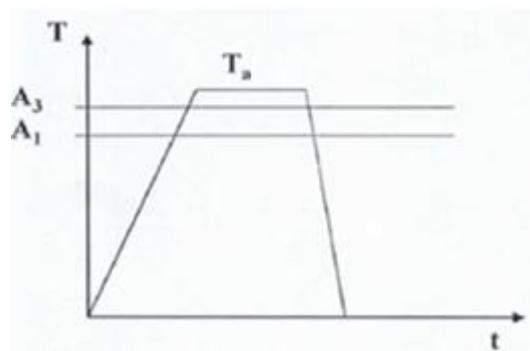


Figura 721. Ciclo térmico del temple.

La **velocidad crítica de temple**: mínima velocidad de enfriamiento en un punto que asegura la obtención del 100% de martensita. Es una propiedad característica del acero que depende fuertemente de la composición química y del tamaño del grano austenítico ya que está relacionada con la posición de la nariz de la curva CCT del acero.

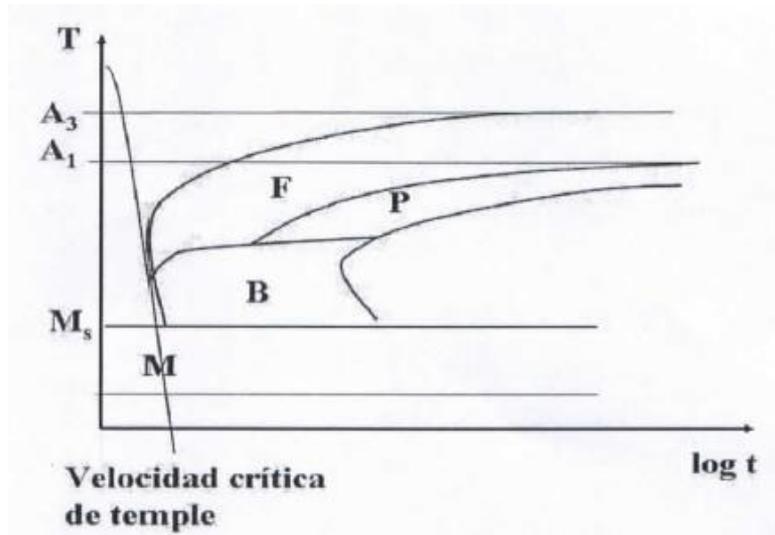


Figura 22. Velocidad crítica de temple.

Templabilidad es la capacidad de una aleación para transformarse en martensita durante un determinado temple. Depende de la composición química del acero. Todos los aceros aleados tienen una relación específica entre las propiedades mecánicas y la velocidad de enfriamiento. Templabilidad no es dureza, que significa resistencia a la penetración, aunque se utilizan medidas de dureza para determinar la extensión de la transformación martensítica en el interior de una probeta.

Los medios de enfriamiento pueden ser variados: agua, aceite, sales fundidas, etc. A su vez estos están determinados principalmente por el tipo de acero, forma del componente y proceso de calentamiento.

El **temple directo** es aparentemente simple, pero en la práctica pueden aparecer problemas difíciles de resolver tales como distorsiones, cambios dimensionales y fisuras. Esto se debe a la superposición simultánea de tensiones originadas en la contracción térmica y a las originadas en la expansión causada por la transformación martensítica.

Tensiones térmicas durante el temple y sus consecuencias:

-En el comienzo del enfriamiento desde la temperatura de austenización la periferia de la pieza se enfría a mayor velocidad que su núcleo. Esto provoca una contracción.

-Cuando la periferia llega a la M_s comienza la transformación a martensita con la expansión correspondiente. La periferia trata de expandirse pero el núcleo restringe dicha expansión y se genera una tensión de compresión en la periferia y de tracción en el núcleo.

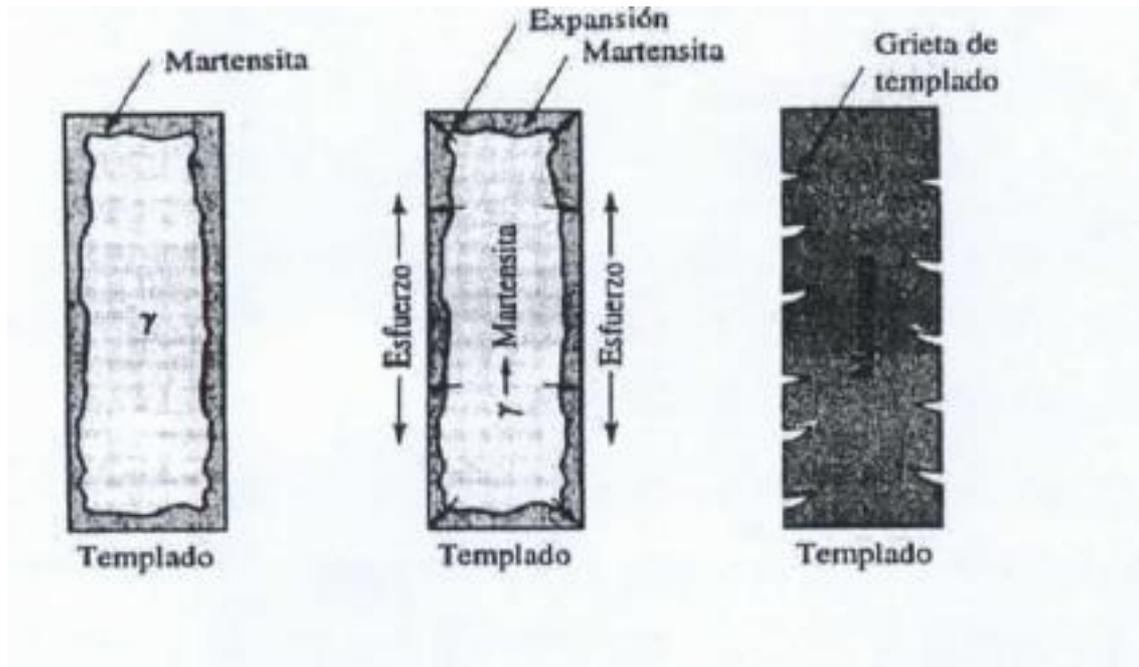


Figura 23. Esquema de la fisuración por temple a causa de la expansión del núcleo cuando se transforma a martensita.

Para reducir los efectos desfavorables del temple directo se han diseñado otros procesos que se describen a continuación.

MARTEMPERING (o temple escalonado):

El tratamiento térmico denominado martempering es utilizado para reducir distorsiones, grietas y otros defectos que se producen durante el temple, debido principalmente a las tensiones mecánicas introducidas por la transformación austenita-martensita.

Durante el enfriamiento se generan tensiones causadas por la contracción que depende directamente del cambio de temperatura, dichas tensiones son de tracción en la superficie de la pieza y de compresión en el núcleo. Simultáneamente al alcanzarse la temperatura M_s aparecen tensiones de compresión causadas por la expansión que tiene lugar durante la transformación austenita-martensita.

El tratamiento consiste básicamente en lo siguiente:

- 1) Se hace el recocido de austenización en forma usual.
- 2) La pieza se temple en un baño en sales fundidas, a una temperatura un poco mayor a M_s .
- 3) Se mantiene la pieza dentro del baño el tiempo necesario para conseguir que toda la masa, incluso el núcleo de la pieza, alcance la temperatura del baño (no prolongar el tiempo demasiado para evitar que se inicie la transformación bainítica).

Luego que la pieza ha alcanzado temperatura uniforme o que se homogeneice su temperatura, se procede a enfriar a velocidad moderada (usualmente al aire),

para evitar crear una gran diferencia de temperatura entre la superficie y el núcleo de la pieza, pasando por el rango entre Ms y Mf.

- 4) Después de realizado el martempering las piezas deben ser revenidas en la forma convencional.

En la Figura 24 se muestra esquemáticamente el diagrama TTT con las curvas de enfriamiento durante el martempering.

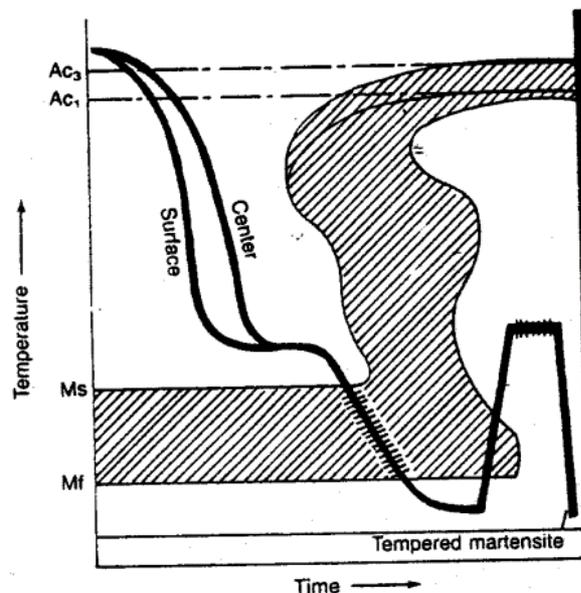


Figura 24. Diagrama TTT del Martempering.

La transformación martensítica se produce durante el relativamente lento enfriamiento al aire, y como el gradiente de temperatura característico del temple clásico no existe, la superficie y el núcleo terminan de enfriarse a las mismas velocidades, formándose martensita casi simultáneamente en toda la sección, tanto en las secciones grandes como en las pequeñas y las tensiones producidas por la transformación son muchísimo menores; por lo tanto las deformaciones y grietas de temple son mínimas. Si conviene disminuir la dureza o modificar otras propiedades mecánicas, se puede realizar un revenido posterior que producirá los mismos efectos que el revenido clásico.

Un aspecto importante del martempering es que no debe formarse otro producto de transformación que no sea martensita. Por lo tanto, los aceros adecuados para el martempering deben ser suficientemente templables no sólo con respecto a la transformación de productos de alta temperatura tales como ferrita y perlita, sino también, con respecto a la bainita que podría formarse justo por encima de la temperatura M_s . Otra consideración en este aspecto es que las sales calientes tengan una severidad de temple ligeramente más baja que el aceite de temple. Un acero para martempering, por lo tanto, debe ser lo suficientemente templable para compensar la reducida velocidad de enfriamiento. El enfriamiento al aire a través del rango de transformación martensítica es también muy importante. El temple en agua, aún cuando la temperatura fuera uniforme en la sección de la pieza justo por encima de la temperatura M_s , conducirá casi invariablemente a la fisuración.

Entre sus aplicaciones se encuentran:

- Gran variedad de piezas con geometría relativamente compleja y de espesores no muy grandes hechas con aceros de baja aleación. Ej: engranajes, ejes y árboles, eslabones de cadenas, etc.
- Aceros de alto C muy susceptibles a la fisuración por temple, particularmente en el caso de aceros de alta aleación donde es posible martemperar grandes secciones de piezas complejas (matrices de aceros para herramientas, piezas de aceros inoxidables martensíticos).
- Piezas carburadas.

AUSTEMPERING (o temple bainítico):

Tratamiento isotérmico en el rango de la transformación bainítica. El acero es enfriado desde la T de austenización en forma suficientemente rápida como para evitar las transformaciones de alta T llegando hasta una $T > M_s$ y manteniendo allí hasta que se complete la transformación bainítica.

El objetivo principal es aumentar la resistencia al impacto y la ductilidad del acero reduciendo las distorsiones y la posibilidad de formación de grietas o fisuras. Se obtienen **estructuras bainíticas** que tienen una tenacidad mucho mayor que la correspondiente a estructuras martensíticas de temple y revenido, y para la misma dureza. Se calienta el acero hasta la temperatura de austenización y se enfría luego muy rápidamente hasta una temperatura ligeramente superior a M_s , se mantiene en un baño de sales a esa temperatura (250 - 400°C) el tiempo suficiente para que se produzca isotérmicamente la transformación total de la austenita en bainita inferior, enfriando después al aire. Cualquier otro enfriamiento no provoca más transformaciones.

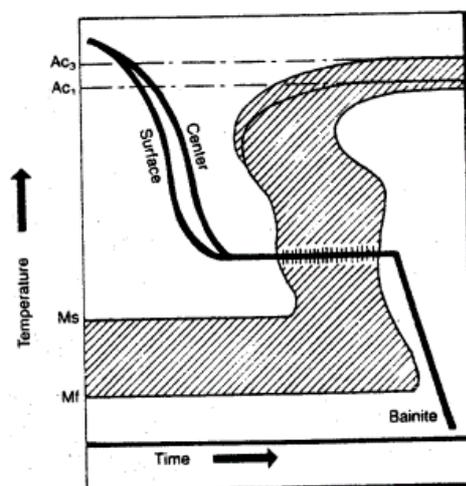


Figura 25. Diagrama TTT del Austempering.

Las ventajas del austempering respecto a los tratamientos clásicos de temple y revenido, como la transformación bainítica tiene lugar en forma isotérmica a una temperatura relativamente alta, es que las tensiones internas propias de la transformación son muy pequeñas, resultado de una deformación mínima y al no existir la etapa martensítica, aparece prácticamente libre de las microscópicas grietas de temple. Mejoran algunas propiedades mecánicas tales como: la estriación es muy elevada para el grado de dureza del acero, la resiliencia aumenta también, tiene bastante tenacidad y en el ensayo de plegado se obtienen mejores resultados. La limitación de este tratamiento es que es difícil conseguir en la práctica la velocidad de enfriamiento necesaria para evitar la transformación en la nariz de la curva de la S y se formarían entonces conjuntamente: perlitas blandas y bainita que reducen los valores de tenacidad.

Entre sus aplicaciones se encuentran:

- Piezas de sección pequeña y geometría complicada o muy esbelta, que deben sufrir el mínimo de distorsión y alcanzar durezas altas (barras estabilizadoras, arandelas, piezas fabricadas a partir de flejes o chapas finas).
- Piezas de sección pequeña que deben poseer una tenacidad muy alta para durezas de alrededor de HRC 50.

TEMPLE SUPERFICIAL

OCURRE CUANDO LO QUE QUEREMOS OBTENER ES DUREZA EN LA PERIFERIA.

Se trata entonces de calentar la superficie y luego enfriarla rápidamente, de esa manera se obtiene una importante dureza superficial, conservando un núcleo tenaz.

Temple a la llama: se trata de calentar una pieza mediante uno o varios sopletes, hasta que se alcance la temperatura prevista, luego se enfría en agua o cualquier otro medio adecuado.

Se utiliza para aceros con C = 0,30 % a 0,60 %

TEMPLE A LA LLAMA

La pieza permanece quieta y gira la llama.

La llama permanece quieta y gira la pieza.

Dispositivos en los que la llama y el enfriamiento se mueven hacia un lado y la pieza hacia el otro.

Dispositivo semiautomático: calienta la pieza, se desplaza y el enfriador enfría la pieza, luego la sumerge.

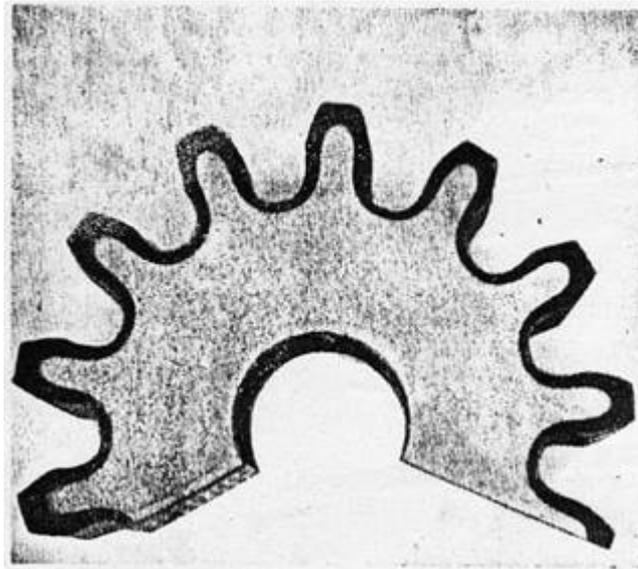


Figura 86. Sección transversal de un engranaje templado con llama oxiacetilénica.

TEMPLE POR INDUCCION

Se hace pasar una corriente eléctrica de alta frecuencia que calienta las piezas a elevadas temperatura. Luego se enfrían rápidamente con una ducha de agua fría.

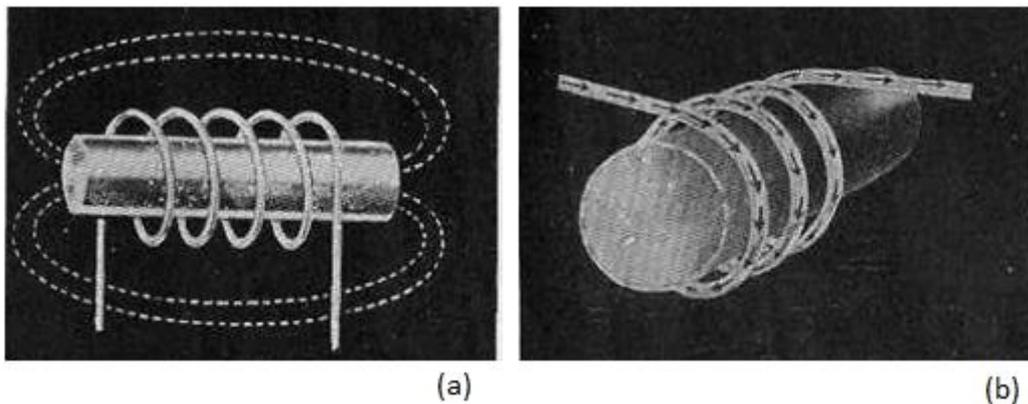


Figura 97. a) Al pasar la corriente eléctrica por las espiras, se crea un campo magnético que atraviesa el acero. b) La capa periférica de la pieza de acero se calienta rápidamente al ser atravesada por corrientes eléctricas inducidas de alta temperatura. (Corrientes de Foucault).

TRATAMIENTO TÉRMICO CON LÁSER

El uso del rayo láser permite realizar tratamientos térmicos de superficie, compitiendo con procesos convencionales tales como calentamiento por inducción.

El láser es una fuente de potencia localizada de alta densidad y por lo tanto su aplicación sólo se realiza en procesos de superficie donde ofrece ventajas tales como ciclos de producción más cortos y reducción al mínimo de las distorsiones. Además se puede considerar el tratamiento térmico como etapa final de fabricación, sin necesidad de operaciones tales como rectificado, enderezado, etc.

La fuente de potencia láser es un instrumento capaz de producir en forma controlable un delgado haz de radiación, que al incidir sobre la superficie genera calor. La energía emitida por la fuente en forma de un haz monocromático de radiación electromagnética tiene una longitud de onda que puede variar entre el ultravioleta y el infrarrojo.

El láser de tipo industrial emite en el infrarrojo (no visible), y en particular los utilizados en tratamientos térmicos emiten en una longitud de onda de $10.6\mu\text{m}$. Se focaliza el haz sobre una zona cuyo diámetro es del orden de la longitud de onda y, por lo tanto, se pueden obtener altas densidades de potencia. Los parámetros que definen la aplicación son la densidad de potencia aplicada y la duración de la aplicación (tiempo de incidencia sobre la superficie).

Además del endurecimiento de la superficie, por transformación es posible aplicar el láser para la realización de los siguientes procesos:

Endurecimiento por “choque”: se usan densidades de potencia del orden de $(10^8 - 10^9)$ wats/cm² y tiempos de aplicación de $(10^{-8}$ a 10^{-6}) seg. La incidencia del haz genera ondas de choque por vaporización superficial de una delgada capa de material; las ondas de choque causan el endurecimiento superficial.

Microfusión de la superficie (glazing): se usan densidades de potencia y tiempos de aplicación tales que la zona afectada se funde y solidifica obteniendo una estructura de tamaño de grano extremadamente fino con gran resistencia al desgaste y a la corrosión. Este procedimiento se usa para homogeneizar la superficie o para mejorar la integridad de, por ejemplo, depósitos efectuados por vía electroquímica.

Recubrimiento de superficies (cladding): permite fundir un material previamente colocado sobre la superficie de modo que pase a formar una capa protectora o resistente al desgaste.

Formación de aleaciones sobre la superficie: se funde una delgada capa sobre la superficie de la pieza al mismo tiempo que se agregan los elementos de aleación necesarios para obtener las propiedades deseadas luego de la solidificación.

La causa de la diferencia entre resultados obtenidos con métodos convencionales y los obtenidos con láser radica fundamentalmente en las altas velocidades de calentamiento

y enfriamiento que permite el láser. Como ejemplo en un acero con 0.4% C y a 0.5 mm de profundidad en una probeta de ese material, el acero llega a alcanzar estado austenítico.

Con láser se pueden lograr profundidades mayores, pero es necesario reducir la densidad de potencia y la velocidad de aplicación, obteniendo resultados similares a los procesos convencionales. La dureza de la superficie tratada depende principalmente de la composición química, de la microestructura y del espesor de la sección para una condición determinada del haz incidente.

En general, el láser es aplicable a todos los materiales que pueden ser tratados con los procesos convencionales (calentamiento por inducción, por llama, etc.). Aunque el láser presenta ventajas notables para el tratamiento de aceros de baja templabilidad como son los aceros al carbono aún con contenidos de carbono de 0.2%C, mientras que para aplicar procesos convencionales el contenido de carbono debe ser de por lo menos 0.3 a 0.5%C.

Los aceros y fundiciones que se pueden austenizar fácilmente, manteniendo el C en solución, facilitan el tratamiento con láser mientras que las aleaciones esencialmente ferríticas o con carburos esferoidizados no responden adecuadamente.

La zona superficial de una probeta de acero AISI 1045 templado y revenido después del endurecimiento de superficie, es totalmente martensítica y a medida que aumenta la profundidad hacia la interfase que separa la capa del núcleo, la austenización no es completa y la estructura resultante es una mezcla de martensita y la microestructura original.

REVENIDO

El revenido es un tratamiento subcrítico que se aplica luego del temple con el objeto de:

- Aumentar la ductilidad y tenacidad de la martensita.
- Lograr las propiedades finales del acero eligiendo adecuadamente la temperatura y tiempo del tratamiento.
- Disminuir las tensiones residuales ocasionadas por el temple.

Se calienta el acero a una temperatura inferior a A1, se mantiene y luego se enfría a temperatura ambiente, para disminuir dureza y aumentar la tenacidad.

Después del revenido se obtiene martensita revenida en donde se ha dado energía para la difusión para poder obtener una microestructura menos frágil y más estable (influencia del tiempo y temperatura).

En aceros aleados el revenido a temperaturas entre 538 y 676°C seguido de un enfriamiento lento da una fragilidad de revenido (disminución de resiliencia) debido a la precipitación de alguna fase en los contornos de grano durante el enfriamiento. El Mn, P y Cr favorecen la fragilidad y el Mo la retarda.

Propiedades de un acero revenido:

- menor dureza
- menor resistencia a la rotura
- mayor alargamiento y mayor resiliencia y tenacidad.

Cuando hay elementos de aleación como el V que pueden formar carburos, la cementita es reemplazada por ellos y hay un aumento de dureza.

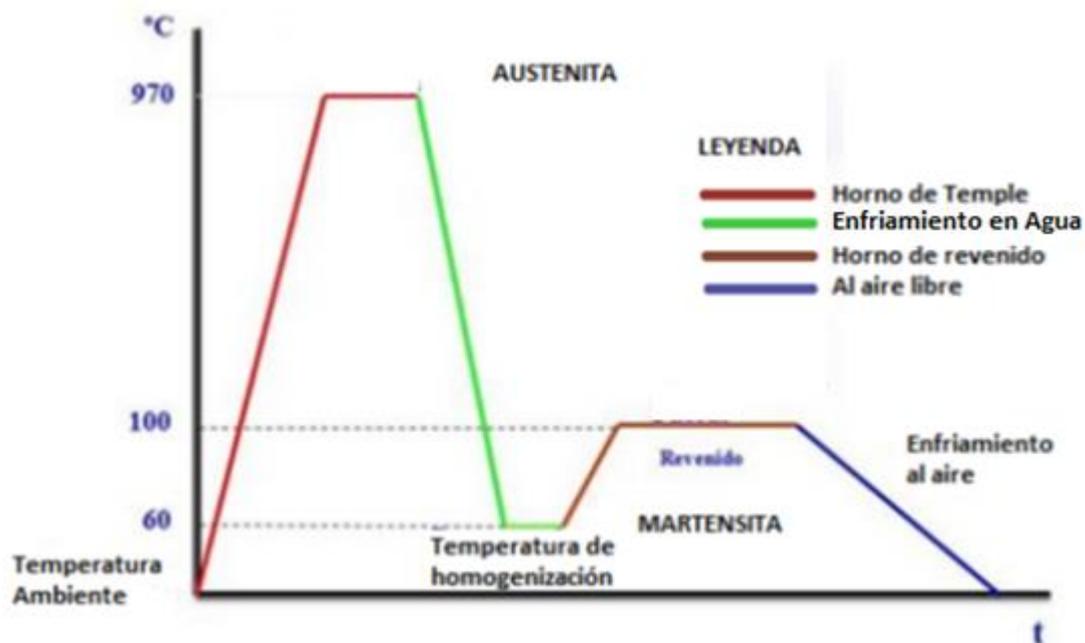


Figura 108. Ciclo térmico donde se representa el Revenido.

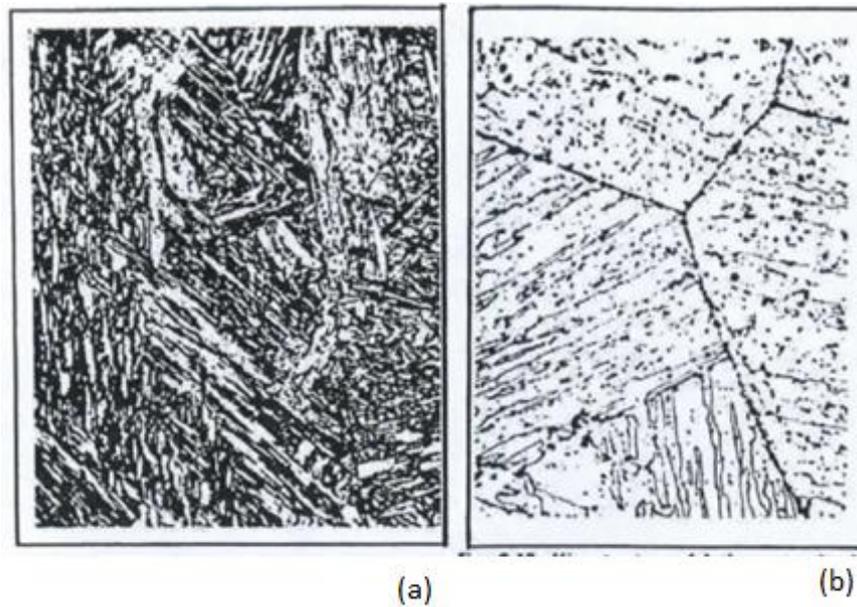


Figura 29. Aspecto en el microscopio óptico de la martensita revenida en un acero de 0,2%C:
a) Revenido 15 minutos a 400 °C y b) Revenido 2 horas a 700 °C.

RECRISTALIZACIÓN CON DEFORMACIÓN PLÁSTICA PREVIA

Una estructura defectuosa que no posee transformación en estado sólido, no puede modificarse por simple calentamiento y enfriamiento.

Se le debe introducir energía con deformación plástica en frío (laminación, estampado, etc.) luego se calienta el material y hay eliminación de tensiones residuales elásticas, que no modifica la estructura original y se llama a esta etapa, recuperación.

Luego con dicho calentamiento se nuclea en borde de grano alrededor de las impurezas, los nuevos cristalitos y se llama recristalización. Estos cristalitos comienzan a crecer hasta recristalizar toda la estructura: recristalización y luego dichos granos comienzan a crecer aumentando la plasticidad y disminuyendo la resistencia del material.

ENDURECIMIENTO POR PRECIPITACIÓN

Se aplica a los materiales que en su diagrama de equilibrio tienen solución sólida con disminución de la solubilidad parcial en estado sólido.

Primero se calienta a T_2 la aleación que contiene en borde de grano una segunda fase, así se solubiliza esta y luego se enfría bruscamente para retener la fase α blanda, dúctil y maquinable. Se fabrica la pieza en este estado y luego se la somete a un ligero calentamiento para que se formen gérmenes que no llegan a ser núcleos ni van al borde de grano, pero distorsionan el retículo cristalográfico aumentando la dureza, resistencia y el límite elástico del material sin producir interfase alguna.

No se debe calentar excesivamente, ya que sino se nuclea la segunda fase y habrán interfaces y el material se vuelve a ablandar. Este tratamiento también se llama de envejecimiento.

Los tratamientos térmicos de recristalización alotrópica pueden aplicarse al material o piezas terminadas.

Los de recristalización con deformación plástica previa al material semielaborado.

Los tratamientos de endurecimiento por precipitación forman parte de los procesos de fabricación.

DEFORMACION EN CALIENTE: Se calienta por encima de la recristalización del material (la deformación y la recristalización están juntas). Ejemplo: proceso de forja.