

TRATAMIENTOS TÉRMICOS



Ciencia de los Materiales
Facultad de Ingeniería - UNCuyo

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.

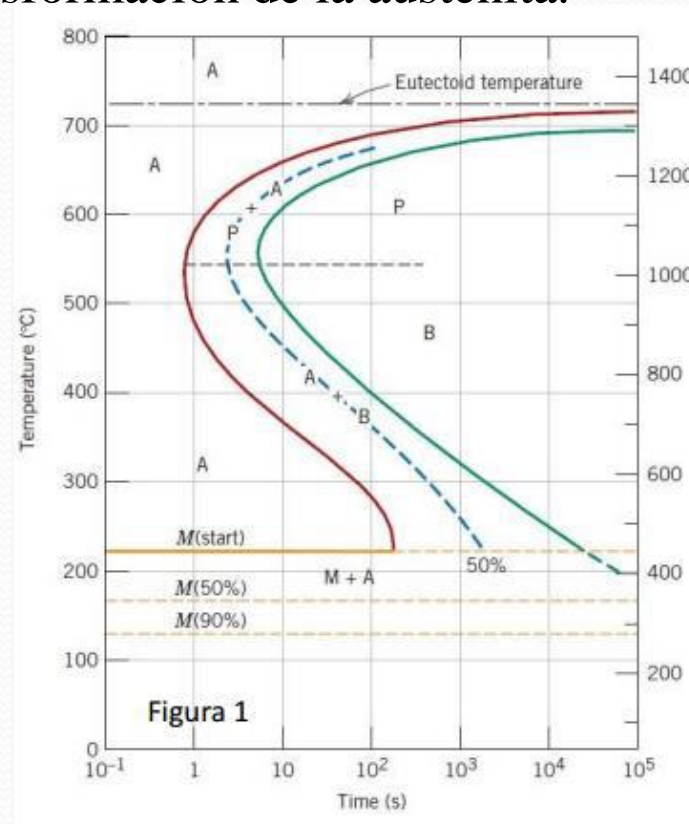
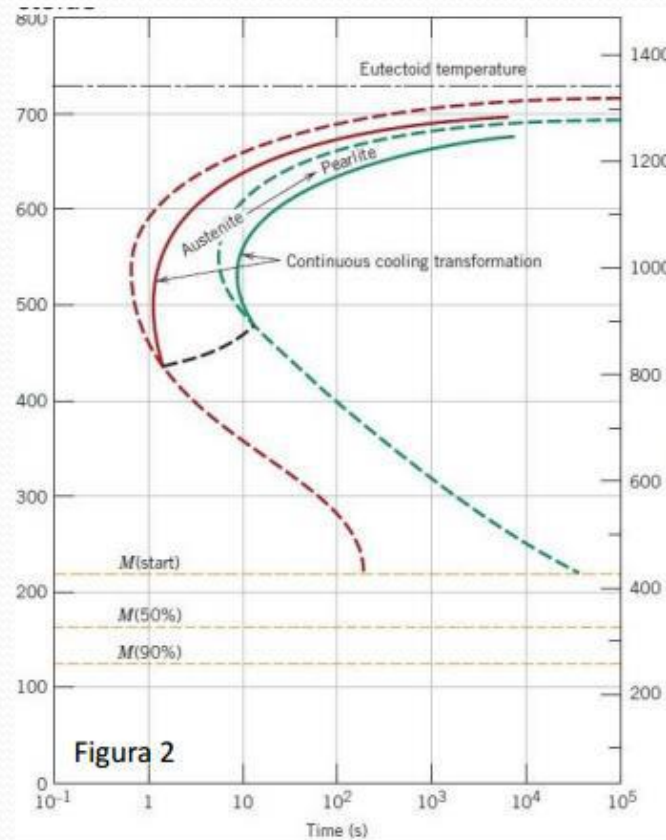


DIAGRAMA CON ENFRIAMIENTO CONTINUO

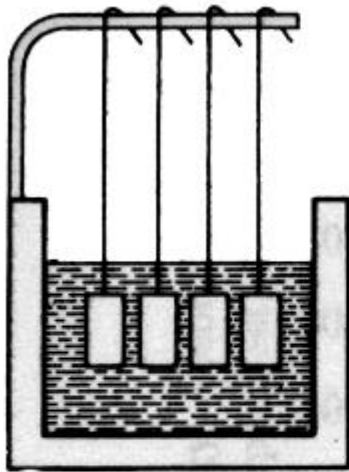
El diagrama de enfriamiento continuo es muy semejante al de transformación isotérmica y con respecto a este está desplazado hacia menores temperaturas y hacia tiempos mayores. Se comparan ambos diagramas.



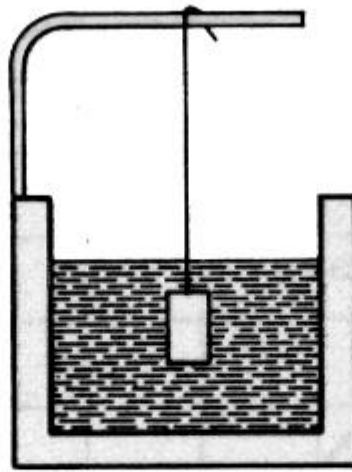
DIAGRAMAS TTT

- Grafican las condiciones (temperatura-tiempo) en que ocurre la transformación de la austenita **para cada tipo de acero.**

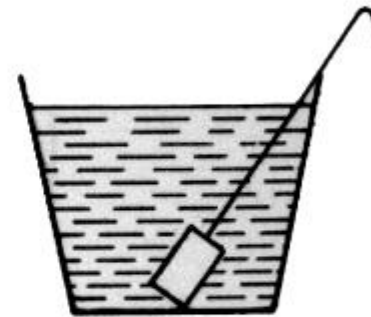
MÉTODO EXPERIMENTAL



Baño de sales
fundidas a 770°C
Austenización



Baño de sales
fundidas a 700°C
Trat. isotérmico



Agua fría
Temple

MÉTODO EXPERIMENTAL

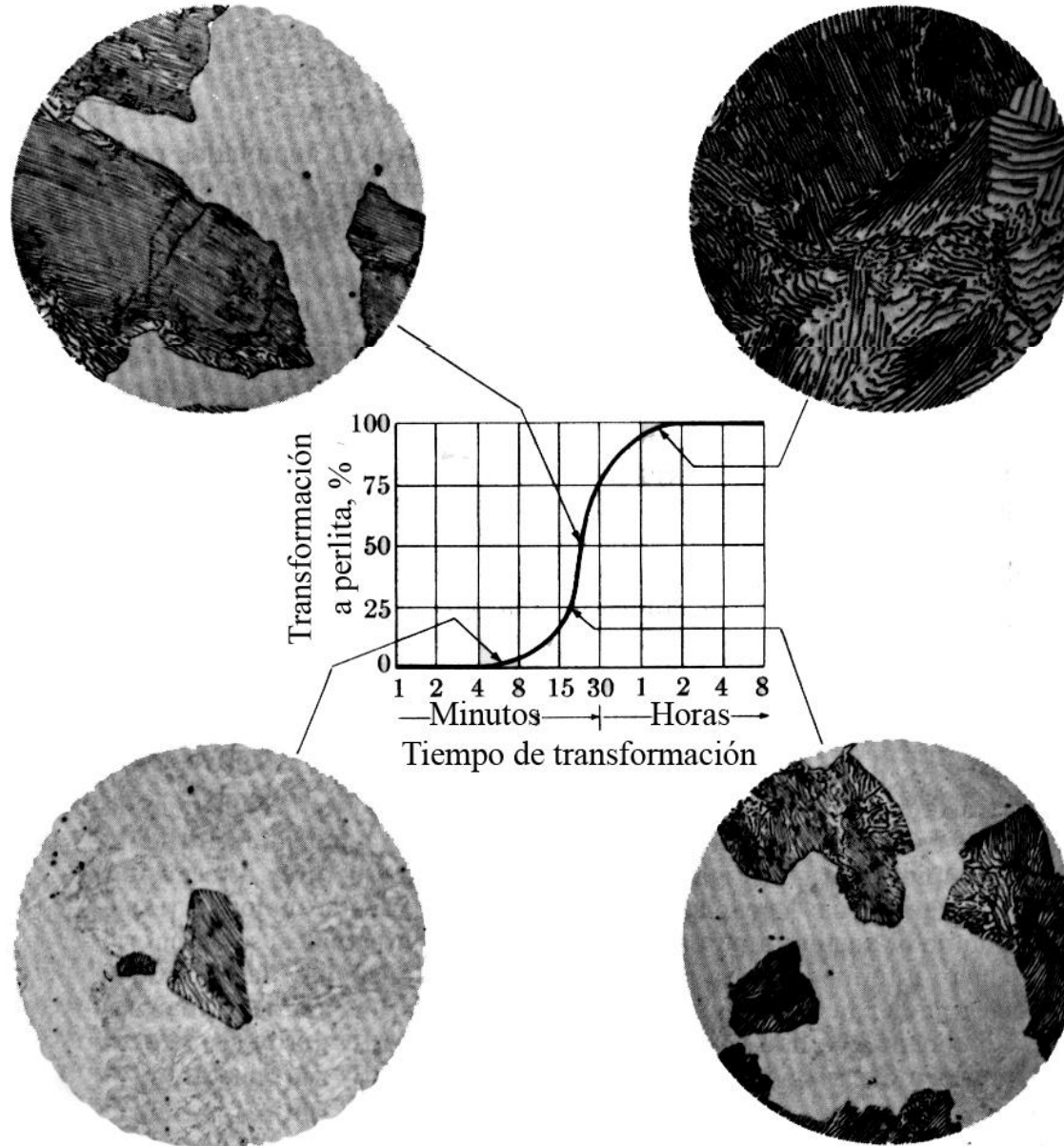


DIAGRAMA ACERO HIPOEUTECTOIDE

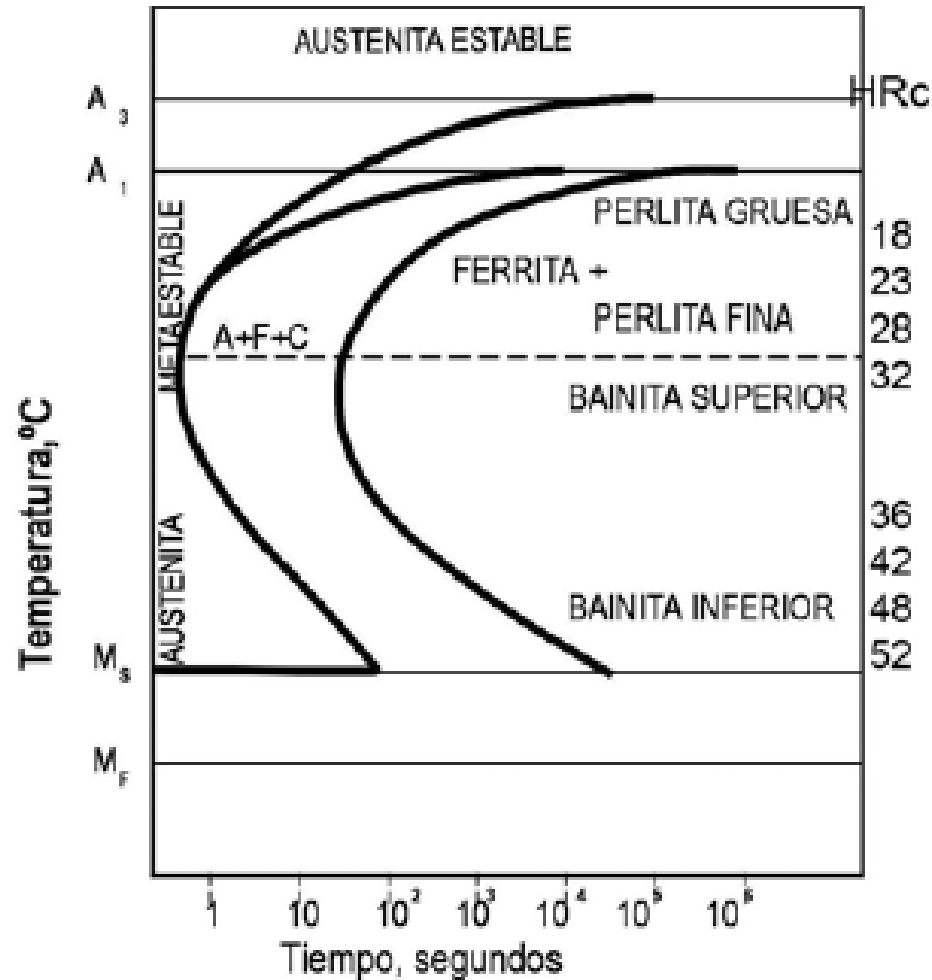
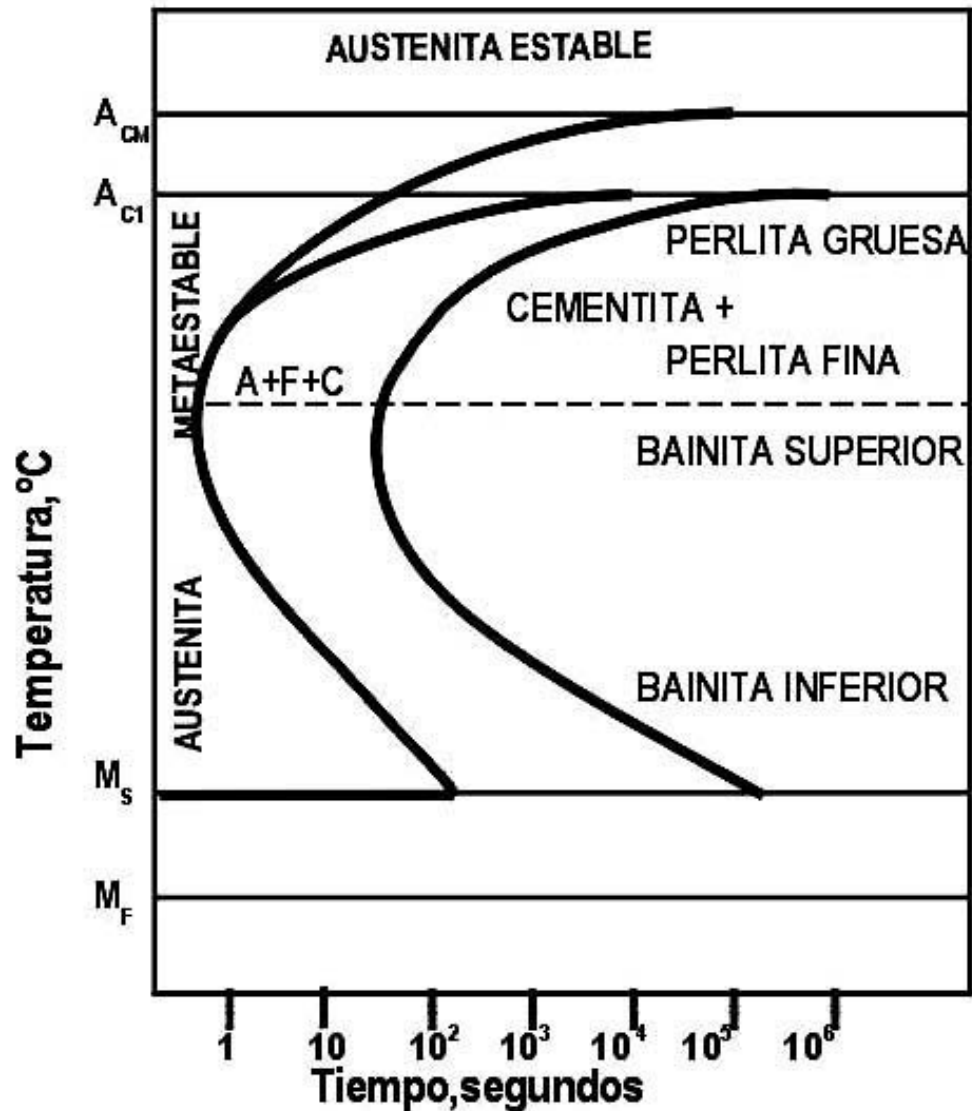


Figura 3: DIAGRAMA TTT DEL SAE 1045

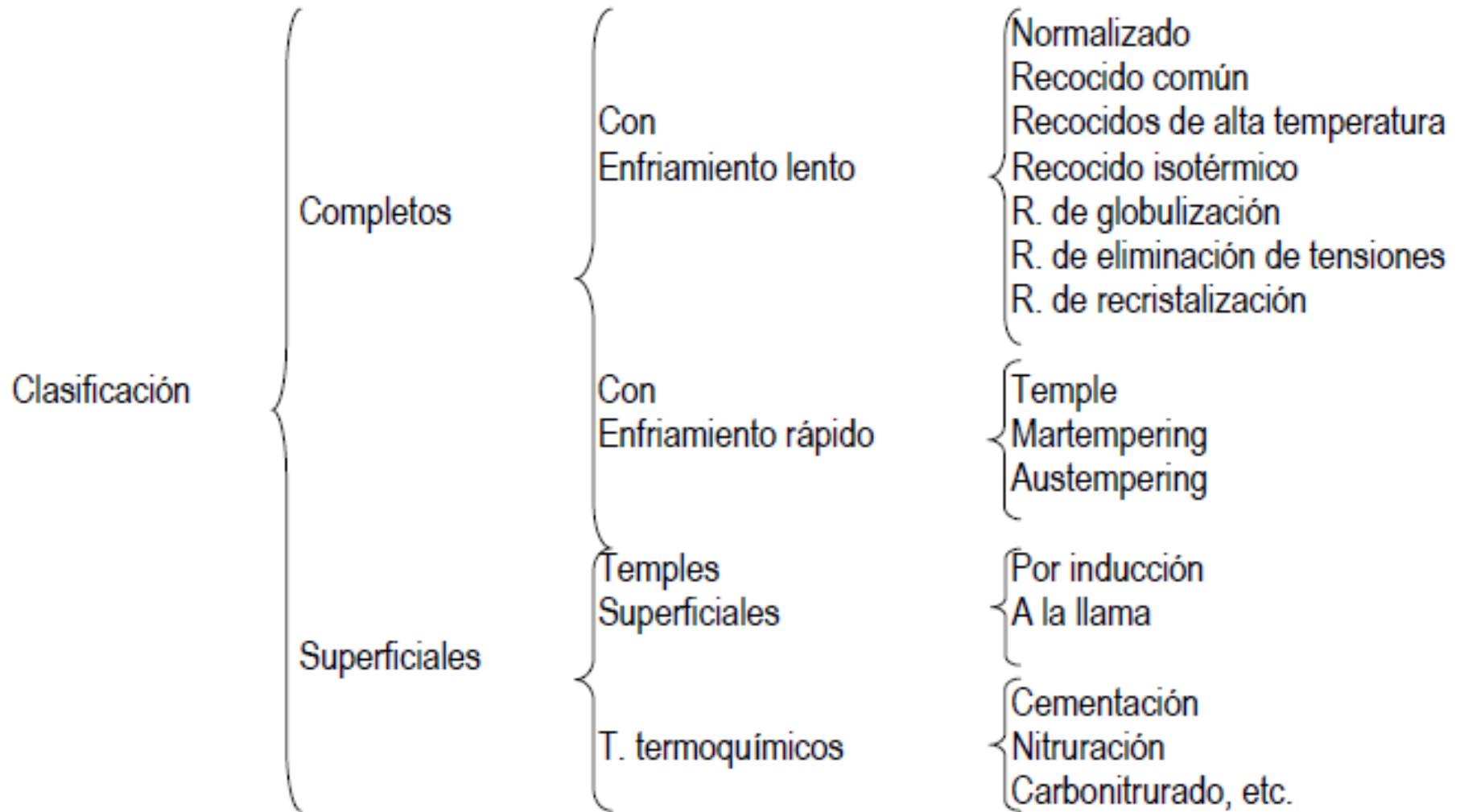
DIAGRAMA ACERO HIPEREUTECTOIDE



EFECTO DE LA COMPOSICIÓN

- La composición química de un acero y en especial el contenido de los elementos aleantes, es el factor que influye más decisivamente en la forma y situación de la curva de la “S”
- Para una composición dada, el tamaño de grano y la homogeneidad de la austenita, ejercen también una gran influencia.
- La mayoría de los elementos aleantes modifican la cinética de transformación, retardan la transformación isotérmica, las curvas TTT son desplazadas a la derecha.
- El carbono es el más potente, pero su contenido en el acero está normalmente determinado.

TRATAMIENTOS TÉRMICOS



TRATAMIENTO TÉRMICO DE LOS ACEROS

- 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 A_{c1} . Para los hipereutectoides comienza en A_{c1} y termina en A_{cm} , aunque 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.

RECOCIDO

Consiste en 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. 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

RECOCIDO

Baja Resistencia y Dureza.

Para ser deformado o mecanizado o deformado nuevamente. Hay recristalización de fase y esta afina el grano y elimina la estructura Widmanstätten del acero.

Al recocido se someten las piezas fundidas, forjadas y laminadas, disminuyendo la dureza y resistencia y mejorando la facilidad de elaboración por corte.

Al afinar el grano elimina las tensiones internas y disminuye la heterogeneidad estructural, contribuye al aumento de la plasticidad. Para piezas fundidas de gran tamaño, es el tratamiento térmico final.

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.

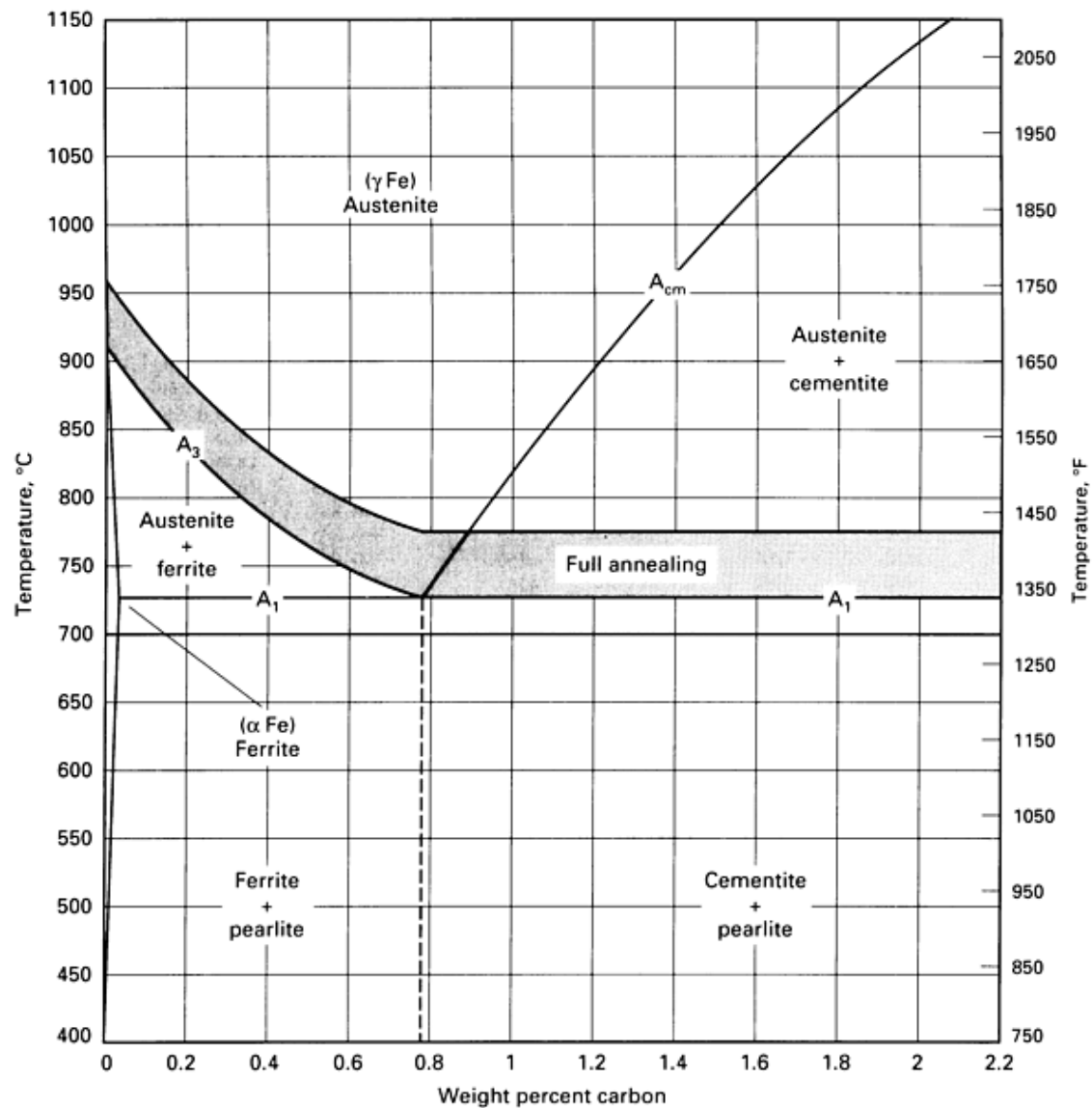
En general, el recocido puede dividirse en tres etapas:

- 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 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.

RECOCIDO TOTAL

Durante el calentamiento por encima del Ac_3 se forma austenita en la interfase ferrita-cementita. Por eso, durante el calentamiento hasta $30^\circ - 50^\circ$ por encima de Ac_3 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 Ac_3 provoca el crecimiento del grano de austenita, lo que empeora las propiedades del acero.

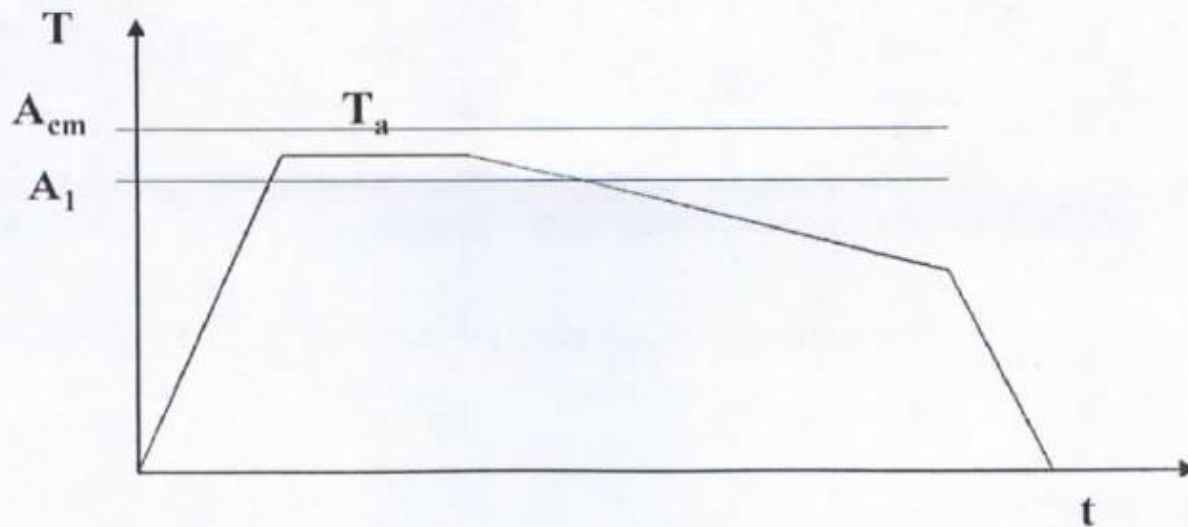
Los fines de este tratamiento son: ablandar el acero, regenerar su estructura o en el caso de los aceros al carbono de bajo o mediano contenido de carbono, mejorar la maquinabilidad.



Rango típico de un recocido.

RECOCIDO TOTAL

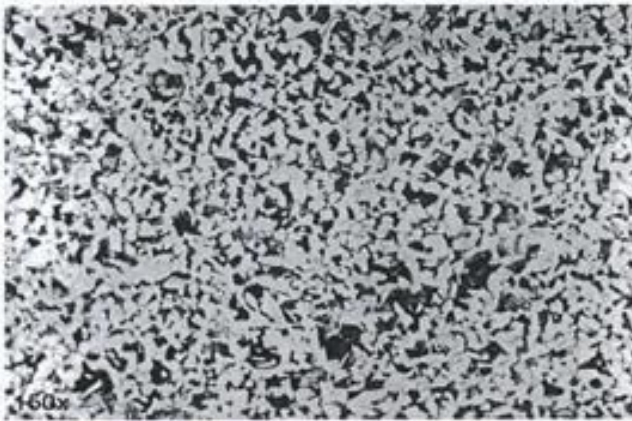
Al recocer aceros hipereutectoides, la austenización debe realizarse sólo ligeramente por encima de la temperatura eutectoide, de otro modo, durante el enfriamiento se formaría una red de cementita frágil en los límites de grano de la austenita y el material sería frágil. Es mucho más frecuente el uso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



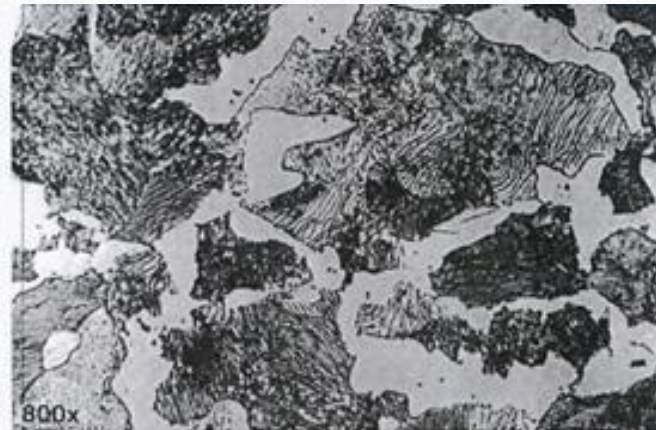
Recocido de aceros hipereutectoides.

RECOCIDO TOTAL

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.



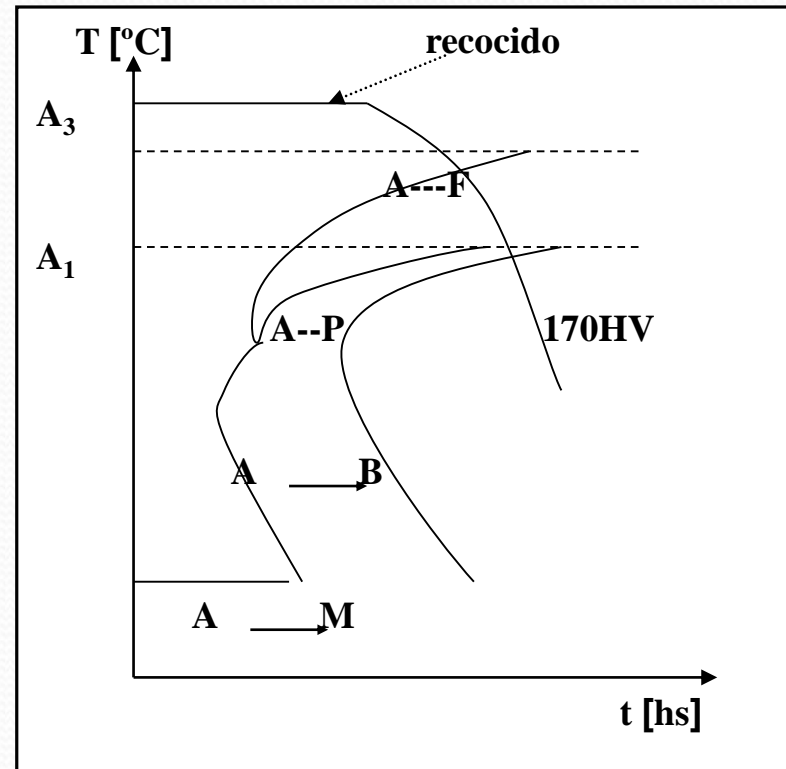
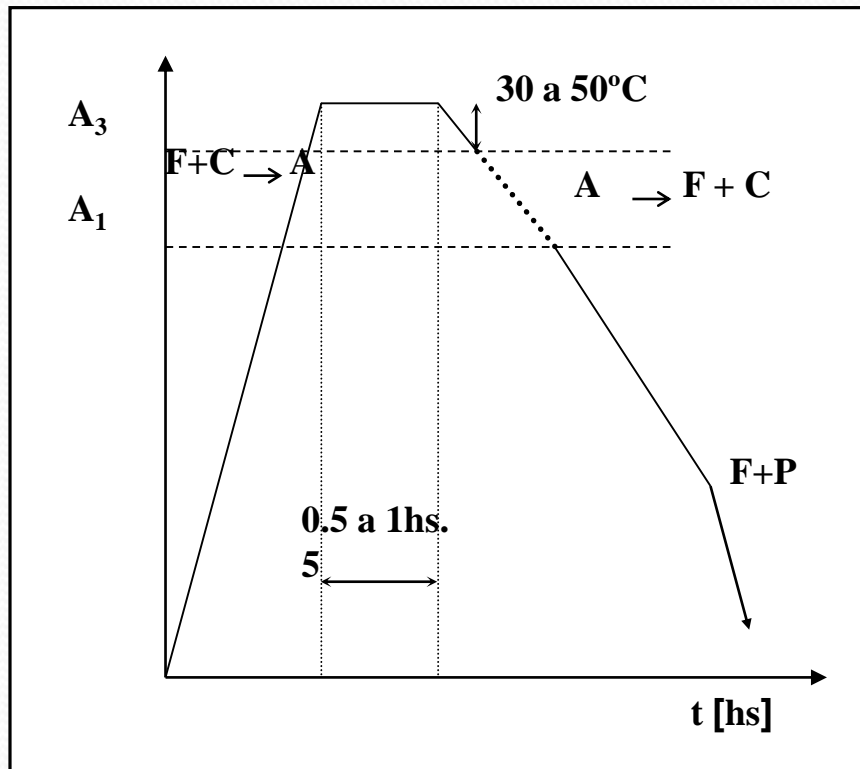
(a)



(b)

a) Estructura de un acero 0.3%C recocido y b)
Estructura de un acero 0,5%C recocido.

RECOCIDO TOTAL



RECOCIDO TOTAL

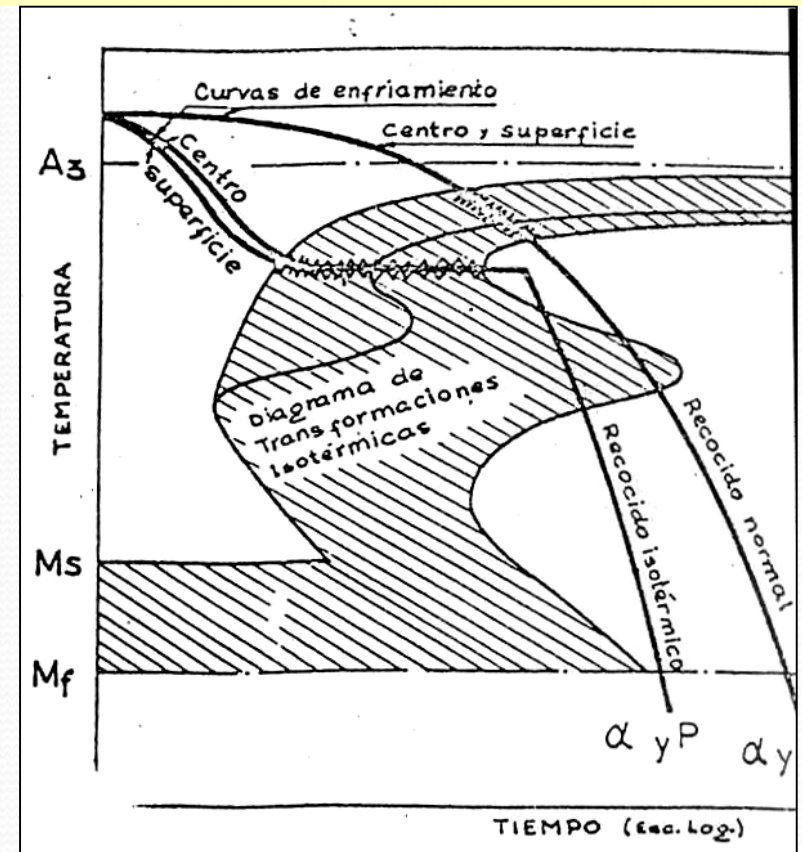
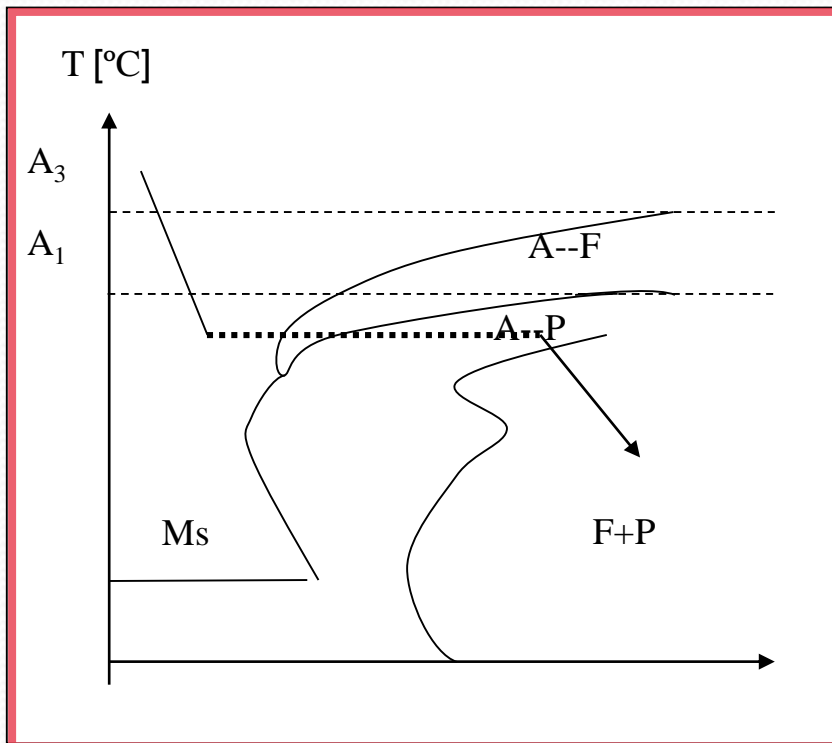
El enfriamiento lento, sobre todo de los aceros aleados, que tienen tendencia a la fragilidad de revenido, es necesario realizarlo hasta los 500°- 600°C. Después de la descomposición de la austenita en la zona perlítica, el enfriamiento posterior puede ser acelerado e incluso realizado al aire libre.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

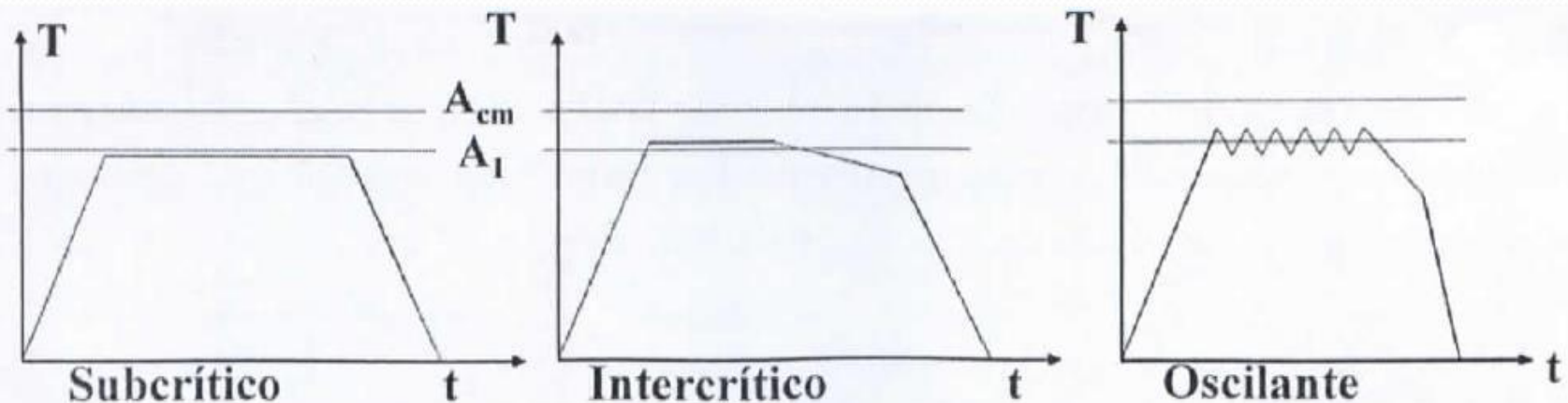
Se austeniza, luego se enfría en otro horno) hasta una temperatura por debajo de A_{c1} , generalmente hasta 50° - 100° bajo dicho punto. A la cual se realiza la exposición isotérmica, para la descomposición total de la austenita, luego se enfría al aire.

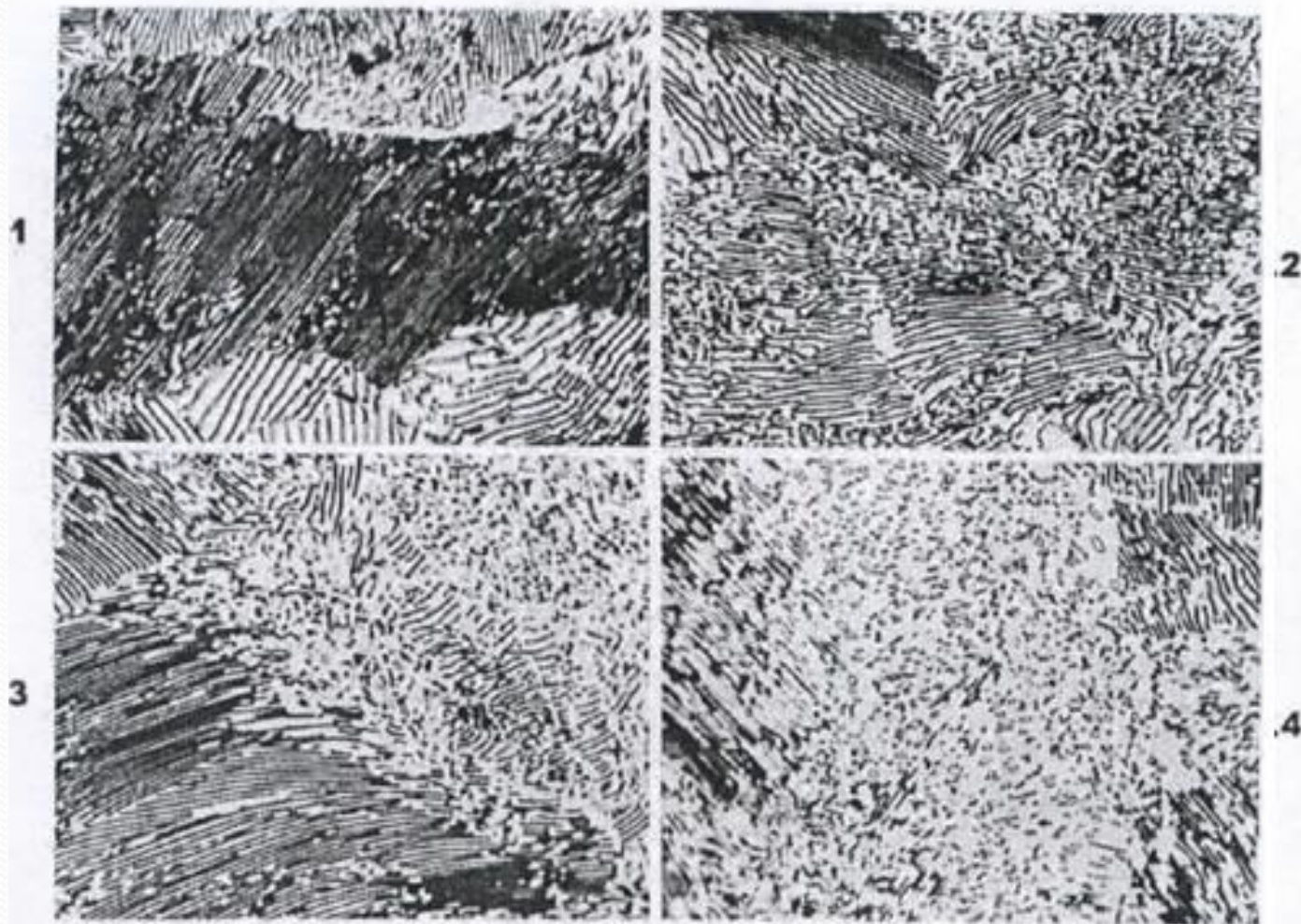


Se disminuye la duración del proceso para aceros aleados, que son enfriados lentamente para conseguir la disminución de la dureza. Se obtiene una estructura más homogénea, ya que la temperatura en toda la sección se equilibra.

Recocido incompleto - Recocido de esferoidización o de globulización

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, aunque puede presentar problemas en operaciones de mecanizado por arranque de viruta debido a que el material se comporta como pastoso. 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.

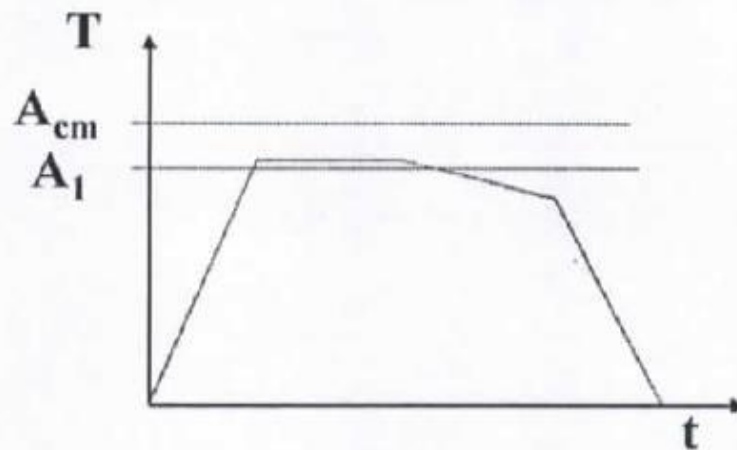




Esferoidización de un acero de 0,8%C a 650°C:
(1) 0h, (2) 4h, (3) 16h, (4) 64h.

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 .

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.



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 A_{c1} y enfriar lentamente. Los objetivos de dicho tratamiento:

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

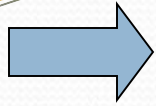
1. Disminuir las tensiones totales actuantes sobre una pieza.
2. Evitar fenómenos de rotura diferida causados por el H o bien algún tipo de corrosión bajo tensión.
3. Aumentar la estabilidad dimensional en servicio.
4. Optimizar algunas propiedades físicas.

-Sus aplicaciones son muchas, 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 grano 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

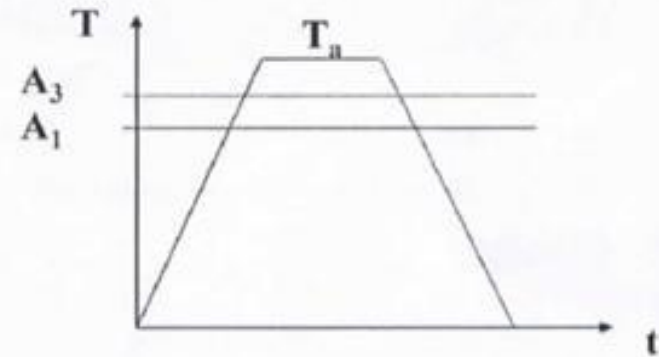


Se obtiene perlita más fina y abundante que en el recocido.

- Para refinar el tamaño de grano en piezas que han sido deformada en caliente o en frío, y de esa forma se reduce la posibilidad de formación de grietas y distorsiones en el tratamiento de temple.
- Permite obtener una microestructura de grano más fino y carburo laminar que facilitan las operaciones de mecanizado por arranque de viruta.
- Permite reducir la estructura en bandas debido a la heterogeneidad química (microsegregación) heredada de la solidificación. La reducción o eliminación de la bandas facilita el mecanizado y permite obtener mejores resultado en los tratamientos térmicos posteriores.

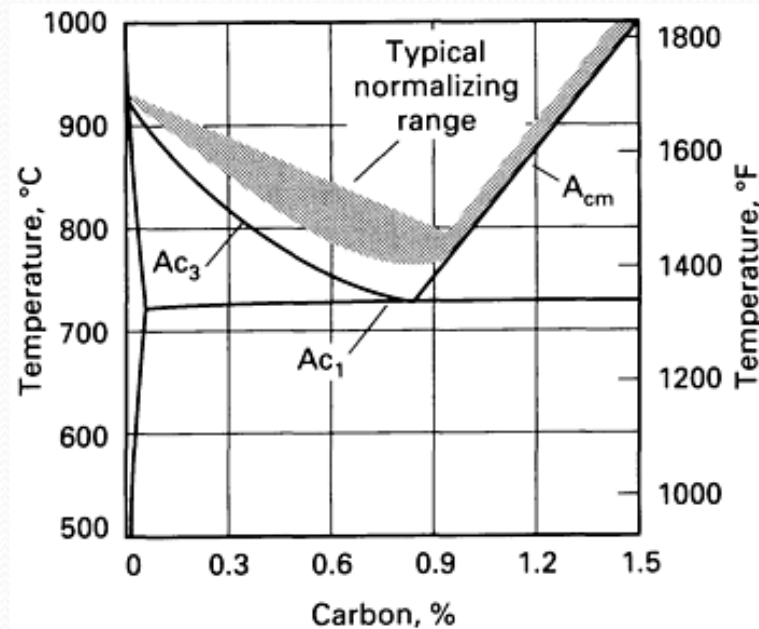
NORMALIZADO

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.

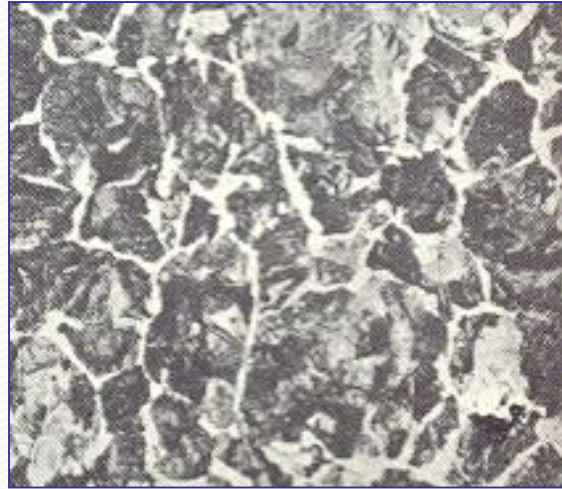
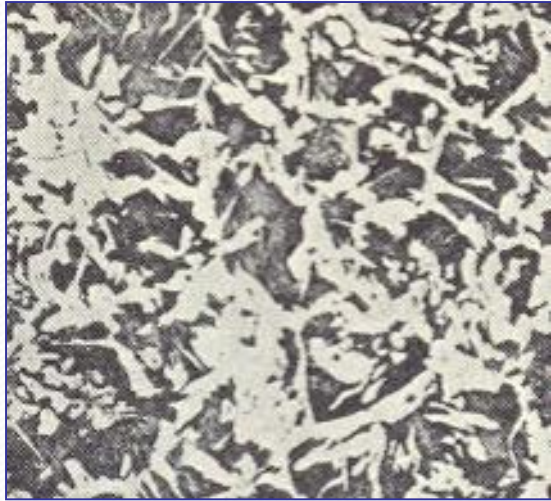
Rango típico de un normalizado.



NORMALIZADO

- 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 Acm. 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.
- 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 Acm.

Aceros normalizados



C 0,45%. Normalizado

$$\sigma_f = 29,9 \text{ kg/mm}^2$$

$$\sigma_T = 56,7 \text{ Kg/mm}^2$$

C 0,6%. Normalizado

$$\sigma_f = 31,5 \text{ kg/mm}^2$$

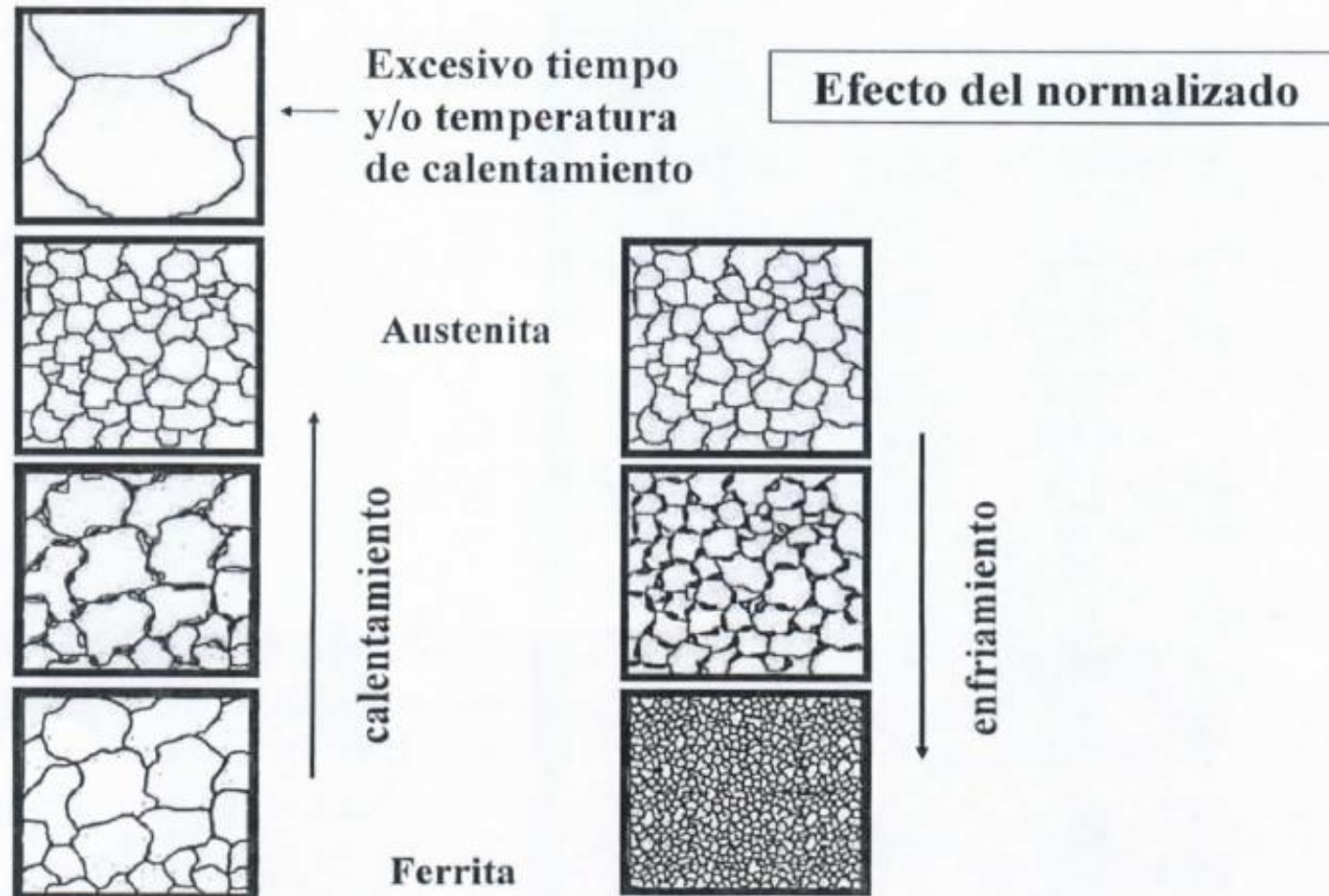
$$\sigma_T = 67,7 \text{ Kg/mm}^2$$

C 0,9%. Normalizado

$$\sigma_f = 39,4 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\sigma_T = 63,5 \text{ Kg/mm}^2$$

NORMALIZADO



NORMALIZADO

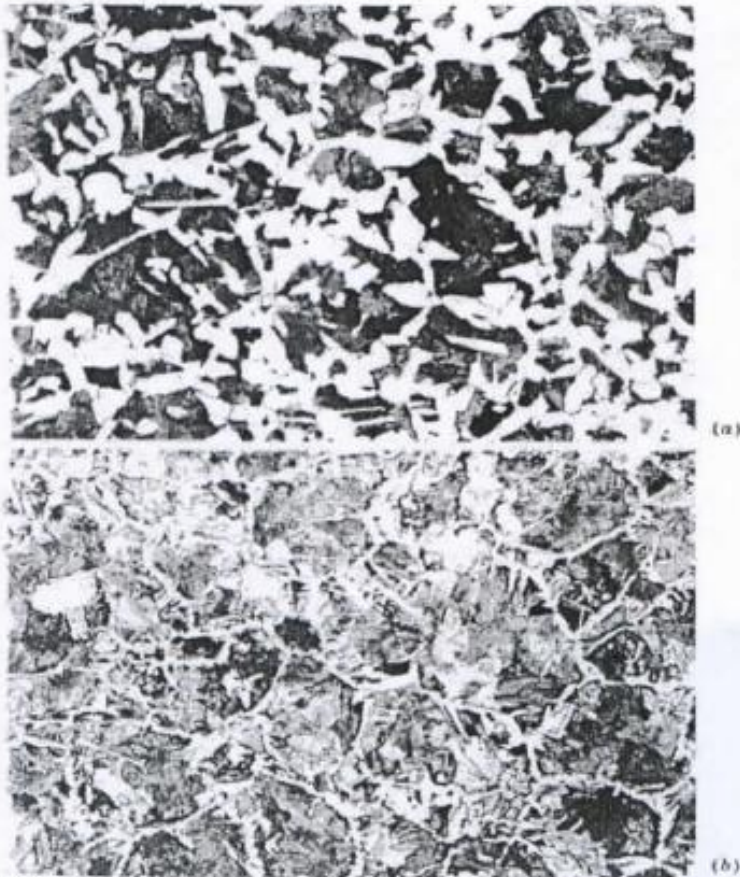
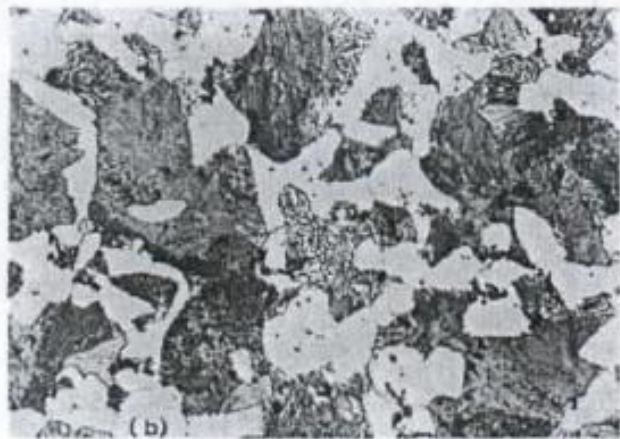


Figure 8-13. Microstructure of Fe-0.4% C alloy that has been annealed: (a) slowly cooled (annealed); (b) more rapidly cooled (normalized). Note the ferrite outlining the prior austenite grain boundaries and the decrease in the volume of ferrite with more rapid cooling. (Courtesy of E. Zurello, J. and L. Steel Company.)

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

NORMALIZADO

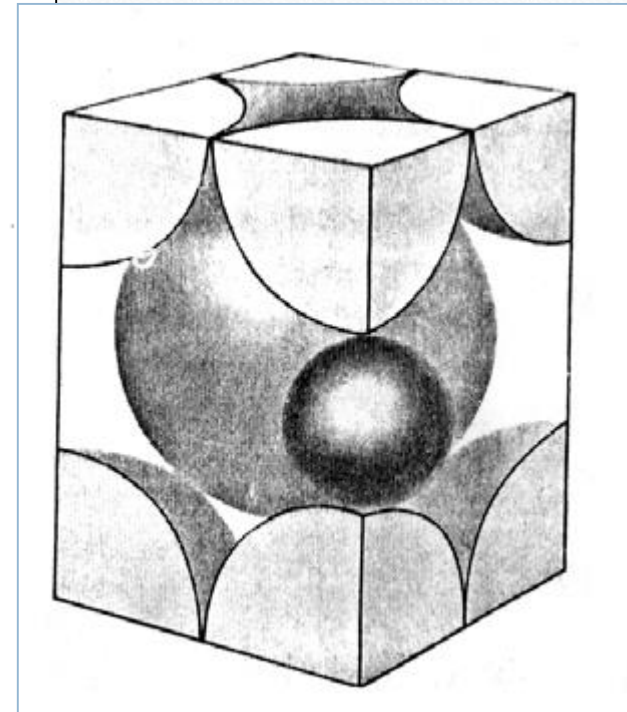
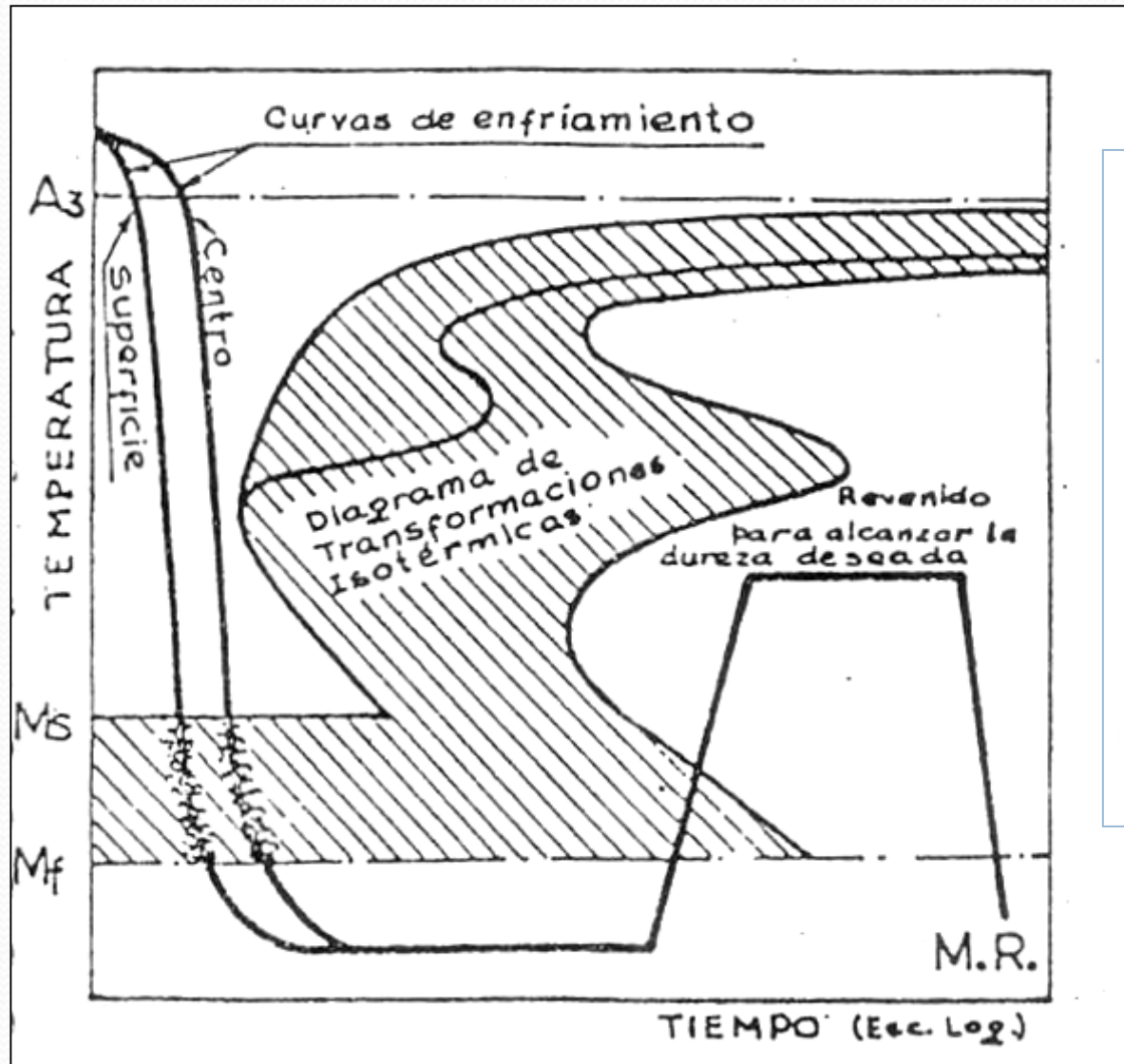


**Efecto refinador del
normalizado.**

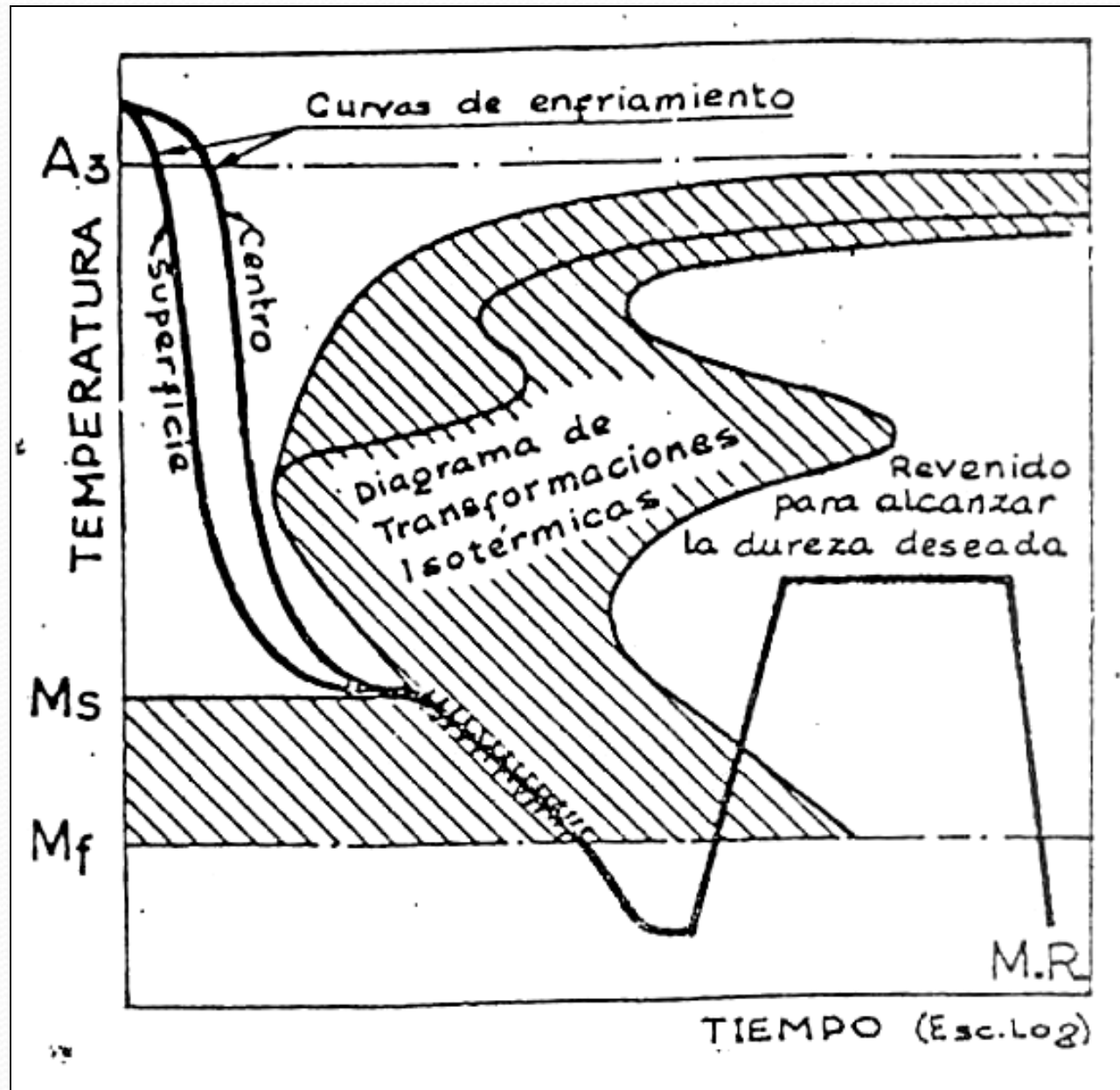
**Estructura de (a) forjado a alta
temperatura (tamaño de grano
 $G=3$), y (b) normalizado (tamaño
de grano $G=6$). Acero de 0,5%C.**

Figure 5.14. Influence of normalizing anneal on grain size. Carbon steel 0.50% C: (a) As rolled or forged. Grain size 3 ASTM; (b) Normalized. Grain size 6 ASTM. Both 300 \times .

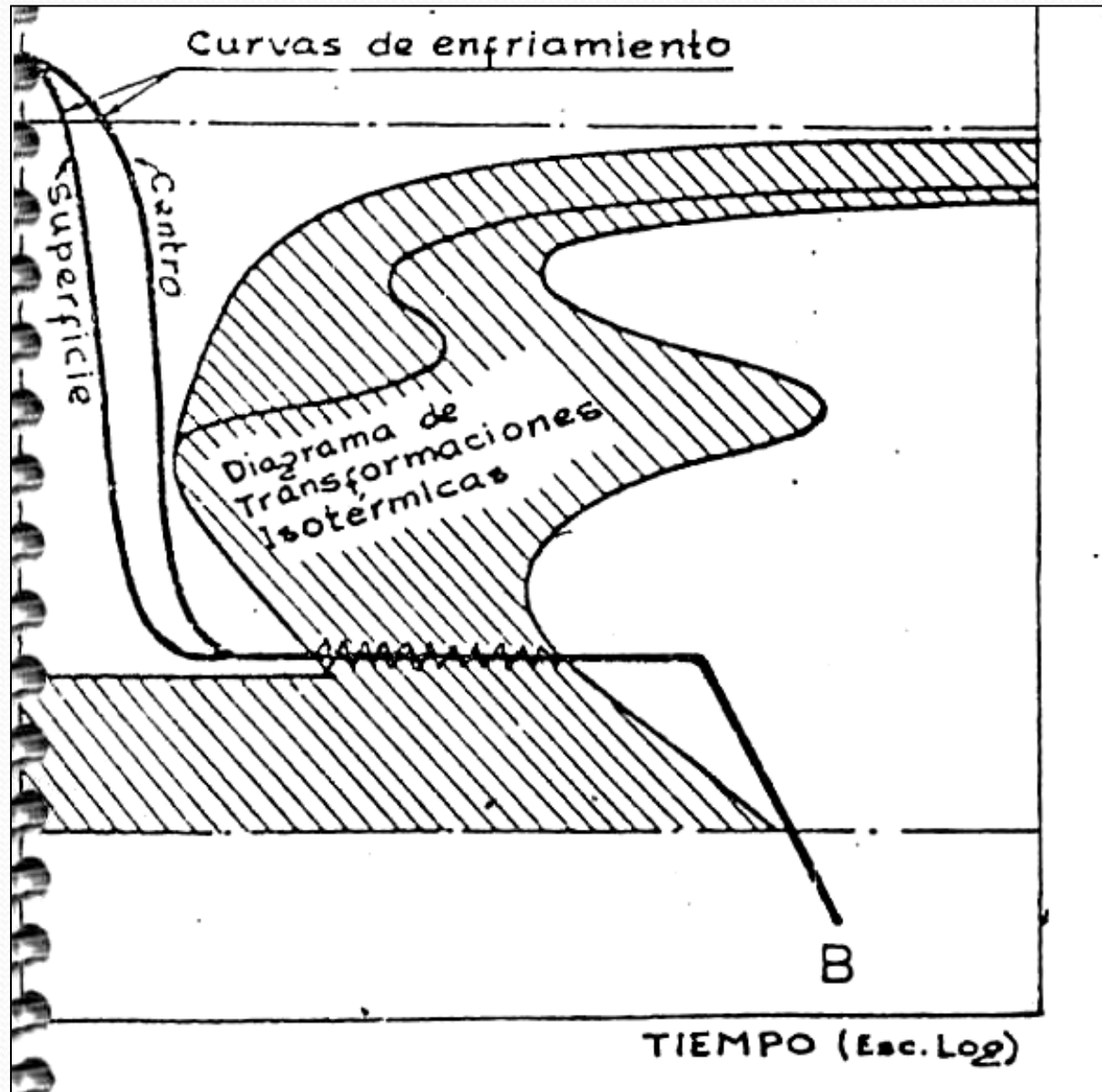
TEMPLE Y REVENIDO



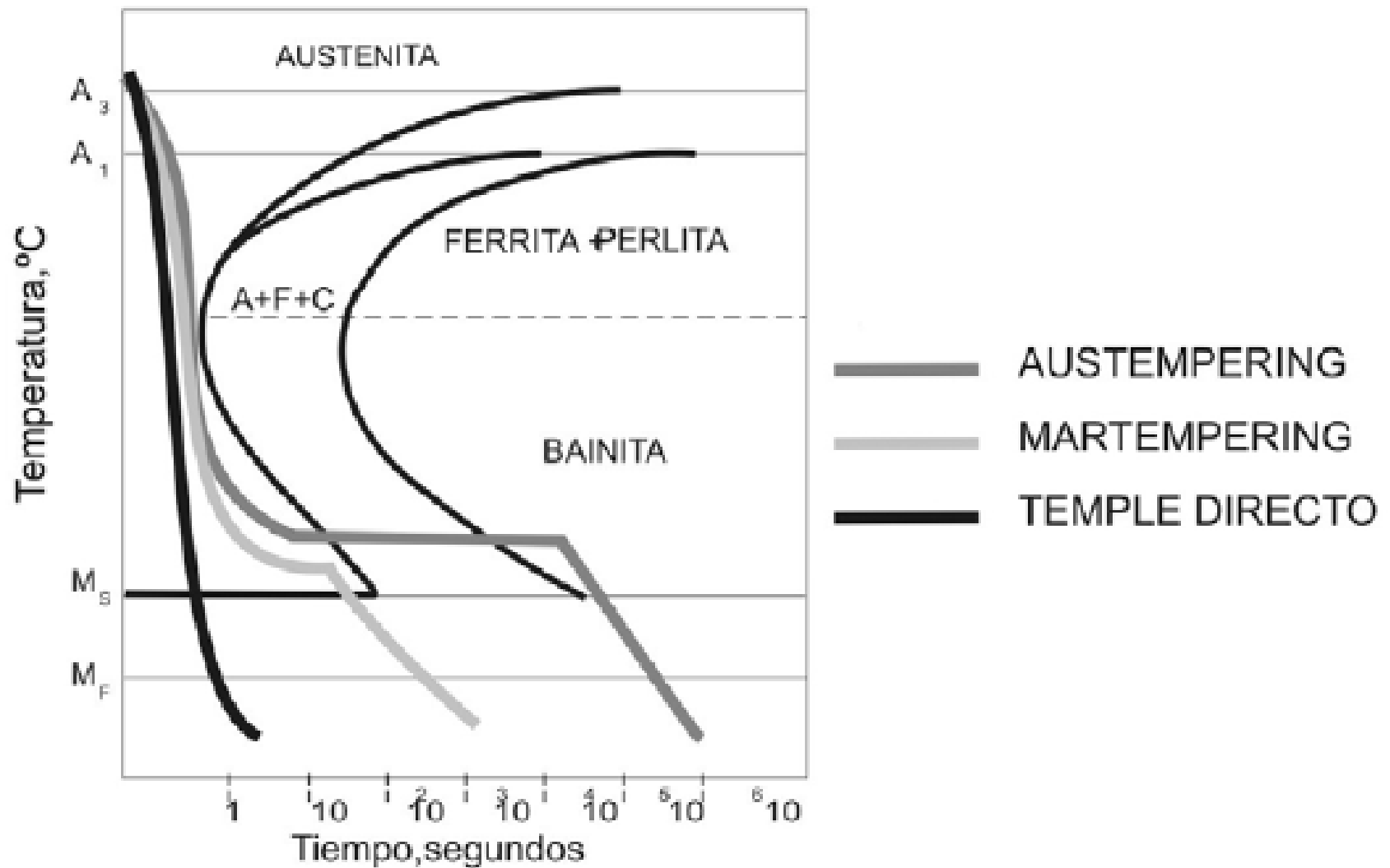
MARTEMPERING



AUSTEMPERING



VARIANTES DEL PROCESO DE TEMPLE



TRATAMIENTOS SUPERFICIALES

- *La mayoría de las piezas componentes de máquinas se elaboran para que sus propiedades sean uniformes*
- *Sin embargo, ciertos mecanismos requieren una superficie dura y una región suave y tenaz en su interior*
- *Esto se puede logra adicionando elementos (C, N, B, etc) que penetran en la matriz y endurecen directamente la superficie o mejoran sus propiedades para el temple posterior.*
- *También se pueden hacer temples locales calentando y enfriando ciertas la zona de interés*

TRATAMIENTOS SUPERFICIALES

- **Principales métodos**
 - ***TERMOQUÍMICOS***
 - ***SELECTIVOS***

TRATAMIENTOS TERMOQUÍMICOS

CEMENTACION

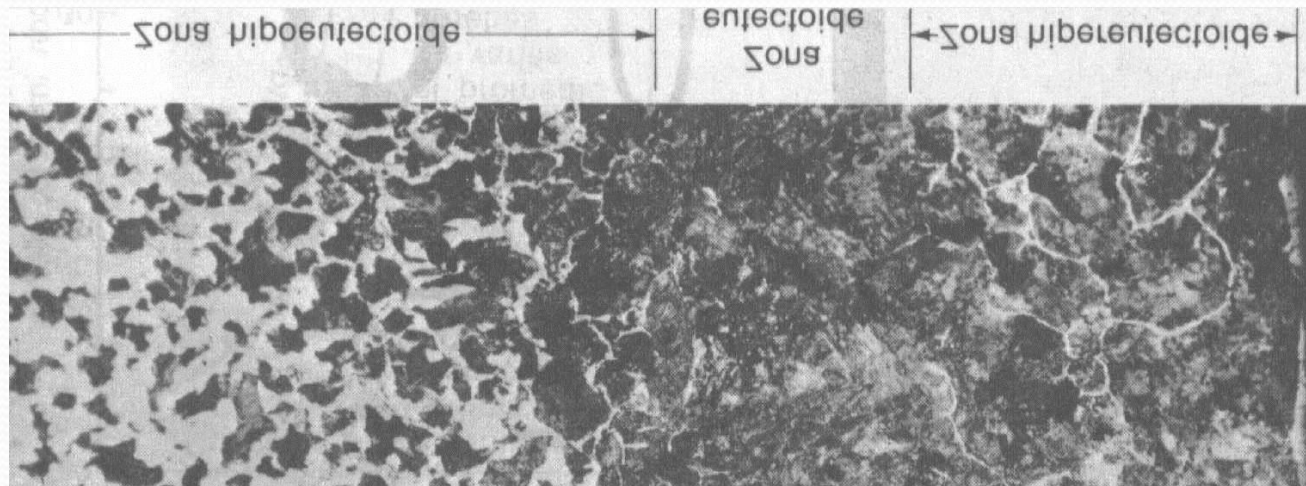
- *Es el más viejo tratamientos termoquímicos*
- *Se coloca un acero de bajo C (0.2%) en una atmósfera que contiene CO a una temperatura de 900 °C aproximadamente*



- *En la superficie del acero se forma una capa superficial de alto C (1.2%) debido a que a esa temperatura la Austenita disuelve esa cantidad de C aproximadamente*
- *Como en la superficie hay alta concentración de C y en el interior hay baja concentración, este difunde desde afuera hacia adentro*
- *Luego de un tiempo estimado se saca la pieza del horno y se temple*

CEMENTACION

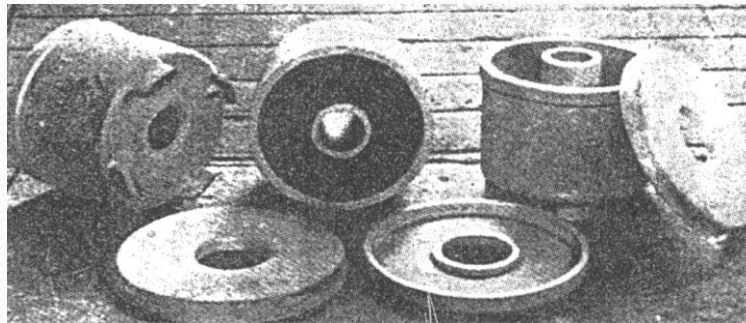
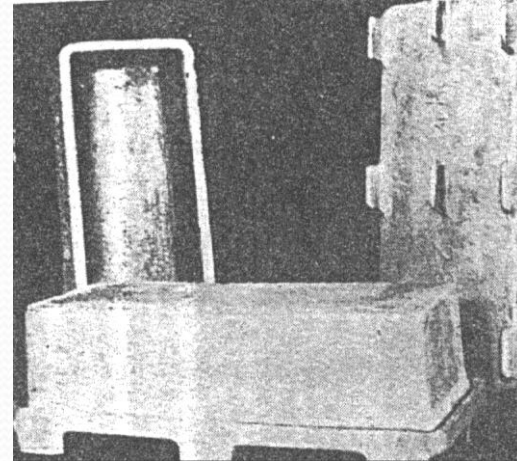
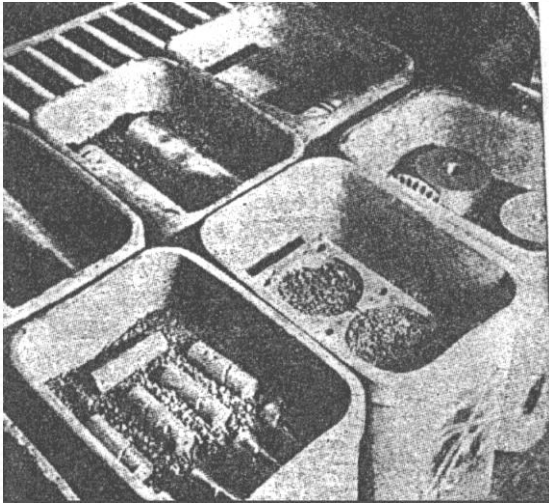
- El examen microscópico mostrará el gradiente de C
- En la superficie está la zona hipereutectoide de Perlita con una red blanca de Cementita, seguido por una zona Eutectoide de Perlita y luego una zona hipoeutectoide de Perlita y Ferrita
- La ecuación anterior es reversible y se llama descarburización, que es la pérdida de C a altas temperaturas
- Los materiales para la cementación puede ser sólidos, gas rico en carbono o líquido



CEMENTACION SOLIDA

- *Utiliza carbón vegetal, coque y carbonato de bario como activador. Cuando se sella la caja queda suficiente aire para formar CO.*
- *Se calienta hasta la temperatura adecuada y luego se enfría lentamente (dura de 6 a 10 h)*
- *Ventajas: es útil para pequeñas piezas y además no necesita una atmósfera preparada*
- *Desventajas: no existe un control estrecho del proceso, no se temple directamente*
- *No se utiliza cuando se requiere una profundidad inferior a 0.8 mm*

CEMENTACION SOLIDA



CEMENTACION GASEOSA

- El acero se calienta en contacto con CO y/o un hidrocarburo (metano, propano)
- El proceso dura de 1 hora a varios días
- Se tiene un procedimiento mas limpio
- Se logra un templado directo
- Menores costos
- Control mas estricto de la calidad

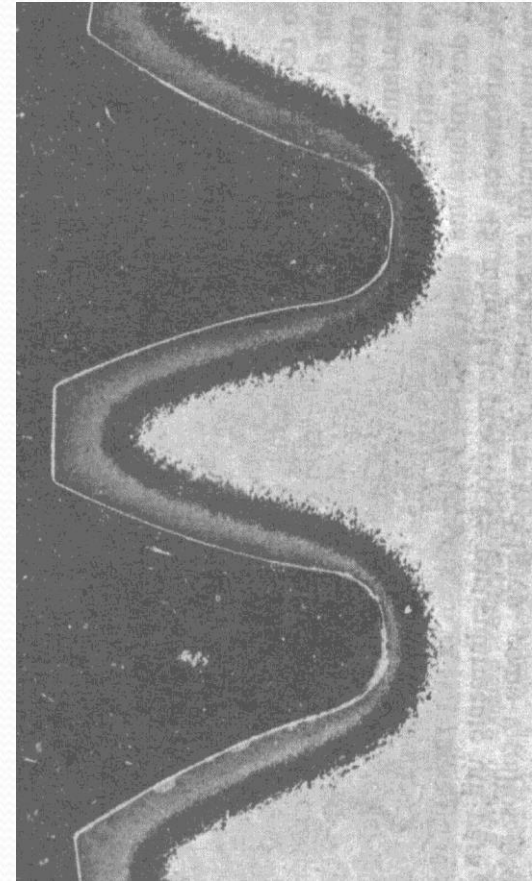
CEMENTACION LIQUIDA

- Se coloca el acero en un baño de cianuro fundido, de donde difundirá el C hacia el metal. Dura de 1 a 6 horas.
- Temp 850 a $900^{\circ}C$
- Se logra espesores de hasta 6 mm
- Se adapta mejor a piezas de pequeño y mediano tamaño

CEMENTACION

TEMPLE DESPUES DE LA CARBURIZACIÓN

- La temperatura de carburización es la de la región austenítica por lo que el templeado directo endurecerá toda la pieza si la velocidad de enfriamiento es mayor que la crítica
- En el caso de grano grueso suele provocar fragilidad y distorsión, por lo que se debe aplicar solo a aceros de grano fino
- Luego del templeado se logra una capa exterior de martensita seguida por una mas oscura de transición



NITRURACION

- Se realiza en una atmósfera de mezcla de amoníaco y amoníaco disociado.
- Se produce nitruros por la reacción del N. Si bien se pueden formar con Fe, los mejores resultados se tienen con los aleados que tienen Al, Cr y Mo
- En general los objetos son templados y revenidos antes de nitrurar para que el núcleo quede con resistencia y tenacidad
- Luego se mecaniza casi hasta las medidas finales
- Las piezas se colocan en un recipiente hermético y se alimenta con la mezcla mientras se calienta (540°C)
- Luego de 60 hr se logra una penetración de 0.6 mm
- Con la nitruración se logran durezas de mas de 1000 Vickers
- Como el proceso se hace a temperaturas bajas y no se temple, no hay problema de distorsión.
- Tiene excelente resistencia la desgaste y la fatiga

CROMIZADO

- *No está restringido a materiales ferrosos*
- *En el acero forma una capa exterior de acero inoxidable y si el C es mayor de 0.6 precipitará carburos aumentando la resistencia al desgaste*
- *Se calienta la pieza (900-1090 °C) en contacto con Cr en fase gaseosa*
- *Se logran durezas de 800 a 1000 Vickers*
- *Se aplica en ejes de bombas, herramientas, troqueles*

BORADO

- *Se aplica a Aceros*
- *Se calienta la pieza a temperatura de austenizacion (800-1050°C) en contacto con Sales de Boro*
- *Se forma una capa de 200 micrones compuesta de 2 subcapas: FeB (ortorómbica) y Fe₂B (tetragonal centrada en el cuerpo)*
- *Se logran durezas mayores de 1500 Vickers*



TRATAMIENTOS SELECTIVOS

POR LLAMA

- *Se aplica con soplete o un aparato especial*
- *Luego se temple: rociando agua, inmersión en agua o aceite o corriente de aire.*
- *Después se reviene para liberar esfuerzos*
- *Se logran espesores de 1/8 a 1/4 "*
- *Ventajas: portátil, localizado*
- *Desventajas: posibilidad de sobrecalentamiento*

POR INDUCCION

- *Mediante un campo magnético intenso se produce una corriente en la pieza que por efecto Joule la calienta*
- *Esto se logra con bobinas que son refrigeradas*
- *Se utilizan frecuencias de 10.000 a 500.000 Hz*
- *Se logra mas profundidad aumentando el tiempo de exposición.*
- *Se obtienen superficies más delgadas, pero altos costos*

TRATAMIENTOS TERMICOS DE FUNDICIONES

Fundición maleable de corazón negro

Calentando las piezas ya terminadas para disolver algo del grafito y luego temprar y revenir. Este aumento de la resistencia mecánica va aparejado a una disminución de la ductilidad.

Fundición maleable de corazón blanco

La fundición maleable de corazón blanco no se templea pues carece del % C mínimo para tomar temple.

Fundición nodular

La fundición nodular tiene muchas ventajas sobre la fundición gris. Sus propiedades mecánicas son superiores, pues hay menor superficie de discontinuidad en el material, generalmente se obtiene con matriz perlítica, pero puede recocerse y templarse, y obtener así fundición nodular de matriz ferrítica o martensítica.

Los tratamientos para fundiciones grises y nodulares son similares, como el recocido de alivio de tensiones, de ablandamiento, temple y revenido (aumenta resist. tracción y desgaste) y temple superficial (superficie dura martensítica y núcleo tenaz).