

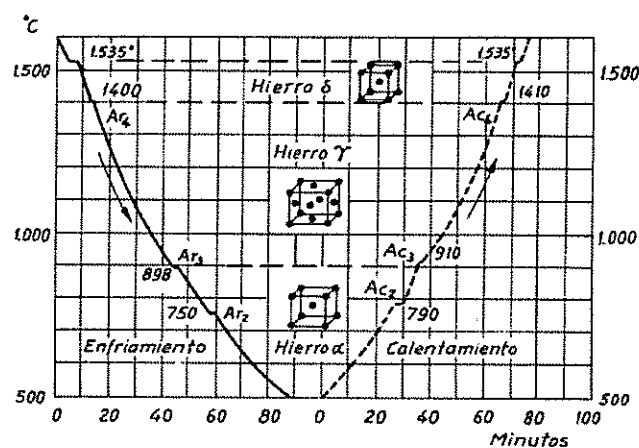
1. EL HIERRO, PUNTOS CRÍTICOS Y CAMBIOS ALOTRÓPICOS

El hierro puro tiene distintos estados alotrópicos, lo que indica que presenta distinta estructura cristalina en función de la temperatura. Estos cambios quedan reflejados si estudiamos el enfriamiento lento de una muestra de hierro lo más puro posible desde el estado líquido.

En este estudio podemos observar que el hierro solidifica casi instantáneamente a 1535°C, al seguir descendiendo la temperatura no se observa nada anormal en el proceso de enfriamiento hasta que a los 1400°C se aprecia una disminución de la velocidad de enfriamiento debido al desprendimiento de calor de forma espontánea como consecuencia del cambio de estructura de BCC a FCC. Hacia los 898°C se aprecia otro nuevo desprendimiento de calor originando de nuevo una nueva disminución de la velocidad de enfriamiento, ha ocurrido un nuevo cambio de estructura donde el hierro pasa de FCC a BCC. A los 750°C vuelve a detenerse el enfriamiento causado por un cambio del comportamiento magnético, pasando de hierro no magnético a hierro magnético que se mantiene así hasta temperatura ambiente.

Las temperaturas a las que ocurren estos fenómenos se las denominan temperaturas críticas, designadas con la notificación Ar.

Si a una muestra exactamente igual la calentamos desde temperatura ambiente hasta su completa difusión, volveríamos a encontrarnos con sucesivas detenciones y variaciones en la velocidad de calentamiento, volveremos a encontrarnos con las temperaturas críticas, denominadas ahora Ac. Las temperaturas Ac son ligeramente superiores a las de Ar dando lugar al fenómeno de HISTÉRESIS TÉRMICA.

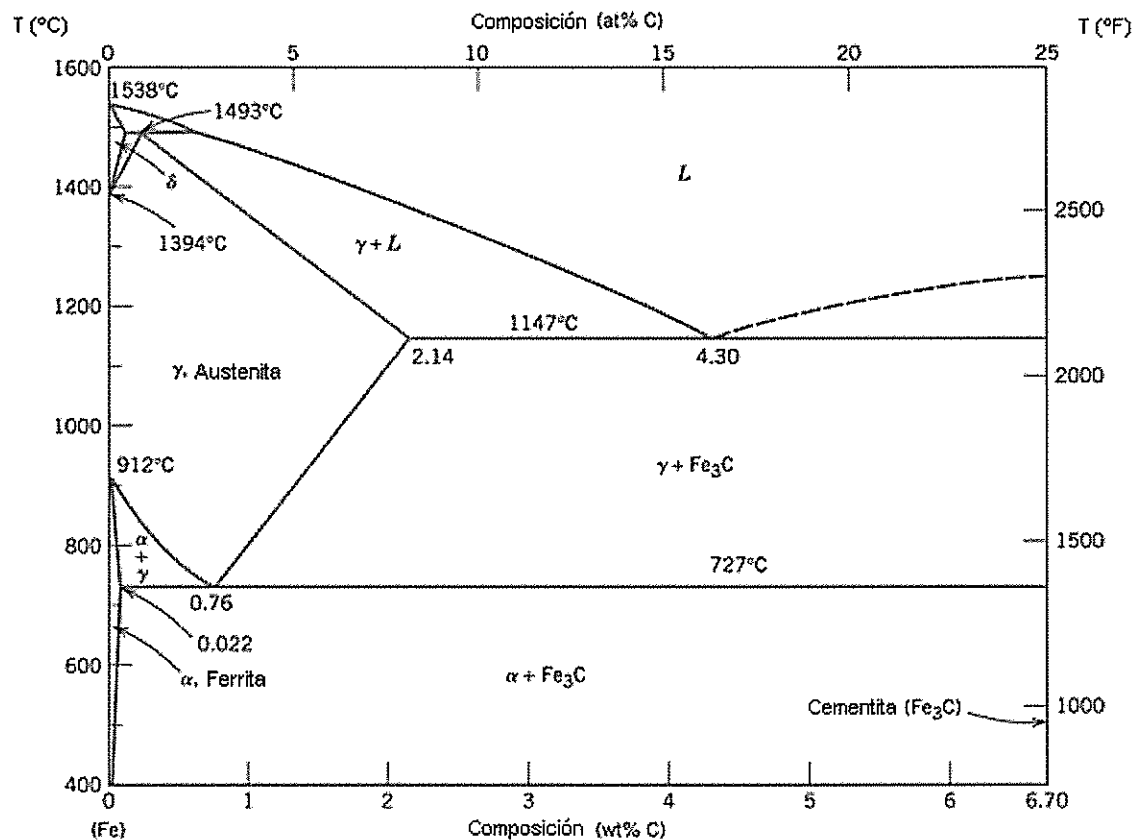


Ciclo de histéresis térmica de hierro

2. DIAGRAMA Fe-Fe₃C. MICROESTRUCTURAS EN ESTADO DE EQUILIBRIO

Diagrama metaestable por el que se rigen todos los aceros y la mayoría de las fundiciones.

Se considera metaestable porque la cementita (Fe₃C) tiende a descomponerse con el tiempo para dar ferrita y grafito, pero como dicho proceso ocurre a velocidades muy lentas se puede utilizar dicho diagrama como si fuese un diagrama estable.



Microconstituyentes de equilibrio:

Los microconstituyentes son los formados por las diversas fases del diagrama.

Ferrita δ: Solución sólida ~~sustitucional~~ de Carbono en el hierro δ. Máxima solubilidad la presenta a 0,08 % C a 1493 °C.

Austenita: Solución sólida ~~sustitucional~~ de carbono en hierro γ. Presenta máxima solubilidad: 2,14 % C a 1147 °C. Todos los aceros se encuentran en estado de austenita

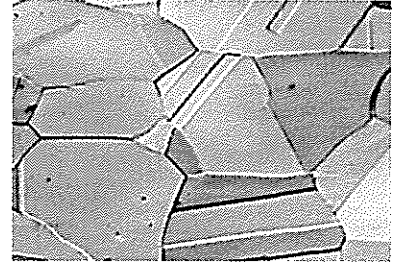
cuando se calientan por encima de A_3 o A_{cm} . Es inestable a temperatura ambiente, excepto en el caso de que el acero sea de alto contenido en carbono contenga determinados elementos de aleación en cantidades adecuadas que estabilicen la austenita haciéndola estable a temperatura ambiente (aceros inoxidables austeníticos)

$R_m = 88 \div 105 \text{ kg/mm}^2$. 300 HB. $A = 30 \div 60 \%$.

Carácter no magnético.

Dúctil, tenaz y muy densa.

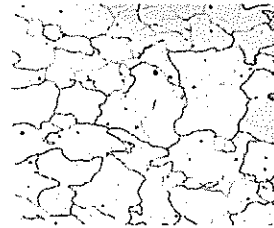
Gran resistencia al desgaste y a la corrosión.



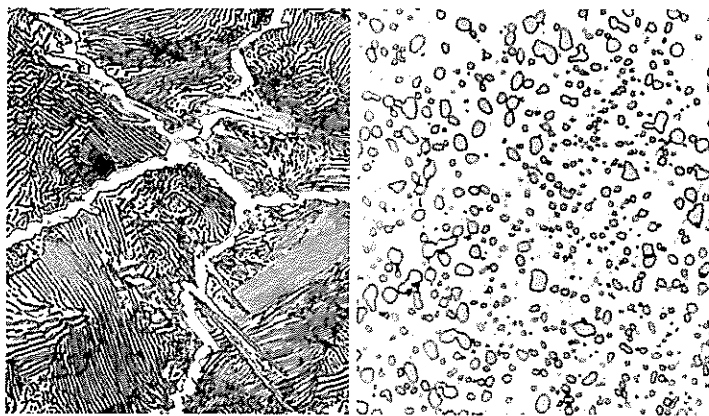
Ferrita: Solución sólida intersticial de C en hierro α . Máxima solubilidad: 0,025 % C a 723 ° C. Mínima solubilidad: 0,008 % C a T ambiente. Destaca en los aceros de muy bajo contenido en carbono, la unión de los granos, en forma de líneas negras, de contornos suaves y regulares.

$R_m = 20 \text{ kg/mm}^2$. HB = 90 y alargamiento 35 %

De color blanco, magnética, dúctil y maleable



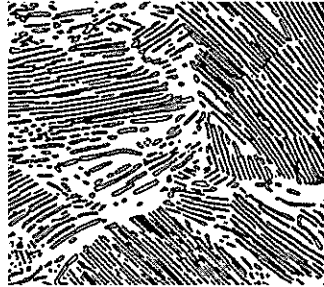
Cementita: carburo de hierro (Fe_3C) con un 6,7% en carbono. Es el constituyente más duro y frágil de los caeros al carbono, siendo su dureza superior a 68HRc. Cristaliza formando un paralelepípedo ortorrómbico de gran tamaño. Magnética hasta los 218°C. Aparece de color blanco brillante y sólo el picrato sódico en caliente la oscurece, blanqueando a la ferrita.



Perlita: microconstituyente eutectoide con 0,77% C formado por capas alternas de ferrita y cementita. Microconstituyente en que la austenita se transforma a 727° C. Según la velocidad de enfriamiento, las láminas estarán más o menos separadas. A menor velocidad mayor distancia habrá entre láminas. La coloración que puede presenta

la perlita en es debido a un efecto de sombras de los relieves de los microconstituyentes que los forman.

$R_m = 80 \text{ kg/mm}^2$ y $A = 15 \%$, $200 \div 300 \text{ HB}$ en función de velocidad de enfriamiento



PUNTOS CRÍTICOS DE LOS ACEROS

En el diagrama de equilibrio se observa que existen ciertas temperaturas donde ocurren transformaciones en el calentamiento y enfriamiento lento de un acero determinado.

Estas temperaturas donde ocurren cambios microestructurales y de comportamiento físico como el magnetismo, se denominan puntos críticos.

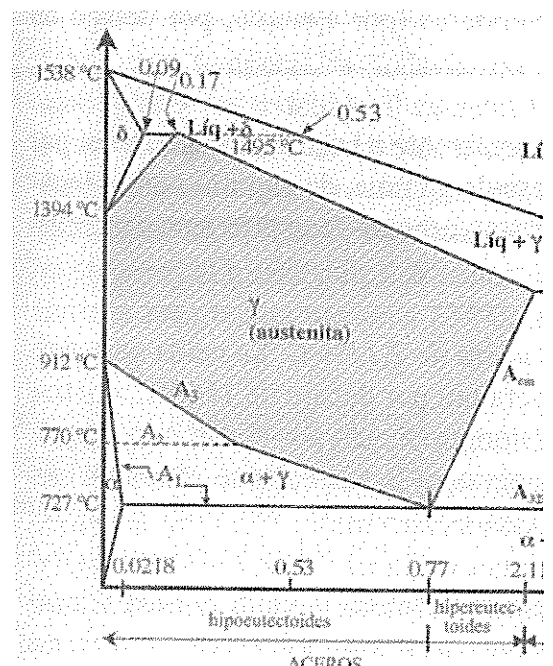
Desde el punto de vista de los aceros los puntos que nos interesan son:

A_1 y A_{321} temperatura mínima a la que puede existir la austenita, temperatura que nos indica la transformación eutectoide de austenita a perlita.

A_2 Cambio de ferrita no magnética a ferrita magnética

A_3 temperatura que nos indica el cambio alotrópico de hierro con estructura FCC a hierro con estructura BCC.

A_{cm} temperatura que nos marca el límite de solubilidad del carbono en la austenita en función de la temperatura, máxima solubilidad a 1147°C con $2,11\%C$ y mínima a 727°C con $0,77\%C$.



PROCESO DE ENFRIAMIENTO DE ALEACIONES Fe- Fe₃C

ACERO HIPOEUTECTOIDE

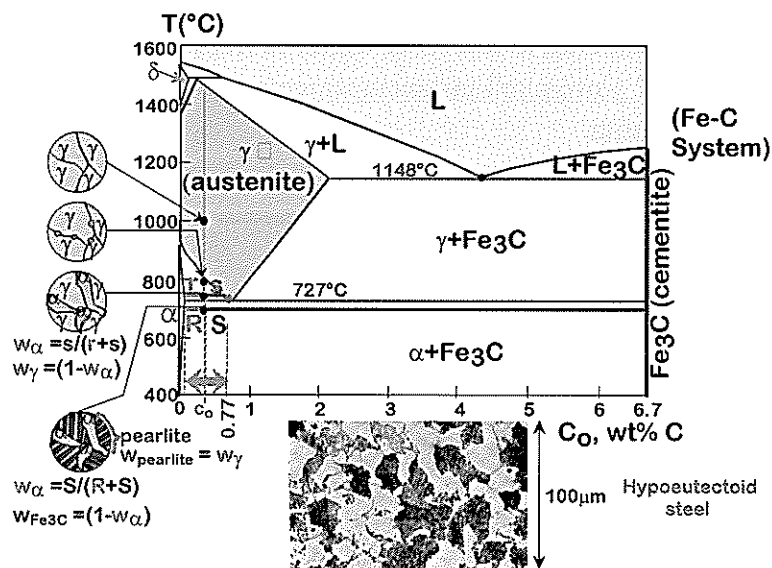
Acero de 0,20% C

La solidificación comienza a 1495 ° C aproximadamente, precipitando cristales de austenita con contenido en carbono inferior al 0,20 %C. El contenido en carbono total de la aleación vendrá dado por la abscisa correspondiente al contenido en %C, de la correspondiente aleación.

Al continuar el enfriamiento precipitan cristales de austenita cada vez más ricos en carbono, por lo que podremos hablar entonces de heterogeneidad, en cuanto al contenido en carbono de los primeros cristales de austenita a los últimos que se obtienen. Dicha heterogeneidad desaparece si dejamos el tiempo suficiente para que se complete la difusión. Al mismo tiempo el líquido residual se va enriqueciendo en carbono durante el enfriamiento.

A partir de los 891 ° C comienza a nacer de la austenita cristales de ferrita, ahora el contenido de carbono de la austenita restante va creciendo según la línea de temperatura crítica superior en el lado hipoeutectoide, mientras sigue descendiendo la temperatura.

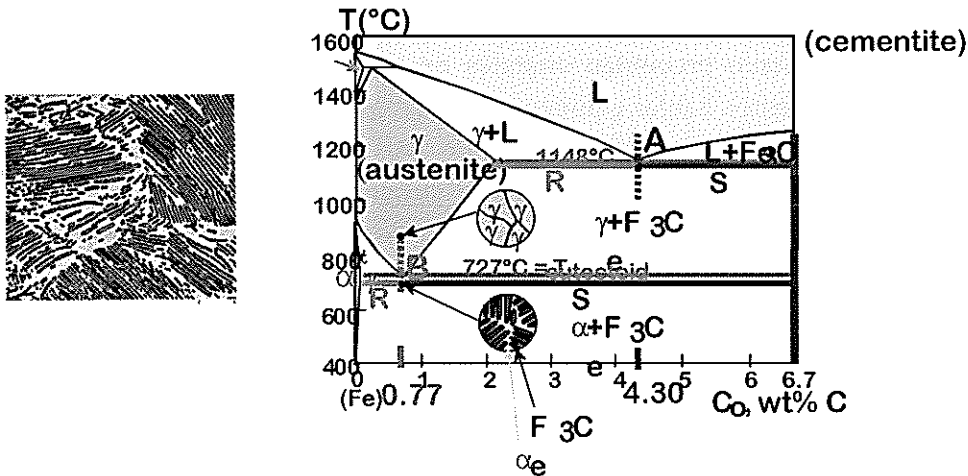
A 723 ° C la austenita contiene 0,77 % C por lo que presenta las condiciones adecuadas para dar perlita, con desprendimiento de calor. Luego a temperatura ambiente nos encontraremos con ferrita y perlita.



ACERO EUTECTOIDE

Acero con 0,77 % C

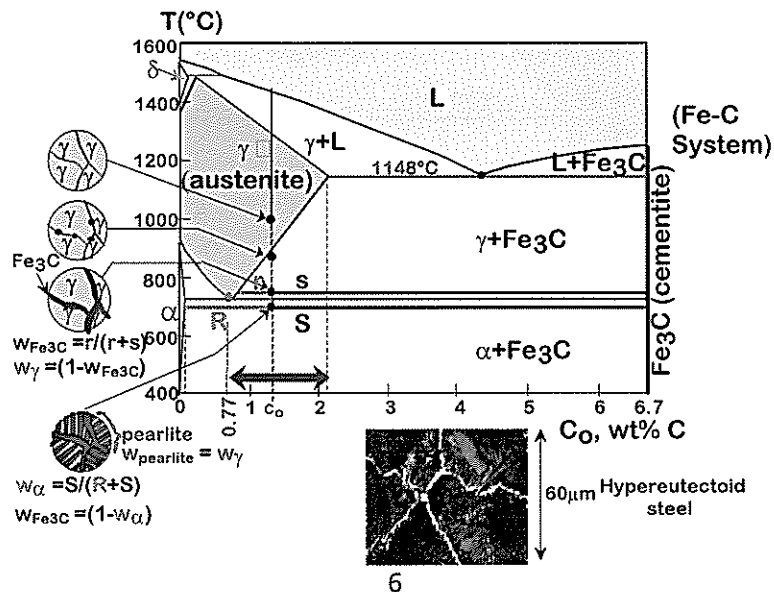
Nos interesa lo que ocurre a partir de temperaturas próximas, pero por encima de A_1 . Luego a 0,77 y 1225 ° C tenemos 100 % de austenita, hasta los 723 ° C no ocurre nada, salvo que desciende la temperatura. Pero al alcanzar dicha temperatura la austenita se transforma toda ella en perlita, que se nos mantiene de esta forma hasta la temperatura ambiente.



ACERO HIPEREUTECTOIDE

Acero con 1,4 % C

Desde el estado líquido hasta la solidificación el proceso es el mismo que los tipos de aceros observados hasta ahora. Cuando en el enfriamiento llegamos a la temperatura A_{cm} de los cristales de austenita, comienza a nacer cristales de cementita y el porcentaje de austenita comienza a descender según la línea de A_{cm} hasta llegar a 723 ° C, donde tendrá 0,77 % C y originará instantáneamente perlita. A temperatura ambiente tendremos perlita y cementita.



3. ACEROS AL CARBONO Y ACEROS ALEADOS

Los aceros son los materiales tecnológicos de interés industrial más ampliamente utilizados en la industria actualmente. La siderurgia y la metalurgia como tecnologías aplicadas sobre estos materiales ofrecen hoy en día un alto nivel de desarrollo, poniendo a disposición del usuario aceros en cantidad, con calidad y a un coste que les hace insuperables como materiales industriales.

Los aceros son aleaciones Fe- Fe₃C con un contenido en carbono no superior al 2,11 %C. Estos materiales se clasifican en aceros al carbono y aceros aleados.

Los aceros al carbono contienen además de hierro y carbono, Si, Mn, P y S en cantidades no superiores a las indicadas, Si=0,50%, Mn=0,90%, P=0,100% y S=0,100%

Los aceros aleados son aceros al carbono con otros elementos de aleación diferentes a los anteriores mencionados o los mismos elementos en mayores proporciones.

Efecto de los cinco elementos fundamentales de los aceros:

Carbono: elemento individual más importante de los aceros. Puede aparecer disuelto dando soluciones sólidas ya comentadas anteriormente como son la ferrita, austenita y ferrita delta, puede formar carburos como la cementita que puede aparecer aislada o combinada con la ferrita para dar la perlita.

La comparación de las potenciales características entre los aceros se hace en base fundamentalmente a su contenido en carbono. Según este se incrementan sus características resistentes y las resilientes disminuyen, de modo general, si bien todo ello dependiendo del estado del tratamiento térmico.

Silicio: Se disuelve en la ferrita aumentando la resistencia del acero sin disminuir en mucho la ductilidad. Facilita la desoxidación del acero líquido mediante la formación de SiO₂.

Manganeso: La función fundamental es evitar los malos efectos del azufre combinándose con el dando MnS. También facilita la desoxidación del acero líquido formando óxidos.

Fósforo: tiende a disolverse en la ferrita aumentando ligeramente la resistencia y la dureza. Puede añadirse deliberadamente para mejorar su maquinabilidad y resistencia a la corrosión. Pero empeora la soldabilidad en frío de los aceros.

Azufre: se combina con el hierro para dar FeS que origina una aleación eutéctica de bajo punto de fusión que tiende a concentrarse en los bordes de grano. Luego cuando el acero

se forja o lamina a altas temperaturas se hace frágil debido a la fusión del eutéctico que destruye la cohesión entre los granos permitiendo que se desarrollen grietas. Con Mn origina el MnS que puede pasar a la escoria o distribuirse por toda la estructura mejorando la maquinabilidad ya que facilitan la rotura de la viruta reduciendo de esta manera el desgaste de la herramienta.

Empeora la soldabilidad en caliente.

Un acero aleado puede definirse como aquel cuyas propiedades y características se deben a algún elemento diferente del carbono.

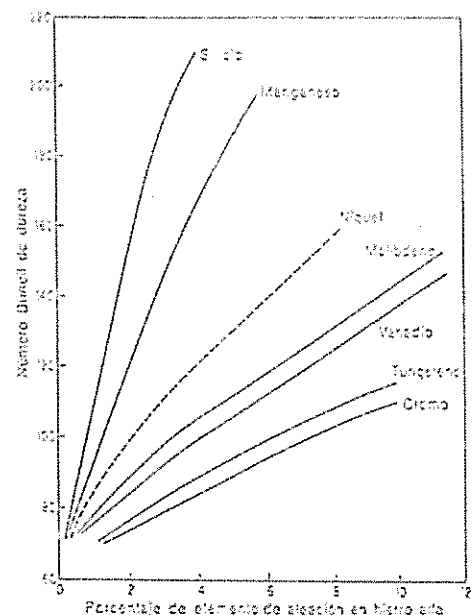
Los elementos de aleación se añaden para muchos propósitos, entre los cuales los más importantes son:

- Aumentar la templabilidad
- Mejorar la resistencia mecánica a temperaturas comunes
- Mejorar las propiedades mecánicas tanto a altas como bajas temperaturas
- Mejorar la tenacidad
- Aumentar la resistencia al desgaste
- Aumentar la resistencia a la corrosión.

A los elementos de aleación según su comportamiento los podemos agrupar en:

Grupo1 Elementos que se disuelven en la ferrita

Ni, Al, Si, Cu y Co se hallan ampliamente disueltos en la ferrita. Cualquier elemento disuelto en esta fase aumenta su dureza y su resistencia de acuerdo con los principios generales del endurecimiento por solución sólida.



Grupo 2 Elementos que se combinan con el carbono para formar carburos simples o complejos.

Como todos los carburos que se encuentran en los aceros son duros y frágiles, su efecto en las propiedades mecánicas a temperatura ambiente es análogo, sin importar la composición específica.

La presencia de estos elementos influye en la temperatura de endurecimiento y el tiempo necesario para obtener un calentamiento total y uniforme. Los carburos son lentos de disolver y tienden a no disolverse en la austenita, salvo que se realice un tratamiento de solubilizado a altas temperaturas, esto hace que disminuyan los contenidos de carbono y aleantes en la austenita a una cantidad por debajo de la que tiene el acero en general.

Los carburos no disueltos actúan reduciendo el tamaño de grano, este efecto combinado con el anterior tienden a reducir la templabilidad .

Desde un punto de vista técnico probablemente hay alguna solubilidad de todos los elementos en la ferrita, por ejemplo en ausencia de carbono se encuentra disueltos en la ferrita grandes proporciones de elementos del grupo 2, luego la tendencia a formar carburos es obvia sólo cuando hay gran cantidad de carbono.

Esta tabla muestra la tendencia relativa de ciertos elementos de aleación a existir en ambos grupos por el tamaño de la punta de la flecha.

ELEMENTO DE ALEACION	GRUPO 1 DISUELTO EN FERRITA	GRUPO 2 COMBINADO EN CARBUROS
Niquel	Ni	
Silicio	Si	
Aluminio	Al	
Cobre	Cu	
Manganeso	Mn	Mn
Cromo	Cr	Cr
Tungsteno	W	W
Molibdano	Mo	Mo
Vanadio	V	V
Titanio	Ti	Ti

Grupo 3 otros elementos

Elementos con efecto grafitizante:

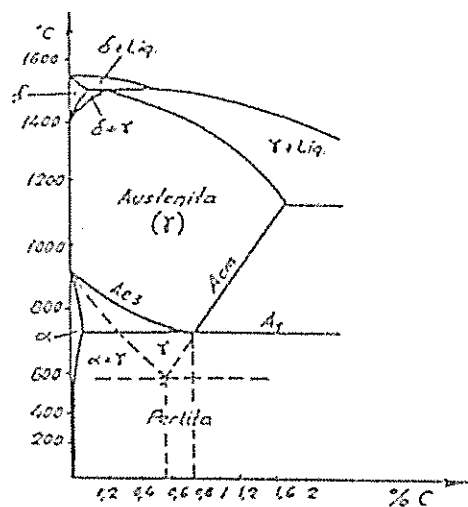
Favorecen la descomposición del carburo de hierro. Algunos elementos son Si, Co, Al y Ni. El efecto de estos aleantes junto con altas temperaturas y prolongado en el tiempo puede producirse el llamado fenómeno de grafitización o descomposición de cementita en grafito y hierro, lo cual supone una pérdida notable de las características resistentes del acero.

Elementos alfégenos y ganmágenos

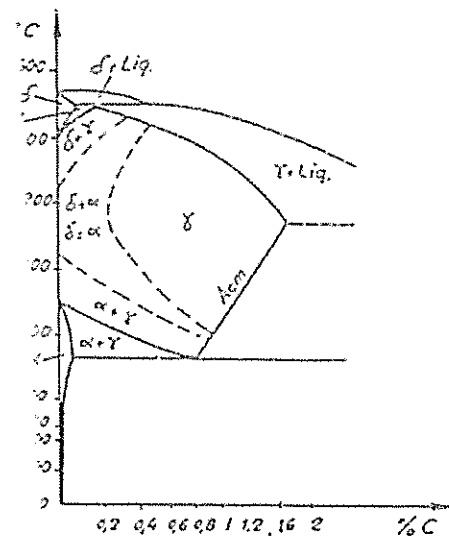
Los elementos alfégenos incrementan o estabilizan el campo de existencia de la ferrita Cr, Mo, Si, Al, V, Ti, Nb, W, Zr, Be, S, P.

Los elementos ganmágenos actúan estabilizando la austenita, estos son Ni, Mn, Cu, Co y Zn. Por la acción de estos últimos es posible obtener a temperatura ambiente austenita perfectamente estabilizada en aceros tales como los inoxidables austeníticos y los aceros al Mn tipo Hadfield.

La acción de ambos grupos de elementos son interdependientes entre sí, siendo sus acciones favorecedoras de uno de los microconstituyentes y actuando en detrimento del otro.



Alfégenos



Ganmágenos

Elementos insolubles

A este grupo pertenecen los elementos de mayor radio atómico como el Pb, Mg y Ca, que no ejercen, por su insolubilidad, acción alguna en el sentido anteriormente citado.

4. CLASIFICACIÓN DE ACEROS

Existe una multiplicidad de criterios que sirvan para hacer una clasificación de los aceros. Los diversos criterios más conocidos son:

Su contenido en C, por su posición respecto al eutectoide, en función de su utilización, etc.

En función del porcentaje en carbono:

Hipoeutectoides, con $<0.8\%C$ con ferrita +perlita

Eutectoide, con $0.8\%C$ con perlita

Hipereutectoide, con $>0.8\%C$ con perlita + cementita

A medida que aumenta el $\%C$ aumenta la dureza del acero

En función de la microestructura presente:

Perlíticos: presentan en cantidades elevadas perlita y son susceptibles de ser tratados termicamente

martensíticos: también llamados de autotemple, con estructura martensítica con porcentajes medios de aleación.

Austeníticos: llevan altos porcentajes de aleación que estabilizan la austenita. No son susceptibles de tratamientos térmicos.

ferríticos: contienen elevados porcentajes de ferrita y contienen elementos de aleación en grandes cantidades.

Ledeburíticos: aceros con altos porcentajes de elementos de aleación. Son aceros que se comportan como fundiciones.

En función de la composición:

Aceros al carbono, contienen como elementos mayoritarios el Fe y C, los demás están a nivel de trazas.

A su vez en función de contenido en carbono se clasifican en

Aceros extrasuaves, 0.1-0.2%C

Aceros suaves, 0.2-0.3%C

Aceros semisuaves, 0.3-0.4%C

Aceros semiduros, 0.4-0.5%C

Aceros duros, 0.5-0.6%C

Acero Extraduros, 0.6-0.8%C

Aceros aleados, además del Fe y C, contiene cantidades relativas de otros elementos sobrepasando los porcentajes de la tabla .

Dentro de estos aceros tenemos:

De baja aleación, <5%

De alta aleación, >5%

% límite para clasificación de aceros	
ELEMENTOS	%
Aluminio	0,1
Bismuto	0,1
Boro	0,0008
Circonio	0,1
Cobalto	0,1
Cobre	0,4
Cromo	0,3
Manganeso	1,6
Molibdeno	0,08
Niobio	0,05
Niquel	0,3
Plomo	0,4
Selenio	0,1
Silicio	0,5
Telurio	0,1
Titanio	0,05
Vanadio	0,1
Wolframio	0,1
Lantánidos	0,05
Otros (excepto C, P, N y O)	0,05

En función de las propiedades de utilización: UNE 36-004-78

Aceros de base: Se trata de aceros no aleados que se fabrican en general en convertidores L.D y que no tienen una composición muy precisa, además de contener muchas impurezas. No se garantiza aptitud para tratamientos térmicos. También se denominan aceros comunes. (F-6000 y F-7000)

Aceros de calidad: Se incluyen aceros aleados y no aleados. Dentro de los aceros al carbono son aquellos que no son de base ni especiales. (F-6000)

Aceros especiales: Son aceros para tratamientos térmicos y es mediante este proceso en el que se obtienen las características mecánicas requeridas. La composición química está controlada. (F-1000, F-2000, F-3000 y F- 5000).

Mediante designación numérica y simbólica: UNE 36-009

La norma UNE 36009 es una norma de clasificación de aceros donde se incluyen designaciones numérica y simbólica. La designación numérica que esta norma aplica sigue en su mayor parte la tabla de tipificación del CENIM que ordena los aceros atendiendo a su aplicación, de amplio uso en España. A cada material metalúrgico se le asigna una letra y tres dígitos. La norma UNE conserva dicha designación numérica pero para incluir nuevos tipos de aceros ya normalizados en otros países se hacía necesario una nueva reestructuración y un nuevo sistema de designación con cuatro cifras.

Así, los aceros se designan con la letra F seguida de cuatro dígitos. De estas cifras, y a efectos de clasificación, sólo son significativas las dos primeras.

La primera cifra indica grandes grupos de aceros, reservándose las cifras 1, 2, 3, 4 y 5 para los aceros especiales. Las cifras 6 y 7 se reservan para los aceros de base y de calidad, y la cifra 8 para los aceros de moldeo.

La segunda cifra designa subgrupos afines dentro de cada grupo

La tercera y cuarta cifra sólo tienen como misión diferenciar un tipo de acero del otro, aplicándose a medida que van siendo normalizados los aceros y en orden cronológico.

SERIE F-1000 ACEROS FINOS DE CONSTRUCCIÓN

GRUPO F-1100 ACEROS AL CARBONO (para construcción de piezas que no exijan elevadas características, son aceros de temple y revenido)

GRUPO F-1200 Y F-1300 ACEROS ALEADOS DE GRAN RESISTENCIA (para piezas que exijan elevadas características, son aceros de temple y revenido)

GRUPO F-1400 ACEROS DE GRAN ELASTICIDAD (para muelles y ballestas)

GRUPO F-1500 Y F-1600 ACEROS PARA CEMENTAR

GRUPO F-1700 ACEROS PARA NITRURAR

SERIE F-2000 ACEROS PARA USOS ESPECIALES

GRUPO F-2100 ACEROS PARA FÁCIL MECANIZADO

GRUPO F-2200 ACEROS DE FÁCIL SOLDADURA

GRUPO F-2300 ACEROS CON PROPIEDADES MAGNÉTICAS ESPECIALES

GRUPO F-2400 ACEROS DE ALTA Y BAJA DILATACIÓN

GRUPO F-2500 ACEROS RESISTENTES A LA FLUENCIA

SERIE F-3000 ACEROS RESISTENTES A LA CORROSIÓN Y OXIDACIÓN

GRUPO F-3100 ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS

GRUPO F-3200 ACEROS PARA VÁLVULAS DE MOTORES DE EXPLOSIÓN

GRUPO F-3300 ACEROS REFRACTARIOS

GRUPO F-3400 ACEROS INOXIDABLES MARTENSÍTICOS

GRUPO F-3500 ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS Y AUSTENOFERRÍTICOS.

SERIE F-4000 ACEROS DE EMERGENCIA (CLASIFICACIÓN EN DESUSO. INCLUYEN F-1000 Y F-2000)

SERIE F-5000 ACEROS DE HERRAMIENTAS

GRUPO F-5100 ACEROS AL CARBONO PARA TRABAJO EN FRÍO

GRUPO F-5200 ACEROS ALEADOS PARA HERRAMIENTAS ESPECIALES PARA TRABAJO EN FRÍO

GRUPO F-5300 ACEROS ALEADOS PARA HERRAMIENTAS ESPECIALES PARA TRABAJO EN CALIENTE

GRUPO F-5400 ACEROS ALEADOS PARA HERRAMIENTAS INDEFORMABLES

GRUPO F-5500 ACEROS RÁPIDOS

SERIE F-6000 ACEROS COMUNES (Aceros de base y de calidad)

GRUPO F-6100 ACEROS BESSEMER

GRUPO F-6200 ACEROS SIEMENS

GRUPO F-6300 Y F-6400 ACEROS PARA USOS ESPECIALES

SERIE F-7000 ACEROS AL CARBONO DE BASE

SERIE F-8000 ACEROS DE MOLDEO

ACEROS PARA MUELLES

Caracterizado para piezas que trabajan elásticamente absorbiendo esfuerzos y almacenando energía durante ciertos periodos de tiempo para después devolverla.

El fundamento del funcionamiento de los muelles se basa en la capacidad que presentan ciertos aceros de sufrir importantes deformaciones elásticas.

Principales características:

Elevados límites elásticos: 90-180 Kg/mm²

Resistencia mecánica: 100-240 Kg/mm² (típica 150 Kg/mm²)

Grandes resistencias a la fatiga

Que no sufran descarburaciones en los tratamientos térmicos y trabajos en caliente.

Exentos de cualquier defecto o grieta superficial causante de roturas de los muelles en servicio.

Composición:

Los aceros al carbono se suelen emplear para la fabricación de muelles construidos con varillas o alambres de poco espesor.

Para varillas o llantas de espesores mayores de 10mm es difícil conseguir un buen temple con los aceros al carbono corrientes debido a su baja templabilidad para resolver esa dificultad se ha consagrado desde hace muchísimos años los aceros para muelles clásicos, los aceros manganeso-silicio. La presencia de manganeso sirve para aumentar la templabilidad y el silicio además también de mejorar la templabilidad mejora el límite elástico y la resistencia a la fatiga. (0,40-0,50 %C temple en agua, 0,50-0,60 %C temple en aceite)

Para evitar el peligro de grietas, deformaciones o temples imperfectos se emplean numerosos tipos de aceros al manganeso, cromo-manganeso, cromo-silicio, cromo-vanadio que presentan mayor aptitud al temple y además tienen como gran ventaja frente a los aceros manganeso-silicio que sufren pocas descarburaciones en los tratamientos térmicos.

CAP. VI. ACEROS PARA MUELLES

Composición en %						
P < 0,030			S < 0,030			
N.º	C	Mn	Si	Cr.	V	W
Aceros al carbono						
1	0,45-0,60	0,60-0,80	0,20-0,30	—	—	—
2	0,60-0,80	0,60-0,80	0,20-0,30	—	—	—
3	0,80-1,00	0,50-0,70	0,20-0,30	—	—	—
Mangano-siliciosos						
4	0,42-0,52	0,60-0,90	1,70-2,00	—	—	—
5	0,50-0,60	0,70-1,00	1,70-2,00	—	—	—
Al manganeso						
6	0,50-0,70	0,80-1,20	—	—	—	—
Cromo-manganeso						
7	0,40-0,50	0,60-0,80	—	0,90-1,10	—	—
8	0,45-0,55	0,60-0,80	—	0,90-1,10	—	—
Cromo-silicio						
9	0,40-0,60	0,50	0,90-1,10	0,90-1,10	—	—
Cromo-manganeso-vanadio						
10	0,45	0,60-0,80	—	0,90-1,10	0,20	—
11	0,55	0,60-0,80	—	0,90-1,10	0,20	—
Para muelles que trabajan en caliente						
12	0,50	0,30	0,30	1,50	0,30	2,00
13	0,60	0,90	1,95	—	0,35	Mo 0,50
14	0,55	1,15	1,95	—	0,35	Mo 1,30

Tratamientos térmicos:

Recocido: tiene por objeto ablandar el acero, quitarle tensiones que se han originado en la laminación y trefilado y hacer posible el enrollado. Debe evitarse en los aceros manganeso-silicio la descarburación (debido a que lo hacen con mayor facilidad que los demás), ya que en las zonas descarburadas se inician fácilmente grietas de fatiga durante el trabajo del muelle. Se suele realizar a temperaturas comprendidas entre los 750-800° C y luego se enfría lentamente hasta los 600 ° C

Temple: Se realiza a temperaturas variables entre los 800 y 900 ° C. Se evitará que se prolongue demasiado el calentamiento para evitar la descarburación y el aumento del crecimiento de grano que puede originar fragilidad. El enfriamiento se hará rápidamente en agua o aceite, según el tipo de acero, la mejor forma de saberlo es estudiar las curvas Jominy.

Revenido: se suele efectuar a temperaturas variables desde los 200 a 500 ° C, según el proceso de fabricación y luego se enfría al aire.

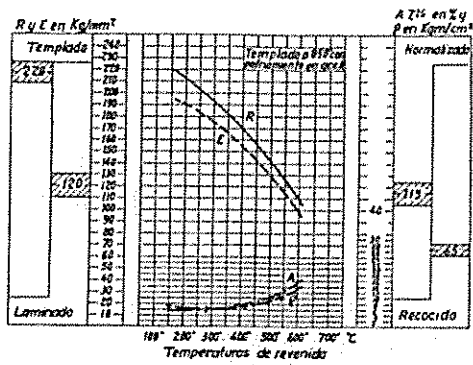


Diagrama de revenido de un acero Mn-Si para muelles

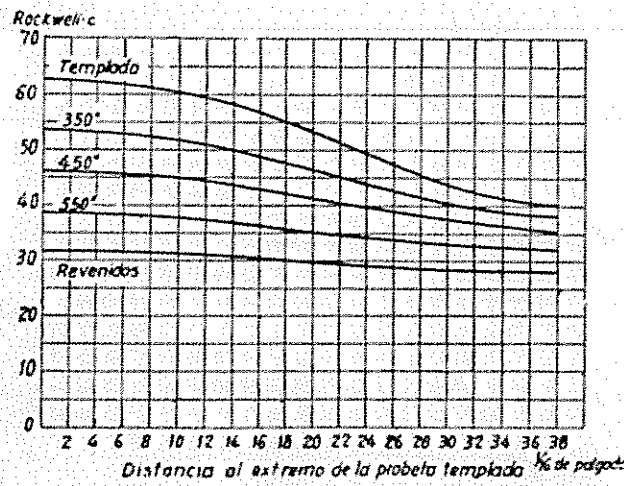
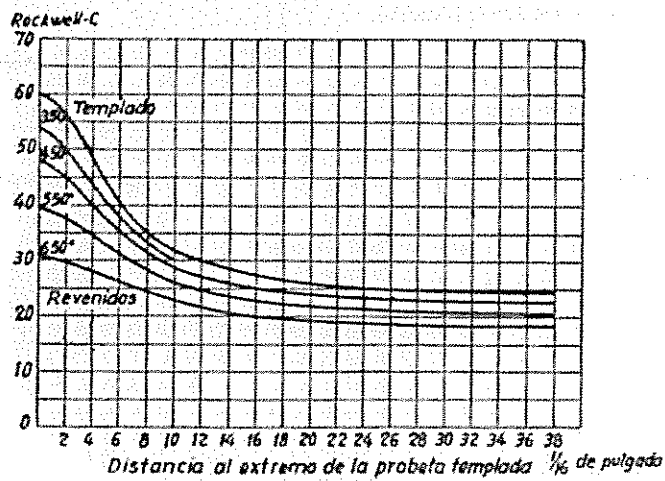


FIGURA 86
Curva Jominy de un acero cromo-manganeso.



Curvas jominy de un acero Cr-Mn y Mn-Si

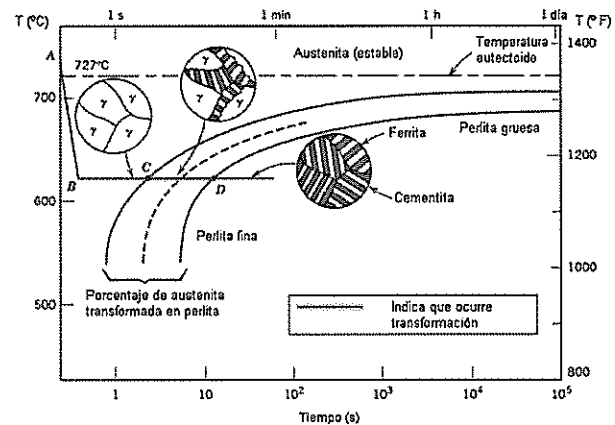
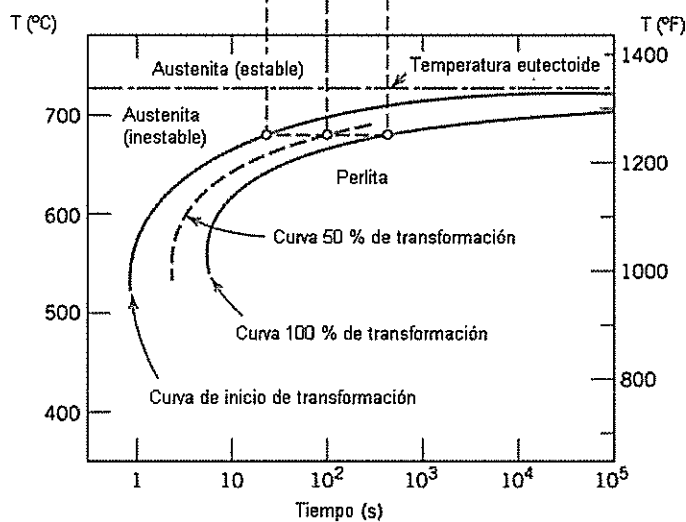
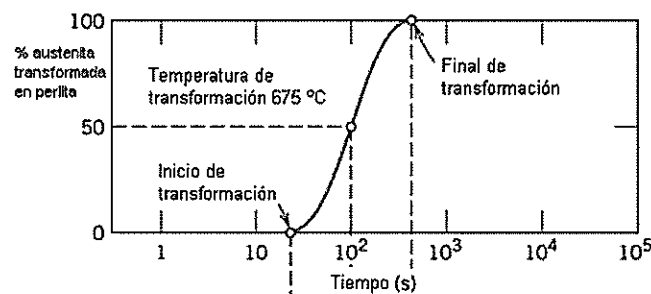
5. TRATAMIENTOS TÉRMICOS Y TERMOQUÍMICOS DE LOS ACEROS

CURVAS TEMPERATURA, TIEMPO Y TRANSFORMACIÓN

Son diagramas de transformación isotérmica de la austenita y nos indica el tiempo necesario para que se inicie y complete a temperatura constante la transformación de la austenita en otros microconstituyentes.

Debido a la forma característica que toman las respectivas líneas del diagrama, parecida a la letra S, los diagramas T.T.T, reciben el nombre de curvas de las "S".

Existen para una composición y un tamaño de grano dados



En la figura se puede apreciar como a una temperatura de 675°C se indica el tiempo para que comience la transformación, el tiempo para que ocurra una transformación del 50% y para el fin de la transformación.

Vamos a proceder al estudio del enfriamiento de un acero eutectoide, desde una temperatura $A_3+50^\circ\text{C}$, hasta la temperatura ordinaria.

1° se enfría rápidamente hasta una temperatura $T_1 < A_1$

2° se mantiene un tiempo t_1

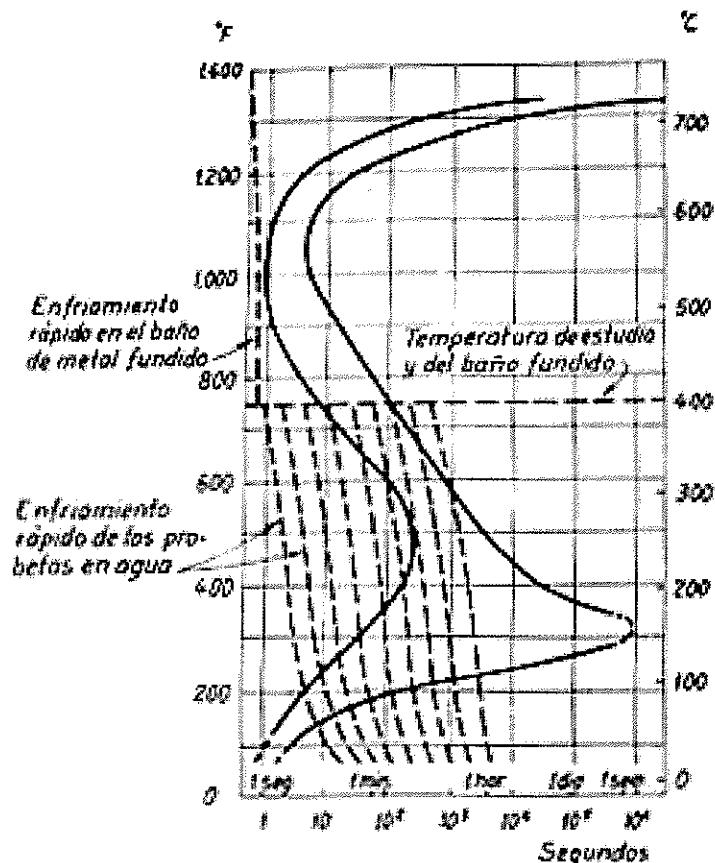
3° enfriamiento rápido hasta temperatura ambiente

4° observación microestructural

Todo aquella microestructura que a temperatura T_1 está como austenita se transforma en el enfriamiento rápido en martensita, luego si hay 100% martensita quiere decir que a T_1 y t_1 había 100% austenita.

Este procedimiento se realiza para la temperatura T_1 a tiempos diferentes hasta que en un tiempo t_x toda la microestructura después de enfriar rápidamente sea diferente a martensita ya que eso nos indicará que a T_1 y tiempo t_x la austenita se ha transformado totalmente.

Esto mismo se realizará para distintas temperaturas desde la temperatura crítica superior hasta temperatura ambiente.



Los resultados obtenidos se llevan a un diagrama temperatura-tiempo y se indica el tiempo de inicio y fin de transformación para cada temperatura. Luego se unen todos los tiempos de inicio y de fin y se consiguen las curvas de las "S".

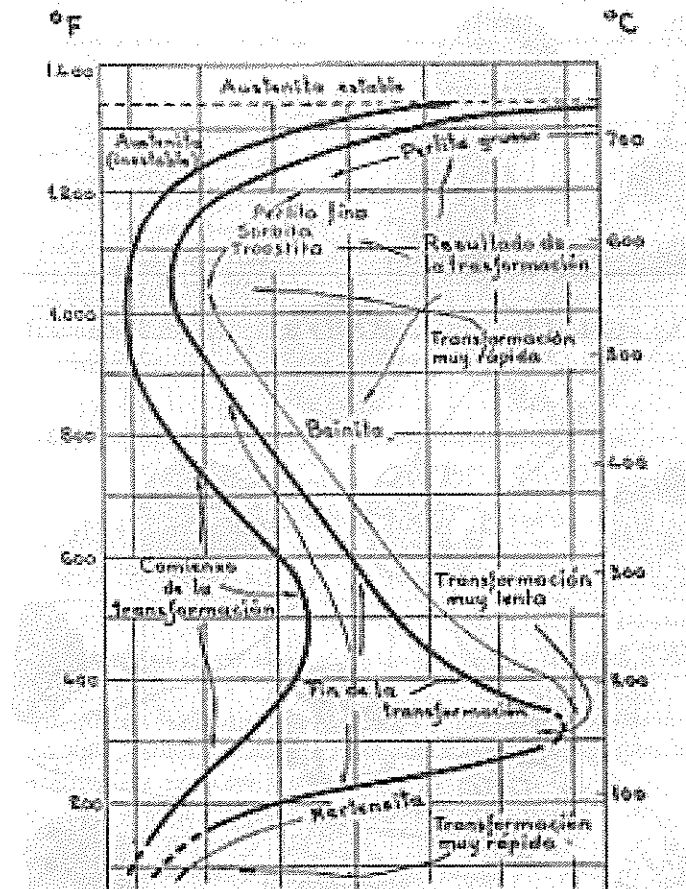


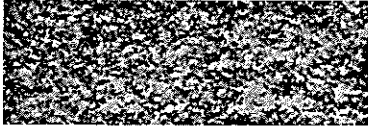
Diagrama TTT para un acero eutectoide, en los aceros hipoeutectoides e hipereutectoides aparece la transformación de austenita a microconstituyentes proeutectoides a altas temperaturas.

Microconstituyentes fuera del equilibrio:

Perlita comentada en apartados anteriores

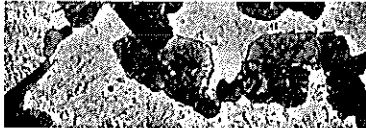
Sorbita: se obtiene por enfriamiento continuo o por transformación isotérmica de la austenita en la zona de 650 a 600 ° C

$$R_m = 88 \div 140 \text{ kg/mm}^2; 250 \div 400 \text{ HB}; A = 10 \div 20 \%$$



Trostita: se obtiene por enfriamiento continuo o por transformación isotérmica de la austenita en la zona de 600 a 500 ° C

$$R_m = 140 \div 175 \text{ kg/mm}^2; 400 \div 500 \text{ HB}; A = 5 \div 10 \%$$



Bainita: se obtiene por transformación isotérmica de la austenita en la zona de 500 a 225 °C. Hay dos tipos:

Superior: aspecto arborescente, formada a 500 ÷ 450 ° C

Inferior: aspecto acicular, formada a 450 ÷ 225 ° C



Martensita: se obtiene por enfriamiento rápido de los aceros desde alta temperatura (constituyente típico de los aceros templados)

Sus propiedades varían con su composición, aumentado su dureza, resistencia y fragilidad con el contenido en carbono:

$$R_m = 170 \div 250 \text{ kg/mm}^2; 50 \div 68 \text{ HRC}; A = 0,5 \div 2,5 \%$$

Aspecto acicular (agujas en zigzag, con ángulos de 60°)

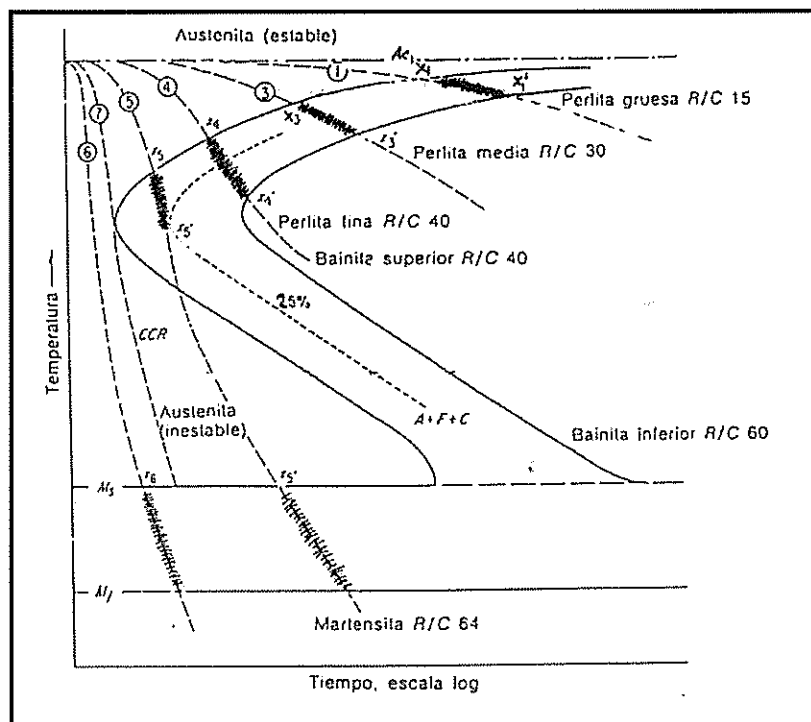
Cristaliza en el sistema tetragonal

La transformación de austenita en martensita depende exclusivamente de la temperatura, las líneas de las curvas TTT que marcan el avance de la formación de martensita son horizontales.



Estos diagramas como ya se ha comentado anteriormente indican el tiempo necesario para que se inicie y concluya la transformación de la austenita, además de indicarnos la microestructura a la que se transforma en cada temperatura. Pero lo que realmente nos interesa no son las transformaciones que ocurren a temperatura constante, sino aquellas que tienen lugar en un enfriamiento continuo desde el estado de austenización, ya que mediante este enfriamiento se fundamenta los tratamientos más importantes de los aceros.

Para los enfriamientos continuos se emplean las curvas de enfriamiento superpuestas a las curvas de las "S", debido a que presentan las mismas coordenadas. Los puntos de corte de las curvas de enfriamiento con las líneas del diagrama TTT nos marcan el tiempo en que comienza y acaba la transformación, además las microestructuras que aparecen serán aquellas por las que atraviesa la curva de enfriamiento.



Las zonas oscuras de las líneas muestran las transformaciones.

La curva 7 indica la velocidad crítica de temple, que es la mínima velocidad a la que hay que enfriar para obtener martensita 100%. Cuanto más pequeño sea su valor mejor aptitud tendrá el acero para ser templado. Los aceros al carbono ordinarios tienen velocidades críticas de temple elevadas, por lo tanto para lograr una correcta transformación hay que conjugar adecuadamente una serie de factores. Por el contrario hay determinados aceros aleados que poseen velocidades críticas de temple tan

reducidas que con un simple enfriamiento al aire es suficiente para que su estructura adquiera la configuración característica del temple (aceros de autotemple)

Sobre la velocidad crítica de temple influyen ciertos factores, que serán aquellos que influyan también sobre las curvas de la "S". Todos aquellos factores que desplacen las curvas de las "S" hacia la derecha reducirán la velocidad crítica de temple y mejorará por tanto la capacidad de ser templado el acero.

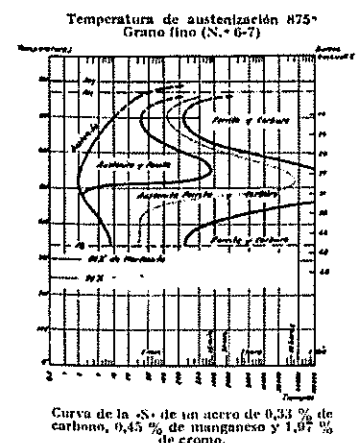
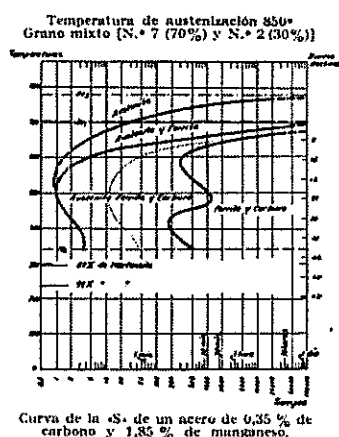
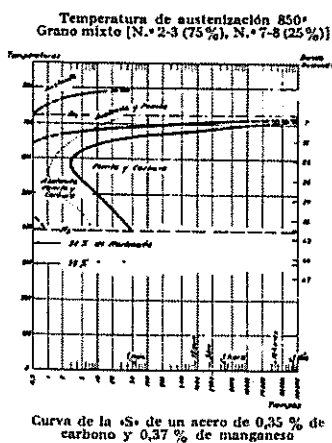
Factores que influyen en las curvas de las "S":

Composición: la adición de elementos de aleación tiende a retardar las transformaciones:

- Elementos que forman carburos (Cr, Mo): actúan más intensamente en las regiones perlíticas que en las bainíticas formándose dos narices
- Elementos que forman solución sólida con la austenita (Mn): retrasan todas las transformaciones
- En la transformación martensítica se modifica el punto Ms en función de los elementos de aleación

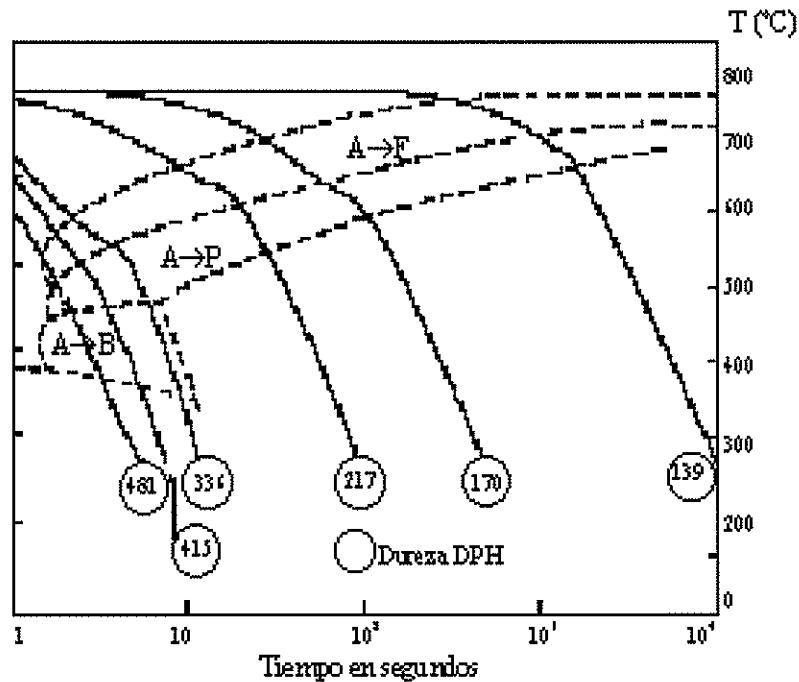
$$M_s = 500 - 350(\%C) - 40(\%Mn) - 35(\%V) - 20(\%Cr) - 17(\%Ni) - 10(\%Cu) - 10(\%Mo) - 5(\%W) + 15(\%Co) + 30(\%Al)$$

Tamaño de grano: al aumentar se retrasa el inicio y fin de las transformaciones



Influencia de la composición

Ejemplo:



Para enfriamiento muy lento, DPH 139, la microestructura se caracteriza por perlita gruesa y grandes regiones de ferrita.

Para un enfriamiento no tan lento, DPH 170, la estructura es ferrítica y perlítica, siendo ambas finas.

Para DPH 217, hay muy poca ferrita en los primitivos bordes de grano de la austenita, si bien se observa algo de ferrita Widmanstätten, la mayor proporción es perlita.

Para DPH 336, a diferencia de la fotografías precedentes, en esta se observa, por primera vez, una cantidad apreciable de martensita en el centro de los granos. Por tanto hay una mezcla de ferrita, bainita, (que corresponde a la fase gris acicular), perlita y, por supuesto, martensita.

Para DPH 415, la fase oscura y redondeada en los bordes de grano es perlita, observándose además, martensita en el centro de los granos y ferrita Widmanstätten o bainita superior en los bordes.

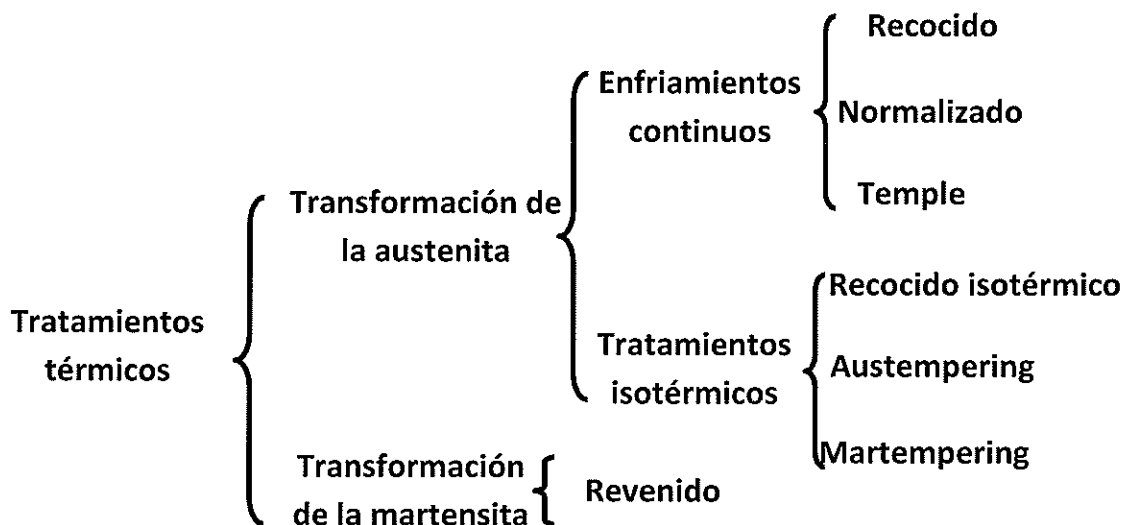
Para enfriamiento muy rápido, DPH 481, hay un poco de perlita y bainita que crecen en los bordes de grano como una fina banda, si bien, la mayoría

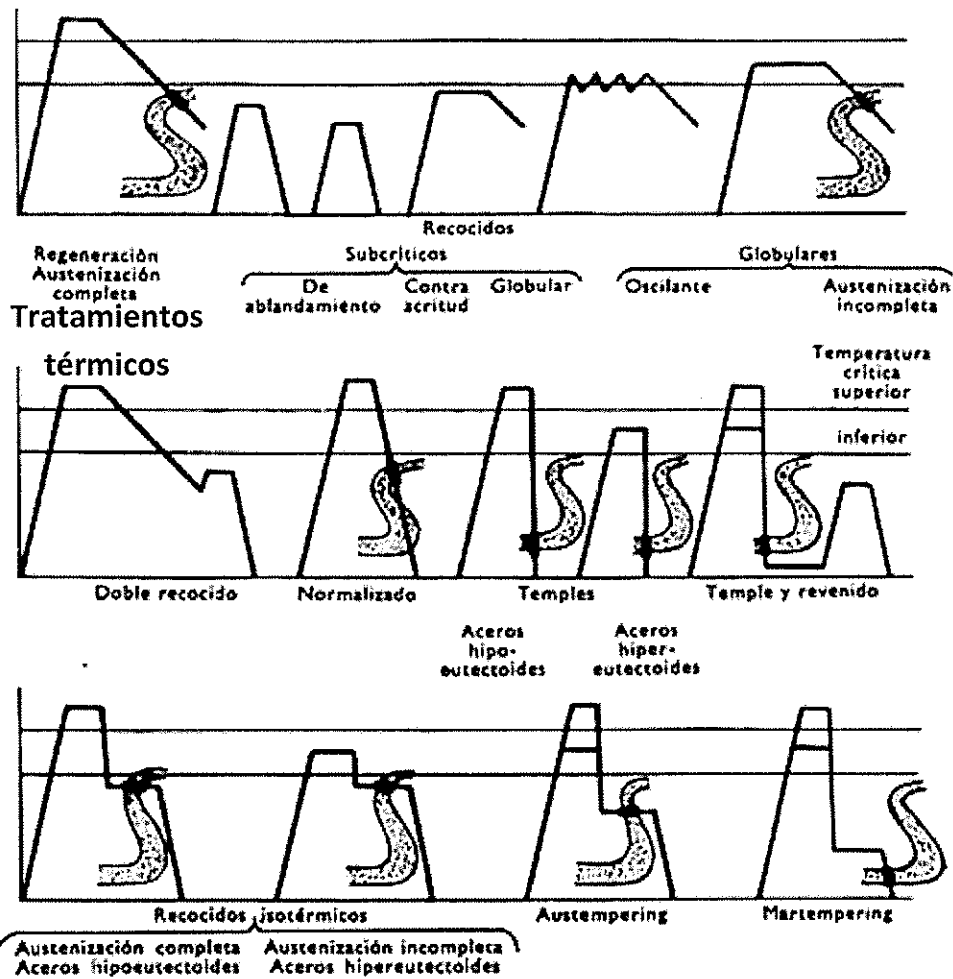
TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Los tratamientos térmicos a que son sometidos los aceros tienen por finalidad mejorar sus propiedades y características por efecto de la modificación de la estructura microscópica de los mismos. Los referidos tratamientos consisten fundamentalmente, en un calentamiento del acero hasta una temperatura prefijada, mantenimiento a dicha temperatura durante un tiempo determinado que suele ser función del espesor de la pieza a tratar, para a continuación enfriar convenientemente en un medio que será en función del tipo de tratamiento escogido según que propiedades y características se deseen obtener.

Los factores a fijar en un tratamiento térmico son: tiempo, temperatura y velocidad de enfriamiento

Podemos en principio establecer un cuadro con los diferentes tipos de tratamientos térmicos:





RECOCIDO

El objeto principal de este tipo de tratamientos es “ablandar” el acero. Otras veces se intenta regenerar su estructura, o bien, eliminar tensiones internas.

El trabajo en frío de los aceros deforma la estructura cristalina, llegando, incluso, a destruir. Un ejemplo de este tipo de trabajo, sería la laminación o estampación, pudiéndose provocar en el acero una capa superficial amorfa (metal “agriado”). Este hecho provoca un gran aumento de la fragilidad imposibilitando en muchos casos la continuación del trabajo del acero. Otras veces, un lingote de acero está lejos de presentar una composición química uniforme en el conjunto de su masa, existiendo una gran heterogeneidad en cuanto a la composición del núcleo y de la periferia del lingote, lo que le hace no apto para proseguir un trabajo con un material en estas condiciones. En otros casos hay que conseguir una estructura globular, lo que traerá consigo una disminución de la dureza del material, posibilitándolo para un mecanizado más fácil.

Pues bien este tratamiento se efectúa para conseguir un acero libre de defectos anteriores, y apto, por una parte, para poder ser mecanizado, y por otra, para obtener una microestructura correcta.

Procedimiento:

1° Calentamiento lento hasta la temperatura de tratamiento

2° Permanencia del material a la temperatura antes mencionada, durante un tiempo prudencial (1 hora por 25mm de espesor).

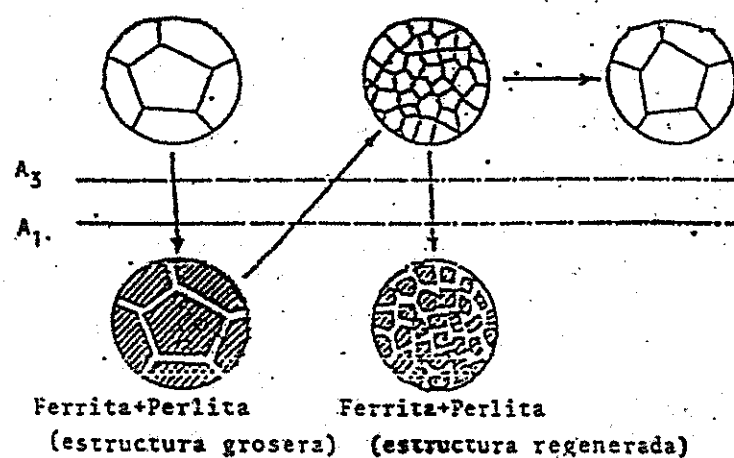
3° Enfriamiento lo más lento posible hasta la temperatura ambiente.

En función del estado estructural en que queremos dejar el acero para una posterior fase de mecanizado, podemos clasificar este tipo de tratamiento en:

Recocidos de austenización completa

Recocido de homogenización: se efectúa con el fin de eliminar la heterogeneidad en la composición del acero. Debemos calentar lentamente hasta la temperatura lo más alta posible ($A_3 + 200^\circ\text{C}$), después de un tiempo de permanencia enfriar muy lentamente hasta la temperatura ambiente, en el horno. Debido a las elevadas temperaturas ha crecido de modo excesivo el tamaño de grano.

Recocido de regeneración: se realiza para eliminar el estado de sobrecalentamiento originado en el tratamiento anterior. Consiste en calentar el acero a temperatura $A_3 + 70^\circ\text{C}$, así la estructura se regenera obteniendo un tamaño de grano de la austenita normal. El enfriamiento desde la temperatura de austenización hasta la temperatura ambiente será lento.



Recocido de recristalización: se realiza sobre aceros que han sido trabajados en frío (a temperatura inferior a A_1). Similar al recocido de regeneración, siendo su temperatura de calentamiento $A_3 + 75^\circ \text{C}$, para enfriar a continuación muy lentamente quedando el acero sin acritud. Si el acero es un acero hipereutectoide la temperatura a la que se debe calentar será $A_{cm} + 75^\circ \text{C}$. La perlita, al igual que la cementita y carburos serán de forma globular, por ello a este último caso se suele llamar recocido de globalización.

Recocidos subcríticos

Son aquellos cuya temperatura de calentamiento y permanencia está por debajo de la línea correspondiente a la temperatura crítica inferior. El enfriamiento debe ser lo más lentamente posible, a ser preferible en el horno.

Recocido subcrítico de ablandamiento: calentar por debajo de A_1 y enfriar al aire. Ablanda el acero haciéndolo más apto para posteriores procesos de mecanizado.

Recocido subcrítico contra acritud: tiene por objeto aumentar la ductilidad de los aceros con poco contenido en carbono (menos del 0,40%) estirados en frío. Consiste en calentar por debajo de A_1 ($550-650^\circ \text{C}$) seguido de un enfriamiento al aire. Es el tratamiento de recocido que se hace a menor temperatura de calentamiento. De este modo desaparece la cristalización alargada de la ferrita apareciendo cristales poliédricos más dúctiles que los primitivos.

Recocido subcrítico globular: Utilizado para obtener estructura globular de muy baja dureza. El acero se calienta muy próximo a A_1 y se enfría en el horno. Se realiza para aceros con más del 0,50% en carbono y con altos contenidos en elementos de aleación.

Recocidos Globulares

También llamados de austenización incompleta ya que su temperatura de calentamiento y permanencia se suele situar entre A_1 y A_3 . Se suele dar a aceros con más del 0,50 % C para mejorar su maquinabilidad. Muy indicado para los aceros hipereutectoides, consiguiendo de esta manera que la cementita y los carburos formen glóbulos, siendo esta la manera de que estos aceros rebajen dureza antes de ser mecanizados.

Les hay de dos tipos:

Recocidos globulares oscilantes: llamados así porque la temperatura de calentamiento se efectúa según un ciclo oscilante por encima y por debajo de A_1 . Se enfría lentamente en el horno.

Recocido globular de austenización incompleta: Similar al de austenización completa salvo que la temperatura de tratamiento se encuentra entre A_1 y A_3 .

Doble Recocido

Se utiliza cuando se quieren conseguir durezas muy bajas. Consiste en un primer recocido de austenización completa, seguido de un enfriamiento en el horno. A continuación se efectúa un segundo recocido subcrítico, enfriando al aire.

Recocidos Isotérmicos

Tratamientos para ablandar el acero y pueden considerarse como casos particulares de los recocidos de austenización completa o incompleta según se trate de un acero hipo o hipereutectoide respectivamente.

Consiste calentar por encima de A_3 para aceros hipoeutectoide y por encima de A_1 para aceros hipereutectoide seguido de un enfriamiento más o menos rápido hasta una temperatura inferior a A_1 (600-700°C), manteniendo el material durante el tiempo necesario para que se inicie y complete la transformación a la nueva microestructura (para aceros hipoeutectoide ferrita y perlita, y en los aceros hipereutectoide cementita globular y perlita), y posterior enfriamiento al aire.

NORMALIZADO

Consiste en calentamientos a temperaturas ligeramente más elevadas que la temperatura crítica superior, y siempre superior a los recocidos de austenización completa, exceptuando el de homogenización, siguiendo un enfriamiento al aire tranquilo. De esta manera se deja al acero con una estructura y propiedades que, arbitrariamente, se consideran como normales y características de su composición. Se utiliza para piezas que han sufrido trabajos en caliente, trabajos en frío, enfriamientos irregulares o sobrecalentamientos. Sirven también para destruir los efectos de un tratamiento anterior defectuoso. Por medio del normalizado, se eliminan las tensiones internas y se uniformiza el tamaño de grano.

TEMPLE

Tiene por objeto endurecer y aumentar la resistencia de los aceros. Para ello, se calienta, en general, a temperaturas ligeramente superior a la temperatura crítica superior A_3 para aceros hipoeutectoides, para aceros hipereutectoides basta con calentar a temperaturas entre A_{cm} y A_1 y se enfría rápidamente en un medio apropiado (agua, aceite, sales..etc) para obtener microestructura martensítica.

En los aceros templados, es necesario que la totalidad de la estructura sea martensítica (salvo para aceros hipereutectoides que se permite que se encuentre la cementita), por lo que ésta será la meta a conseguir, mediante el enérgico enfriamiento.

Debido a este enfriamiento tan brusco se pueden originar en el acero diferentes defectos como roturas y deformaciones que imposibilitan al material para su uso posterior. Para evitar estos defectos se aconseja enfriar a velocidades más lenta o utilizar medios menos severos como podría ser el aire. Para ello interesa que la velocidad crítica de temple sea lo menor posible lo que se consigue aumentando los elementos de aleación que desplazan las curvas de la "S" hacia la derecha. Pero hay aceros en los cuales, debido a su alto contenido en carbono, así como la cantidad elevada de elementos de aleación no se consigue una transformación completa de la austenita en martensita, quedando una estructura formada por agujas de martensita y zonas claras de austenita sin transformar o residual. Para hacer posible la transformación completa se somete el acero a un tratamiento subcero donde el acero se enfría por debajo de los 0° (40 a 50° C bajo cero).

La capacidad que presenta un acero de ser templado en todo su volumen se denomina templabilidad. Depende de los elementos de aleación y del tamaño de grano. El ensayo que nos permite conocer dicha característica es el Ensayo Jominy que consiste en:

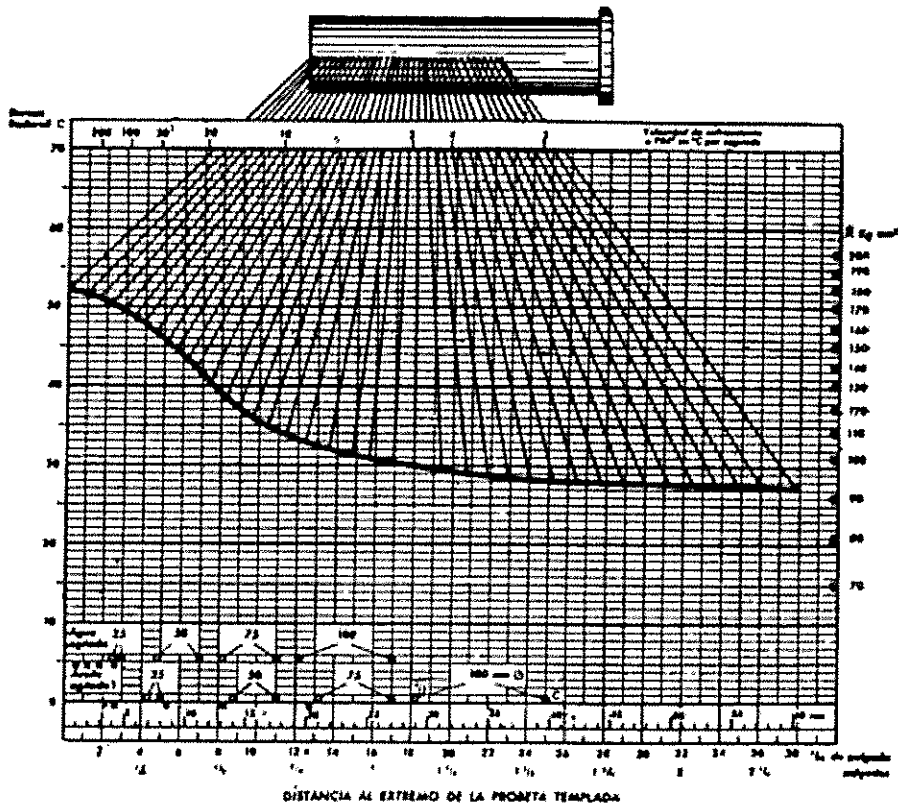
Mantenimiento de la probeta a T^a de austenización 30 min

Enfriamiento de la base inferior de la probeta con un chorro de agua (10 min)

Se planean dos generatrices a 180°

Se miden durezas en la línea central de la superficie plana cada $1/16''$.

Ordenadas durezas HRC; abscisas distancias a la base inferior



La **templabilidad** será mayor cuanto menor sea la disminución de dureza al ir aumentando la distancia a la base inferior. Y la máxima dureza se consigue en el extremo enfriado con agua, a la que se denomina capacidad de temple.

REVENIDO

Tratamiento que se fundamenta en la transformación de la martensita. Casi nunca es utilizado un acero con estructura totalmente martensítica sin revenir, ya que por sus características nos resultaría un acero con gran resistencia, pero por su elevada dureza, sería excesivamente frágil. Además debido al enérgico enfriamiento necesario para obtener estructura martensítica desde el estado de austenización, el acero queda tensionado. Para eliminar estos efectos que quedan en el temple se realiza el tratamiento térmico de revenido, luego el revenido siempre va detrás del temple. A la combinación de dichos tratamientos se denomina BONIFICADO.

El revenido consiste en calentar por debajo de la temperatura crítica A_1 (desde 200 a 600° C siempre en función de las propiedades y características a obtener) seguido de un enfriamiento al aire. En función de la dureza a conseguir en el acero, así será la temperatura de calentamiento en el revenido, debiendo de tener cuidado en no exceder los 600° C, dicha temperatura. Con este tratamiento desaparecen las tensiones del

temple y las agujas de martensita se redondean llegando a desaparecer a altas temperaturas de revenido. Otra observación a tener muy en cuenta, es la de no mantener el acero, una vez templado, mucho tiempo a la temperatura de 450-550 ° C, lo que podría producir un fenómeno denominado “fragilidad de Krupp” típica de aceros Cr-Ni y que se puede evitar añadiendo Mo (0,15-0,50%). También puede aparecer la fragilidad del revenido en la zona de 250 ° C a 400 ° C. La disminución de tenacidad se debe a la película de cementita que envuelve las agujas de martensita

Durante el proceso de revenido ocurren cambios microestructurales debidos a reacciones en estado sólido. Las más importantes son:

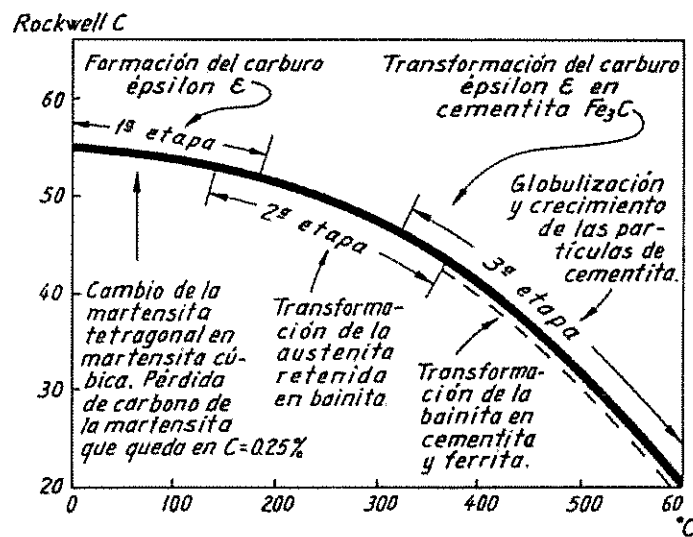
Segregación de átomos de C

Precipitación de carburos

Descomposición de la austenita retenida

Recuperación y recristalización de la matriz ferrítica

No todas estas reacciones ocurren a la misma temperatura y en el mismo período de tiempo. Muchas de ellas suceden simultáneamente, esto determina que las microestructuras resultantes sean muy complejas.



CONSIDERACIONES SOBRE EL RECOCIDO, NORMALIZADO Y TEMPLE.

1° Calentamiento

Para los recocidos de austenización completa (excepción del de homogenización), el normalizado y temple, la velocidad de calentamiento será la misma y lo más homogénea posible (100 a 150 ° C por hora) hasta pasar la zona crítica A_3 .

2° Permanencia a temperatura

El tiempo de permanencia a la temperatura debida, será el mismo en los tres tipos de tratamiento, entre media y una hora por 25mm de espesor de la pieza, distinguiendo:

Recocido: de 20 a 40 ° C por encima de A_3

Normalizado: de 50 a 70 ° C por encima de A_3

Temple: de 40 a 60 ° C por encima de A_3

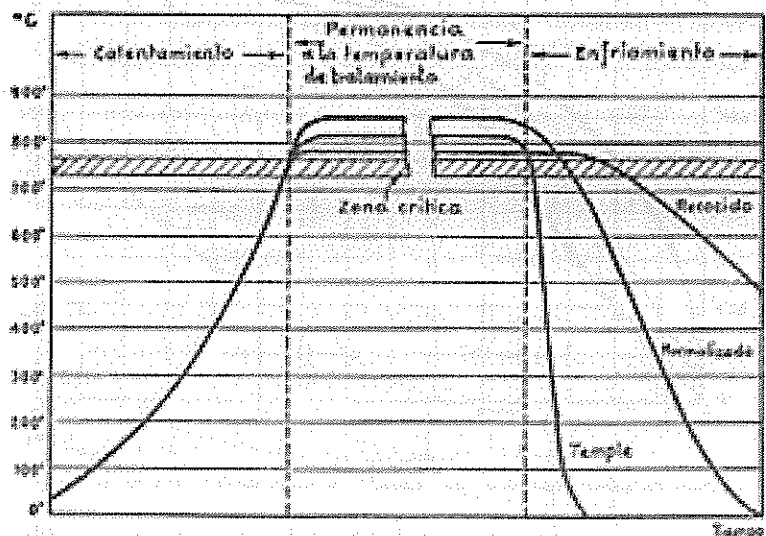
3° Enfriamiento

Esta es la fase que en realidad, nos marca la diferencia entre cada tratamiento.

Recocido: enfriamiento lo más lento posible y en atmósfera controlada, por lo menos hasta pasar A_1

Normalizado: enfriamiento en aire tranquilo hasta la temperatura ambiente.

Temple: enfriamiento lo más rápido posible, y en un medio adecuado al tipo de acero que estamos tratando. La velocidad de enfriamiento nos la dará el respectivo medio y deberá estar en consonancia con cada tipo de acero y los resultados que queramos obtener. Dicha velocidad es la velocidad crítica de temple, y debemos ajustarnos lo más posible a ella para obtener la estructura correcta.



TRATAMIENTOS ISOTÉRMICOS

Son tratamientos donde una de las etapas del proceso transcurre a temperatura constante. Ya se ha comentado alguno en tratamientos anteriores como es el recocido isotérmico, pero los más utilizados son el austempering y martempering.

Austempering

Consiste en calentar por encima de la T^a crítica. Se enfría rápidamente hasta una temperatura entre 450 °C y M_s , y se mantiene a esa T^a hasta que toda la austenita se transforma en bainita. La estructura bainítica proporciona mayor tenacidad que la correspondiente a piezas templadas y revenidas con igual dureza, además la extricción es extraordinariamente elevada para el grado de dureza del acero y la resistencia también aumenta. Las tensiones internas propias de las transformaciones son muy pequeñas, resultando una deformación mínima, y al no existir etapa martensítica, aparece prácticamente libre de las grietas microscópicas de temple, que suelen aparecer.

Sin embargo, este tratamiento tiene la limitación de que puede ser difícil de conseguir en la práctica.

Martempering

Este tratamiento se desarrolló, precisamente para evitar las grietas de temple. Se calienta por encima de la T^a crítica, se enfría hasta una T^a entre 200 y 300 °C pero superior a M_s , y se mantiene el tiempo suficiente para homogeneizar la T^a en toda la pieza pero sin que se inicie la transformación bainítica y enfriándose seguidamente en el aire. Se obtiene una estructura martensítica poco tensionada ya que el gradiente de temperatura característico del temple clásico no existe, la superficie y el núcleo terminan de enfriarse a la misma velocidad formándose martensita casi simultáneamente en toda la sección, esto es la causa de que se obtengan deformaciones mínimas.

Si conviene disminuir la dureza o modificar otras propiedades mecánicas, puede realizarse un revenido posterior que producirá los mismos efectos que el revenido clásico.

Como en el caso del austempering pueden ocurrir limitaciones, como que la curva de las “S” este próxima al eje impidiendo que se realice dicho tratamiento, ya que antes de la transformación martensítica pueden ocurrir otras debido a que la curva de enfriamiento corta la curva de las “S” a temperaturas más altas.

Este tratamiento ha encontrado aplicaciones prácticas en múltiples casos como: herramientas, rodamientos de colas, cojinetes, engranajes, troqueles...

TRATAMIENTOS TÉRMICOS SUPERFICIALES

La mayor parte de las piezas que componen las máquinas y motores, se fabrican de forma que sus propiedades mecánicas sean bastante uniforme en toda su masa. Sin embargo, en ciertos mecanismos es necesario que algunas piezas sean superficialmente muy duras, resistentes al desgaste y a la penetración, y el núcleo central muy tenaz para poder soportar los choques, flexiones, torsiones, etc. A que están sometidos

Se pueden dividir en:

Tratamientos termoquímicos: implican cambios en la composición química del acero en la capa exterior.

Temple superficial: no implica cambio en la composición química

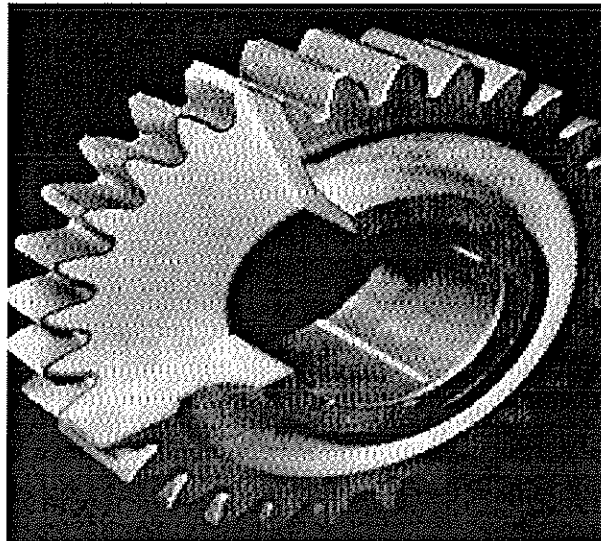
Tratamientos termoquímicos

Cementación

El más antiguo de los tratamientos termoquímicos. Consiste en aumentar el contenido en carbono en la superficie del acero, rodeándolo de un medio rico en C a alta T^a (850 °C ÷ 1000 °C). Posteriormente la pieza se temple y se reviene quedando con alta dureza superficial. Se emplean cementantes sólidos (carbón vegetal, carbonato de bario...), líquidos (cianuro sódico, cloruros y carbonatos sódicos...) o gaseosos (metano y monóxido de carbono).

Se aplica sobre aceros de 0,08 ÷ 0,25 % C.

Ejemplo de difusión de intersticiales, en el endurecimiento de un engranaje.



Nitruración

Por absorción de nitrógeno se alcanzan extraordinarias dureza (1100 a 650 Vickers) en las superficies de las piezas. En primer lugar las piezas se someten a temple y revenido. A continuación se nitruran haciendo pasar amoníaco gaseoso a 500 °C, y posteriormente el enfriamiento se hace al aire, lo que origina ausencia de deformaciones.

Sobre aceros de 0,2 ÷ 0,6 % C aleados con Al, Cr, Mo y V

Carbonitruración

Endurecimiento superficial basado en la acción del nitrógeno y del carbono. Las piezas se calientan a temperaturas entre 680-860 ° C en una atmósfera que cede C y N. Posteriormente las piezas se templean y revienen. El N absorbido reduce la velocidad crítica de temple del acero.

Los espesores de capa endurecida que se obtienen suelen oscilar entre 0,05-0,30 mm. Espesores por tanto, menores que los conseguidos por el proceso de cementación, pero recomendados para piezas de pequeños espesores y tamaños, que se fabriquen en grandes series.

Cianuración

Endurecimiento superficial de pequeñas piezas de acero. Se utilizan baños con cianuro, carbonato y cianato sódico a temperaturas de 760 a 950 °C

Sulfinización

Tiene por objeto incorporar azufre a la capa superficial de la pieza a tratar. Esta capa adquiere así y debido al azufre disuelto, bien en forma de azufre o en forma de sulfuros de bajo punto de fusión, unas propiedades lubricantes excelentes, propiedades que son las que confieren a la pieza una buena resistencia al desgaste y un coeficiente de rozamiento menor.

La sulfinización es un proceso de difusión en fase sólida, siendo la profundidad de penetración proporcional al tiempo y temperatura del tratamiento, igual que en los tratamientos anteriores.

La incorporación del azufre se realiza haciendo actuar sobre la superficie de la pieza una mezcla de sales fundidas, formadas por cianuro sódico (por lo que también se incorporará C y N, que aumentan la dureza superficial) y sulfito o hiposulfito sódico, a una temperatura ligeramente superior a 550 ° C.

Los aceros más utilizados son aceros al carbono de 0,2-0,5 %C y aleados en pequeñas proporciones al Cr-Ni en los cuales partiendo de un estado previo de normalización, la capa superficial sulfinizada aparece más homogénea.

Temple superficial

Consiste en endurecer superficialmente un acero pero sin alterar su composición química. Esto se logra en la práctica, mediante modificación estructural por calentamientos locales y selectivos, seguidos de rápidos enfriamientos de la zona afectada por el calor. En estas condiciones se consiguen unas mejoras notables en la resistencia y dureza de la superficie sin alterar el núcleo.

El calor necesario para alcanzar las temperaturas del temple se puede aportar mediante una llama dando el temple a la llama, o por medio de corrientes inducidas de alta o media frecuencia originando el temple por inducción.

Las ventajas más importantes del temple superficial son: ahorro de tiempo, posibilidad de utilizar materiales más baratos, es aplicable a piezas de grandes dimensiones, aumenta la resistencia al desgaste y disminuye las deformaciones.

6. METALOGRAFÍA

La metalografía es la técnica de laboratorio de apoyo en metalurgia. Pone de manifiesto para su análisis interpretativo, la estructura macro y/o micro de un material metálico. Aporta conocimiento suficientemente preciso de unas técnicas tecnológicas, que serán la base del comportamiento en servicio.

El laboratorio metalográfico abarca desde la extracción de la probeta de la muestra elegida hasta su observación mediante microscopía. Pero desde el inicio hasta el final hay una serie de etapas intermedias de cuya eficaz realización va a depender el resultado final obtenido.

Si la observación se realiza a bajos aumentos la técnica es micrográfica y si lo es a grandes aumentos es macrográfica.

Etapas para la preparación de la probeta metalográfica:

1º Toma de muestra. Siempre que sea posible se recomienda mantener el tamaño de la muestra (6-25mm de diámetro para redondos y de lado para sección cuadrada). La muestra debe de seleccionarse de diferentes puntos y ser fiel reflejo de la zona de material que se desea estudiar. La probeta se cortará siempre que sea posible con tronzadora metalográfica que dan cortes más limpios y eliminan menos material.

2º Empastillado. Cuando las dimensiones de la muestra nos impiden manejarlas con seguridad se recurre a insertarlas en una resina termoplástica o termoestable. El empastillado en caliente requiere prensas metalográficas que proporcionan presión y calor, y resinas en polvo. Cuando la probeta es lo suficientemente grande para entrar en la prensa o puede sufrir cambios microestructurales debido a la temperatura a la que trabaja la prensa se recurrirá a resinas líquidas, que con ayuda de un catalizador y luz UV polimerizan.

3º Desbaste. Etapa que elimina la superficie originada en el corte y que consigue que la probeta sea totalmente plana. Consiste en una serie de etapas de desbaste donde se hace pasar la probeta por distintos papeles de esmeril de granulometría cada vez mayor. Sabremos cuando hemos concluido con una etapa de desbaste cuando no quedan líneas originadas de la etapa anterior. Igual que en el corte, se precisa refrigeración en el proceso para evitar el calentamiento de la muestra. Para evitar contaminar las lijas se

exige buena limpieza, limpiando la probeta con agua antes de ser sometida a una nueva etapa de desbaste.

4° Pulido. Después de esta etapa (se lleva a cabo en 2 o 3 pasos) la probeta estará libre de rayas y será tan brillante como un espejo. Se utilizan pulidoras metalográficas con paños de pulido (de distinto material van desde la seda hasta el terciopelo), abrasivo (debe de tener gran dureza puede, ser alúmina, diamante, carburo de silicio...) y refrigerante. A parte de este pulido mecánico se encuentra el pulido electrolítico que se realiza mediante la formación de una celda electrolítica donde la muestra a pulir actúa de ánodo.

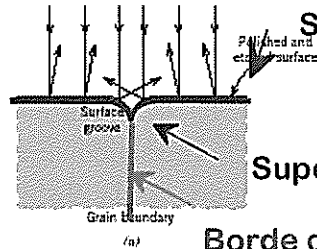
5° Ataque. Nos permite visualizar la microestructura del material mediante la disolución selectiva del borde de grano. En estado de pulido lo único que vamos a poder observar será todo aquello que no adquiera brillo metálico como las inclusiones no metálicas, poros, grietas...

El ataque puede realizarse mediante la aplicación sobre la probeta de reactivos de ataque formados por ácidos orgánicos o inorgánicos, álcalis y sustancias complejas disueltas en agua, alcohol... (para los aceros se emplea el reactivo Nital (alcohol + ácido nítrico) durante un tiempo determinado y a una temperatura adecuada. O mediante ataque electrolítico que al igual que el pulido consiste en formar una pila electrolítica con la probeta actuando de ánodo.

6° Observación en el microscopio.

El microscopio metalográfico tiene una iluminación de tal manera que son los rayos reflejados en la superficie de la probeta metalográfica los que posibilitan la observación. Esto es consecuencia del hecho de que los materiales metálicos, son opacos a la luz visible, luego el fundamento de la observación metalográfica es el principio de reflexión de la onda luminosa.

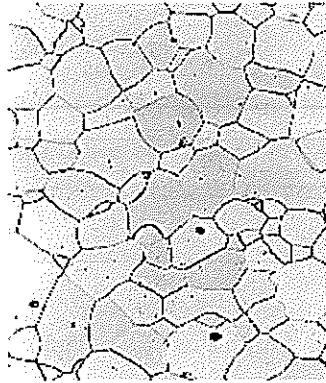
Cuando observamos la microestructura de los metales lo que apreciamos es el borde de grano, que se observará oscuro, debido a que el rayo de luz reflejado es desviado fuera del ocular.



Superficie pulida

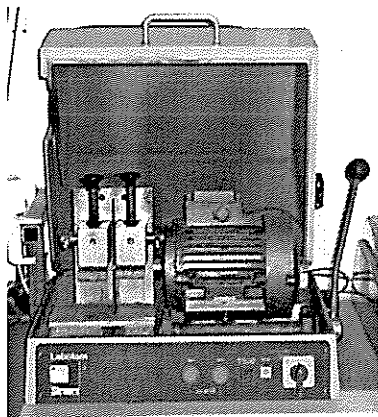
Superficie atacada

Borde de grano

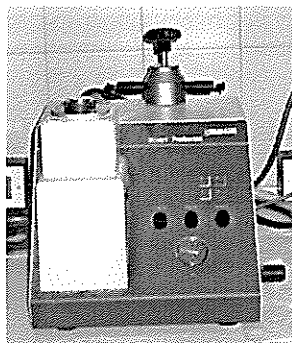


(b)

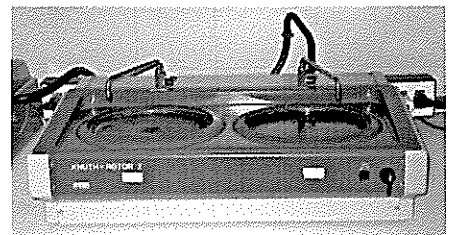
TRONZADORA METALGRÁFICA



PRENSA



DESBASTADORA

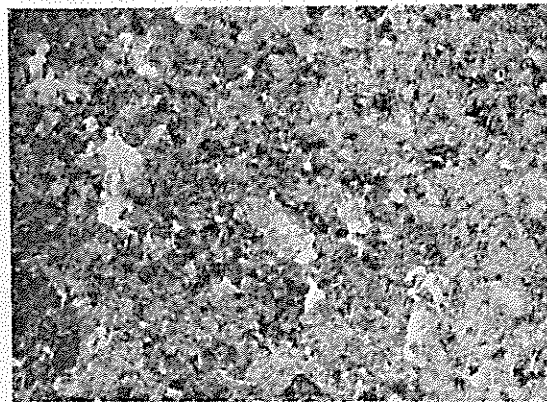


7. MICROESTRUCTURAS DE ACEROS

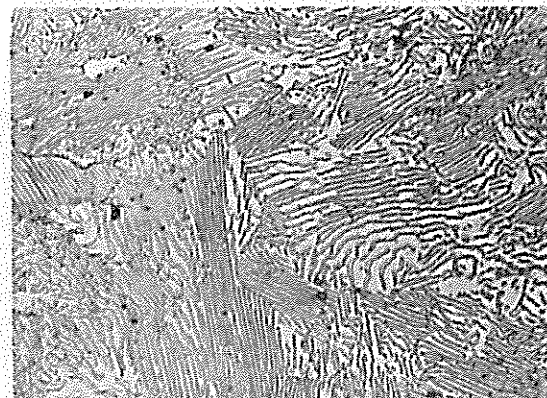
Acero al carbono (0,77 % C). Calentado a 800° C durante una hora y enfriado en el horno. RECOCIDO.

El recocido a 800° C sitúa el material en el estado austenítico. Al enfriar lentamente, por reacción eutectoide, la solución sólida austenita se desdobra en ferrita y cementita, de estructura laminar, denominada perlita. Por la lentitud del proceso de formación de la perlita, esta se presenta en láminas gruesas, especificadas que el microscopio óptico resuelve muy bien. A mayores aumentos aparecen bien resueltos las fases ferrita y cementita (fase discontinua del agregado)

Por la lentitud del proceso la formación del constituyente eutectoide perlita se presenta en láminas gruesas, espaciadas, que el microscopio óptico resuelve muy bien.



(x 75)

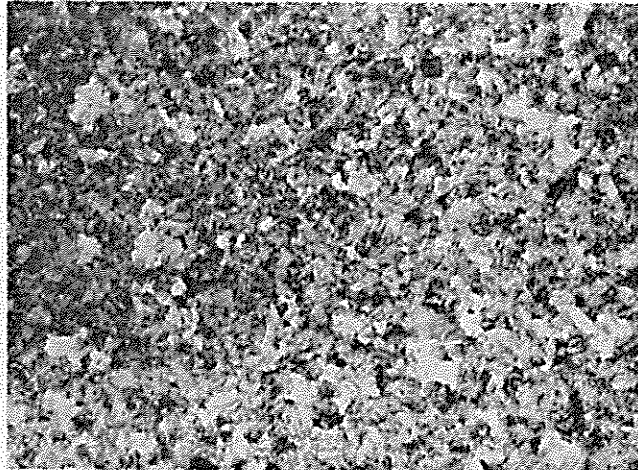


(x 750)

Probeta X-17

Acero al carbono (0,77 % C). Calentado a 800° C durante una hora y enfriado al aire. NORMALIZADO.

El enfriamiento al aire es considerablemente más rápido que en el horno. Por eso la perlita final es notablemente más fina, aún partiendo de una misma estructura monofásica de austenítica que en el caso anterior. Las láminas alternas de ferrita y cementita son más estrechas, están más próximas por ello sólo se resuelven a grandes aumentos. Además tratándose de un enfriamiento continuo, cabe esperar que en la misma colonia perlítica se encuentren diversos espaciados.



(× 75)

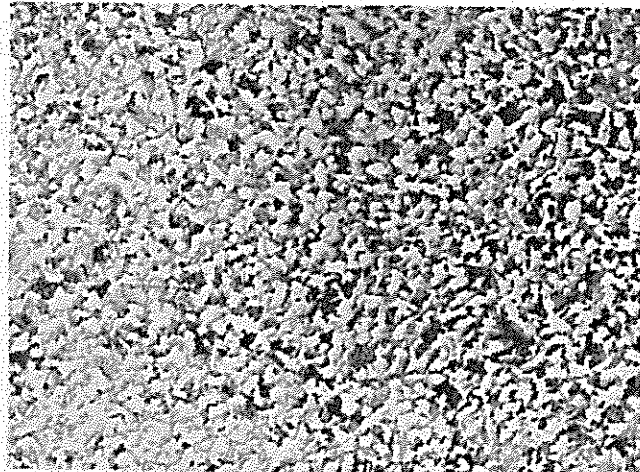


(× 750)

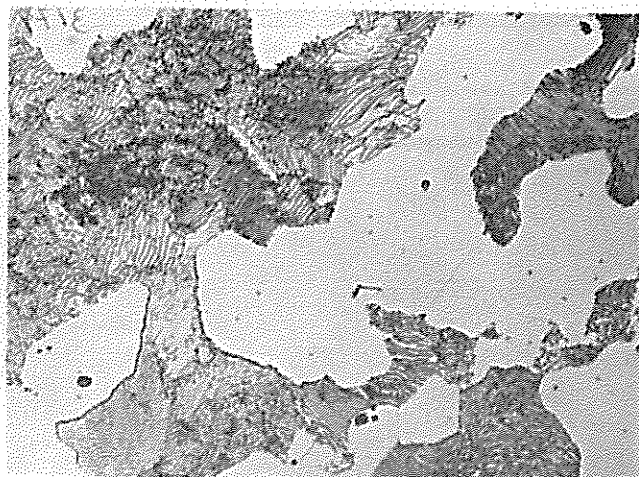
Acero al carbono (0,35 % C). Enfriado en el horno desde 870° C.

La microestructura está formada por colonias de perlita (zonas oscuras) distribuidas en una matriz de ferrita (blanca)

La ferrita sólo precipita de los granos de austenita en forma de estructura Widmastätten, cuando aquellos han adquirido gran tamaño por sobrecalentamiento, o cuando se ha enfriado con relativa rapidez a través de la zona de transformación.



(x 75)

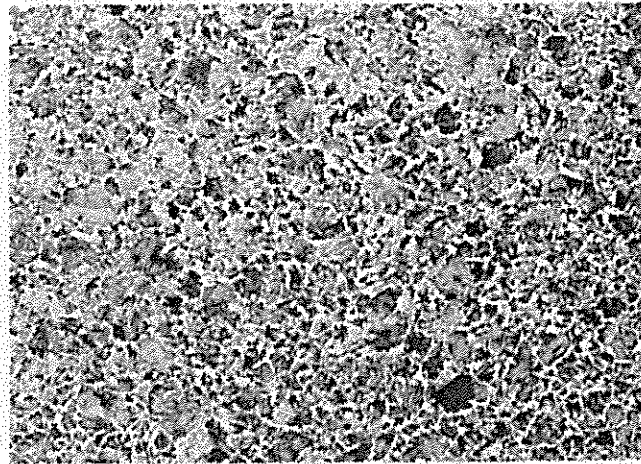


(x 750)

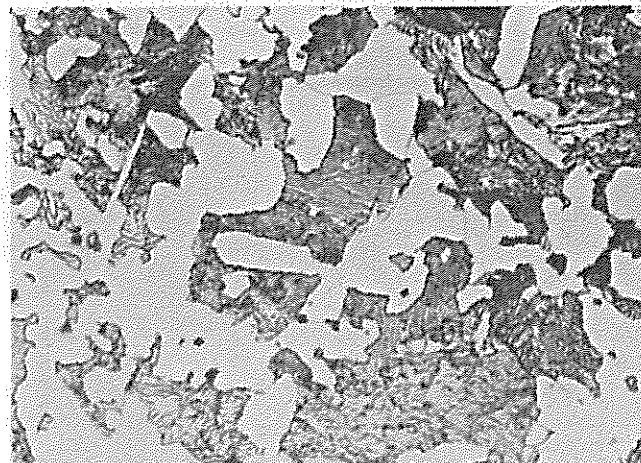
Acero al carbono (0,35 % C). Normalizado desde 870° C.

El acero es el mismo que el de la probeta anterior. La diferencia corresponde a la del estado recocido y normalizado del acero.

Enfriando en determinadas condiciones, el eutectoide perlita podría llegar a ocupar todo el campo de la microestructura, en aceros con sólo el 0,4 % C. En este caso el enfriamiento es lo suficientemente rápido como para retrasar la iniciación de la separación de ferrita proeutectoide, e iniciar la reacción eutectoide cuando la austenita remanente tenga menos del 0,77 % C. El resultado es una reducción del campo de la ferrita y un aumento de las colonias perlíticas. La propia morfología de los granos de ferrita han cambiado, presentándose ahora con tendencia acicular, pero sin llegar a la estructura Widmstätten. En cuanto a la perlita, esta es más fina.



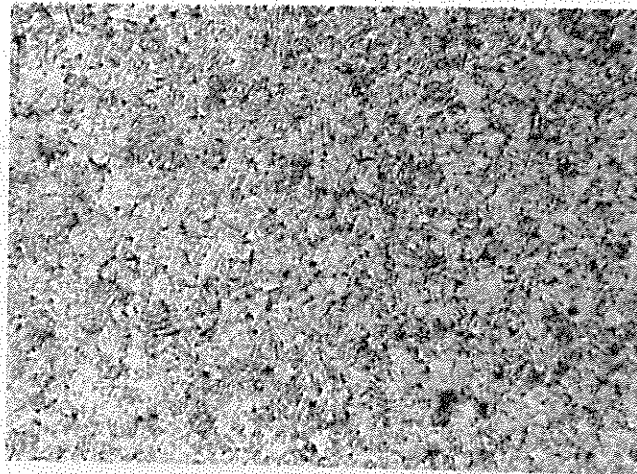
(x 75)



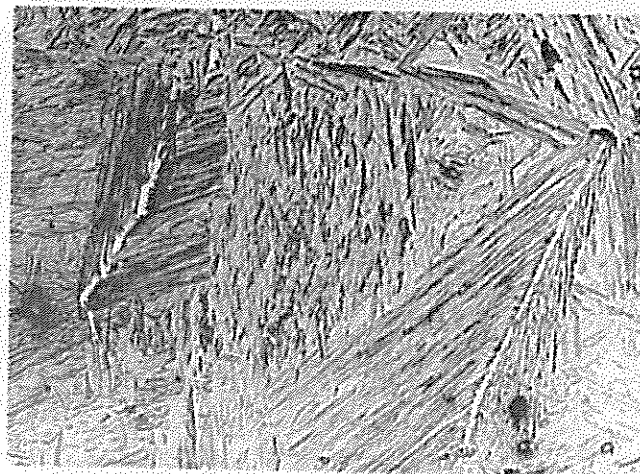
(x 750)

Acero al carbono (0,35 % C). Calentado a 870° C durante una hora y templado en agua desde esa temperatura.

El enfriamiento rápido desde la temperatura de austenita monofásica impide la reacción eutectoide y la segregación de ferrita llegándose a una estructura final de martensita.



(x 75)



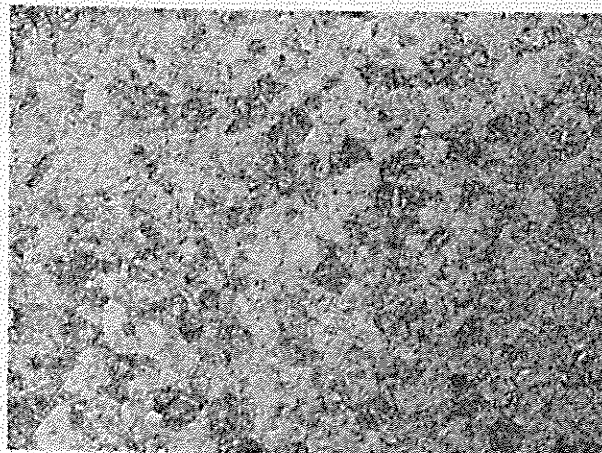
(x 750)

Acero al carbono (0,35 % C). Calentado a 870° C durante una hora y templado en agua desde esa temperatura y revenido a 600 ° C durante dos horas.

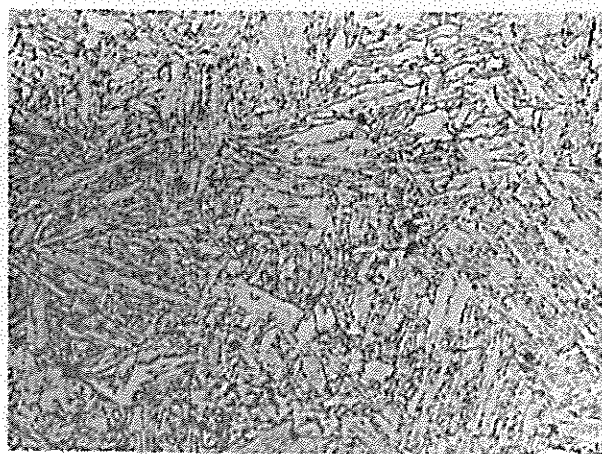
Se observa el efecto del revenido sobre la estructura metaestable de la martensita. Por medio de este tratamiento el carbono precipita de la solución sobresaturada (martensita) en forma de carburo de hierro (cementita), y la red tetragonal, tensa, se estabiliza en forma de cúbica centrada en el cuerpo.

La estructura de la martensita era homogénea en cuanto a la distribución del carbono, por ello la precipitación de cementita tiene lugar en toda la masa, y se presenta en forma de pequeñas partículas, que aparecen como puntos oscuros sobre una matriz ferrítica que aún conserva estructura acicular. En realidad, la cementita no se tiñe de negro en el ataque, lo que pasa es que el microscopio no resuelve su contorno para este tamaño tan pequeño y aparecen como puntos negros.

El tamaño de las partículas precipitadas depende de la temperatura y tiempo de revenido.



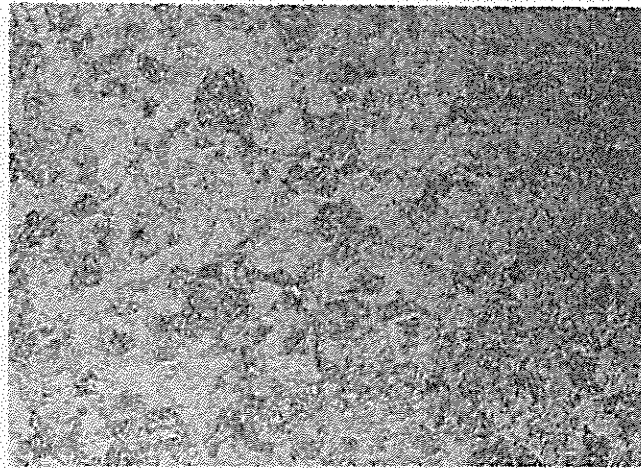
(× 75)



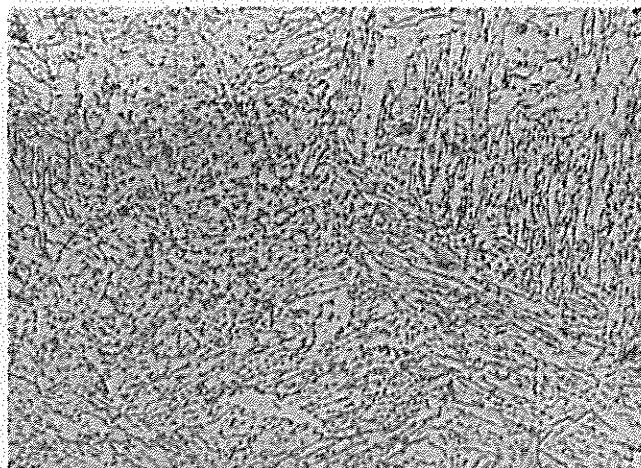
(× 750)

Acero al carbono (0,35 % C). Calentado a 870° C durante una hora y templado en agua desde esa temperatura y revenido a 600 ° C durante cuatro días. (Tiempo de revenido intencionado para revelar el crecimiento de las partículas y no se corresponde con ningún revenido normal)

La diferencia con respecto a la probeta anterior está exclusivamente en el tiempo. El resultado es que las partículas han crecido y se resuelven ya como pequeñas formas redondeadas, de un tono claro, como la matriz de ferrita, todavía ligeramente acicular.



(× 75)



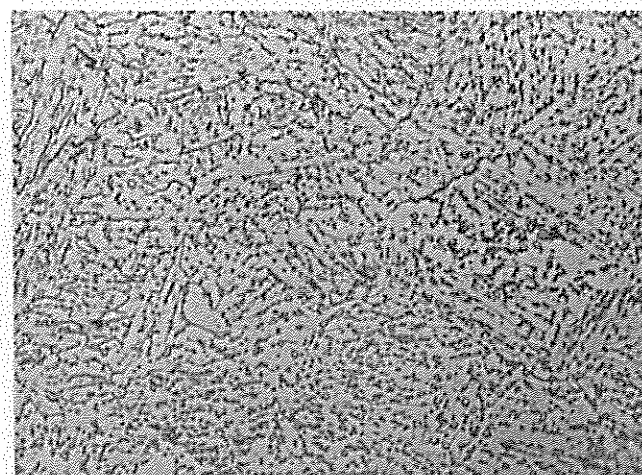
(× 750)

Acero al carbono (0,35 % C). Calentado a 870° C durante una hora y templado en agua desde esa temperatura y revenido a 660 ° C durante cuatro días. (No corresponde a un revenido normal)

Se llega a un tamaño de partículas de cementita notablemente mayor, lo que indica la importante influencia en el proceso de revenido de relativamente pequeñas variaciones de temperatura. Ha desaparecido, casi por completo, la estructura acicular de la matriz de ferrita.



(x 75)



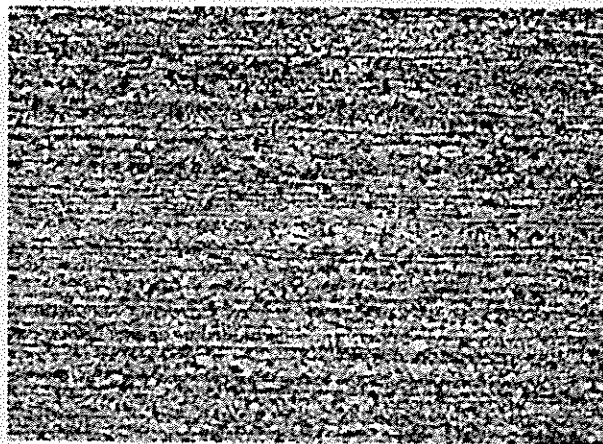
(x 750)

Acero al carbono (0,35 % C) laminado en caliente

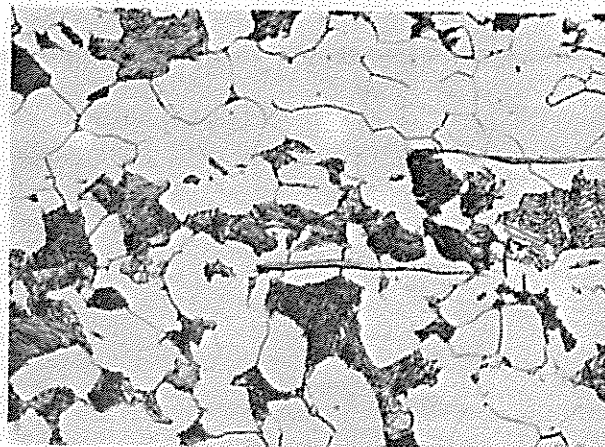
Este material, aún trabajado en caliente cuando es monofásico (austenita), puede adoptar la estructura de bandas. Al parecer, por un fenómeno complejo, no bien conocido, el carbono puede segregarse en ciertas secciones con forma de bandas, que naturalmente, se alternan con otras de menor contenido en este elemento. Al producirse la reacción eutectoide, la perlita se distribuye, con preferencia, en las bandas en la que se había segregado el carbono dando la estructura que puede observarse.

Si el hechurado se realizó cuando la estructura es bifásica (austenita+ferrita), ambas fases se distribuyen en bandas, y después al enfriar la perlita se forma en las bandas que ocupó la austenita.

Las inclusiones, generalmente de MnS, aparecen plásticamente alargadas en la dirección de laminado.



(x 75)



(x 750)

Acero al carbono (1,3 % C). Enfriado en el horno desde 970° C.

Se puede apreciar con relativamente pocos aumentos, la trama de cementita que dibuja los contornos de los granos de austenita originaria, y aparece muy clara a mayores aumentos, rodeando las colonias de perlita cuya estructura está perfectamente resuelta.



(x 75)



(x 750)