

Los tratamientos térmicos se definen como ciclos de calentamiento y enfriamiento que se les da a los metales en estado sólido para variar alguna ó algunas de sus propiedades de la forma deseada ó requerida.

Los tratamientos térmicos más conocidos son los siguientes: Recocido (varios tipos); Normalizado, Temple; Revenido.

También veremos algunos tratamientos especiales como Austempering; Martempering y los endurecimientos superficiales como Cementado; Cianurado; Nitrurado; Endurecimiento por flama y por inducción.

RECOCIDO.- Con éste nombre se conocen varios tratamientos cuyo objeto principal es ablandar el acero, otras veces también se desea además regenerar su estructura o eliminar tensiones internas. Las diferentes clases de recocido que se emplean en la industria se pueden clasificar en tres grupos:

- A).- Recocidos con Austenización completa (o de Regeneración)
- B).- Recocidos subcríticos
- C).- Recocidos con austenización incompleta.

A).- RECOCIDOS CON AUSTENIZACION COMPLETA.- En este caso el calentamiento se hace a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior durante un tiempo que depende del espesor del material (1 hora por pulgada de espesor). Posteriormente se enfría muy lentamente. Sirve para ablandar al acero y regenerar su estructura.

B).- RECOCIDOS SUBCRITICOS.- El calentamiento se hace por debajo de la temperatura crítica inferior, no teniendo tanta importancia como en el caso anterior la velocidad de enfriamiento, pudiendo incluso enfriarse el acero al aire sin que se endurezca. Por medio de este tratamiento se eliminan las tensiones del material y se aumenta su ductilidad. Se pueden distinguir tres clases de recocido subcríticos.

1).- De ablandamiento, 2).- Contra acritud, 3).- Globular.

DE ABLANDAMIENTO.- Su principal objeto es ablandar el acero por un procedimiento rápido y económico. Con este tratamiento no se suelen obtener las menores durezas, pero en muchos casos las que se consiguen son suficientes para mecanizar perfectamente los materiales. El proceso consiste en calentar el acero hasta una temperatura que siendo inferior a la crítica Ac, sea lo más elevada posible y enfriar luego en aire.

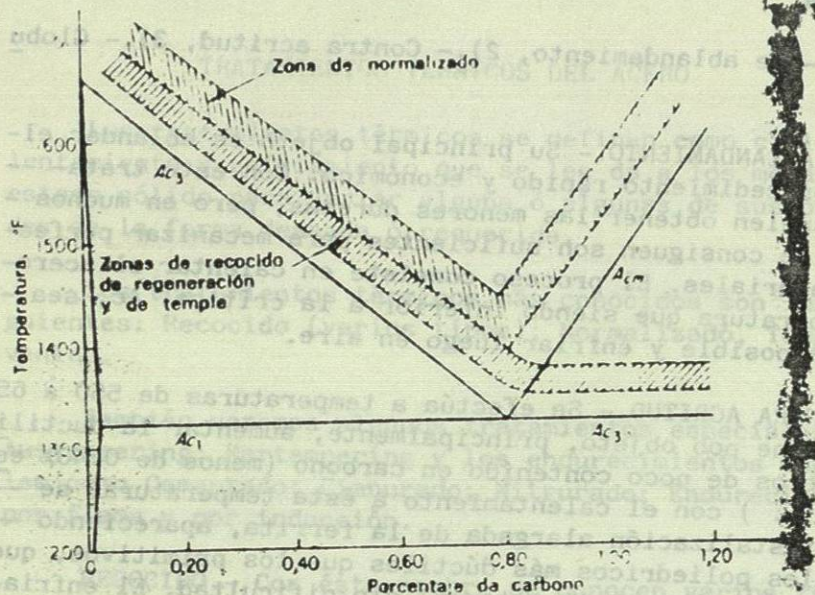
CONTRA ACRTUD.- Se efectúa a temperaturas de 550 a 650 grados C, y tiene por objeto, principalmente, aumentar la ductilidad de los aceros de poco contenido en carbono (menos de 0.40% es tirados en frío.) con el calentamiento a ésta temperatura, se destruye la cristalización alargada de la ferrita, apareciendo nuevos cristales poliedricos más dúctiles que los primitivos, que permiten estirar o laminar el material sin dificultad. El enfriamiento se suele hacer al aire.

GLOBULAR.- En ocasiones para obtener en los aceros al carbono y de baja aleación una estructura globular de muy baja dureza, en cierto modo parecida a la que se obtiene en el recocido de austenización incompleta (que se estudia a continuación), se les somete a los aceros en un calentamiento a temperaturas inferiores pero muy próximas a la crítica Ac, debiendo luego enfriarse el acero lentamente en el horno.

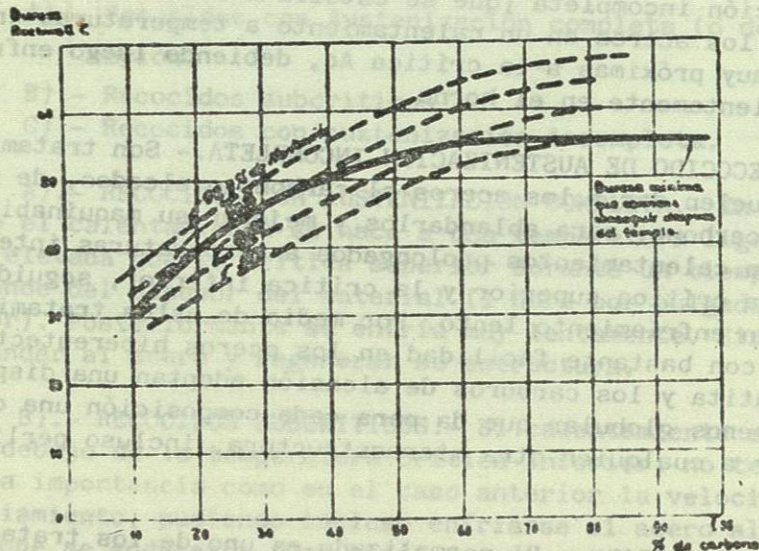
RECOCIDO DE AUSTENIZACION INCOMPLETA.- Son tratamientos que se suelen dar a los aceros al carbono o aleados, de más de 0.50% de carbono, para ablandarlos y mejorar su maquinabilidad. Consisten en calentamientos prolongados a temperaturas intermedias entre la crítica superior y la crítica inferior, seguidos siempre de un enfriamiento lento. Por medio de estos tratamientos se consigue con bastante facilidad en los aceros hipereutectoides que la cementita y los carburos de aleación adoptan una disposición más o menos globular que da para cada composición una dureza muy inferior a cualquier otra microestructura, incluso perlita laminar.

NORMALIZADO.- El normalizado es uno de los tratamientos térmicos más fáciles de efectuar. Se utiliza lo mismo para piezas fundidas, forjadas o mecanizadas, y sirve para afinar la





#### INTERVALOS DE TEMPERATURAS DE NORMALIZADO, RECOCIDO Y TEMPLE DE LOS ACEROS AL CARBONO



PROMEDIO DE DUREZAS QUE SE OBTIENEN EN LOS ACEROS AL CARBONO DESPUES DEL TEMPLE EN FUNCION DEL CONTENIDO EN CARBONO Y SEGUN EL PORCENTAJE DE MARTENSITA OBTENIDA.

estructura y eliminar las tensiones que suelen aparecer en la forja o en otras operaciones posteriores. Como el nombre lo indica, se da este tratamiento a los aceros para que queden con los constituyentes característicos que puedan considerarse normales o propios a su composición. Se efectúa no sólo después de la forja o laminación, sino también después de ciertos sobre calentamientos o enfriamientos hechos en malas condiciones y siempre que se quiere destruir los efectos de cualquier calentamiento o tratamiento anterior.

Consiste en calentar los aceros a una temperatura superior a la crítica  $Ac_3$  o  $Ac_{cm}$ , para que pasen al estado austenítico y dejar luego enfriar las piezas al aire tranquilo. En el normalizado, la velocidad de enfriamiento es más lenta que en el temple y más rápida que en el recocido. Es un tratamiento típico de los aceros al carbono de construcción de 0,15 a 0,40% de C y rara vez se emplea en los aceros de herramientas, ni en los aleados de construcción.

El espesor de las piezas ejerce bastante influencia en los constituyentes y características que se obtienen en el normalizado de los aceros.

Es distinta la microestructura que se obtiene en un redondo de acero de 8 mm de diámetro de 0,45% de carbono que en otro de 250 mm de diámetro de la misma composición debido a que la velocidad de enfriamiento, que es la que en definitiva regula el tratamiento, es bastante diferente en ambos casos.

**TEMPLE.**— El temple tiene por objeto endurecer y aumentar la resistencia de los aceros. Para ello, se calienta en general el acero a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior y se enfría luego más o menos rápidamente (según la composición y el tamaño de la pieza) en un medio conveniente, agua, aceite, etc.,

Teóricamente en el temple, lo mismo que en el recocido de regeneración de los aceros hipoeutectoides, toda la masa de acero debe encontrarse en estado austenítico en el momento de comenzar el enfriamiento. Si entonces se enfría el acero con rapidez, todo el material queda con gran dureza y la transformación de la austenita ocurre generalmente por debajo de 350°. La estructura resultante llamada



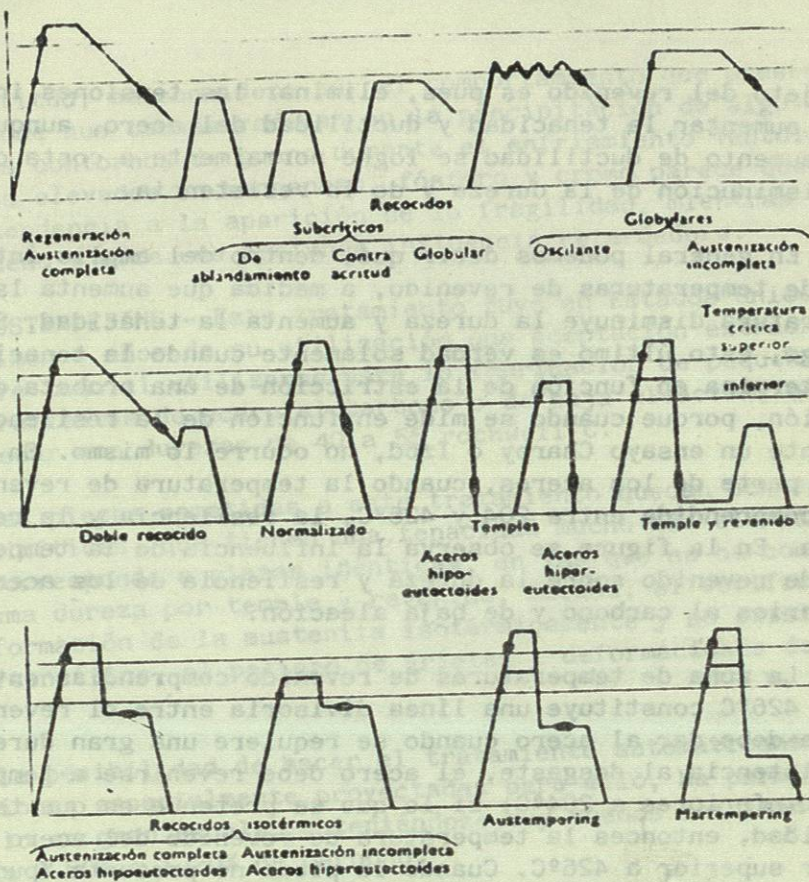
martensita, es una solución sólida sobresaturada de carbono atrapado en una estructura tetragonal centrada en el cuerpo.

Dos dimensiones de la celda unitaria son iguales, pero la tercera está ligeramente extendida debido al carbono atrapado. La razón axial c/a aumenta con el contenido de carbono a un máximo de 1.08. Esta estructura reticular altamente distorsionada es la principal razón para la alta dureza de la martensita. Como los átomos de la martensita están menos densamente empaquetados, en la austenita durante la transformación, ocurre una expansión; sin embargo, durante la formación de martensita, dicha expansión produce altos esfuerzos localizados que dan como resultado la deformación plástica de la matriz. Después de un enfriamiento drástico (temple), la martensita aparece microscópicamente como una estructura blanca acicular o tipo aguja, descrita algunas veces como un haz de pajitas. En la mayoría de los aceros, la estructura martensítica aparece vaga e indeterminable.

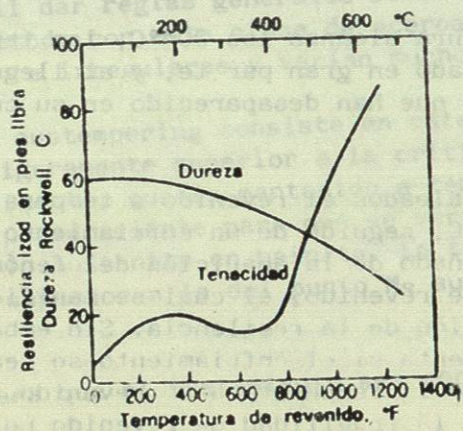
**TEMPLE DE LOS ACEROS HIPEREUTECTOIDES.**— En la mayoría de los aceros de herramientas (aceros hipereutectoides) el temple se suele realizar, como hemos dicho antes, con calentamiento de austenización incompleta.

Se ha visto en la práctica industrial que de esta forma se obtienen, en general, los mejores resultados. En estos casos, cuando en el calentamiento que se da para el temple el acero ha alcanzado la máxima temperatura, en la masa hay austenita y una cantidad de cementita y carburos aleados y complejos sin disolver cuya proporción varía según los casos con la temperatura alcanzada y la clase de acero. El temple de diversos aceros como el de limas de C=1,3% aceros rápidos 18-4-1 y de 5% de cobalto, aceros indeformables con 13% de cromo, etc., se realizan normalmente con calentamientos de austenización incompleta. Después del enfriamiento en estos aceros se obtiene martensita que proviene de la austenita transformada y carburos. A veces puede quedar también algo de austenita sin transformar.

**REVENIDO.**— Los aceros después del temple, suelen quedar demasiado frágiles para la mayoría de los usos a que van a ser destinados. Por otra parte, la formación de martensita da lugar a considerables tensiones en el acero. Por todo ello, las piezas, después del temple, se someten casi siempre a un revenido, que es un tratamiento que consiste en calentar el acero a una temperatura más baja que su temperatura crítica inferior. Al-



ESQUEMA DE LOS TRATAMIENTOS TERMICOS MAS EMPLEADOS Y DEL DESPLAZAMIENTO DE LAS ZONAS DE TRANSFORMACION. LOS PUNTOS Y ZONAS NEGRAS, SEÑALAN LAS TEMPERATURAS DE TRANSFORMACION DEL ACERO.



INFLUENCIA DE UN REVENIDO DE UNA HORA A DISTINTAS TEMPERATURAS SOBRE LA DUREZA Y LA RESILIENCIA DEL ACERO 4140



El objeto del revenido es pues, eliminar las tensiones internas y aumentar la tenacidad y ductilidad del acero, aunque este aumento de ductilidad se logre normalmente a costa de una disminución de la dureza y de la resistencia.

En general podemos decir que, dentro del amplio intervalo de temperaturas de revenido, a medida que aumenta la temperatura disminuye la dureza y aumenta la tenacidad. Sin embargo, esto último es verdad solamente cuando la tenacidad se determina en función de la estricción de una probeta de tracción, porque cuando se mide en función de la resiliencia mediante un ensayo Charpy o Izod, no ocurre lo mismo. En la mayor parte de los aceros, cuando la temperatura de revenido está comprendida entre 204 y 426°C, la resiliencia y la resistencia. En la figura se observa la influencia de la temperatura de revenido sobre la dureza y resiliencia de los aceros ordinarios al carbono y de baja aleación.

La zona de temperaturas de revenido comprendidas entre 204 y 426°C constituye una línea divisoria entre el revenido que se debe dar al acero cuando se requiere una gran dureza o resistencia al desgaste, el acero debe revenirse a temperaturas inferiores a 204°C; si lo que se pretende es que tenga tenacidad, entonces la temperatura de revenido del acero debe ser superior a 426°C. Cuando la pieza no presenta "puntos de concentración de tensiones" o entalladas la variación de la ductilidad puede constituir una medida de la tenacidad mejor que la resiliencia y, aunque el revenido se realice en el intervalo de temperaturas de 204 y 426°C no ocasiona ningún perjuicio a la pieza.

Cuando la temperatura alcanza los 204°C, las tensiones residuales se han eliminado en gran parte, y al llegar a los 482°C se puede decir que han desaparecido en su casi totalidad.

En algunos aceros aleados el revenido a temperaturas entre los 538 y los 676°C, seguido de un enfriamiento relativamente lento, va acompañado de la aparición del fenómeno conocido como fragilidad de revenido, el cual se manifiesta por una acusada disminución de la resiliencia. Sin embargo, este fenómeno no se presenta si el enfriamiento se realiza rápidamente en agua desde la temperatura de revenido. Aunque el mecanismo que origina la fragilidad de revenido no se co-

on exactitud, se considera por el comportamiento que presentan el acero, que sus causas radican en la precipitación de algunos elementos en los contornos de grano durante el enfriamiento lento. Los contenidos elevados en manganeso, fósforo y cromo parecen tener la tendencia a la aparición de la fragilidad, mientras que el molibdeno ejerce una profunda influencia retardadora.

**AUSTEMPERING.**— Este tratamiento tuvo en Estados Unidos los primeros años de su utilización una aceptación extraordinaria, sobre todo al utilizarse para la fabricación de pequeñas herramientas de acero al carbono o de baja aleación, que dan de quedar con durezas de 40 a 55 rockwell C.

Las piezas sometidas a este tratamiento quedan con estructuras bainíticas, que tienen una tenacidad mucho más elevada que la que corresponde a piezas idénticas, en las que se ha conseguido la misma dureza por temple y revenido. Además, al verificarse la transformación de la austenita isotérmicamente y no existiendo la etapa martensítica, el peligro de grietas y deformaciones desaparece.

La posibilidad de hacer el tratamiento automáticamente en instalaciones especialmente proyectadas para ello, ha permitido utilizarlo en gran escala, obteniéndose muy buenos resultados en aceros de 0.50% a 1.20% de carbono.

En cambio, las experiencias realizadas con aceros de construcción al carbono y aleados de 0,20 a 0,40% de carbono, no son tan satisfactorias. Algunas veces los resultados son mejores que los obtenidos en el temple y revenido, y otras veces inferiores. Es difícil dar reglas generales sobre las ventajas e inconvenientes del método con esta clase de aceros, porque los resultados son bastante irregulares y varían mucho de unos casos a otros.

El austempering consiste en calentar el acero a una temperatura ligeramente superior a la crítica y enfriarlo luego en un baño caliente, que es mantenido a temperatura constante, durante un tiempo suficiente para que se verifique la total transformación de la austenita en bainita. La temperatura del baño, que debe ser superior a la del punto  $M_s$  suele variar de 250° a

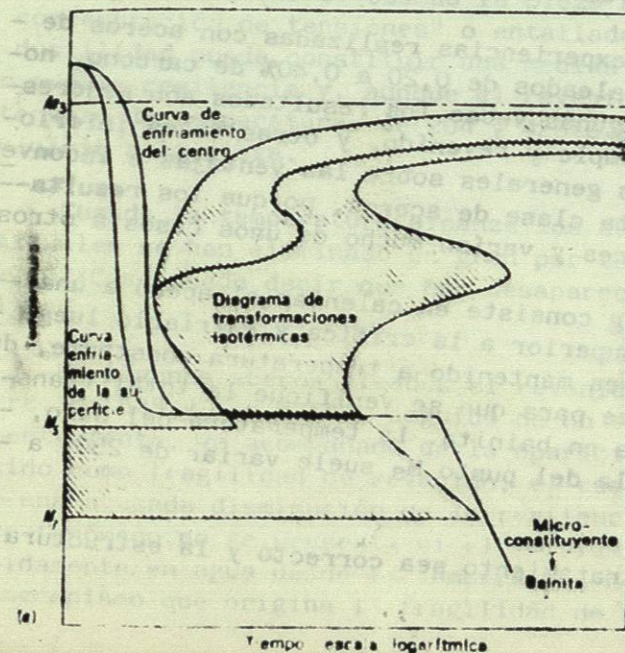
Para que el tratamiento sea correcto y la estructura



sea totalmente bainítica, el enfriamiento en la primera fase debe ser suficientemente rápido para evitar la formación de perlita.

En la figura, se puede ver los resultados obtenidos -- con un acero de 0,74% de carbono enfriado en un baño de 300° y manteniendo en él durante quince minutos, en comparación -- con los resultados obtenidos en el mismo acero templado directamente y luego revenido.

Recientemente se ha comenzado a utilizar una variante de este proceso para tratar grandes piezas. El acero, después de ser calentado a la temperatura de austenización, ligeramente superior a la crítica, se enfría rápidamente en un baño cuya temperatura es inferior a  $M_s$ , con lo que se consigue salvar la nariz de la "S" aunque se transforma algo de austenita en martensita, y luego se pasa inmediatamente la pieza a un baño cuya temperatura es la precisa para que se efectúe isotérmicamente la transformación bainítica del resto de la masa, que se encuentra todavía en estado austenítico, y así aunque una parte del material se ha transformado en martensita, la mayor parte recibe el tratamiento isotérmico, a pesar de su gran tamaño, sin que aparezcan estructuras perlíticas blandas.



REPRESENTACION ESQUEMATICA SOBRE EL DIAGRAMA TIPO I DEL TRATAMIENTO DE AUSTEMPERING.

DUREZA ROCKWELL C 50

TRATAMIENTO DE AUSTEMPERING

TEMPLADO Y REVENIDO

ESTRICCION EN LA TRACCION

34,5 POR CIENTO

0,7 POR CIENTO

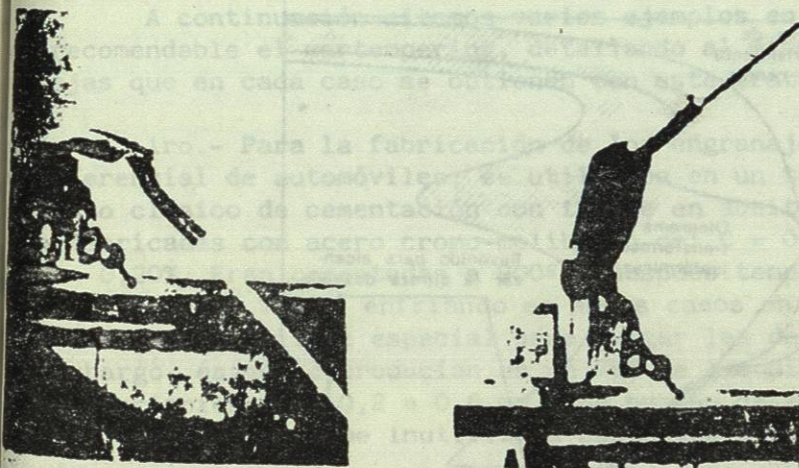
CHOQUE

4,87 KGM

0,40 KGM

ENSAYO DE PLEGADO

COMPARACION ENTRE LA TENACIDAD Y DUCTILIDAD DE VARILLAS QUE DESPUES DEL AUSTEMPERING UNAS, Y DEL TEMPLE Y REVENIDO OTRAS HAN QUEDADO CON LA MISMA DUREZA.



COMPORTAMIENTO DE UNA PALA AUSTEMPERIZADA. LA FOTOGRAFIA MUESTRA LA CURVATURA QUE PUEDE ALCANZAR LA PALA SIN ROMPERSE, Y LA DE LA DERECHA MUESTRA COMO AL DESAPARECER -- LA FUERZA QUE MANTENIA DOBLADA LA PALA, RECUPERA ESTA SU POSICION ORIGINAL.