1261

F A C U L T A D D E I N G E N I E R I A

U. N. A. M.

SEMINARIO DE INGENIERIA MECANICA

ÚNICO

TRATAMIENTOS TERMICOS DEL ACERO

TRABAJO QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

PRESENTA EL PASANTE

SERGIO ARTURO DE ALBA RUIZ

1 9 6 9

Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM
Biblioteca Central
Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

1261

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

TRATAMIENTOS TERMICOS DEL ACERO

Sergio A. de Alba Ruiz

MEXICO, D. F. 1969

I N D I C E

I.- INTRODUCCION. 1

II.- COMPOSICION DE LOS ACEROS 5

III.- CLASIFICACION DE LAS ALEACIONES HIERRO-CARBONO . . . 13

IV.- DIAGRAMA HIERRO-CARBONO 15

V.- TRATAMIENTOS TERMICOS 18

VI.- TEMPLABILIDAD 46

VII.- PRUEBAS DE DUREZA 52

CONSIDERACIONES FINALES 58

BIBLIOGRAFIA 59

I.- INTRODUCCION

Para el correcto estudio de los tratamientos térmicos de los metales es necesario el conocimiento de su estructura.

Existen dos tipos de sólidos: los cristalinos y los amorfos. Los cristalinos tienen sistemas definidos de átomos, que se repiten uniformemente en todo el sólido, en cambio en los amorfos los sistemas de átomos no se repiten uniformemente en todo el sólido.

La estructura cristalográfica de los metales se origina en una disposición atómica regular llamada retículo atómico. Los más importantes son:

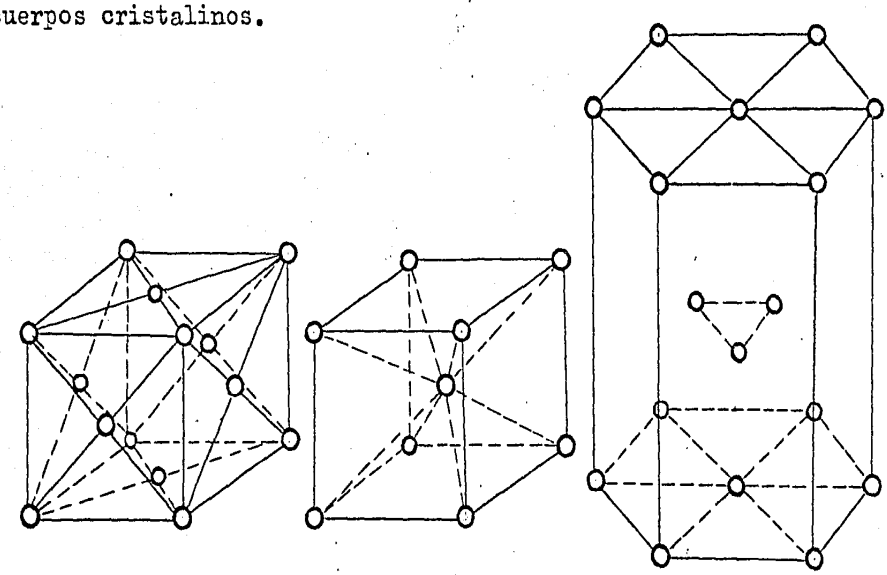
1).- Cubos de caras centradas: cuando el centro de las caras está ocupado por un átomo.

2).- Cubo centrado: cuando está el centro del cubo ocupado por un átomo.

3).- El retículo exagonal: tiene un átomo en el centro de la cara inferior y otro en el centro de la cara superior y tres átomos formando un triángulo entre la cara superior y la inferior.

En el retículo atómico hay planos que contienen varios átomos. Los planos más importantes son los que contienen mayor número de átomos, ya que en ellos se produce el clivaje en la deformación en caliente o en frío.

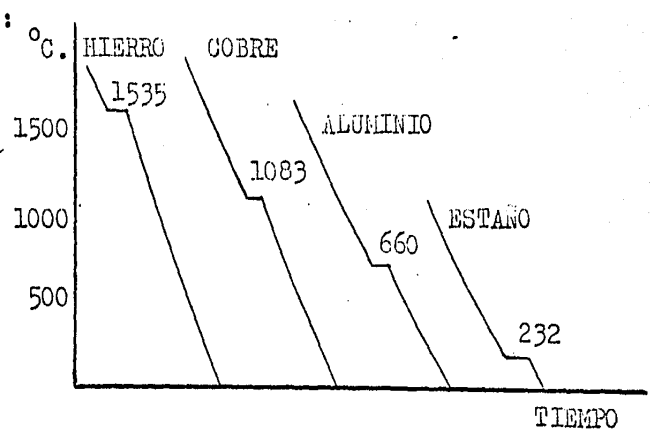
Si un cuerpo cristalizado se rompe, los fragmentos no adoptan formas irregulares, sino que presentan una fractura neta, que conserva la forma geométrica del cristal primitivo. A esta separación mecánica se le llama clivaje y es exclusiva de los cuerpos cristalinos.



CUBO DE CARAS CENTRADAS CUBO CENTRADO RETICULO EXAGONAL

SOLIDIFICACION.- Supongamos que se tiene un metal puro fundido y que lo enfriamos lentamente, observando su enfriamiento, notaremos que la temperatura se estabiliza durante un cierto período de tiempo, en el cual empieza a verificarse la solidificación del metal y posteriormente continúa el enfriamiento hasta la temperatura ambiente.

Representando este proceso en un gráfica, se obtendrán las siguientes curvas:



Aleaciones.- Una aleación es una substancia homogénea con carac ter metálico constituída por dos o más metales ó metales y meta loides.

Lo mismo que los metales, las aleaciones están constituídas por granos cristalinos integrados por átomos agrupados con arre glo a su correspondiente red espacial, pero como en este caso - los átomos no son todos de la misma naturaleza, los granos cris talinos podrán ser ó no idénticos en su estructura y composi - ción.

Vamos a suponer que procedemos a solidificar una aleación- de dos metales. Al solidificarse este líquido homogéneo pueden- suceder dos casos:

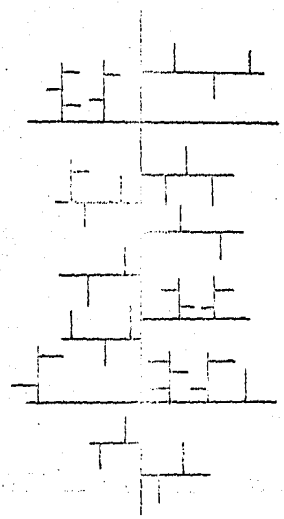
1).- Que los átomos de los dos metales sigan mezclados en- cada grano cristalino, obteniéndose cristales mixtos- con átomos de los dos elementos.

2).- Que los átomos de cada metal se separen en la solidi- ficación, obteniéndose granos cristalinos de uno y - del otro metal.

En el primer caso puede suceder que existan entre los áto- mos, enlaces iónicos, formándose un compuesto químico, o bién,- que no existan esos enlaces, originándose los cristales mixtos- en cuyo caso, los cristales así formados, por su analogía con - las soluciones líquidas se denominan soluciones sólidas.

En el segundo caso, los granos cristalinos de distinta com posición estarán entremezclados y aunque la homogeneidad será - menor que la obtenida en el caso anterior, puede considerarse - suficiente para cumplir con las condiciones de homogeneidad.

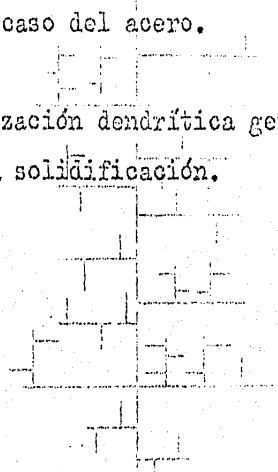
CRISTALIZACION DENDRITICA.- La estructura atómica del hierro es un cubo y el desarrollo cristalino sigue las direcciones de sus diagonales, al estar dichas diagonales lo suficientemente alargadas, las condiciones favorables a la cristalización en esas direcciones aumentarán, de manera que se incrementará más rápido en ese sentido y perpendicularmente entre si, como se muestra en la siguiente figura:



El desarrollo continúa en las ramificaciones secundarias hasta llenar el espacio libre. Se llama cristalización dendrítica por el aspecto que adquiere durante el proceso.

La velocidad de crecimiento de un cristal crece con el descenso de temperatura, hasta alcanzar rápidamente valores elevados, como en el caso del acero.

La cristalización dendrítica generalmente desaparece después de finalizada la solidificación.



II.- C O M P O S I C I O N D E L O S A C E R O S

Los aceros son aleaciones o combinaciones cuyo principal constituyente es el Hierro combinado con carbono, este en porcentaje que varía de 0.1 a 1.7 aproximadamente y en algunos casos, además de estos, contienen: Cromo, Níquel, Silicio, Manganeso, Tungsteno, Molibdeno, Aluminio, Titanio, Cobre, Cobalto, Zinc, Vanadio, en diversas proporciones, aunque algunos de estos se alean muy raras veces.

Los constituyentes principales de la estructura resultante son:

FERRITA.- La ferrita es Hierro Alfa, es decir, Hierro casi puro que puede contener en solución cantidades pequeñas de fósforo, Silicio y otras impurezas.

Cristaliza en el sistema cúbico de cuerpo centrado, tiene una resistencia de 2800 $Kg/cm.^2$, 35% de alargamiento y una dureza de 90 unidades Brimell. Es un material muy blando, dúctil y maleable, conteniendo un máximo de 0.05% de carbono.

PERLITA.- Es una mezcla eutectoide, con una estructura laminar compuesta de capas alternadas de ferrita y cementita. - Tiene una resistencia de 8000 $Kg/cm.^2$ y un alargamiento de 15%- aproximadamente. Contiene 86.5% de Ferrita y 13.5% de cementita.

Según la distancia interlaminar, la perlita se clasifica en:

Perlita gruesa, cuya separación entre láminas es de 400$\mu\mu$ y tiene una dureza de 200 unidades Brinell; Perlita normal que tiene una separación de 350$\mu\mu$ y 220 unidades Brinell de dureza y la Perlita fina que tiene 250$\mu\mu$ de separación entre láminas y una dureza de 300 unidades Brinell.

CEMENTITA.- Se da este nombre al carburo de hierro, es el constituyente más duro y frágil de las aleaciones hierro - carbono. Es magnética a la temperatura ordinaria, pero pierde su magnetismo a 218°C. Puede aparecer en diversas formas en los aceros:

1).- Como Cementita proeutectoide en los aceros con más de 0.89% de carbono, formando una red que envuelve los granos de Perlita y también en forma de agujas finas que partiendo de la red, se dirigen hacia el interior de los cristales.

2).- Formando parte de la Perlita, se le llama Cementita Perlítica o Eutectoide.

3).- Como Cementita globular, cuando los aceros de 0.89% a 1.4% de carbono han sufrido un recocido a una temperatura de 720°C. aproximadamente.

AUSTENITA.- Es considerada como una solución sólida de carburo de hierro en Hierro Gamma. Puede contener desde 0 a 1.7% de C., es relativamente blanda, no es susceptible de imanarse y su límite elástico es muy bajo. Al examen microscópico se aprecia generalmente en forma de pequeñas agujas ligeramente coloreadas.

MARTENSITA.- Este constituyente se encuentra en los aceros templeados, está formada por una solución sólida sobre saturada de carburo de hierro en hierro Alfa. Se obtiene por enfriamiento rápido de los aceros desde una alta temperatura. Tiene una resistencia de 1700 a 2500 Kg./cm.^{2} y una dureza de 50 a 68 cifras Rockwell-C y un alargamiento de 2.5 a 0.5%, que varían según el contenido en carbono.

Al observarse con el microscópio aparece como una acumulación de agujas muy finas que se cruzan triangularmente. Cuando

aparecen las agujas de Martensita sobre fondo blanco de Austenita, la observación es bastante clara. Se obtiene esta estructura en los aceros de alto contenido en carbono, en los que no se ha conseguido la transformación completa de la Austenita en Martensita.

La Martensita cristaliza en el sistema tetragonal y su retícula elemental está formada por un paralepípedo que difiere muy poco del cubo de cuerpo centrado del Hierro Alfa.

TROSTITA.- Es un agregado extremadamente fino de Cementita y de Hierro Alfa. Aparece en los aceros enfriados, desde el estado austenítico, a velocidades ligeramente inferiores a las del temple y en el corazón de grandes piezas templadas en agua.

Es un constituyente de forma nodular con estructura radial aparece comunmente acompañando a la Martensita y a la Austenita, situada en los contornos de los cristales.

Si se examina la Trostita con el microscopio se puede apreciar la presencia de laminillas, orientadas hacia un nódulo central.

SORBITA.- Es un agregado fino de Cementita y Hierro Alfa. Se obtiene enfriando la Austenita a una velocidad bastante inferior a la crítica de temple.

Es el constituyente de máxima resistencia de los aceros.- Al observarse al microscopio aparece formado por pequeños gusanillos y a veces con granos blancos muy finos sobre fondo obscuro.

Tiene una dureza de 250 a 400 unidades Brinell y un alargamiento de 10 a 20%.

Es el constituyente de casi todos los aceros forjados y laminados, debido a que la velocidad de enfriamiento no es lo suficientemente lenta para la formación de perlita.

BAINITA.- Aunque este constituyente puede aparecer en un acero templado, es el constituyente característico del tratamiento isotérmico denominado austempering.

Existen dos tipos de estructura de la bainita: la bainita superior que tiene un aspecto arborescente formada a 500°C y la bainita inferior, formada de 250 a 400°C., la cual presenta un aspecto acicular semejante al de la martensita.

La bainita superior está constituida por una matriz ferrítica que contiene carburos. La bainita inferior está formada por agujas alargadas de ferrita conteniendo placas delgadas de carburos.

LEDEBURITA.- Es un eutéctico de cristales mixtos de hierro y carburo de hierro con un contenido de carbono de 4.25% a 1130°C.

También se le puede considerar como una mezcla de cristales de austenita y cementita.

INFLUENCIA DE LOS PRINCIPALES ELEMENTOS DE ALEACION

SILICIO.- Aumenta la dureza del acero y en mayores cantidades lo hace quebradizo. Tiene propiedades desoxidantes y para aprovechar dichas propiedades, sin perjudicar al acero, se debe añadir combinado con manganeso en forma de ferromanganeso y ferrosilicio.

Los aceros de bajo contenido en carbono pueden forjarse hasta con 7% de silicio y los de alto contenido en carbono hasta con 5% de silicio.

La carga de ruptura y el límite elástico de los aceros de bajo contenido en carbono aumentan proporcionalmente con el Silicio hasta un 5% de éste, al seguir aumentando el porcentaje de Silicio estas propiedades disminuyen rápidamente.

La resistividad eléctrica aumenta casi proporcionalmente con el contenido de Silicio. En los aceros de alto contenido en carbono es menos la influencia del Silicio sobre las propiedades mecánicas.

MANGANESO.- Aumenta la dureza de los aceros al igual que el Silicio, pero dificulta su soldabilidad.

Un contenido mayor de 0.75% de manganeso produce un acero quebradizo. El manganeso eleva la dureza y resistencia a los aceros martensíticos pero los hace muy quebradizos.

MOLIBDENO.- Aumenta la resistencia a la tracción del acero, manteniendo su ductilidad, aumenta la dureza y hace que permanezca invariable al elevarse la temperatura.

NIQUEL.- Eleva en forma considerable la resistencia a la tracción y el límite elástico del acero.

Los aceros con un contenido de 22% de Níquel tienen una gran resistencia a la corrosión del agua salada y con porcentajes de 36% tienen un coeficiente de dilatación muy inferior al del Pt., lo cual es muy útil en la fabricación de instrumentos de precisión.

Un contenido de niquel de 30% produce en el acero una elevada resistividad eléctrica.

CROMO.- Con el Cromo los aceros adquieren un considerable aumento de dureza. Con un contenido de cromo de un 10% y un tratamiento térmico conveniente son muy resistentes a la corrosión y con un 28% de Cromo resisten elevadas temperaturas sin oxidarse.

La presencia del cromo dificulta la soldabilidad en los aceros, pero no ofrece dificultad alguna en la soldadura autógena.

VANADIO.- El Vanadio hace a los aceros más maleables, con una elevada resistencia a la tracción y a la fatiga.

WOLFRAMIO.- Su presencia en los aceros los hace que conserven su dureza al aumentar considerablemente la temperatura hasta unos 600°C.

COBALTO.- Aumenta considerablemente la resistencia mecánica y el límite de elasticidad del acero. Mejora la aptitud cortante del acero de herramientas.

COMPOSICIONES DE LOS ACEROS MOLDEADOS

CLASE	TIPO	C	Si	Mn	Ni	Cr	W	Mo
ACERO AL CARBONO	0.20% C	0.21	0.27	0.69	-	-	-	-
	0.30	0.32	0.24	0.73	-	-	-	-
	0.40	0.39	0.26	0.64	-	-	-	-
	0.60	0.62	0.22	0.66	-	-	-	-
	0.75	0.73	0.27	0.69	-	-	-	-
ACERO ALEADO	Mn 1.5%, 0.25%C	0.23	0.31	1.41	-	-	-	-
	Ni-Cr	0.36	0.28	0.53	1.62	0.76	-	-
	Ni-Cr,Mo	0.32	0.23	0.72	1.87	0.78	-	0.38
	C-Cr	0.43	0.29	0.58	-	0.89	-	-
ACERO INOXIDABLE	14% Cr	0.29	0.48	0.53	-	13.4	-	-
	18% Cr, 2% Ni	0.17	0.31	0.57	1.7	17.9	-	-
ACERO RESISTENTE A LOS ACIDOS	18% Cr, 8% Ni	0.10	0.73	0.38	8.2	18.4	0.63	-
ACERO RESISTENTE AL CALOR	Mo (a)0.20% C	0.18	0.24	0.63	-	-	-	0.51
	(b)0.30% C	0.32	0.36	0.78	-	-	-	0.58
ACERO RESISTENTE AL CHOQUE	Mn-Mo	0.25	0.26	1.43	-	-	-	0.54
ACERO RESISTENTE AL DESGASTE	C-Cr	0.73	0.34	0.81	-	1.62	-	-
	Con Mn	1.07	0.72	12.8	-	-	-	-

PROPIEDADES MECANICAS DEL ACERO

Para conocer la calidad del acero y sus posibles aplica - ciones, se deben saber sus principales características, las cuales se determinan por medio de ensayos o prubas apropiadas.

Entre las características que deben interesar en la industria, las características mecánicas son de las más importantes para determinar el empleo adecuado de los aceros.

Las propiedades mecánicas del acero son:

Elasticidad.- Es la propiedad que permite que un material se deforme al aplicar una carga y que recobre su tamaño origi - nal al eliminar dicha carga.

Aunque el grado de elasticidad del acero es muy pequeño no debe considerarse como una propiedad sin importancia, pues de - él depende el diseño de estructuras de acero que estén someti - das a carga.

Plasticidad.- Es la capacidad de un material para soportar una gran deformación permanente sin romperse.

La condición elástica no continúa indefinidamente, ya que si una determinada carga es eliminada, la barra no recobrará su longitud original y se dice entonces que la barra está plásticamente deformada.

III.- CLASIFICACION DE LAS ALEACIONES HIERRO-CARBONO

Dependiendo de su contenido en carbono, se les divide en 3 grupos:

1).- El hierro dulce con menos de 0.06% de carbono, es el más suave y dúctil pero de resistencia baja, cuyos usos son muy limitados, sirve por ejemplo para herraduras y productos de herrería en general por su facilidad para soldar a golpe. No adquiere el temple.

2).- Los aceros que contienen hasta 1.76% de carbono y se les clasifica en aceros al carbono y aceros aleados. Los aceros al carbono se clasifican según su contenido en carbono en:

Suaves o dulces, con un contenido de hasta 0.20% de C.
Semiduros con hasta 0.50% de C.
Duros con hasta 0.80% de C.
Extraduros con mayor porcentaje.

Los aceros aleados se denominan según los elementos de aleación más importantes que tienen, por ejemplo: aceros al níquel, al cromo, al tungsteno, al molibdeno, alvanadio, etc., o según su uso y propiedades principales: como inoxidables, de alta velocidad, para herramientas, etc.

Los aceros se pueden someter a tratamientos térmicos, con los cuales sus propiedades físicas pueden variarse, esta posibilidad y la gran variedad de aceros existentes, hacen posible que se encuentre un acero apropiado para casi toda clase de aplicación industrial.

3).- Fundiciones o hierros colados, que contienen del 1.76% a 4.5% de carbono, los cuales no son dúctiles y no se de-

dejan deformar plasticamento, no son laminables ni forjables pe ro en cambio son fáciles de fundir, por tener un punto de fu - sión bastante bajo.

Existen 2 clases de fundiciones:

Las grises, en las cuales el carbono está principalmente - como grafito y las blancas en las que el carbono está combinado en forma de carburo de hierro. Las grises son las más usuales,- por ser fácilmente maquinables con herramientas y por ser más - tenaces.

Las fundiciones blancas son muy duras, frágiles y no son - maquinables, se usan solamente donde se desea alta resistencia- al desgaste.

Las fundiciones también pueden ser divididas en:

Fundiciones Hipoeutécticas de 1.76 a 4.3% de carbono.
" Eutécticas alrededor de 4.3% de carbono.
" Hipereutécticas de 4.3% hasta 6% de carbono.

IV.- DIAGRAMA HIERRO - CARBONO

La aleación binaria hierro - Carbono comprende el acero ordinario y la fundición. Como hierro se conoce industrialmente a los aceros muy dulces, que contienen muy poca cantidad de carbono, siendo el único hierro prácticamente puro el que se obtiene electrolíticamente.

A distintas temperaturas, el hierro existe en cuatro formas alotrópicas, que se han denominado Alfa, Beta, Gamma y Delta. Actualmente el hierro Beta ya no es considerado como una forma alotrópica, sino como una modificación no magnética del hierro Alfa. Entre 0° C. y 768°C. Existe el hierro Alfa, de 768°C. a 908°C. el hierro Beta, de 908°C. a 1401°C. el hierro Gamma y entre 1401°C. y 1535°C. el hierro Delta.

En el Diagrama los puntos representan la composición de acero o de hierro gris puros, por lo que no representan estrictamente el comportamiento de los aceros, debido a que estos contienen impurezas, sin embargo, el diagrama sirve de guía para el estudio de los tratamientos térmicos.

El diagrama hierro - carbono nos proporciona una forma fácil de seguir las variaciones debidas a cambios de temperatura en los aceros. En cada curva de enfriamientos se han determinado las temperaturas a las cuales ocurren cambios estructurales, es decir, los puntos críticos. Las líneas del diagrama constituyen el lugar geométrico de los puntos críticos.

Las líneas A_3, $A_{cm.}$ y A_1, han sido trazadas a través de puntos, cada uno de los cuales representa equilibrio en una aleación cuyo contenido de carbono es indicado por la abscisa y la temperatura por su ordenada correspondiente.

La línea ABCD, conocida como la línea "Líquidus", marca el lugar geométrico de los puntos que definen la iniciación de la solidificación. La línea HIECF indica el final de la solidificación y es conocida como línea "Solidus".

La línea GOS indica el comienzo de la transformación de la austenita en ferrita, la línea SE, la transformación de la austenita en cementita y la línea PSK el final de ambas transformaciones. A la temperatura 723°C., se le llama temperatura inicial de austenización.

La línea MO. conocida como Línea Curie indica un cambio en las propiedades magnéticas de la austenita.

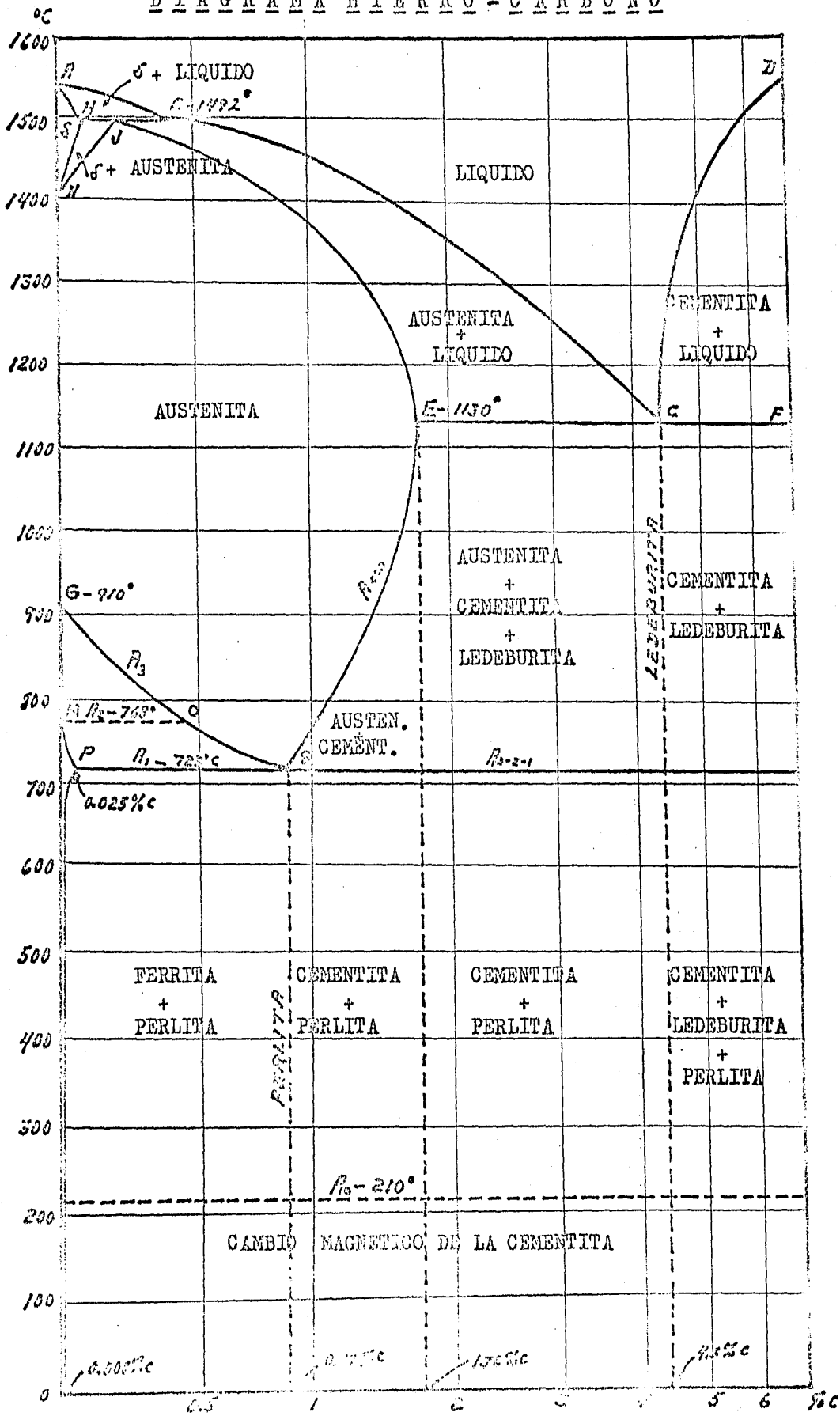
En el diagrama se ve que un acero con un contenido de 0.89% de carbono efectúa la transformación de ferrita y cementita en austenita a temperatura constante, a este acero se le llama Acero Eutectoide.

El acero eutectoide consiste de una mezcla de ferrita y cementita, cuyas partículas están en forma de placas o láminas, a esta estructura se le llama Perlita.

El acero que contiene menos de 0.89% de carbono se le da el nombre de Acero Hipoeutectoide y su estructura contiene Perlita con exceso de Ferrita, a los aceros que contienen más de 0.89% de carbono se les llaman Hipereutectoides y su estructura consiste de Perlita con exceso de Cementita.

Al punto C, se le llama Punto Eutéctico, que corresponde a un contenido de carbono de 4.3%, en este punto la solidificación es isotérmica y coinciden las líneas Solidus y Liquidus.

D I A G R A M A H I E R R O - C A R B O N O



V.- T R A T A M I E N T O S T E R M I C O S

El tratamiento térmico se define como una operación o combinación de operaciones que comprende el calentamiento y enfriamiento de un metal o aleación en estado sólido con el objeto de obtener ciertas propiedades deseadas.

Por medio de un tratamiento térmico las propiedades de un acero pueden alterarse a voluntad y los efectos no son de caracter inalterable, ya que si un acero resultó duro, puede ablandarse o suavisarse para poder ser maquinado y después puede ser endurecido nuevamente ya maquinado. Por lo tanto, podemos adaptar un acero a cualquier condición de trabajo.

La obtención de las propiedades deseadas por medio de un tratamiento térmico, se deben a los cambios estructurales producidos por el calentamiento y enfriamiento.

Todas las piezas de acero moldeado sufren alguna forma de tratamiento térmico, con excepción de algunas piezas de acero bajo en carbono sujetas a un servicio no riguroso.

Los objetivos principales del tratamiento térmico son:

1).- Destrucción y afino de la estructura base del metal bruto de colada.

2).- Eliminación ó alivio de tensiones internas.

3).- Desarrollo de las propiedades físicas necesarias.

El tratamiento térmico más conveniente depende de la composición, forma y exigencias en el servicio de las piezas coladas.

Los fundamentos del tratamiento térmico se derivan de los-

estudios que están resumidos en el diagrama de equilibrio hierro-carbono, en donde se hace referencia al intervalo crítico, en el que se produce en el calentamiento la disolución de la cementita en la ferrita, formándose la disolución sólida austenita.

El acero en lingotes presenta una determinada estructura cristalina que depende de varios factores que pueden variar en el proceso de la colada. Esta estructura cambia durante los calentamientos previos a que hay que someter los lingotes para su forja y este trabajo en caliente destruye y modifica a su vez la estructura adquirida durante el calentamiento.

El forjado ó laminado mejora la estructura primitiva del lingote, dando al acero características mecánicas más elevadas, pero prácticamente, hay siempre necesidad de cambiar o mejorar una o varias veces estas estructuras producidas por el trabajo en caliente, ya que no son adecuadas para maquinar la pieza ó para el trabajo a que han de estar sometidas. De aquí la necesidad de los tratamientos a que hay que someter al acero para que, por medio de calentamientos y enfriamientos adecuados, conseguir las características mecánicas deseadas, modificando la estructura.

Si se lleva un acero a una temperatura alta determinada y se mantiene durante un período de tiempo suficiente para que la estructura que debe tener a esa temperatura sea homogénea, un enfriamiento posterior influirá en su estructura final según sea la velocidad de enfriamiento.

Si la velocidad de enfriamiento es lenta, los cambios de estructura se llevaran a cabo según el diagrama hierro-carbono, pero si el enfriamiento es rápido, la estructura que tenía el

material a la temperatura elevada será retenida o parcialmente-retenida al enfriar dicho acero.

Los tratamientos térmicos son:

Recocido.
Normalizado.
Temple.
Revenido.
Cementación.
Nitruración.
Cianuración.
Sulfinización.
Carbonitruración.

En los tratamientos de cementación, nitruración , cianuración, sulfinización y carbonitruración, no solo se someten los-aceros a calentamientos y enfriamientos, sino que se trata la - superficie de las piezas mediante compuestos químicos y que por difusión varía la composición química en una capa de espesor determinado.

R E C O C I D O

El recocido consiste en calentar la pieza a una temperatura mayor que la temperatura crítica Ac_3, el mantenimiento de ésta por un período de tiempo adecuado, seguido por un lento enfriamiento.

El calentamiento debe ser lento, la temperatura de recocido es generalmente 38°C. mayor que la temperatura crítica y el tiempo durante el cual se mantiene esta temperatura es nomenor de una hora por cada pulgada de sección, la pieza tratada se deja enfriar lentamente.

El recocido tiene como propósitos:

1).- Hacer desaparecer las tensiones internas.
2).- Perfeccionar la estructura cristalina.
3).- Expulsar gases.
4).- Producir una microestructura definida.
5).- Producir la mayor suavidad posible en su clase.
6).- Modificar la ductilidad, la tenacidad y las características eléctricas o magnéticas.
7).- Producir una reorientación del grano.
8).- Homogeneizar la estructura.

El proceso consiste en calentar el acero sobre su temperatura crítica y enfriarlo lentamente. Para un acero hipoeutectoide, el cual es una mezcla de ferrita y perlita, primero se calentará sobre su temperatura crítica con el objeto de transformar completamente a austenita, una vez que sea homogénea la estructura se procede a enfriarlo lenta y uniformemente, la estructura resultante será perlita laminar y ferrita libre.

La velocidad de enfriamiento será inversamente proporcional al tamaño de la pieza, cualquier variación en la velocidad de enfriamiento altera la forma en que la ferrita y la perlita precipitan de la austenita.

El recorrido de enfriamiento de los aceros eutectoides e hipereutectoides presenta una diferencia debido a los porcentajes diferentes en la composición de su estructura.

Como norma general se puede decir que los aceros después de su trabajo en caliente, deben recocerse y lo ideal es meterlos en el horno de recocer sin que hayan perdido el calor con que termina la operación en caliente, de este modo no hay peligro de que algunos se templen en su enfriamiento, se ahorra combustible o energía, se quitan las tensiones de forja o laminado y se deja el acero en condiciones ideales para recibir el temple si es necesario.

Un acero bien recocido presenta una gran homogeneidad en su estructura, queda libre de tensiones internas y su dureza será la mínima en su clase.

El recocido se puede dividir en 3 clases, según las temperaturas críticas:

Recocido subcrítico.- Se calienta el acero a una temperatura menor que la temperatura crítica de calentamiento Ac_1. - Con esta clase de recocido se suaviza el acero, se eliminan gases y se reducen esfuerzos. Debido a que no se forma austenita el proceso de enfriamiento se ve limitado únicamente por la condición de esfuerzos internos.

Recocido crítico.- Se calienta el acero a una temperatura comprendida entre las líneas críticas Ac_1 y Ac_3. Con este tipo de recocido se alteran los efectos magnéticos y eléctri-

cos, se reorientan los granos y la cementita se esferoidiza.- En el proceso de enfriamiento la austenita no solo puede transformarse en perlita sino en bainita o martensita.

Recocido total.- En esta clase de recocido el acero se - calienta hasta una temperatura de 10°C. arriba de la crítica- Ac_3. El proceso de enfriamiento es muy importante, debiéndose conocer las temperaturas críticas y el diagrama isotérmico de transformación.

Si la velocidad de enfriamiento, entre las líneas Ar_1 y Ar_3 es baja, resultará una estructura suave y si es alta se- obtiene perlita. Este tipo de recocido elimina esfuerzos, - disminuye la dureza, altera las propiedades mecánicas y homogeiniza la microestructura.

Los mejores hornos para recocer son los eléctricos de - resistencia. El horno debe cerrar lo mejor posible para evitar la entrada de aire, ya que disminuye el rendimiento y - produce oxidación en las piezas.

N O R M A L I Z A D O

El normalizado consiste en el calentamiento de una pieza de acero a una temperatura aproximadamente 40°C. mayor - que la temperatura crítica Ac_3, seguido de un enfriamiento - en aire hasta la temperatura ambiente.

Es un tratamiento intermedio entre el recocido y el temple que no perjudica en nada al acero suave que, a pesar del enfriamiento rápido puede mecanizarse fácilmente, teniendo - además la ventaja de igualar el grano y la dureza del material.

El normalizado también se usa cuando se han empleado aceros algo más bajos en carbono, que los necesarios para dar unas características mecánicas con material recocido, siempre que el porcentaje de carbono sea superior a 0.25, pues enfriando al aire, adquieren algo más de dureza que con el recocido.

En el proceso se calienta la pieza a una temperatura mayor que la crítica, hasta que se efectúe la completa formación de austenita y enseguida se deja enfriar en el aire.

Con el enfriamiento lento, los aceros hipoeutécticos precipitarán en forma de ferrita entre los puntos críticos Ar_3 y Ar_1, la ferrita precipitada formará una red unida alrededor de la austenita restante. Al descender la temperatura a Ar_1, la austenita se transformará en perlita laminar.

Con incrementos de la velocidad de enfriamiento las placas laminares de perlita tenderán progresivamente hacer más finas.

En la fase proeutectoide, la ferrita disminuye gradualmente en volumen, hasta que a una velocidad de enfriamiento suficientemente alta, será suprimida totalmente.

En los aceros de bajo contenido en carbono esta condición no se presenta, ya que hay tanta ferrita presente que su precipitación no se puede suspender ordinariamente.

Los cambios en la estructura influyen en las propiedades físicas, con los incrementos de finura de la perlita sobre las obtenidas con el enfriamiento en el horno, se incrementan la resistencia y la ductilidad.

La producción de perlita de grano fino, tal como se produce con el enfriamiento al aire, en piezas de pequeña sección

transversal, es muy deseable cuando se requieren propiedades físicas altas, sin embargo, en piezas de secciones grandes, la masa impedirá el enfriamiento a la velocidad óptima, pero aún así, pueden ser obtenidas cualidades considerablemente mejores, sobre las obtenidas con el enfriamiento en el horno.

Para aceros hipereutectoides casi no se usa el normalizado, sin embargo, cuando el acero ha precipitado como una red quebradiza de cementita en los límites del grano y a lo largo de los planos cristalográficos, es necesario la normalización de tal forma que la red quebradiza no tenga oportunidad de precipitar, el normalizado producirá una perlita de grano fino que responderá a cualquier tratamiento posterior que sea necesario.

T E M P L E

El temple es un tratamiento que consiste en el calentamiento de una pieza de acero hasta una temperatura superior a la crítica Ac_3, seguido de un enfriamiento a mayor velocidad que la crítica, para que una vez enfriada totalmente la pieza, tenga la misma estructura, con alguna variación, de la que se forma al calentar a una determinada temperatura y que comunica al acero, elevadas características mecánicas.

El tratamiento de temple o endurecimiento se basa en que, al calentar o enfriar un acero, las líneas críticas A_1 y A_3 se convertirán en Ac_1 y Ac_3 durante el calentamiento y en Ar durante el enfriamiento.

Cuando el enfriamiento es lento, la línea Ac quedará más alta que las críticas y la Ar quedará debajo de ellas y por lo tanto a mayor velocidad de enfriamiento el punto de trans-

formación caerá mucho más abajo. Por ejemplo, en un acero eutectoide es lógico que la austenita, en vez de transformarse en perlita como en un enfriamiento lento, se transformará en trostita ó martensita según sea la velocidad de enfriamiento, pero siempre y cuando dicha velocidad sea mayor que la crítica.

Si un acero eutectoide es calentado hasta una temperatura inferior a su línea Ac_1 y enfriado rápidamente, se observa que no se produce cambio alguno en su estructura original, si se calienta a una temperatura situada entre las críticas Ac_1 y Ac_3 y se enfría rápidamente, se encuentra que si hay diferencia entre la estructura inicial del acero y la ahora obtenida, ya que parte de la ferrita ha sido absorbida por la solución sólida en que se ha convertido la perlita antes existente, lo cual originará un endurecimiento del acero.

Ahora bien, si el acero original es calentado a una temperatura un poco mayor que la de su crítico Ac_3 y se deja durante un período de tiempo suficiente para que su estructura sea homogénea, se obtiene el grano de austenita más fino posible, el enfriamiento rápido retendrá esta condición y se obtendrá la mayor dureza posible dentro de este tipo de acero.

Pero si se eleva el acero inicial a una temperatura considerablemente mayor que Ac_3, únicamente se obtiene como resultado un incremento en el tamaño del grano, que produce al enfriarse rápidamente un acero quebradizo.

El acero deberá dejarse a la temperatura de temple, el tiempo suficiente para que sea homogéneo, es decir, que se haya llevado a cabo completamente la difusión, de lo contrario las zonas no transformadas serán centros para la precipitación del exceso de ferrita libre, por lo que el acero no tendrá las propiedades requeridas.

BIBLIOTECA CENTRAL
U. N. A. M.

Con el temple se obtiene generalmente una estructura martensítica mezclada con pequeñas cantidades de austenita no -- transformada o con alguna proporción de trostita.

El enfriamiento puede ser al aire, en agua o en ac[illegible] y- en algunos casos en mercurio y es más o menos rápido, según la cantidad de aire o líquido usado y la temperatura de éstos. El enfriamiento al aire puede ser en una atmósfera en calma o empleando aire a presión, en el enfriamiento en agua, puede usarse natural o agua en la que se haya disuelto sosa, cloruro desodio o algún ácido.

Estas adiciones sirven para elevar el punto de ebullición del agua, con lo cual, el temple es más homogéneo en toda la - pieza, por no producirse con tanta facilidad el desprendimiento de burbujas de vapor y haber una mejor circulación del lí - quido.

En el temple hay que tener muchas precauciones y un conocimiento lo más completo posible del acero a tratar para evi - tar posibles estalladuras y grietas que pueden producirse du - rante la operación.

Los aceros de alto contenido en carbono, son los que tienen más probabilidad de agrietamiento, por lo que el templado- debe darse de una manera un poco superficial para poder evitar las estalladuras y grietas, quedando el núcleo central con menos dureza, y la pieza con más elasticidad, sin perder sus características mecánicas.

Como tratamiento previo al temple, se recomienda el recocido, para quitar las tensiones internas y evitar el posible - agrietamiento del material.

Cuando las piezas a templar son grandes y de secciones desiguales, es conveniente empezar el calentamiento teniendo el horno completamente frío y empezar a calentar regulando a una temperatura de 300 a 400°C, conservándola hasta calcular que toda la pieza haya adquirido la misma temperatura, ya que si la pieza se mete en el horno de calentamiento, estando éste a una temperatura arriba de 500°C, es muy probable que debido al calentamiento brusco, se produzcan dilataciones desiguales con el posible estallido de la pieza.

Para el calentamiento, al lado de los hornos deben ir los tanques y las instalaciones para el enfriamiento de las piezas, para que no se produzcan enfriamientos considerables. Estos enfriamientos, aunque sean de pocos grados, han de tenerse siempre en cuenta y calentar un poco más, para que al sumergir la pieza, esté a la debida temperatura.

R E V E N I D O

Es un tratamiento que consiste en calentar el acero a una temperatura más baja que su crítica inferior Ac_1, enfriándolo luego al aire, en aceite ó agua.

Los aceros después de haber sido endurecidos suelen quedar duros o frágiles para los usos a que van a ser destinados. El objeto del revenido no es eliminar los efectos del endurecido sino modificarlos, disminuyendo la dureza, aumentando la tenacidad y eliminando las tensiones internas que tienen los aceros endurecidos.

El revenido se produce en tres etapas:

En la primera etapa, que se realiza a temperaturas inferio

res a 300°C, de la martensita sobre saturada de carbono se precipita un carburo de hierro épsilon, que cristaliza en el sistema hexagonal.

La precipitación del carburo épsilon se realiza en los límites de los subgranos heredados de la austenita, los cuales siguen manifestándose en la martensita.

La formación de carburo épsilon origina una pérdida importante de carbono en la martensita, que queda aproximadamente con 0.25% de C y su red tetragonal se transforma en red cúbica, dando como resultado una disminución en la longitud y el volumen del acero.

En la segunda etapa, que solo se presenta cuando aparece austenita retenida en la microestructura del acero, la austenita retenida se transforma en bainita.

La temperatura en que se produce esta segunda etapa varía de 250 a 600°C. La bainita al ser calentada a altas temperaturas, sufre también una precipitación de carburo de hierro conformación final de cementita y ferrita.

En la tercera etapa se produce una modificación del carburo épsilon, que apareció en la primera etapa, que se redisuelve al aumentar la temperatura, formándose una precipitación de cementita, desapareciendo el carburo épsilon y el carbono se presenta formando cementita tanto en el interior como en los límites de las agujas de martensita.

Al ir aumentando la temperatura se redisuelve la cementita del interior de las agujas, mientras aumenta la red de cementita que envuelve a la martensita.

EFECTOS DE LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO.

El cambio de estructura de los aceros al carbono acaba de efectuarse a 723°C al enfriarse lentamente, sin embargo si la velocidad de enfriamiento aumenta ocurren varios cambios.

La temperatura a la cual se efectúa la transformación desciende, debido a la histéresis térmica por inercia, el tamaño de las partículas de ferrita y cementita disminuye, la velocidad a la que la austenita se convierte en las microestructuras resultantes aumenta.

Estos cambios se pueden ver en los diagramas de transformación tiempo-temperatura, conocidos como diagramas "TTT" ó curvas "S".

Las curvas de transformación tiempo-temperatura se utilizan para predecir la estructura y sus propiedades que se obtienen al enfriar el acero después de la temperatura de austenización.

Cada punto de una curva "TTT" se obtiene enfriando rápidamente pequeñas muestras desde la región austenítica hasta una temperatura abajo de la región, manteniéndose cada muestra a esa temperatura durante diferentes períodos de tiempo y enfriándose después rápidamente en agua. Asi como para determinar los puntos a 540°C sobre la curva TTT de la siguiente figura, las muestras se tienen que enfriar rápidamente desde arriba de la temperatura A_1 hasta 538°C y mantenerse cada muestra a esa temperatura durante intervalos de tiempo diferentes.

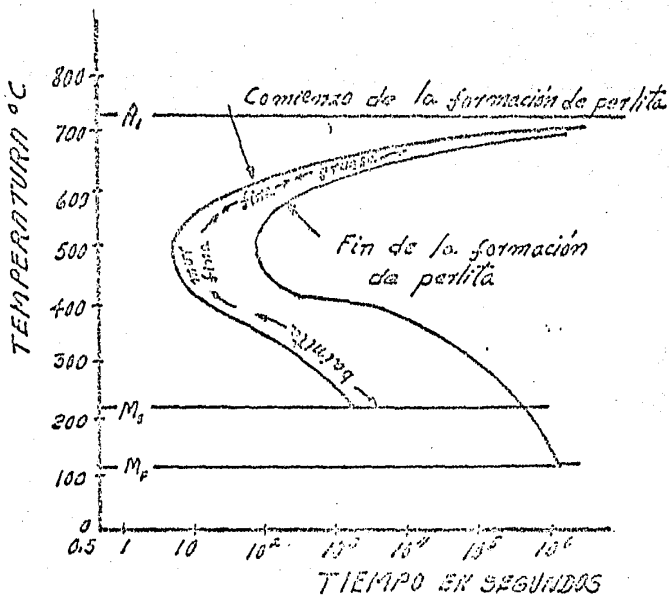


DIAGRAMA TTT PARA UN ACERO CON 0.80% DE CARBONO

Se observa que la muestra mantenida durante 5 segundos estaba comenzando a transformarse en perlita y la muestra mantenida durante 100 segundos estaba transformada por completo en perlita, siendo estos dos tiempos los de comienzo y fin de la transformación sobre la curva TTT.

Si la transformación se efectúa inmediatamente abajo de la temperatura crítica A_1, se forma una perlita relativamente gruesa y se necesita un tiempo relativamente largo para la transformación.

Con temperaturas más bajas, la transformación es más rápida y se obtiene una estructura perlítica más fina. En la figura anterior, la transformación más rápida se efectúa a 540°C, siendo ese punto la "nariz" de la curva.

A una temperatura abajo de la nariz de la curva, la perlita toma más tiempo para transformarse y a temperaturas aún más bajas se obtiene bainita en la transformación. Pero si se en -

fría rápidamente a temperaturas abajo de 140°C y se examina la microestructura, se encontrará que se ha transformado por completo en martensita y que esta transformación no depende del tiempo.

Las curvas TTT no se aplican al caso del enfriamiento continuo, sin embargo, en una operación de enfriamiento cualquiera, puede obtenerse un cuadro cualitativo, superponiendo las curvas de enfriamiento rápido-enfriamiento lento de una función determinada sobre el diagrama TTT.

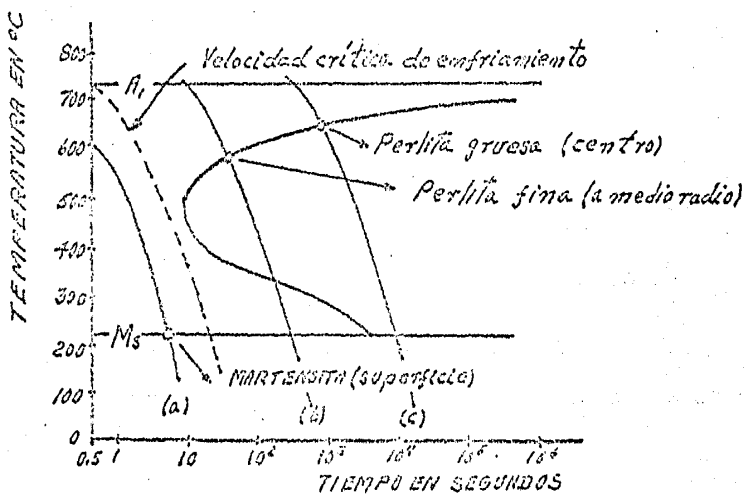


DIAGRAMA TTT PARA UN ACERO CON 0.80% DE CARBONO.

Si una barra grande de acero, con 0.80% de carbono, es enfriada rápidamente, la superficie de la barra se enfría muy rápidamente y se transforma en martensita, en el centro del radio el enfriamiento es menos rápido y se transforma en perlita fina y en el centro el enfriamiento es más lento y se transforma en una perlita gruesa, como se observa en la figura.

C E M E N T A C I O N

La cementación es un tratamiento térmico mediante el cual se carburiza superficialmente una capa de acero.

Casi todas las piezas que componen las máquinas y motores se fabrican de forma que sus propiedades mecánicas sean uniformes en toda la masa, pero algunas piezas es necesario que tengan superficies muy duras, resistentes al desgaste y de núcleo central muy tenaz, para poder soportar los choques a que estan sometidas, para conseguir estas características se usa la cementación.

La cementación consiste en aumentar el contenido de carbono en la superficie de las piezas de acero, rodeándolas con un medio carburante y manteniéndolas durante un cierto tiempo a elevada temperatura. Se pueden emplear cementantes sólidos, líquidos y gaseosos. Cuando se usan cementantes sólidos la duración de la cementación es de 6 a 12 horas, con cementantes líquidos de 1 a 6 horas y de 1 hora a varios días cuando se utilizan cementantes gaseosos.

La afinidad del fierro por el carbono es bastante grande cuando es calentado a una temperatura suficientemente alta en contacto con una materia carbonosa, de tal forma que el fierro absorve rápidamente algo de carbono.

La cantidad de carbono absorvida depende principalmente de:

1).- La temperatura de cementación.
2).- La composición del material sujeto a la cementación.
3).- La naturaleza del material cementante.
4).- La duración de la cementación.

TEMPERATURA DE CEMENTACION.- Para que el fierro pueda absorver fácil y rápidamente carbono, deberá estar en su condición Gamma, es decir, se tiene que calentar a una temperatura arriba de su rango crítico.

La proporción de carbono en la capa cementada aumenta con la temperatura de cementación, pudiendo llegar hasta un contenido de 1.76% de C. a 1130° C. Para cementar un acero de bajo contenido en carbono deberá ser calentado a una temperatura que exceda los 825° C., pués así el acero se encuentra en estado austemítico y disuelve con gran facilidad el carbono.

COMPOSICION DEL MATERIAL.- Los aceros usados para cementar deben tener menos de 0.2% de C. Este tipo de acero, debido a su composición química y a sus características de transformación no puede ser endurecido, pero por medio de la cementación puede obtener una capa con un contenido alto de carbono, la cual es dura en alto grado.

El acero que va a ser cementado no deberá tener más del 0.60% de Mn, para que la capa cementada no resulte muy frágil y quebradiza.

La absorción del carbono es favorecida por aquellos elementos especiales que contiene el acero y que existen en él como carburos dobles, tales como el Mn, Tn, Cr, Mb, en cambio, existe otra serie de elementos que se oponen, tales como el Ni, Si, y Al.

NATURALEZA DEL MATERIAL CEMENTANTE.- Los cementantes pueden ser sólidos, líquidos a la temperatura de cementación y gaseosos, siendo los materiales sólidos los más usados.

Los cementantes sólidos y que no llegan a fundir son: el carbón vegetal, coque, huesos calcinados, etc., los cuales se-

mezclan con carbonatos alcalinos, con el fin de alcanzar capas superiores a 0.60% de C.

Una mezcla de cementante sólido muy empleada es la siguiente:

Carbón vegetal triturado 60%.
Carburo de Bario 40%.

El carbonato de Bario puede sustituirse por carbonato desodio o carbonato de calcio.

Antes se creía que la cementación de los aceros se verificaba al penetrar el carbono del cementante sólido a través de la superficie del acero y difundirse luego hacia el interior, pero recientemente se ha comprobado que la transferencia del carbono al acero, se efectúa por medio de los gases que se desprenden al calentar las mezclas cementantes a alta temperatura, siendo en estos procesos el CO el principal agente carburante.

Las piezas que van a ser cementadas se colocan en cajas de hierro colado, plata o acero inoxidable, cubiertas completamente de material cementante, cerrando bien las juntas con barro o arcillas refractarias.

Los materiales cementantes líquidos (baños de sales) tienen gran aplicación en el cementado de piezas pequeñas, pués es más rápido y sencillo que con cementantes sólidos. Existen gran variedad de materiales cementantes a base de sales dependiendo su composición del espesor que se quiera lograr en la capa cementada.

Para lograr capas de .2 a 1.5 mm. se usa la siguiente composición:

Cianuro de sodio 20%
Cloruro de Bario 30%
Cloruro sódico 25%
Carbonato sódico 25%

Para espesores de 1.5 a 3 mm. se usa:

Cianuro sódico 10%
Cloruro de Bario 55%
Cloruro Sódico 20%
Carbonato sódico 15%

El espesor de la capa cementada depende de la composición del baño, de la temperatura y de la duración del tratamiento.

Los hornos deben estar cubiertos por campanas, de ser posible con tiro forzado para evacuar los gases que son muy venenosos.

Los cementantes gaseosos son mezclas de gases en las cuales unos son activos y otros son portadores.

El gas activo puede ser gas metano, propano o butano. El gas portador es una mezcla de monóxido de carbono, hidrógeno y nitrógeno con pequeños porcentajes de vapor de agua.

La cementación se efectúa colocando las piezas en un horno con atmósfera carburante a una temperatura de 850 a900° C.

La operación se realiza de la siguiente manera: despues de mezclar el gas activo al gas portador la mezcla de gases se conducen al horno de cementación. La cementación la realiza el gas activo al descomponerse según la siguiente reacción:

CH_4 ---- C + $2H_2$

El espesor de la capa cementada depende de la duración de la operación, 0.15 mm. por hora aproximadamente y de la temperatura de cementación.

MECANISMO DE LA CEMENTACION.- El proceso de la cementación es el siguiente:

El carbón a elevada temperatura, en contacto con el oxígeno del aire que se encuentra siempre en el interior de las cajas, da CO según las siguientes reacción:

$$2C + O_2 \longrightarrow 2CO$$

Luego el CO formado se descompone a elevada temperatura en C y bióxido de carbono:

$$2CO \longrightarrow C + CO_2$$

La cementación es producida por cualquiera de las 2 reacciones siguientes:

$$2CO + 3Fe \longrightarrow Fe_3 + CO_2$$

$$C + 3Fe \longrightarrow CFe_3$$

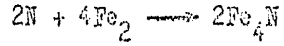
Para que se efectúe con facilidad la absorción del carbono, el acero debe encontrarse en estado austenítico con el Fierro en forma de Fierro Gamma. El carbono queda disuelto en el Fierro Gamma y de acuerdo con las leyes de difusión, al existir en la periferia una concentración más elevada que en el interior penetra hacia el núcleo.

Las mezclas cementantes pierden su actividad con el uso y es necesario renovarlas periódicamente.

N I T R U R A C I O N

Es un tratamiento que tiene por objeto aportar nitrógeno en forma de nitruros de hierro a la capa superficial con lo que se obtiene un endurecimiento de los aceros.

La nitruración se realiza calentando la pieza a 500°C. aproximadamente en una corriente de gas amoniaco durante un tiempo de 24 a 80 horas. El gas amoniaco se disocia por el calor:



$$2NH_3 \longrightarrow 2N + 3H_2$$
$$2N + 4Fe \longrightarrow 2Fe_2N$$
$$2N + 4Fe_2 \longrightarrow 2Fe_4N$$

El gran endurecimiento superficial que se consigue con este tratamiento se sebe a la formación de los nitruros. Los espesores de la capa nitrurada varían entre 0.20 y 0.70mm. Según el tiempo que dure el tratamiento. La profundidad que se obtiene es de 0.2mm. por cada 24 horas.

En este tratamiento no se debe rebasar los 500°C., pués si se opera a temperaturas mayores se tiene el peligro de obtenerse capas muy frágiles, el operar a baja temperatura es una ventaja pues de esta manera no hay aumento de tamaño de grano, y no es necesario someter las piezas a ningún tratamiento posterior ni a ninguna operación de acabado puesto que no sufren prácticamente deformaciones.

Antes de la nitruración, las piezas se maquinan con un exceso de más de 2mm. y después se templan para que queden en las mejores condiciones de soportar la contracción de la periferia después del nitrurado.

Después las piezas se vuelven a maquinar a las medidas - exactas y se protegen las superficies que no se quieran nitrurar sumergiéndolas en un baño fundido de una aleación compuesta de 60% de plomo y 40% de estaño.

Las piezas ya preparadas se colocan en cajas de acero inoxidable de manera que pueda circular bien el gas amoniaco, cerrándose las cajas herméticamente y conectándose el tubo de entrada del amoniaco a las botellas donde se almacena dicho gas a presión, y el tubo de salida se conecta a un frasco lavador para controlar por medio del burbujeo el paso del amoniaco.

Mediante una instalación de control se comprueba periódicamente el grado de disociación del gas amoniaco. La temperatura se controla mediante un pirómetro y un termostato.

Concluída la operación se retiran las cajas del horno dejándolas enfriar al aire sin desconectar el tubo del amoniaco. El paso del gas se interrumpe cuando la temperatura en el interior de las cajas está por debajo de los 150°C. y las piezas - se sacan hasta que las cajas están completamente frias.

Por medio de la nitruración se obtiene una gran dureza superficial y se aumenta la resistencia a la corrosión en agua - dulce, salada y en atmósferas húmedas. En las piezas nitruradas no se producen deformaciones y se mantiene la dureza lograda a temperaturas cercanas a los 500°C.

Los aceros empleados en este tratamiento deben ser aleados con un contenido en carbono de 0.25 a 0.50%, pues si se emplearan porcentajes inferiores a 0.25% el núcleo no tendría la resistencia necesaria para soportar la presión de la capa nitrurada y si se usan aceros con contenidos superiores a .50% - de C. presentarían dificultades en el maquinado.

C I A N U R A C I O N

La Cianuración de los aceros tiene por objeto endurecer - los superficialmente por la acción combinada del carbono y el- nitrógeno, por lo tanto se puede considerar como un proceso - mixto de cementación y nitruración.

El tratamiento se realiza calentanto las piezas de 700 a- 900°C. en un baño compuesto generalmente:

Cianuro Sódico 30 a 40%
Carbonato Sódico 30 a 40%
Cloruro Sódico 20 a 30%

Este baño en contacto con el aire y a consecuencia del calor produce las reacciones siguientes:

$$2CNNa + O_2 \longrightarrow 2CNONa$$
$$4CNONa \longrightarrow 2CNNa + CO_3Na_2 + CO + 2N$$
$$2CO \longrightarrow C + CO_2$$

El Nitrógeno naciente se combina con el acero formando nitruros y el carbono se disuelve en el Hierro Gamma ya que la - temperatura que se tiene, se encuentra el acero en estado austenítico.

Para que la cianuración se efectúe es preciso que haya un 3% de cianato sódico.

El espesor de la capa cianurada depende de la duración - del tratamiento obteniéndose espesores de 0.3 mm. máximo de - profundidad en un tiempo de aproximadamente 50 minutos.

Este tratamiento se aplica para endurecer piezas de acero de bajo y medio contenido de carbono.

S U L F I N I Z A C I O N

El objeto de la sulfinización es aumentar la resistencia al desgaste de las piezas tratadas, calentándolas en un baño de sales.

La temperatura debe ser de 560 a 570°C. y el horno para la fusión de las sales debe ser eléctrico con regulación automática de temperatura y de buena precisión, ya que si se pasa de los 575°C. se produce un hinchamiento en el material.

El baño de sales se compone de tres tipos de sales:

Sales activas, formadas casi exclusivamente por sulfito de sodio; sales protectoras para impedir la oxidación de las sales activas y sales de soporte alcalinas para bajar hasta 450°C. la temperatura de fusión de la mezcla.

Dependiendo de los tamaños y espesores de las piezas el tiempo que dura la operación varía entre 30 minutos y 3 horas, obteniéndose como máximo una profundidad de capa de .3mm.

Como efecto del tratamiento se advierte una débil corrosión superficial que origina microcavidades, que vista al microscopio presenta el aspecto de piel de gallina, cuyas asperesas formadas por material muy transformado se aplastan en cuanto se inicia el rozamiento.

Este tratamiento se puede aplicar a los aceros al carbono cualquiera que sea su composición, pero es preferible que contengan molibdeno.

Las piezas sulfinizadas resisten temperaturas muy elevadas en el rozamiento, hasta 600°C.

Debido a que la sulfinización no produce aumento de dureza y que no es conveniente el templado por las deformaciones que puede originar se recomienda como operación previa la nitruración.

Las piezas que se van sulfinizar se precalientan a unos 500°C. y después se introducen en el baño que deberá estar a una temperatura de 565°C.

Después de una hora de tratamiento se tendrá un espesor de 0.15mm., lo cual es suficiente en caso que no vaya a ser rectificada la pieza posteriormente, pero si se ha de rectificar se prolonga el tratamiento durante 3 horas para obtener una capa de 0.3mm.

Las piezas sulfinizadas tienen gran aplicación en piezas de maquinaria sometidas a rozamientos y tambien en herramientas tales como brocas, escareadores etc.

La capa sulfinizada tiene un propiedad que se le denomina como autopropagación del efecto cementante del azufre. Se observa en ejes tratados girando en chumaceras que su diámetro disminuye en varios milímetros después de miles de horas de trabajo, mientras que la capa sulfinizada se mantiene inalterable. Parece como que la capa tratada va emigrando hacia el interior de la pieza conforme ésta va desgastándose.

La capa tratada tiene una cualidad, su autosoldabilidad, a la que se atribuye en parte sus características favorables al rozamiento.

C A R B O N I T R U R A C I O N

Es un tratamiento mediante el cual se endurece una capa superficial por la absorción simultánea de carbono y nitrógeno. - La operación es semejante a la cementación gaseosa, empleándose gas portador formado por monóxido de carbono, nitrógeno, hidrógeno y gas metano y como gas activo amoniaco.

La carbonitruración produce una disminución en la velocidad crítica de temple, que es debida a la aportación del nitrógeno a la austenita.

Con una aportación de .50% de nitrógeno el punto A_1 baja a 590°C. para un acero con un contenido en carbono de 2%. El proceso se realiza a temperaturas cercanas a los 900°C. es decir,- con el acero en estado austenítico.

Al ser las temperaturas de transformación de la austenita más bajas, puede realizarse el tratamiento a temperaturas inferiores a las de cementación, por lo que hay una disminución del crecimiento del grano.

Existen tres tipos de carbonitruración:

1o.- Carbonitruración ligera, con espesores de 2 a 4 centésimas de milímetro, para piezas expuestas a deformaciones en el calentamiento o enfriamiento. La operación se realiza a una temperatura de 650 a 690°C.,el temple se realiza enfriando en corrientes de aire obteniéndose después del revenido una dureza de 35 a 55 cifras Rockwell-C.

2o.- Carbonitruración media, de .05 a .09mm. de profundidad, para piezas corrientes. Las temperaturas empleadas varían entre 790 y 900°C., el temple se realiza -

en aceite, alcanzándose una dureza de 57 a 63 cifras Rockwell-C.

3o.- Carbonitruración profunda con un espesor de 0.1 a - 0.5mm. La temperatura empleada es de 840 a 860°C., dejando enfriar las piezas en el horno hasta 550°C., el temple se realiza enfriando en agua o aceite, se obtienen durezas de 57 a 60 cifras Rockwell-C.

Se obtienen piezas de superficie dura y buena tenacidad en el núcleo. Este tratamiento se emplea para endurecimiento de engranajes etc.

Las piezas carbonitruradas tienen una velocidad de temple- suficientemente bajas para enfriarlas en aceite obteniendo por- consiguiente una disminución muy notable de deformaciones y - grietas.

Las piezas que se carbonitrurizan se suelen templar y revenir obteniéndose durezas de hasta 65 cifras Rockwell-C.

TRATAMIENTOS TERMICOS DE LOS ACEROS MOLDEADOS

CLASE	TIPO	TRATAMIENTOS TERMICOS	DUREZA BRINELL	RESISTENCIA Kg/mm.²
ACERO AL CARBONO	0.20% C	RECOCIDO 900° C	111-126	41-47
	0.30	RECOCIDO 890° C	121-149	45-53
	[illegible]	RECOCIDO 860° C	159-179	55-63
	0.60	RECOCIDO 840° C	196-225	70-78
	0.75	RECOCIDO 810° C	225-255	78-86
ACERO ALEADO	Mn 1.5%, 0.45%C	TEMPLE EN ACEITE 870°C REVENIDO 600° C RECOCIDO 900° C	183-229	63-78
	Ni-Cr	TEMPLE EN ACEITE 870°C REVENIDO 600° C RECOCIDO 900° C	183-248	63-78
	Ni-Cr, Mo	TEMPLE AL AIRE 870°C REVENIDO 600° C RECOCIDO 900° C	229-277	78-94
	C-Cr	TEMPLE EN ACEITE 870°C REVENIDO 600° C RECOCIDO 900° C	183-248	63-86
ACERO INOXIDABLE	14% Cr	REVENIDO 700° C TEMPLE EN ACEITE 970°C	183-207	63-71
	18% Cr, 2% Ni	REVENIDO 550° C TEMPLE EN ACEITE 970°C	207-228	71-78
ACERO RESISTENTE A LOS ACIDOS	18% Cr, 8% Ni	TEMPLE EN AGUA 1150° C	143-170	50-71
ACERO RESISTENTE AL CALOR	Mo (a) 0.20% C	TEMPLE AL AIRE 870°C REVENIDO 650° C RECOCIDO 900° C	143-174	50-60
ACERO RESISTENTE AL CHOQUE	Mn-Mo	TEMPLE AL AIRE 870°C REVENIDO 650° C RECOCIDO 900° C	183-229	63-78

VI.- T E M P L A B I L I D A D

La templabilidad se define como la susceptibilidad que tienen los aceros a endurecerse.

Aunque un acero haya sido calentado a la temperatura correcta para su temple y dejado a esa temperatura el tiempo suficiente para la completa transformación, no siempre es posible enfriarlo tan rápidamente que se alcance a templar en su totalidad ya que existe el peligro de roturas en la pieza ocasionadas por las tensiones producidas por el enfriamiento.

Este peligro puede ser evitado si se hace una elección correcta del acero que tenga la templabilidad adecuada, la cual es proporcionada por los elementos de aleación que contiene el acero.

Supongamos que se tienen dos aceros de diferentes composiciones, que se calientan a sus respectivas temperaturas de austenización y luego se enfríasn rápidamente, empleando un mismo medio de enfriamiento, al comparar sus durezas se observa que un acero desarrolló más dureza que el otro, pero pese a la diferencia de durezas, los dos aceros pueden tener la misma templabilidad, lo cual sería posible si ambos aceros necesitan la misma velocidad de enfriamiento, para desarrollar su máxima dureza y similar penetración de temple.

La templabilidad es función inversa de la velocidad crítica de enfriamiento, es decir, si un acero requiere una velocidad muy alta para templarse completamente, ese acero tendrá una templabilidad baja, mientras que si requiere una velocidad baja para templarse completamente, entonces el acero tendrá una templabilidad alta, por lo que se puede concluir que la templabilidad es la capacidad de penetración del temple.

La templabilidad es una propiedad de gran importancia debido a la gran apliacación práctica que tiene y aún con los numerosos estudios que sobre ella se han realizado, no se puede considerar completamente resuelto el problema, sin embargo, la tendencia existente es de generalizar el uso de la templabilidad en la designación de los aceros, lo cual facilitará la elección de un determinado tipo de acero según la aplicación práctica.

La importancia que tiene la templabilidad aumenta cuando se trata de templar piezas de gran espesor.

Existen varios métodos para medir la templabilidad:

1) El examen de las fracturas de barras templadas.
2) El estudio de las curvas de dureza.
3) El ensayo Jominy.

1) Examen de las fracturas de barras templadas.
Esta prueba consiste en templar una barra y romperla, para observar la apariencia de la fractura y la profundidad de temple. Al observar la fractura se notará facilmente la penetración del temple por la clara definición de las zonas.

La parte exterior de la pieza fracturada, tiene el aspecto de grano fino, mientras que el interior tiene un aspecto irregular, más bien fibroso, lo cual indica tenacidad, pero el examen revela también un rápido cambio de una zona a otra.

2) Estudio de las curvas de dureza.
Este método consiste en determinar la dureza en el interior de una serie de barras redondas, las cuales han

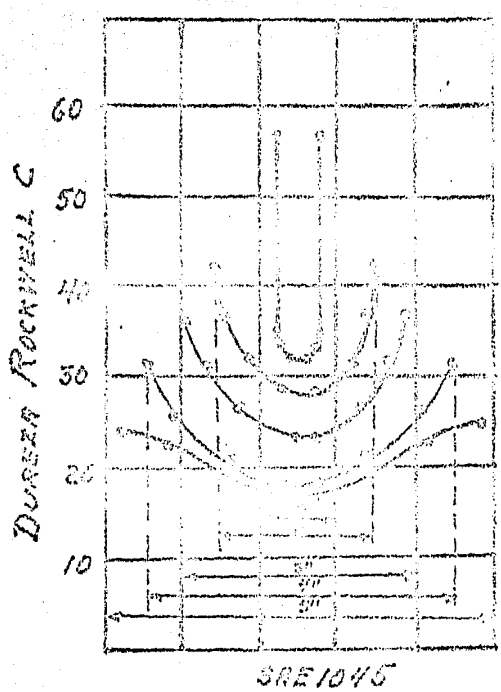
sido previamente templadas. Se comienza preparando por forja o laminación una serie de barras de diferentes diámetros y se les da el tratamiento adecuado para su temple.

Al examinar las piezas se observa que la pieza más chica generalmente endurece completamente, pero la más grande tendrá el centro sin templar. Por ejemplo, para un acero SAE 1045 las durezas superficiales para las diferentes barras son:

Diámetro	Durezas
1/2"	59 cifras Rockwell C
1"	58 " "
2"	41 " "
3"	35 " "
4"	30 " "
5"	24 " "

Es fácil de observar que al aumentar el diámetro la dureza disminuye. Lo anterior se refiere solamente a durezas superficiales, pero el centro de las piezas tienen menos dureza debido a que no están en contacto con el medio enfriante. Por ejemplo el centro de la barra de una pulgada de diámetro tiene una dureza de 33 cifras Rockwell C.

Para determinar la variación de la dureza se corta la pieza templada por la mitad, se pule y después se miden las durezas en la escala Rockwell C, tomando las lecturas a intervalos cortos desde la superficie hasta el centro de la pieza y sobre dos líneas a ángulos rectos. Después de haber hecho las mediciones a cada barra, con los resultados obtenidos se construyen una serie de curvas llamadas curvas "U" y que son características de cada acero.



Es interesante hacer notar el descenso brusco en las - durezas a una distancia determinada, que es la parte - con 50% de martensita.

3) Ensayo Jominy.

Este método fue sugerido por W. E. Jominy y tiene las- ventajas que es rápido y solo se utiliza una sola pro- beta de muestra. El proceso es el siguiente:

1º Preparación de la probeta.- La probeta que es un ci lindro de una pulgada de diámetro y cuatro pulgadas de largo con un soporte para poderse sostener en posición vertical para su enfriamiento. La barra de la cual se- va a maquinar la probeta deberá ser forjada o laminada con un diámetro de 1 1/4 de pulgada que representa la- sección completa del acero por probarse.

2º Normalizado.- La barra forjada o laminada deberá - ser normalizada antes de proceder a su maquinado, que- le dará las dimensiones convenientes.

Esto es muy importante ya que la estructura del material en el temple afecta a su comportamiento, por lo tanto las variaciones en la estructura inicial deben evitarse.

El tiempo del normalizado será de una hora a partir del momento en que la probeta alcance la temperatura indicada. Si la barra normalizada conserva una dureza elevada deberá dársele un revenido corto, a unos 55°C abajo del punto Ac_1, para ayudar al maquinado.

3º Calentamiento para templar.- La probeta deberá calentarse a la temperatura de austenización y mantenerse en ella durante 30 minutos.

Es necesario un pirómetro con termopar para medir la temperatura. Es muy importante que al calentarse la pieza, no se le forme una capa de óxido, por lo que es necesario tener el horno con una atmósfera controlada.

4º Enfriamiento.- La probeta deberá ponerse en un soporte para que una columna de agua pueda ser dirigida directamente contra la punta de la barra.

El agua usada debe estar a una temperatura de 20 a 25°C la columna de agua debe tener una altura libre de 2 1/2 pulgada la cual debe salir de un orificio de 1/2 pulgada de diámetro.

El soporte debe estar seco antes de hacer la prueba. Debe haber una distancia de 1/2 pulgada de la punta de la probeta al orificio de salida del agua.

El tiempo empleado desde el momento de sacar la probeta del horno hasta el momento de empezar a enfriarse no debe ser mayor de 5 segundos y la probeta debe permanecer enfriándose durante 10 minutos.

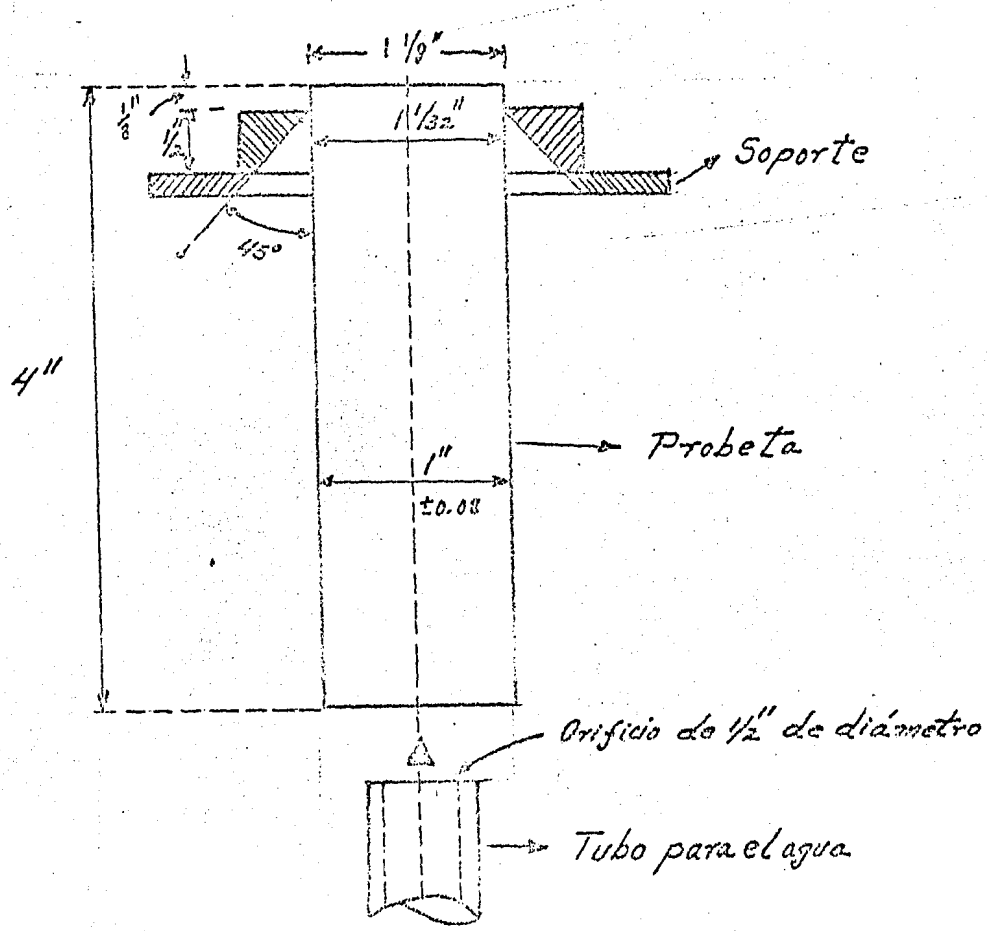
5º Medida de durezas.- Para medir las durezas se trazan dos generatrices a 180° rebajando 0.015 de pulgada

aproximadamente a lo largo de la probeta y sobre ella- se miden las durezas por el método Rockwell C. La preparación de los planos debe hacerse con mucho cuidado de manera que no se eleve mucho la temperatura y cambie - la estructura.

La probeta debe ponerse en un soporte en forma de V, - con la condición de que la línea central del soporte - quede exactamente debajo del penetrador de la máquina- probadora y que tenga 120°.

Las lecturas deben hacerse cada 1/16 de pulgada durante la primera pulgada y a juicio del probador las pulgadas siguientes.

6º Graficado.- Las durezas deben graficarse tomando como abscisas las distancias a la punta que fue enfriada directamente con el chorro de agua y como ordenadas - las durezas a esas distancias.



VII.- P R U E B A S D E D U R E Z A

Actualmente existen muchos métodos para medir la dureza,- que según el procedimiento que se emplea, pueden clasificarse- en tres grupos:

1) Los que miden la resistencia que oponen los cuerpos a- la penetración, puede ser determinada estática o dinámicamente, es decir, se puede ejercer la presión pro - gresivamente o por medio de un golpe.

2) Los que miden la dureza mineralógica, o sea la resis - tencia que oponen los cuerpos a ser rayados.

3) Los que miden la dureza elástica.

Los métodos más usados son los siguientes: Brinell, Rockwell, Vickers y Shore.

Aunque los fundamentos en que se basan los diferentes procedimientos de prueba son distintos entre si, hay tablas de - equivalencias en las que se puede comparar las cifras de dureza halladas en cada caso.

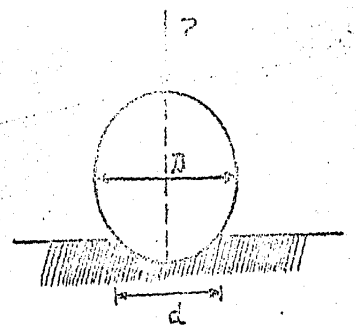
No se puede medir la dureza utilizando una unidad absoluta, las cifras que se manejan son siempre empíricas y se refieren únicamente a un medio particular de medida.

PRUEBA BRINELL.- Esta prueba consiste en aplicar y comprimir - progresivamente sobre una superficie plana y lisa del material a ensayar una bola de acero muy duro, manteniendo la presión - durante un cierto tiempo para que se produzca una impresión o- huella en forma de casquete esférico.

Posteriormente se mide el diámetro de la huella con un microscopio portátil, con este diámetro se calcula el área de la superficie de depresión y dividiendo la carga entre el área se obtiene el número Brinell.

$$H = \frac{P}{S} = \frac{P}{\pi D/2 \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$$

En la que P es el peso aplicado en kg., S la superficie del casquete esférico en mm^2, D el diámetro de la bola en mm y d el diámetro del casquete esférico.



La superficie que va a ser probada debe estar plana y lisa. La prueba Brinell es considerada como destructiva, debido a la huella relativamente grande dejada por el penetrador.

PRUEBA ROCKWELL.- Esta prueba se basa como la prueba Brinell, en la resistencia que oponen los materiales a ser penetrados por un cuerpo más duro, pero en la prueba Rockwell, la dureza se determina en función de la profundidad de penetración, mientras que en la Brinell se determina en función de la superficie de la huella.

En esta prueba primero se aplica una carga de 10 kg. y luego otra carga de 90 a 140 kg. según se emplee como cuerpo penetrador una bola o un cono de diamante. La carga previa de 10 Kg. asienta el penetrador sobre el material a probar y eli-

mina cualquier inperfección de la superficie.

Las cifras de dureza Rockwell son función de la diferencia entre la penetración conseguida cuando actúa la carga pequeña y la profundidad de la huella permanente que hicieron las dos cargas cuando actuaron a la vez.

Para piezas templadas y duras se emplea como cuerpo penetrador un cono de diamante tallado con un ángulo de 120° con la punta ligeramente esférica con un radio de 1/64 de pulgada y las durezas obtenidas se denominan Rockwell C. Para materiales blandos se utiliza una bola de acero templado de 1/16 de pulgada, en este caso las durezas se denominan Rockwell B.

En la prueba de dureza Rockwell, la carga es aplicada por medio de un sistema de palancas y los valores son leídos directamente sobre una carátula calibrada.

PRUEBA VICKERS.- En esta prueba se aplica a la muestra una determinada carga mediante un penetrador de diamante cuya punta tiene la forma de una pirámide de base cuadrada.

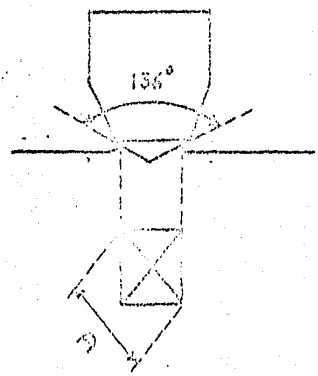
La penetración del diamante deja una huella de sección cuadrada. Después que el área de la huella ha sido medida, el valor de la dureza se determina dividiendo la carga en kg., entre el área de la superficie de la huella en $mm.^2$.

La dureza Vickers DPH, se determina por medio de la siguiente fórmula:

$$DPH = \frac{1.8544\ P}{2\ d}$$

En donde, P es la carga en Kg., d es la longitud de la

diagonal. La carga que se usa varía de 1 a 120 Kg. y es aplicada por medio de un juego de palancas que mueven una leva. Después de haber mantenido la carga durante un tiempo relativamente corto, se coloca un microscopio sobre la huella cuadrada, cuyas diagonales se miden en una retícula graduada.



El ángulo de 136° de la punta de la pirámide de base cuadrada, fue elegido para que las cifras Vickers coincidan con las Brinell, pero a partir de las 250 unidades, la dureza Vickers es algo superior a la Brinell.

El aparato Vickers es capáz de determinar exactamente la dureza de materiales muy duros, más allá de los rangos de la prueba Brinell. También es capaz de tomar lecturas de dureza sobre partes pequeñas, así como en áreas individuales de tamaño microscópico dentro de una pieza de acero, lo cual lo hace un aparato muy útil para propósitos de investigación.

Debido a que la huella impresa es muy pequeña, la superficie a probar debe estar muy bien pulida.

PRUEBA TUKON.- El probador de dureza Tukon se emplea cuando se desea determinar la dureza de partes pequeñas tales como: alambre delgado, áreas de carburación, cristales individuales etc.

El probador puede ser un diamante de base cuadrada como en la prueba Vickers o un penetrador especial denominado penetrador Knoop, que es un diamante esmerilado en forma de pirámide teniendo una base romboidea, de tal manera que producira una huella en forma del diamante con una diagonal mayor aproximadamente siete veces la longitud de la menor.

El probador Tukon es completamente automático una vez que la muestra hace contacto con el penetrador. La carga aplicada puede variar desde un gramo hasta 50 Kg., dependiendo si la dureza es determinada sobre una escala microscópica o macroscópica.

La medida de la longitud de la huella se hace con la ayuda de un microscopio que trae el instrumento. Cuando se usa el penetrador de diamante de base cuadrada, la dureza puede ser calculada como la dureza Vickers. Cuando se usa el penetrador Knoop, el número de dureza KHN, es determinado por medio de la siguiente fórmula:

$$KHN = \frac{P}{2\,L\,C_p}$$

En donde: P = carga aplicada en Kg., L=longitud de la diagonal mayor de la huella; C_p = constante para cada penetrador.

PRUEBA SHORE.- La principal ventaja de esta prueba consiste en que por medio del escleroscopio, se puede medir la dureza de piezas de forma irregular o en general piezas que no pueden ser colocadas en las máquinas que se utilizan en las pruebas anteriores.

Para la ejecución de esta prueba se coloca uno de los extremos abiertos de un tubo calibrado de vidrio, contra la pieza a -

la que se le quiere medir la dureza y un pequeño martinete con - punta de diamante se coloca en la parte superior del tubo y es - dejado caer contra la pieza.

El martinete rebotará a cierta altura sobre la superficie,- la cual es medida en la escala graduada del tubo. Por medio de - esta altura se determina la dureza del material.

La exactitud de un probador de dureza tipo rebote depende - de la habilidad del operador, ya que el instrumento debe estar - absolutamente vertical, de modo que la altura del martinete no - sea reducida por la fricción.

La dureza Shore, no guarda relación con ninguna de las co - rrespondientes a los otros procedimientos.

CONSIDERACIONES FINALES

La elección del tratamiento térmico depende de la pieza y de las propiedades que se necesiten.

El recocido y el normalizado se emplean en la mayor parte de las piezas de acero moldeado. El temple y el revenido son convenientes para piezas adecuadas de aceros al carbono, pero se aplican más frecuentemente a los aceros moldeados aleados.

La estructura del acero moldeado no es fácil de modificar empleando únicamente un tratamiento térmico y se necesitan temperaturas más altas y mayor tiempo que en los materiales forjados o tratados mecánicamente.

El calentamiento hasta la temperatura necesaria debe ser lo más uniforme posible y se debe mantener la temperatura por un tiempo mínimo de dos horas o cuando los espesores son muy grandes, se puede aplicar la regla de mantener una hora por cada pulgada de espesor.

Si se efectúa primero un normalizado a temperatura elevada y luego se recalienta arriba de la temperatura crítica, enfriando posteriormente al aire, se obtiene el máximo afino del grano y unas propiedades excelentes.

Para obtener una mejor ductilidad, en piezas coladas de elevada resistencia, se efectúa un normalizado ordinario y después un revenido.

B I B L I O G R A F I A

1.- STEEL AND ITS HEAT TREATMENT
BULLENS D. K.
JOHN WILEY & SONS, INC. 1962.

2.- ELEMENTS OF HEAT TREATMENT
ENOS-FONTAINE
JOHN WILEY & SONS, INC 1960

3.- THE MAKING, SHAPING AND TREATING OF STEEL
UNITED STATES CORPORATION, STEEL, 1962

4.- ELEMENTS OF METALLURGY AND HEAT TREATMENT OF STEEL
METALS ENGINEERING INSTITUTE

5.- TRATAMIENTOS TERMICOS DE LOS ACEROS
JOSE APRAIZ BARREIRO
DOSSAT, MADRID.

6.- METALLOGRAPHY AND HEAT TREATMENT OF STEEL
TEICHERT ERNEST J.
MC GRAW HILL.

7.- FUNDICION PARA INGENIEROS
HOWARD F. TAYLOR.

8.- STRUCTURE OF METALS
BARRET C. S.
MC GRAW HILL CO. 1952.