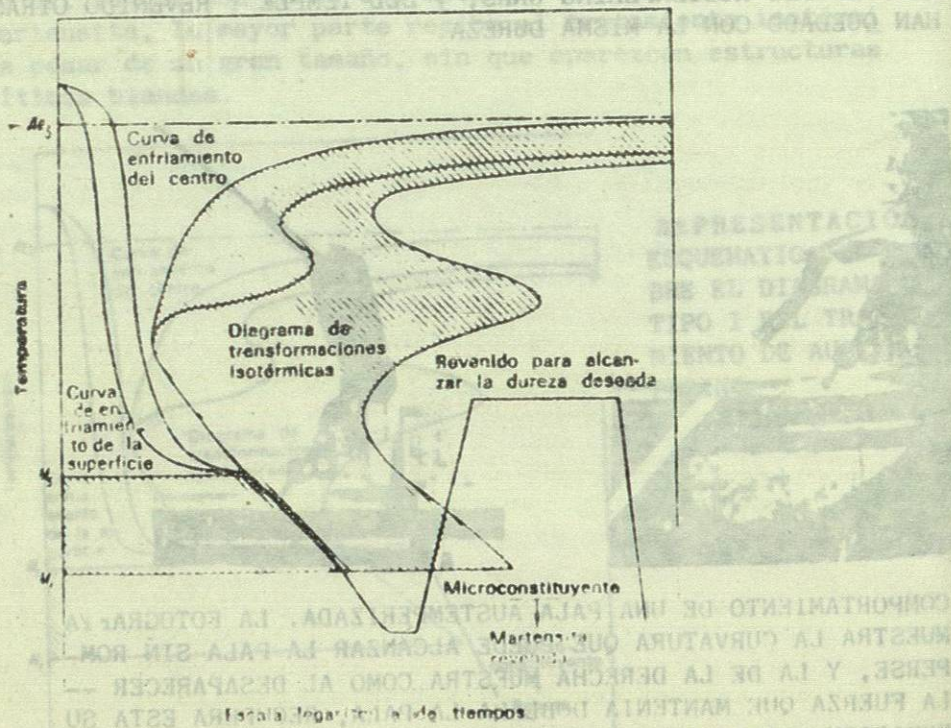


REPRESENTACION SOBRE EL MISMO DIAGRAMA DEL PROCESO NORMAL DE TEMPLE DIRECTO SEGUIDO DE REVENDIO.



REPRESENTACION ESQUEMATICA DEL MARTEMPERING.

MARTEMPERING.— Este tratamiento se efectúa calentando el acero y manteniéndolo a una temperatura superior a la crítica durante un tiempo suficiente para su completa austenización y enfriándolo luego en un baño de sal fundida, cuya temperatura suele oscilar entre 200 y 300° y debe ser superior al punto M_s , de comienzo de formación de la martensita. El material debe permanecer en el baño caliente el tiempo suficiente para conseguir que toda la masa del acero, incluso el corazón de la pieza, alcance e iguale la temperatura del baño, no prolongando demasiado la permanencia para evitar que se inicie la transformación en ningún punto, enfriándose luego la pieza al aire. De esta forma se obtiene una estructura martensítica con muy pocas tensiones residuales. Cuando convenga disminuir la dureza o resistencia obtenida, se puede dar posteriormente al acero un revenido. Es necesario que el enfriamiento en el martempering sea suficientemente rápido para que la curva de enfriamiento no corte a la nariz de la "S" en ningún punto, pues si lo hiciera, parte de la austenita se transformaría en otros constituyentes y al llegar la masa no sería ya de austenita se transformaría en otros constituyentes y al llegar a la zona de formación de la martensita, tendríamos que parte de la masa no sería ya de austenita y no se podría transformar. En piezas gruesas y cuando se utilizan aceros al carbono o de baja aleación ésta condición suele ser difícil de cumplir y por eso éste tratamiento, lo mismo que el austempering, es de aplicación limitada.

A continuación citamos varios ejemplos en los que es muy recomendable el martempering, detallando al mismo tiempo las ventajas que en cada caso se obtienen con este tratamiento.

1ro.— Para la fabricación de los engranajes del mecanismo diferencial de automóviles, se utilizaba en un taller el procedimiento clásico de cementación con temple en aceite. Las piezas eran fabricadas con acero cromo-molibdeno de: $C = 0,10\%$; $Cr = 0,5\%$ y $Mo = 0,20\%$. Eran cementadas a 900° y después templadas primero a 850° y luego a 780°, enfriando en ambos casos en aceite, utilizando además un utilaje especial para evitar las deformaciones. Sin embargo, éstas se producían en un 75% de las piezas, apareciendo variaciones de 0,2 a 0,6 mm. que hacían necesario en enderezado muy costoso y que inutilizaba bastantes piezas por agrietamiento.

Empleando en cambio baños de sales calientes a 200° en lugar de aceite para el enfriamiento, se han obtenido resultados muy notables. Las deformaciones medias no pasan de 0,1 mm, el en-

derezado ha sido suprimido, se han reducido los excesos para el rectificad y se obtienen durezas de 63 a 65 rockwell C, iguales o ligeramente superiores a las obtenidas en el temple en aceite.

2do.- En la fabricación de troqueles de forma complicada con partes delgadas y de gran logitud, fabricados con acero cromo-manganeso, se presentaban deformaciones importantes, que llegaban a ser en bastantes casos superiores a lo permitido. Empleando baños de sales para el enfriamiento se resolvió el problema, pues las deformaciones eran casi inapreciables.

Ensayando diferentes medios de enfriamiento con durezas casi similares, se obtuvieron las siguientes deformaciones medias:

AGUA SALADA.... = 0,3 mm ACEITE A 20° = 0,06 mm
 ACEITE A 100°.. = 0,05mm BAÑO DE SALES a 200° 0,05mm

Estas cifras revelan la gran ventaja que ofrece el enfriamiento en baño de sales sobre los otros medios de enfriamiento.

ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL DEL ACERO.

En numerosas aplicaciones industriales es necesario que algunas piezas tengan la superficie muy dura y resistente al desgaste, y la parte central, llamada corazón muy tenaz y relativamente blanda. Los tratamientos térmicos principalmente utilizados para conseguir estas características son los cinco siguientes:

- 1.- Cementación
- 2.- Nitruración
- 3.- Cianuración ó Carbonitruración
- 4.- Endurecimiento Superficial por Llama
- 5.- Endurecimiento Superficial por Corriente de Inducción.

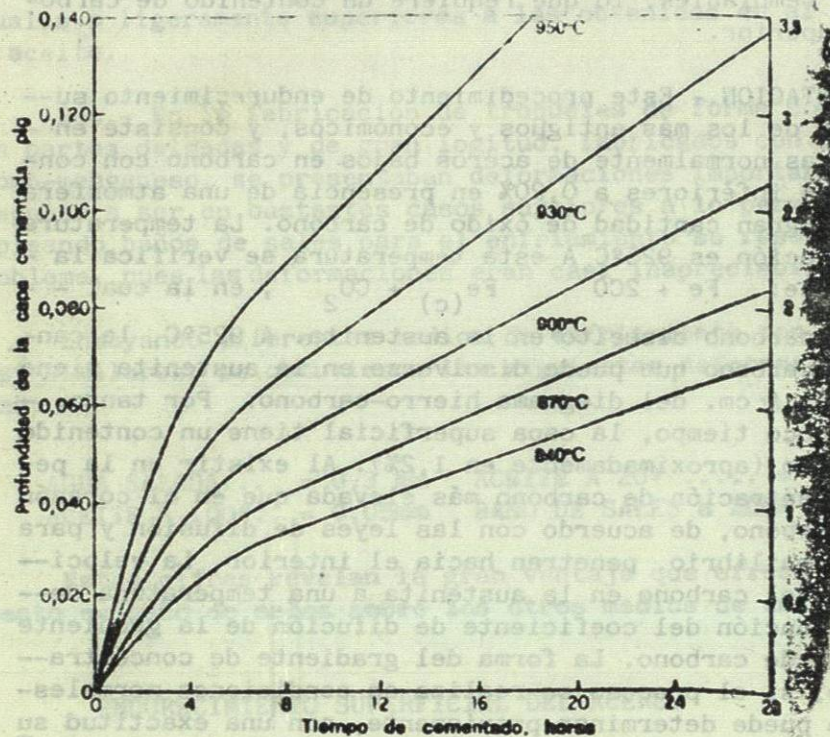
Los tres primeros procedimientos originan una variación en la composición química, ya que el primero supone la adición de carbono el segundo de nitrógeno y la cianuración de ambos, carbono y nitrógeno. En los dos últimos procedimientos no varía la composición química del acero y en escencia, se reducen a

un temple superficial. Ambos procedimientos son aplicables solamente a los aceros templables, lo que requiere un contenido de carbono de 0,35% a superior.

CEMENTACION.- Este procedimiento de endurecimiento superficial es uno de los más antiguos y económicos, y consiste en colocar las piezas normalmente de aceros bajos en carbono con contenidos iguales o inferiores a 0,20% en presencia de una atmósfera que contiene una gran cantidad de óxido de carbono. La temperatura normal de cementación es 925°C A esta temperatura se verifica la reacción siguiente: $Fe + 2CO \rightleftharpoons Fe_{(c)} + CO_2$, en la cual

$Fe_{(c)}$ indica el carbono disuelto en la austenita. A 925°C, la cantidad máxima de carbono que puede disolverse en la austenita viene dada por la línea A cm. del diagrama hierro-carbono. Por tanto, al cabo de muy poco tiempo, la capa superficial tiene un contenido de carbono elevado (aproximadamente en 1,2%). Al existir en la periferia una concentración de carbono más elevada que en el corazón los átomos de carbono, de acuerdo con las leyes de difusión y para restablecer el equilibrio, penetran hacia el interior. La velocidad de difusión del carbono en la austenita a una temperatura determinada, es función del coeficiente de difusión de la gradiente de concentración de carbono. La forma del gradiente de concentración de carbono, si el proceso se realiza en condiciones normales y conocidas, se puede determinar previamente, con una exactitud suficiente, para un contenido de carbono en la superficie determinada, en función de la duración del proceso de concentración. Una vez transcurrido el tiempo que se considere necesario para que, por difusión del carbono, la capa cementada alcance el espesor deseado, la pieza se saca del horno y se deja enfriar.

En la práctica, la cementación puede realizarse con cementantes sólidos, líquidos o gaseosos. Si el medio cementante es sólido, la pieza a tratar se coloca en el interior de una cajacerrada, rodeada completamente por el cementante. El conjunto se calienta a la temperatura adecuada durante el tiempo requerido para que se realice la cementación y después se enfría lentamente. Este procedimiento presenta el inconveniente de no poder trabajar con grandes series, debido a que es un procedimiento en la carga se efectúa fundamentalmente por lotes. Las mezclas cementales comerciales suelen estar formadas normalmente por terroes o trozos relativamente gruesos de un compuesto constituido por carbón vegetal coque y un 20% aproximadamente de un activador tal como el carbonato bórico, de tal modo que al cerrar la caja queda en su interior



RELACION ENTRE LA TEMPERATURA Y DURACION DE LA CEMENTACION Y LA PENETRACION DEL CARBONO

aire suficiente para que se forme óxido de carbono. Los principales inconvenientes de los cementantes sólidos son la gran duración del calentamiento y enfriamiento de la carga, el elevado costo de preparación y colocación de las piezas en las cajas, así como de desarmar éstas y la dificultad de templar directamente las piezas desde la temperatura de cementación.

La cementación gaseosa puede realizarse de manera intermitente ó continua, y se presenta más al posterior tratamiento térmico. Las piezas se colocan en contacto con gases ricos en óxidos de carbono y con hidrocarburos tales como el metano, butano, y propano. Así mismo, el gas natural constituye también un buen cementante. Por lo general estos gases se mezclan antes de entrar en el horno con cantidades determinadas del aire el cual actúa como diluyente y proporciona el oxígeno necesario para la formación de monóxido de carbono, a partir de los hidrocarburos.

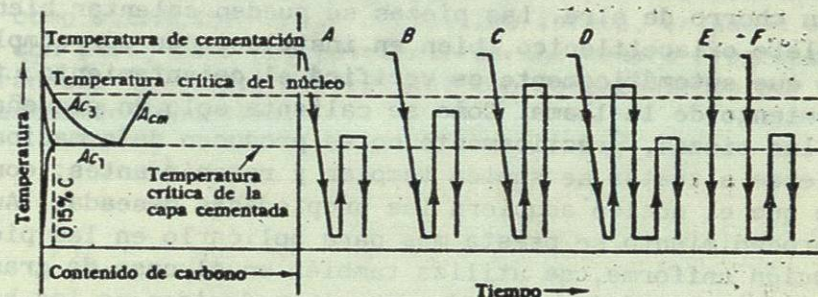
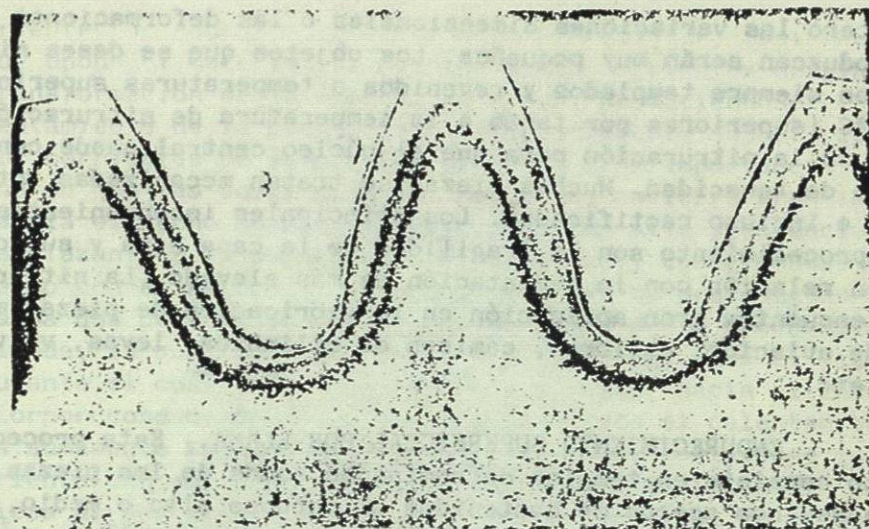
La cementación en medio líquido se realiza en un baño de sales fundidas que tienen hasta un 20% de cianuro sódico (NaCN), el cual proporciona carbono y nitrógeno. La capa cementada obtenida por este procedimiento está compuesta en su mayor parte por carbono y solo en una fracción muy pequeña por nitrógeno. Las temperaturas normales a que se realiza este tratamiento están comprendidas entre 870 y 950°C, utilizándose principalmente en la obtención de capas cementadas de hasta 0,75 mm de profundidad, siendo su principal limitación el costo de las sales cementantes.

CIANURACION.— La cianuración es un procedimiento utilizado para endurecer superficialmente los aceros aleados y el carbono mediante la formación de una capa dura de poco espesor, elevada dureza y buena resistencia al desgaste. Este tratamiento se efectúa por inmersión del acero en un baño fundido con un contenido de cianuro sódico de aproximadamente el 30% y a temperaturas comprendidas entre 787 y 870°C seguida normalmente por un temple en agua. La cianuración se diferencia de la cementación en baño de sales en la composición y carácter de la capa dura, pues mientras que en la cianuración ésta tiene un elevado contenido de nitrógeno y bajo de carbono, en el caso de la cementación ocurre exactamente lo contrario. La cianuración ésta tiene un elevado contenido de nitrógeno y bajo de carbono, en el caso de la cementación ocurre exactamente lo --

contrario. La cianuración es muy empleada en el endurecimiento superficial de piezas pequeñas. Como los espesores que alcanza la capa dura en los tiempos normales de inmersión (de hasta una hora), no exceden de 0,25 mm (0,0010 pulgadas), la elevada dureza que obtiene no es achaçable solamente a la concentración de carbono. Lo que ocurre es que nitrógeno, de una manera análoga al carbono, se combina también con el hierro formando unas agujas de nitruro de hierro, de tamaño submicroscópico, que contribuyen a dar a la capa cianurada la elevada dureza que presenta.

En la carbonitruración, llamada también cianuración gaseosa, se logran los mismos efectos que en la cianuración, utilizando una mezcla formada por amoníaco (NH_3) ó por hidrocarburos en estado gaseoso. Este procedimiento se utiliza principalmente como sustituto de la cianuración por su bajo costo. La figura muestra la capa dura obtenida por carbonitruración, calentado un acero C1213 en una atmósfera de propano y amoníaco a 843°C durante veinte minutos, y templando seguidamente el acero en aceite. Midiendo la profundidad de la capa cementada, desde el borde hasta el centro de la zona oscura, con un ocular micrométrico, cada una de cuyas divisiones vale 0,025 mm, se obtiene un espesor de aproximadamente 0.0625 mm.

NITRURACION.— En este procedimiento, las piezas a tratar se colocan en una caja cerrada a través de la cual se hace pasar durante toda la operación una corriente de amoníaco, manteniéndose el conjunto de una temperatura comprendida entre 480 y 620°C . Al calentarse el amoníaco a esas temperaturas, se disocia parcialmente en nitrógeno e hidrógeno. El nitrógeno penetra a través de la superficie del acero y se combina con el hierro y elementos de aleación formando nitruros. En la figura se aprecia el gran espesor de la capa dura de un engranaje nitrurado. Con este tratamiento se consiguen durezas elevadísimas que no se obtienen por otros procedimientos de endurecimiento superficial, alcanzándose en la capa dura de los aceros durezas superiores a 70 rockwell C. Actualmente se ha desarrollado un tipo especial de aceros aleados, denominados aceros de nitruración, con contenidos de 0,25 a 0,50% de carbono y de aluminio, cromo y molibdeno de hasta 3% especialmente adecuados para sufrir este tratamiento. Los procesos de nitruración son muy largos (con un proceso de 50 h se obtiene una capa nitrurada de un espesor aproximado de 0,381 mm) y rara vez se utilizan para la obtención de capas duras de espesor superior a 0,500 mm. Por ser la temperatura de nitruración inferior a la temperatura crítica



Treatment	Capa cementada	Núcleo
A—adecuado para los aceros de grano fino	Grano fino; con carburo en exceso sin disolver	Grano grueso; blando y mecanizable
B—adecuado para los aceros de grano fino	Grano un poco más grueso; parte del carburo en exceso se disuelve	Afinado parcialmente; más resistente y tenaz que en A
C—adecuado para los aceros de grano fino	Estructura ligeramente gruesa; se favorece la disolución del carburo en exceso; en los aceros de muy alta aleación se promueve la retención de austenita	Afinado; el núcleo adquiere una dureza y resistencia máximas; una combinación de la resistencia y ductilidad mejor que en B
D—adecuado para los aceros de grano fino	Afinado; se favorece la disolución del carburo en exceso; la retención de austenita reducida al mínimo	Afinado; blando y mecanizable; tenacidad y resistencia al choque máximas
E—adecuado solo para los aceros de grano fino	Estructura gruesa con el exceso de carburo disuelto; austenita retenida; deformaciones mínimas	Grueso, pero duro
F—adecuado solo para los aceros de grano fino	Afinado; se favorece la solución del carburo en exceso; la retención de austenita reducida al mínimo	Grueso, buena tenacidad

del acero las variaciones dimensionales o las deformaciones que se produzcan serán muy pequeñas. Los objetos que se desea nitrurar son siempre templados y revenidos a temperaturas superiores a 593°C (superiores por tanto a la temperatura de nitruración) — antes de la nitruración para que el núcleo central quede con el máximo de tenacidad. Muchas piezas se tratan mecanizadas totalmente e incluso rectificadas. Los principales inconvenientes de este procedimiento son la fragilidad de la capa dura y su costo que en relación con la cementación es más elevado. La nitruración encuentra gran aplicación en la fabricación de piezas motores de aviación, calibres, camisas de cilindros, levas, válvulas, etc.

ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL POR LLAMA. — Este procedimiento consiste en templar determinadas zonas de las piezas, fabricadas, con aceros de contenidos en carbono alto o medio, calentándolas rápidamente y enfriándolas inmediatamente en agua o en un chorro de aire. Las piezas se pueden calentar bien con un soplete oxiacetilénico, bien en instalaciones más complejas en las que automáticamente se verifica el calentamiento, temple y movimiento de la llama. Como se calienta solo en pequeña parte de las piezas, prácticamente no se producen deformaciones. Las piezas a tratar se suelen templar y revenir antes, con el fin de que el núcleo adquiera las propiedades deseadas. Aunque este procedimiento se presta más para aplicarlo en las piezas de sección uniforme, se utiliza también en el caso de grandes piezas por su volumen no pueden ser introducidas en los hornos de temple. Este procedimiento se utiliza para aumentar la dureza superficial y resistencia al desgaste de los bulones de los pistones, ejes, engranes grandes, levas e instrumentos manuales

ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL POR CORRIENTES DE INDUCCIÓN. — En principio, este procedimiento es similar al anterior caracterizándose ambos por ser procedimientos de temple superficial que se realizan sin que varíe la composición química del acero. Este procedimiento se aplica principalmente a los aceros con un contenido de carbono medio. La pieza que se va a endurecer superficialmente constituye el secundario de una instalación de calentamiento por corrientes de alta frecuencia en la que el primario está constituido por varias espiras de tubo de cobre, por cuyo interior circula agua de refrigeración durante la operación. Cuando a través de las espiras del primario pasa una corriente alterna de alta frecuencia se crea un campo magnético alternativo, el cual da lugar al nacimiento en el acero de co-

rrientes de Foucault y efectos de histeresis. La resistencia que opone el material al paso de estas corrientes origina la transformación de la energía en calor, produciéndose el calentamiento de la pieza. En el endurecimiento superficial — por corrientes de inducción, encierra gran importancia el hecho de que las corrientes de inducción, encierra gran importancia el hecho de que las corrientes de alta frecuencia se desplazan por la superficie del conductor, conociéndose este hecho con el nombre de efecto pelicular. La profundidad total a que penetra el calor depende tanto de la frecuencia empleada, la cual varía de 2,000 a 500,000 cps. con el tiempo durante el cual puede transmitirse el calor hacia el interior por conducción. Por este procedimiento el calentamiento es sumamente rápido, cuestión de segundos, cortándose la corriente una vez terminado y templándose inmediatamente la pieza al ser enfriada por unos chorros de agua. En el caso de piezas de cierta longitud y de sección recta uniforme, tales como sierras de cinta o husillos largos, se puede aplicar con éxito este procedimiento de una manera progresiva, lográndose un temple superficial con calentamiento por corrientes de inducción.

