

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº 1	1974

04.74.15

CNA-28

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION

CENTRAL NUCLEAR EN ATUCHA

- ACEROS -

Ings. A.F. Rivelis y C.J. Lerch

Buenos Aires-Argentina
1974

CAPITULO I

1. PRODUCCION DE HIERRO Y ACERO

El primer proceso en la conversión de mineral de hierro a acero es realizado en un alto horno, donde el mineral de hierro, coque, caliza y aire reaccionan a alta temperatura para producir una forma impura de hierro llamada "arrabio".

El acero es producido a partir de dos prácticas de fundición: 1) carga caliente; 2) carga fría. En la primera el arrabio fundido se transfiere del alto horno a hornos de solera abierta o tipo convertidor y la conversión a acero implica el uso de oxígeno para mejorar la velocidad de producción. En la segunda, el acero se produce a partir de una carga compuesta de arrabio y chatarra en proporciones variables. En este caso se pueden usar hornos de arco eléctrico como alternativa a los de solera abierta, pero es también común soplar oxígeno a cualquier tipo de horno.

Estos procesos están basados esencialmente en eliminar cantidades excesivas de carbono, silicio y manganeso e impurezas como azufre y fósforo por reacciones químicas bajo ciertos tipos de escorias, en tanto que las impurezas se transfieren del metal a la escoria. El proceso continua con la adición de cantidades controladas de carbono, silicio, manganeso para producir la composición requerida del acero. Otros elementos aleantes se agregan para dar ciertas características especiales al acero.

La remoción de impurezas depende de la naturaleza de la escoria usada. Una escoria ácida que contiene una alta proporción de materiales silicosos es usable para eliminar carbono, silicio y manganeso, en tanto que una escoria básica que contiene una alta proporción de óxido de calcio permite además eliminar azufre y fósforo.

Debido a que materiales básicos y ácidos reaccionan químicamente entre sí, en un proceso que usa escoria ácida es necesario usar un revestimiento ácido en el horno (refractario a base de sílice), en tanto que al usar escorias básicas se debe usar revestimiento refractario también básico (por ejemplo dolomita). Esto lleva a la terminología de aceros ácidos o básicos.

Luego de completada la operación de acería, el metal fundido es colado en moldes refractarios para la producción de piezas fundidas, o en lingoteras de fundición para la producción de lingotes.

El acero en estado líquido puede contener en solución relativamente grandes cantidades de gases, principalmente oxígeno e hidrógeno. Pero la solubilidad de estos gases disminuye al bajar la temperatura por lo que estos gases son liberados durante el

enfriamiento y pueden ser atrapados en el metal que está solidificando dando lugar a la formación de numerosos poros.

Para ciertas aplicaciones como barras comerciales o alambre para clavos, remaches, chapa para chasis de automóviles (donde no son esenciales buenas propiedades ingenieriles) no es necesario eliminar los gases disueltos en el acero, puesto que durante las operaciones de transformación del lingote a producto final (laminación, etc.) estos poros se sueldan, ya que al no estar en contacto con la atmósfera exterior no se produce oxidación del hierro en ellos. Estos aceros son los comunmente llamados "efervescentes" debido a la violenta evolución de los gases al desprenderse del metal fundido. Justamente debido a este proceso las partículas de óxidos presentes son desplazadas hacia la parte superior del lingote, originándose una capa superficial muy pura y una parte central superior con alto contenido de inclusiones. Esto permite obtener productos semiterminados de buena calidad superficial pero con cierta inhomogeneidad de propiedades. Debido a esta acción de efervescencia y a la cantidad de poros presentes en el interior del lingote, se produce un muy pequeño rechupe por contracción durante la solidificación (3% en volumen) por lo que no es necesario desbastar el lingote y el rendimiento en material es alto.

Para otras aplicaciones donde se requieren buenas propiedades mecánicas en todo el producto es necesario eliminar la mayoría de estos gases del acero líquido. El oxígeno se puede eliminar fácilmente mediante el agregado de manganeso, silicio o aluminio, los que debido a su gran afinidad con el oxígeno reaccionan con él formando inclusiones no metálicas que se incorporan a la escoria. Estos aceros se conocen como "calmados". El hidrógeno por el contrario no puede ser fácilmente eliminado y es necesario limitar la contaminación con este elemento.

2. EL PROCESO DE SOLIDIFICACION

El metal comienza a solidificar formando nucleos cristalinos los cuales crecen adoptando una forma característica denominada "dendritas". Las dendritas crecen hasta que se produce el contacto con dendritas vecinas; esta superficie de contacto da lugar al borde del cristal, o borde de grano. Las ramas de las dendritas se ensanchan y finalmente el metal líquido encerrado entre ellas va solidificando completando el cristal, por lo que normalmente se pierde evidencia, en la observación directa al microscopio óptico, del crecimiento dendrítico. En realidad, las impurezas contenidas en el metal fundido son segregadas hacia adelante del cristal que va creciendo, hacia los bordes de grano o quedan atrapadas entre las ramas de las dendritas. La distribución de estas impurezas por lo tanto bosquejan el crecimiento dendrítico.

En una lingotera la primer parte del metal que solidifica es la que se encuentra en contacto con las paredes de la misma, que están relativamente frías, produciéndose una alta velocidad de enfriamiento lo que da origen a una zona de granos pequeños y regulares, llamada "zona chill". La extracción de calor que sigue a este primer periodo se hace más lenta, provocando la formación de granos grandes y alargados que crecen desde la pared de la lingotera hacia el centro del lingote. Estos granos se denominan "columnares". La última parte en solidificar, en el centro del lingote, presenta granos de forma regular pero más grandes que los de la "zona chill" y se los llama granos equiaxiales. Estos tipos clásicos de granos pueden estar presentes o faltar de acuerdo con las condiciones de colada, por ejemplo: temperatura de colada del líquido, tipo y temperatura del molde, etc.

Las impurezas contenidas en el acero son en general de menor punto de fusión que el acero, y por lo tanto se concentran en el centro del lingote. En consecuencia es ésta la zona más impura, tanto desde el punto de vista de composición química como del contenido de inclusiones no metálicas. Algunas impurezas son también atrapadas entre los granos columnares y solidifican en ese lugar. Estas áreas se conocen como "áreas segregadas".

3. ESTRUCTURA CRISTALOGRAFICA Y LA TRANSFORMACIÓN ALOTROPICA DEL HIERRO

Los metales en estado sólido consisten en un agregado de cristales o granos; en cada uno de los cuales los átomos están ordenados de acuerdo a un cierto modelo o estructura cristalina. Los metales comúnmente se presentan en alguna de las siguientes tres estructuras (fig. 1):

- a) cúbico centrado en el cuerpo
- b) cúbico centrado en las caras
- c) exagonal compacto

Aunque el arreglo de átomos dentro de cada grano es definido por la estructura cristalina del metal, los granos tienen diferentes orientaciones de su red cristalina uno respecto a otros, por lo que existe una zona de contacto, o borde de grano, en la cual los átomos se encuentran en forma desordenada. Las propiedades de los bordes de grano son, por lo tanto, fundamentalmente distintas de las de los granos mismos y esto tiene importantes consecuencias sobre el comportamiento de los metales.

Algunos metales pueden existir en más de una forma cristalográfica. El hierro puede presentarse en las dos estructuras cúbicas. La estructura cúbica centrada en el cuerpo existe en equilibrio a tem-

peraturas por debajo de 910°C y entre 1400 y 1539°C y es conocida bajo el nombre de "ferrita" o "hierro- α ". La estructura cúbica centrada en las caras se encuentra, en equilibrio, entre 190° y 1400°C y es conocida como "austenita" o "hierro γ ".

Estas dos estructuras cristalinas presentan diferentes propiedades físicas y mecánicas. Por ejemplo, austenita tiene un coeficiente de expansión térmica, 1,5 veces mayor que la ferrita y una menor conductividad térmica.

Si un trozo de hierro es calentado, su estructura cristalina cambia de hierro α a hierro γ a 910°C y el cambio inverso ocurre a 1400°C . Lo opuesto sucede durante el enfriamiento. Calentando por arriba de 769°C , la ferrita deja de ser magnética. Los cambios de estructura cristalina que ocurren a las temperaturas indicadas son acompañados por cambios de volumen: durante el calentamiento, se produce una contracción de volumen (3%) a 910°C y una expansión a 1600°C . Lo opuesto ocurre durante el enfriamiento.

4. CONSTITUCION DEL ACERO. DIAGRAMA DE EQUILIBRIO HIERRO-CEMENTITA

Los aceros son básicamente aleaciones de hierro y carbono. Reciben este nombre hasta composiciones del orden de 2% de carbono, aunque los aceros más comunmente usados en diferentes aplicaciones no van más allá de 1% de C.

Agregados de hasta 0,008% en peso de carbono en hierro puro no tienen marcado efecto sobre los cambios estructurales antes mencionados, puesto que el hierro puede contener esta cantidad de carbono en solución sólida (átomos de carbono dispersos individualmente en la red cristalina de hierro) a todas temperaturas hasta el punto de fusión. El único efecto es que dichos cambios ocurren en un pequeño rango de temperaturas y no a una temperatura específica. Con mayores contenidos de carbono, este puede ser retenido en solución en equilibrio a elevadas temperaturas, no así a temperatura ambiente, siendo expulsado de la solución sólida dando lugar a la formación de partículas de carburo de hierro (Fe_3C), denominado "cementita".

Si se constituye un diagrama representando las temperaturas a que se producen, en condiciones de equilibrio, las distintas transformaciones estructurales en función del contenido de carbono, resulta el diagrama de fig. 2, conocido comunmente como "diagrama de equilibrio Fe-C", o más correctamente diagrama de equilibrio metaestable Fe-cementita. El punto J en el diagrama representa un complejo mecanismo de solidificación llamado "reacción peritética", pero es de escaso significado en las propiedades finales de los aceros y no será discutido aquí. El punto C representa otro complejo mecanismo de solidificación llamado "reacción eutéctica", en que un

líquido de una dada composición se transforma en dos soluciones sólidas llamadas "terminales", de distinta composición entre sí y distintas al líquido original que solidifican en forma conjunta. El punto S indica un mecanismo similar al anterior pero que ahora ocurre en estado sólido y es llamado "reacción eutectoide".

Las regiones comprendidas entre los puntos N-H-A representa el rango de existencia de la solución sólida de carbono en hierro a alta temperatura, llamada también ferrita. La región N-J-E-S-G representa el rango de existencia de la solución sólida de carbono en hierro γ denominada, por extensión, austenita. La región G-P-0 representa la solución sólida de C en hierro α en el rango de bajas temperaturas, igualmente llamada ferrita. Esto ilustra la variación de solubilidad de carbono en hierro a todas las temperaturas hasta la fusión. El punto S indica la mínima temperatura y el correspondiente contenido de carbono (0,8% C) al cual la austenita puede existir, en equilibrio, y debajo de dicha temperatura se transforma inmediatamente, mediante la reacción eutectoide en un constituyente llamado "perlita". Este es un compuesto de ferrita y cementita dispuesto en forma de láminas alternadas agrupadas formando "colonias".

A temperatura ambiente la estructura de un acero con carbono menor que 0,8% enfriado en condiciones de equilibrio (muy lentamente) consiste en una mezcla de granos de ferrita y colonias de perlita. La proporción de perlita aumenta desde 0% con 0.008% de carbono, hasta 100% con 0,8% C. Con más de 0,8% C la estructura consiste en una mezcla de colonias de perlita e islas de cementita, no existiendo otra ferrita que la contenida en la perlita.

5. TRATAMIENTOS TERMICOS DE ACEROS

Calentando un acero eutectoide ($C=0,8\%$) cuyo único constituyente sea perlita, se produce la transformación de este compuesto, en cuanto se supera la temperatura indicada por el punto S (temperatura eutectoide) y se obtiene una estructura compuesta por granos de austenita de composición homogénea. Para lograr esta característica se necesita calentar por arriba del punto S y mantener cierto tiempo a dicha temperatura. Con aceros de menos de 0,8% C (hipoeutectoides) o más de 0,8% C (hipereutectoides) la transformación a austenita comienza al atravesar la línea P-S-K del diagrama (A_1) y es completada al pasar a temperaturas superiores a las indicadas por las líneas G-S (llamada A_3) y S-E (llamada A_{cm}). Si bien es necesario calentar más arriba de las temperaturas a que se completa la transformación para obtener una austenita de composición homogénea, hay que tener en cuenta que el tamaño de grano de esta austenita aumenta al crecer la temperatura y el tiempo de calentamiento, lo que generalmente no es deseable desde el punto de vista de obtención de buenas propiedades.

Si se enfría un acero al carbono lentamente desde el rango austenítico, la transformación se invierte. En aceros con menos de 0.8% C, precipita ferrita en bordes de grano de austenita en tanto la temperatura cae en el rango comprendido por las líneas A_3 y A_1 . Puesto que la ferrita puede contener muy poco carbono en solución, éste es segregado hacia la austenita que aun no ha transformado, la cual se enriquece progresivamente en carbono hasta un máximo de 0.8% C, al llegar a la temperatura A_1 , en que coexiste con la ferrita ya formada y de composición correspondiente al punto P (0,025% C). La disminución de la temperatura por debajo de A_1 provoca la transformación de la austenita remanente a perlita. Posterior enfriamiento hasta temperatura ambiente no produce cambios significativos en la estructura, aunque se debe notar que el contenido de carbono en equilibrio en la ferrita disminuye (línea PQ) a través de la precipitación de nuevos carburos. En consecuencia, a temperaturas debajo de A_1 , un acero hipoeutectoide está compuesto por granos de ferrita y colonias de perlita, la proporción de las cuales depende del contenido de carbono del acero.

La transformación de aceros hipereutectoides ($C > 0.8\%$) es muy similar, salvo que el primer constituyente que precipita de la austenita es cementita (6,66%C) en tanto se enfría en el rango limitado por S-E y S-K, disminuyendo el carbono de la austenita remanente hasta llegar a 0.8% a la temperatura A_1 . Posterior enfriamiento produce la transformación a perlita.

Si el acero es de composición eutectoide ($C = 0.8\%$), transformará completamente a perlita a temperatura A_1 , sin precipitar previamente ferrita o cementita.

6. EFFECTO DE LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO

Las transformaciones descritas más arriba se producen si el acero es enfriado lentamente bajo condiciones de equilibrio (de allí el término "diagrama de equilibrio"). Esta condición de enfriamiento muy lento está fijada por la necesidad de que los distintos átomos puedan reacomodarse en las posiciones requeridas por la nueva estructura cristalina y que el carbono segregue (difunda) permitiendo completar los cambios de composición de la fase inicial a las terminales. Esta difusión depende fuertemente de la temperatura y en menor medida del tiempo a temperatura. A mayores temperaturas o tiempos más largos, es más fácil llegar al equilibrio. En aceros al carbono las estructuras producidas por recocido (calentamiento y enfriamiento en horno) se acercan bastante a las de equilibrio. A mayores velocidades de enfriamiento, sin embargo, no se alcanzan las estructuras de equilibrio y pueden aparecer diferencias significativas. Si el enfriamiento es suficientemente rápido las transformaciones que dependen fundamentalmente de la difusión pueden

ser suprimidas y reemplazadas por otros modos de transformación. Es esta posibilidad de obtener distintas estructuras variando la velocidad de enfriamiento la que da fundamento a los tratamientos térmicos de los aceros.

El primer efecto de una mayor velocidad de enfriamiento es bajar las temperaturas a las que las transformaciones se producen, permitiendo retener austenita a temperaturas menores que A_1 durante un cierto tiempo antes de que comience la transformación. Este tiempo depende fundamentalmente de la composición del acero y de la temperatura considerada.

Para entender las estructuras que pueden producirse por transformación a distintas temperaturas se recurre a enfriamientos instantáneos (temple) desde el rango austenítico hasta diferentes temperaturas, lo que permite retener la austenita y su posterior transformación isotérmica. Se determina así el inicio, fin y estructura resultante de la transformación a cada temperatura. Esta información permite construir un diagrama tiempo-temperatura-transformación (T.T.T.) (fig. 3).

A temperaturas justo debajo de A_1 la transformación a ferrita y perlita (carbono menor que 0,8%) requiere largo tiempo para realizarse. En estas condiciones la difusión es grande y se obtiene granos grandes de ferrita y perlita gruesa (espaciado interlaminar grande). A temperaturas menores los tiempos de transformación son más cortos pero la difusión es también menor y la ferrita y perlita son más finas. Por debajo de 550-600°C, la perlita obtenida no puede ser resuelta en sus componentes laminares bajo el microscopio óptico.

A menores temperaturas la difusión de carbono resulta demasiado baja para permitir la formación de ferrita y perlita, y se forman nuevas estructuras con características aciculares denominadas "bainitas", compuestos de ferrita con morfología acicular o de placas y carburos distribuidos más finamente que en la perlita y con distinta morfología. Hay dos tipos de bainitas: superior e inferior. En la primera la ferrita se presenta con una morfología de grupos de placas paralelas con los carburos como láminas dispuestas en borde de esas placas. En bainita inferior, que se origina en transformaciones a menores temperaturas que la anterior la ferrita tiene forma acicular y los carburos finamente divididos en forma de precipitados dentro de las agujas.

Si se temple directamente hasta bajas temperaturas, se puede suprimir las transformaciones que necesitan difusión de carbono y se obtiene una nueva estructura de características aciculares a través de una transformación sin difusión, que se denomina "martensita". Esta fase tiene una estructura tetragonal centrada en el cuerpo y

contiene en solución todo el carbono componiendo una solución sólida supersaturada. La formación de martensita no depende del tiempo como las transformaciones anteriores, sino solo de la temperatura. Hay una temperatura, llamada M_s , a la cual comienza la transformación y una temperatura M_f final de la transformación. Estas temperaturas dependen fuertemente del contenido de carbono y en menor medida de otros elementos aleantes (M_s baja al aumentar el C).

En la práctica las transformaciones en el acero ocurren bajo condiciones de enfriamiento continuo más que isotérmicamente. En estas nuevas condiciones los productos finales de transformación: ferrita + perlita, bainitas, martensita, son los mismos, pero ahora pueden presentarse simultáneamente varios de ellos ya que la transformación se realiza en un rango de temperaturas que depende de la composición del acero y de la velocidad utilizada. El diagrama de transformación resulta además modificado porque a cada velocidad de enfriamiento la transformación se inicia y finaliza a temperaturas menores y tiempos más largos que los que indicaría el diagrama isotérmico, por lo que es incorrecto superponer curvas de velocidad de enfriamiento con dichos diagramas isotérmicos y hay que recurrir al trazado de diagramas tiempo-temperatura-transformación para enfriamiento continuo. (fig. 4)

7. PROPIEDADES MECANICAS DE LAS DISTINTAS ESTRUCTURAS

Nos referiremos brevemente a las más importantes: resistencia (fluencia, rotura, dureza), ductilidad, tenacidad o resistencia al impacto).

La resistencia a fluencia o tensión de fluencia es la tensión requerida en un ensayo standard de tracción para producir una cierta magnitud de deformación plástica (normalmente 0.1 o 0.2% de deformación plástica). La resistencia a rotura es la tensión máxima desarrollada en el ensayo de tracción. La ductilidad es medida por la elongación que puede soportar una probeta antes de la rotura o por la reducción en el área de ensayo de la misma en el punto de rotura. Estos criterios se ven en la fig. 5 que representa el resultado de un ensayo de tracción.

La dureza mide la resistencia del material a la penetración de un indentador (esfera de acero, cono de diamante, etc.) sobre el que se aplica una carga prefijada. Hay una cierta correlación en general no claramente definida entre la dureza y la resistencia a rotura de un material. Pero en algunos casos, como por ejemplo para materiales que presentan el mismo tipo de comportamiento entre la fluencia y la rotura (endurecimiento por trabajado), esta relación resulta bien definida.

La tenacidad o resistencia al impacto indica la resistencia a rotura bajo condiciones de carga triaxial y alta velocidad de aplicación (impacto). Se realiza sobre probetas con entallas para producir esta condición de triaxialidad mediante la aplicación de un impacto de energía conocida. La tenacidad del acero (medida por la energía absorbida en el ensayo) varía con la temperatura como se ve en la fig. 6. Hay una temperatura de transición por encima de la cual la energía absorbida es alta y se dice que se comporta en forma "ductil". Por debajo de dicha temperatura la energía absorbida es muy baja y se describe como comportamiento "frágil".

En cuanto a las propiedades de las estructuras obtenidas por transformación de la austenita se puede decir en forma general que a medida que se hace menor la temperatura de transformación aumentan la resistencia y la dureza de las estructuras resultantes y en la mayoría de los casos baja la ductilidad y la tenacidad. La estructura más dura y por consiguiente más frágil que es posible conseguir en un acero de composición dada, es la "martensita". La resistencia, y del mismo modo la dureza, de estructuras bainíticas y martensíticas son fuertemente dependientes del contenido de carbono del acero (aumentan al aumentar el C). En el caso de estructuras 100% martensíticas, la dureza de las mismas depende casi exclusivamente del contenido de carbono. En aceros hipoeutectoides ($C < 0,8\%$) transformados en el rango de ferrita + perlita, el aumento de carbono produce un aumento de la proporción de perlita respecto a la de ferrita, por lo que la resistencia de las estructuras resultantes también aumenta.

8. REVENIDO DE MARTENSITA

Dado que la martensita en su estado original es extremadamente frágil, los aceros son raramente usados en esa condición, sino que se prefiere sacrificar algo de la alta resistencia obtenida en aras de mejorar la ductilidad y tenacidad. Esto se consigue mediante un tratamiento de "revenido" que implica calentar el acero durante un cierto tiempo a temperaturas menores que A_1 . La martensita, como ya se dijo, es una estructura de no equilibrio, ya que contiene en solución más carbono que el indicado por el diagrama de equilibrio a temperatura ambiente. Por lo tanto, si el acero es calentado progresivamente a mayores temperaturas, el primer efecto es relevar las altas tensiones internas que caracterizan a la estructura martensítica, luego el carbono en solución comienza a ser segregado y precipita como carburo de hierro en forma de partículas discretas muy finas (más finas que en bainita inferior). Con mayores temperaturas o mayores tiempos, los carburos aumentan en cantidad y tamaño y la matriz resulta empobrecida en carbono. Estos cambios son acompañados por una reducción en resistencia y dureza y un aumento de ductilidad y

tenacidad. (fig. 7). El estado final de revenido consistirá en partículas esféricas de carburos en una matriz relativamente blanda de ferrita. Eligiendo las condiciones de revenido se puede obtener la combinación deseada de propiedades.

9. EFFECTO DE ELEMENTOS ALEANTES

El principal efecto de los elementos aleantes en el tratamiento térmico de los aceros está dado por el retraso de las cinéticas de transformación que, prácticamente, producen todos los elementos de aleación comunes en los aceros. Además se producen modificaciones en las temperaturas A_3 , A_1 , M_s y M_f . La magnitud de estos efectos no es la misma para todos los elementos de aleación; en la fig. 8 se esquematizan los distintos efectos y un orden de efectividad.

De esta manera, con la adición de aleantes se puede modificar las estructuras que se obtienen de un dado tratamiento de enfriamiento continuo. En efecto, veremos más adelante que con aceros al carbono es imposible obtener 100% martensita en piezas que no sean de muy pequeñas dimensiones. Eligiendo los aleantes adecuados podremos conseguir esa condición en piezas más grandes.

De este modo, se puede conseguir una amplia gama de combinaciones de propiedades mecánicas a través de la selección del contenido de carbono, de los elementos de aleación, de la velocidad de enfriamiento durante la transformación de austenita y de las condiciones de revenido.

10. TRATAMIENTOS TERMICOS MAS USUALES

Además del temple y revenido, hay una serie de prácticas normales de tratamientos térmicos que pasaremos a analizar.

Como paso previo conviene observar el proceso de transformación a austenita durante el calentamiento. La fig. 9 es una curva temperatura-tiempo-transformación para la formación de austenita (γ). Se observa que a medida que aumenta la temperatura se hace menor el tiempo de transformación. Esta transformación se realiza bastante rápidamente, pero se necesita bastante más tiempo para disolver los últimos restos de carburos presentes. Aun cuando la solución de los carburos sea completa, se necesita tiempos más largos para distribuir el carbono en solución en forma homogénea. Esta condición de homogeneidad es necesaria para que no haya partes de la pieza que produzcan distintas estructuras al transformar. Por otra parte altas temperaturas o tiempos largos provocan un gran crecimiento del grano de austenita lo cual no es, en general, conveniente por múltiples razo-

nes. El designar rangos de temperatura de austenitizado para los diversos tratamientos es pues una solución de compromiso.

Algunos elementos aleantes tienen gran tendencia a formar carburos de dichos elementos reemplazando al carburo de hierro (cromo, molibdeno, vanadio, niobio, titanio). Estos carburos son de más difícil solución que el carburo de hierro y son necesarias pues temperaturas mayores de austenitizado.

10.1- Recocido

Usualmente se denomina "recocido" a todo tratamiento térmico que resulta en un ablandamiento del acero. Se reconocen tres tipos principales:

a) Recocido total:

Calentamiento 30 ó 50°C, por encima de A_3 , mantenimiento a esa temperatura un tiempo suficiente para homogeneizar austenita, seguido de un enfriamiento en horno (muy lento). La temperatura de austenitización se limita en ese rango para producir una austenita de grano fino que a su vez resulta en una estructura fina de ferrita + perlita, lo que da la mejor combinación de propiedades en una pieza recocida. La principal aplicación es para obtener estructuras aptas para maquinado en aceros de medio carbono (0,30 a 0,60% C).

b) Recocido de esferoidización:

Se trata de obtener los carburos como partículas esféricas en la matriz de ferrita, a cambio de perlita. Hay dos formas principales: 1) calentar la perlita por tiempos muy largos a temperaturas justo debajo de A_1 ; 2) calentar el acero para producir una austenita no homogénea y transformar muy lentamente o isotérmicamente justo debajo de A_1 . Las inhomogeneidades de la austenita actúan como nucleantes de los carburos aislados, inhibiendo la formación de perlita.

La principal aplicación es para obtener la estructura más apta para maquinar en aceros de alto carbono (0,6 a 1% C o superior). Un ejemplo clásico de material que debe ser tratado así para maquinar son los aceros de herramientas.

c) Recocido de recristalización (o de "proceso"):

Calentamiento por debajo de A_1 para recristalizar y ablandar los aceros de bajo carbono con muy alta deformación (por ejemplo chapa

laminada en frío).

d) Recocido de distensionado

Calentamiento por debajo de A_1 y aun por debajo de las temperaturas usuales en el recocido de recristalización, para eliminar tensiones residuales que se pueden originar por ejemplo por enfriamiento, piezas con secciones de distintos espesores, o uniones soldadas.

Condiciones de tratamiento, para estos procesos, reglas prácticas de operación así como equipos usados están descritos en "Metal Handbook" tomo II, sección de "Tratamientos Térmicos".

10.2- Normalizado

Calentamiento en el rango de austenita seguido por enfriamiento al aire. Como en recocido, es práctica normal calentar para obtener una austenita homogénea, pero de grano lo más fino posible. De esta manera se obtiene una estructura fina de ferrita + perlita con una buena combinación de propiedades (mejores que en recocido donde las estructuras resultantes son gruesas).

La principal utilización es:

- refinar el grano y homogeneizar la estructura; esto da una buena combinación de propiedades mecánicas (para su uso directo) o una buena estructura de partida para tratamientos de temple.
- dar la estructura mas apta para maquinado en aceros de bajo carbono (0.20 a 0.30% C).
- homogeneizar y refinar piezas fundidas con estructuras dendríticas.

Al igual que con recocido, referencias completas se encuentran en "Metal Handbook" tomo II, sección "Tratamientos Térmicos".

10.3- Temple y revenido

El temple tiene por objeto conseguir en una pieza estructura martensítica. Para ello se requiere enfriar a velocidades suficientemente altas como para salvar la "nariz" del diagrama de transformación y evitar de ese modo la formación de ferrita, perlita o bainita. La velocidad mínima necesaria para producir una estructura totalmente martensítica se denomina "velocidad crítica de enfriamiento".

El temple se puede realizar sumergiendo la pieza, previamente

calentada en el rango austenítico, en agua o aceite u otros medios.

Posterior al temple se realiza el revenido para obtener la combinación de propiedades deseada.

10.3.a- Velocidad de enfriamiento en un líquido

La variación de temperatura con el tiempo en un punto cercano a la superficie de una barra sumergida en un medio de temple se esquematiza en la fig. 10.

El estado A indica la formación de una delgada capa de vapor sobre la pieza debido a la rápida vaporización del medio de temple. La transferencia del calor a través de la capa de vapor es lenta. El estado B marca la etapa en que se va rompiendo en ciertas zonas la capa de vapor, nuevo líquido se pone en contacto con la pieza caliente y es vaporizado a su vez. Esto causa además turbulencia que contribuye a transferir el calor a través del medio de temple.

Cuando la superficie del metal se acerca a la temperatura de ebullición del líquido de temple, se alcanza un estado de continuo contacto líquido-metal. El calor extraído solo calienta el líquido adyacente y debe transferirse por convección. Este periodo de lenta extracción calórica es conocido como estado C.

El estado apropiado de temple es el B, y se debe asegurar de tenerlo en el rango apropiado de temperatura. La transición A-B es llevada a temperaturas superiores por algo que rompa la capa de vapor inicialmente formada. Por eso es necesario agitación en el líquido. Esto puede hacerse mediante un sistema de bombeo que además renueva el medio de temple, o más simplemente agitando la pieza.

Los principales medios de temple son, en orden de efectividad: salmuera, agua, aceite, aire.

La efectividad del agua depende de su temperatura. La transición $A \rightarrow B$ baja mucho al calentarse el agua ($T_{\text{agua}} = 21^{\circ}\text{C}$: $T_{A \rightarrow B} = 860^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{agua}} = 50^{\circ}\text{C}$: $T_{A \rightarrow B} = 580^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{agua}} = 74^{\circ}\text{C}$: $T_{A \rightarrow B} = 350^{\circ}\text{C}$). Es pues necesario mantener el agua fría y en la práctica se diseñan sistemas de circulación continua con serpentines de enfriamiento.

Particular atención merece el estado C. En general, es en este rango en que se produce la transformación austenita-martensita. Si la expansión en volumen causada por la transformación se produce en distintos tiempos en diferentes partes de la pieza, se crean tensiones internas que superpuestas a las originadas por gradientes térmicos favorecen la aparición de grietas o distorsión. Este es, en general, el caso que ocurre en agua, donde la extracción de calor

en el estado C es todavía bastante rápida.

El aceite es usado pues la velocidad de extracción de calor en el estado C es baja y evita los problemas anteriores. Además este estado comienza a mayor temperatura pues es más alto el punto de ebullición del aceite.

Calentar el aceite causa poca diferencia en la transición A $\rightarrow$ B, probablemente porque al calentar baja la viscosidad y contrapesa la mayor facilidad de mantener la capa de vapor. Sin embargo, es ventajoso usar aceite a alta temperatura (hasta 200°C) para hacer el estado C más lento aún.

11. TRATAMIENTOS SUPERFICIALES

Algunas veces se requiere un alto grado de dureza solo en la superficie de la pieza. Esto puede ser logrado difundiendo carbono, nitrógeno o ambos en la capa superficial de un acero de bajo carbono y luego tratarlo térmicamente. Cuando se desea evitar distorsiones debidas al temple se puede conseguir el endurecimiento por calentamiento superficial (por llama, por inducción).

11.1- Cementación

Implica incorporar carbono, por difusión, en las capas superficiales del metal.

El proceso de cementación puede ser en medio sólido, líquido o gaseoso. En el primer caso las piezas se colocan en cajas cerradas rodeadas de carbón y carbonatos de bario y sodio. En el segundo, el baño está compuesto de carbonato de sodio, cloruro de sodio, cloruro de bario y cianuro de sodio. En el tercero la atmósfera gaseosa contiene hidrocarburos, monóxido y dióxido de carbono. En todos los casos el proceso consiste en calentar en horno, en el rango austenítico, entre 850 y 950° C durante varias horas. Un perfil típico de contenido de carbono luego de 4-5 horas de proceso se indica en la fig. 11.

Una parte importante del proceso es el tratamiento térmico posterior. Los aceros generalmente usados para cementar contienen alrededor de 0.15% C. La composición de la superficie puede llegar a 0,8-0,9% C. Durante la cementación, el uso de alta temperatura (900-950°C) y tiempos largos puede llevar a crecimiento excesivo de grano austenítico. A partir de aquí puede ser usado un doble tratamiento: 1) calentar a 850-900°C por corto tiempo y temprar o enfriar en aire. Esto da una estructura fina y de buenas propiedades al núcleo (de bajo carbono); 2) calentamiento a 780°C y temple para obtener una capa

superficial martensítica. El núcleo no resultará martensítico en aceros al carbono pues la templabilidad no es suficiente.

Normalmente este doble tratamiento puede ser reemplazado por un único temple desde alrededor de 850°C (para el núcleo resulta justo sobre A_3 y la estructura resultante en él será fina). Con aceros de baja aleación este método da generalmente mejores resultados. En cementación líquida o gaseosa el temple puede realizarse directamente desde el tratamiento de cementación (si la temperatura usada no es muy alta).

Las mejores propiedades a fatiga se obtienen cuando la superficie de la pieza está sometida a tensiones de compresión. Esto se consigue si primero transforma el núcleo y luego la capa superficial. Así la expansión de ésta es impedida por el núcleo que ya transformó y se generan las tensiones de compresión. Las condiciones ideales ocurren en el temple en aceite, y es necesario usarlo con aceros aleados. Con aceros al carbono se puede usar temple en agua pues el núcleo transforma a ferrita + perlita a altas temperaturas (la templabilidad es baja). No es usual realizar revenidos. De ser necesario, para conseguir un alivio de tensiones internas, se restringe este tratamiento a $150-200^{\circ}\text{C}$ y no más de una hora.

11.2- Nitruración

Implica incorporar nitrógeno en las capas superficiales del acero. En presencia de cromo o aluminio se forma una capa muy fina con una distribución muy fina de precipitados pequeños (nitruros de cromo o aluminio) que le confiere gran dureza y por lo tanto buena resistencia al desgaste. Las propiedades en fatiga también son buenas. El proceso se realiza a bajas temperaturas ($500-550^{\circ}\text{C}$) y no se necesita temple posterior, así que no hay problemas de distorsión.

El proceso es lento, usualmente requiere de 10 a 72 horas dependiendo de la profundidad deseada para la capa nitrurada. Un perfil de dureza típico en un acero de 0.3% C, 1% Al, 1.5% Cr, 0.2% Mo luego de nitrurado 48 hs a 550°C se indica en la fig. 12.

Luego del tratamiento, queda una capa superficial muy delgada totalmente compuesta por nitruro de hierro ("capa blanca"). Debajo de ella hay una región con precipitados muy finos de nitruros. Esta capa blanca es muy frágil y puede desgranarse en el uso, por lo que usualmente conviene minimizar su espesor, aunque no se puede hacer nada para evitarla. Conviene normalmente eliminarla por arenado, tratamiento químico, etc.

Como el nitrurado es el último proceso a realizar en una pieza,

el acero debe ser tratado térmicamente antes. Los tipos de aceros usados para nitrurar requieren temple y revenido. Para que el proceso de nitrurado no produzca ablandamiento del núcleo es necesario que la temperatura de revenido sea superior (alrededor de 30-50°C) que la de nitrurado.

Una virtud de la superficie nitrurada es que retiene su dureza a altas temperaturas. Hay muy poco cambio de dureza hasta 500°C.

11.3- Tratamientos con carbono y nitrógeno

Llamado "carbonitruración". Es similar a la cementación, pero ahora se incorporan ambos elementos, C y N, con lo que la dureza de la capa superficial es mayor que la esperada por el contenido final de carbono. La principal ventaja sobre la cementación consiste en el menor tiempo requerido para alcanzar una dada penetración.

11.4- Temple superficial

Se confiere dureza a la superficie de piezas, calentando solo la superficie, hasta el rango austenítico, mediante llama o por inducción y su temple posterior en algunos de los medios mencionados.

CAPITULO II

1. SELECCION DE ACEROS

El primer paso para la selección de aceros para un tipo de servicio, es determinar las propiedades que interesan en dichas condiciones de servicio (por ejemplo resistencia, templabilidad, resistencia a impacto, a fatiga, a corrosión, a desgaste, etc.). Esto permite adoptar los criterios de selección del material para obtener la mejor combinación, posible de propiedades requeridas en servicio.

2.1- Resistencia a la tracción

Dado un elemento mecánico, surgen dos condiciones fundamentales a ser tenidas en cuenta en relación con el material a utilizar:

- a) la magnitud de las tensiones
- b) la distribución y naturaleza de las tensiones

La magnitud de las tensiones indicará la resistencia necesaria en el material. La distribución y naturaleza de las mismas indicará la templabilidad necesaria, como se verá más adelante.

Ambas condiciones deberán ser satisfechas por el material elegido, mediante una distribución de estructuras capaces de sobrellevar en cada punto de la pieza las tensiones aplicadas. Esto se logra mediante una adecuada selección de la composición y tratamientos térmicos o termomecánicos a que se somete a los mismos.

Aunque no del todo explicado, la experiencia indica que para el rango de aceros en consideración, con estructura completamente martensítica y revenida, las propiedades mecánicas obtenibles de un ensayo de tracción (resistencia a la tracción, tensión de fluencia, elongación y en menor aproximación reducción de área) son independientes de la composición química cuando se comparan a un mismo nivel de dureza de revenido (fig. 13). La aplicación de esta observación a otro tipo de composiciones y otras estructuras, es erróneo y puede dar lugar a errores.

Este criterio implicaría que si el acero seleccionado cumple con la exigencia de dureza (resistencia a la tracción) requerida, no interesaría su composición. Veremos más adelante, que otra serie de requerimientos establecen los criterios para fijar la composición en límites más estrechos, (por ejemplo, templabilidad, temperatura M_s , resistencia al impacto, desgaste, maquinabilidad, etc.).

Dada la naturaleza extremadamente frágil de la martensita templada debida a la presencia de carbono en solución, salvo raras excepciones, es necesario proceder a un revenido. Es pues necesario conocer, para proceder a la selección del acero, la dureza mínima que es necesario obtener en estado templado, antes del revenido, en orden de obtener las mejores estructuras resistentes a la tracción de la pieza. Tal tipo de información refleja solamente experiencia acumulada, que en algunos casos se ha convertido en recomendaciones acerca del grado mínimo de revenido a dar, a fin de eliminar las características negativas de la martensita (fig. 14).

La dureza a obtener en una estructura martensítica templada es función prácticamente exclusiva de su contenido en carbono. Por lo tanto, una vez determinada la dureza de temple requerida, el contenido en carbono queda automáticamente establecido, con independencia del contenido de otros elementos aleantes (fig. 15).

Esta conclusión es correcta para altos contenidos de martensita (mayores de un 80%) y puede utilizarse como criterio muy poco aproximado para contenidos hasta 50% de martensita. Para estructuras mixtas con menor contenido de martensita, la influencia de los elementos aleantes pasa a ser muy significativa.

A los fines de obtener buenas propiedades, es un buen criterio especificar altos contenidos de martensita, ya que aparte de reducir la dispersión de los valores de dureza, permiten elegir los contenidos de carbono más bajos posibles con la consiguiente disminución de fragilidad, dificultad de elaboración en frío y caliente y riesgos de fisuración y distorsión. El 90% de martensita es un límite accesible y conveniente.

CONCLUSIONES

- a. A los fines de la resistencia a la tracción de estructuras totalmente martensíticas y revenidas (contenidos de martensita superior a un 80%), el único elemento que interesa es el contenido de carbono. Los elementos aleantes, en el rango de composición a que nos referimos, no modifican significativamente los valores deducibles de un ensayo de tracción.
- b. Se establece como criterio usar el acero con menor contenido de carbono que pueda producir la deseada dureza de temple usando el medio de temple especificado en cada caso, cuando se desea obtener además buena resistencia al impacto. Esto implica lograr altos porcentajes de estructura martensítica por lo que en general se deberá recurrir al uso de aceros aleados, como se verá en seguida, lo cual lleva a mayores costos.

2.2- Templabilidad

Establecido el método para satisfacer los requerimientos de tensión máxima, es menester considerar la distribución de tensiones. Es precisamente la distribución del estado de tensiones, la que determinará, en síntesis, la profundidad de la capa templada. Esta no debe ser mayor que la requerida para sobrellevar el valor de tensiones existentes a una cierta profundidad. Salvo en el caso de tracción o corte puro, en general los estados de tensiones tienen su máximo en la superficie y pasan por cero en el eje neutro. Este hecho elimina en la mayoría de los casos la necesidad de especificar aceros con templabilidad hasta el centro de la pieza.

Por ejemplo, la experiencia indica que para partes sometidas a flexión, parece adecuado tener 80 o 90% de martensita a $1/4$ del radio por debajo de la superficie. En cambio para partes sometidas a tracción o corte puro, es necesario especificar más del 90% de martensita en toda la sección.

Es útil recordar que templabilidad es una propiedad del acero referente a la capacidad de obtener en el mismo un cierto espesor de capa templada y que no tiene ninguna relación con los valores de dureza máxima obtenible.

La templabilidad es determinada casi enteramente por el contenido de elementos aleantes disueltos en la austenita en el momento del temple, que no son necesariamente los valores de análisis. La templabilidad es la propiedad que debe tenerse en cuenta de manera preponderante en el momento de seleccionar la composición química del acero, y por consiguiente, trataremos de dar un breve resumen de la forma en que las distintas variables metalúrgicas operan sobre la misma.

Desafortunadamente el estado del conocimiento actual en la materia está lejos de ser total, por lo que deberemos limitarnos a dar reglas más o menos empíricas sin razones fundamentales. Este estado de la situación implica que el diseñador de aceros no puede predecir ni estimar cuantitativamente el efecto de las variables que regulan el proceso.

El mejor método disponible para el estudio práctico de las características de templabilidad de un material son las curvas TTT, en especial las realizadas para enfriamiento continuo. Si bien por razones cronológicas y de facilidad de obtención, son más comunes las curvas isotérmicas, es necesario recalcar que estas últimas no deben usarse para la predicción de las estructuras resultantes de enfriamiento continuo.

2.3- Composición química

Se recuerda que la influencia más notoria de todos los elementos de aleación comunes en el acero es correr las curvas de transformación a tiempos mayores, con aumento de la templabilidad (fig.8).

Los elementos más potentes para retardar las transformaciones, en términos generales, son el B, Mo, Mn, Cr, Ni y Si. Dentro de este grupo, es necesario destacar que elementos como el B, Mn, Ni y Si, modifican por igual la transformación perlítica y bainítica. En cambio, elementos como el Cr y Mo, retardan mucho más la transformación perlítica que la bainítica. Es este un fenómeno importante del cual se hace uso cuando se quiere obtener estructuras completamente bainíticas. Por otro lado, el agregado de Cr y Mo a una aleación con alto níquel, puede resultar sumamente conveniente en caso de que se utilicen estructuras mixtas, ya que la variación de estructuras (y por consiguiente de propiedades) será mucho más gradual.

Es necesario destacar con todo énfasis, que el efecto de los distintos elementos aleantes no es aditivo, ya que agregando simultáneamente varios de ellos se obtiene un efecto más intenso que el que se podría deducir de sumar sus efectos parciales. En la fig. 16 se muestra el efecto de la variación de iguales tenores de carbono en dos aceros de distinta composición. Es por ello que la antigua utilización de fórmulas de cálculo de templabilidad ha sido prácticamente descartada, y a las cuales sólo convendría referirse cuando no se pueda obtener otra información. Para el objetivo específico de comparación de aceros de características similares, el error del método puede ser varias veces mayor que la diferencia existente entre los materiales comparados.

2.4- Influencia de tamaño de grano

Dado que las transformaciones eutectoides se inician en los límites de grano de la austenita, cuanto mayor sea el tamaño de grano más se retardará la cinética de las transformaciones eutectoideas, aumentando por consiguiente la templabilidad, o sea la posibilidad de obtener martensita con velocidades de enfriamiento menores. Como el tamaño de grano austenítico influye inversamente en la resistencia al impacto la situación se resuelve con una solución de compromiso. Dado que el efecto puede ser muy significativo, conviene tener en cuenta esta variable.

2.5- Sustancias no disueltas en austenita

Al calentar un acero previamente al temple, además del cambio

de fase a austenita, tienen lugar otros procesos que influyen decididamente la marcha del temple. Tales son: homogeneización de la composición, disolución de precipitados y crecimiento de grano. Sería ocioso destacar los beneficios a obtener con una composición homogénea a través de la pieza en el momento del temple y no nos detendremos en ella. Es sí importante recalcar que la efectividad de los aleantes depende de que ellos estén disueltos en la austenita al templar y tiene poco sentido encarecer el material con agregados que luego no han de ser usados por falta de una solubilización adecuada. Se disminuye también de esta manera el contenido real de carbono, con la consiguiente disminución de dureza. El efecto es particularmente importante con muy alto contenido de carbono (del orden de 1%) o cuando hay presente elementos con fuerte tendencia a formar carburos (V o Nb). En este último caso, hay que considerar la posibilidad de que se utilice dichos elementos fundamentalmente como refinadores de grano.

La presencia de carburos no disueltos, por otra parte, actúa de manera similar a las inclusiones, promoviendo la nucleación de las transformaciones eutectoideas y disminuyendo por lo tanto la templeabilidad.

Es decir, que a los fines comparativos, hay que tener presente el grado de limpieza de los aceros comparados y las temperaturas de austenitización utilizadas.

CONCLUSIONES

A los efectos de la templeabilidad, considerando igual tamaño de grano e igual limpieza del acero, es conveniente el uso simultáneo de varios elementos aleantes, pues se incrementa el poder templante.

Si interesa obtener una gradación suave de propiedades entre las que corresponden a martensita y perlita, es conveniente el uso de Cr y Mo, que promueven estructuras bainíticas.

2.6- Método de determinación de templeabilidad

El método actualmente más aceptado es el método de Jominy. Consiste en calentar hasta rango austenítico una barra cilíndrica de 4 pulgadas de longitud y una pulgada de diámetro, y luego colocarla en un dispositivo de temple, de manera de quedar verticalmente dispuesta con su extremo inferior a $\frac{1}{2}$ pulgada sobre una boca de agua, de tal manera que la columna de agua sea dirigida contra ese extremo de la barra. En tanto esta parte inferior de la barra es.

templada en agua, la parte superior resulta enfriada en aire y posiciones intermedias de la barra se enfrían a velocidades intermedias. Luego de este temple, se cepillan dos caras paralelas a una profundidad de la superficie dada, se mide la dureza a lo largo de estas caras partiendo desde el extremo inferior de la barra, cada 1/16 de pulgada. Se determina de esta manera como varía la dureza obtenida al variar la velocidad de enfriamiento, fig. 17.

En la práctica, cada acero se puede comparar en base a una selección por templabilidad, se da por norma una banda limitada por la máxima y mínima templabilidad que se puede obtener con ese acero fig. 17. Esta es la llamada banda H y los aceros que cumplen estos requerimientos son llamados aceros H. El productor garantiza que un acero que vende como "acero H" (por ejemplo 4140H, 5160H, etc.) tiene una curva de templabilidad que cae dentro de la banda H fijada por norma. Esta banda H suele ser algo más estrecha que la banda de dispersión obtenida por el rango de variación permitido en composición (fig. 17).

La información obtenida del ensayo Jominy (o del mismo modo las bandas H) debe complementarse con el conocimiento de la equivalencia de velocidades de enfriamiento de distintos puntos de la barra Jominy con diferentes posiciones en una pieza enfriada en distintos medios de temple. Estas relaciones solo han sido calculadas para barras de sección cilíndrica, para puntos situados en la superficie, 3/4, 1/2 o 1/4 del radio o centro de la barra (fig. 18). Para barras exagonales o cuadradas pueden aplicarse, en primera aproximación, las relaciones obtenidas para barras cilíndricas sin corrección. Para barras rectangulares (planchuelas) se fijan, en base a experiencia, relaciones entre el espesor de la planchuela y diámetro de barra.

En base a estos elementos se puede realizar una selección del acero requerido para un dado servicio, en base a templabilidad. Para ello se siguen los siguientes pasos:

- a) De acuerdo al tipo de sollicitación de la pieza, se elige la profundidad de temple (% de martensita a cierta distancia de la superficie).
- b) En base a la resistencia requerida se fija la dureza luego del revenido en la posición especificada.
- c) Con esta información se puede obtener la dureza de temple mínima necesaria antes del revenido.
- d) Con el % martensita adoptado en el punto especificado y la dureza de temple, se obtiene el contenido de carbono del acero

a usar. El criterio de usar el mínimo carbono posible lleva a especificar porcentajes altos de martensita, lo que llevará a usar mayor cantidad de aleantes. Se debe compatibilizar las buenas propiedades deseadas con el mayor costo del acero a mayores contenidos de aleantes.

- e) Con el diámetro de barra usado, la posición del punto especificado en "a" respecto al centro de la barra, y el medio de temple usado, se determina la distancia desde el extremo de probeta Jominy que enfría en iguales condiciones que ese punto de la barra.
- f) Con este dato, se busca que acero provee esa dureza mínima a la distancia Jominy requerida, para contenidos de carbono iguales o menores al estimado en "d".

Si se desea una transición suave de propiedades, desde superficie a centro de la barra, se elige algún acero que cumpla lo especificado en el punto f), pero que además presente una banda de templabilidad sin caídas abruptas (más bien aplanada).

Deben tenerse en cuenta además otros factores tales como que durante el tratamiento no se produzcan distorsiones grandes o fisuras de temples que inutilicen la pieza fabricada.

Este capítulo es un ejemplo de selección de aceros para un uso dado. Para la selección de materiales para otros usos o aplicaciones se sigue una metodología similar a la aquí empleada.

Referencias completas sobre criterios de selección y ejemplos prácticos pueden encontrarse en "Metal Handbook", tomo I, sección Selección de Materiales.

CAPITULO III

ACEROS INOXIDABLES

La principal característica de estos aceros es su resistencia a la corrosión en diversos medios y a la oxidación a elevada temperatura. Todos ellos poseen como mínimo 11,5% Cr, indispensable para obtener las propiedades mencionadas, debidas a la formación de una película protectora de óxido estable. Estos aceros poseen otros elementos de aleación, que la confieren además de las citadas, otras propiedades, tales como resistencia mecánica tanto a temperaturas altas o bajas. De estos elementos el más común es el Ni.

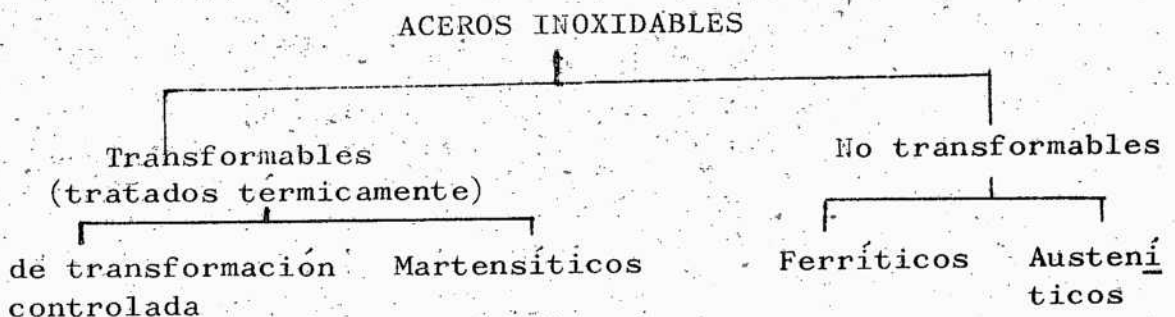
Siendo el Cr y el Ni los principales elementos de aleación, veremos qué efecto producen sobre los aceros.

- El Cr es uno de los elementos alfaógenos, o sea aumenta el campo de existencia de la ferrita (fase α b.c.c.) y disminuye o suprime el campo γ (austenita f.c.c.). Ver figura 19.
- El Ni, por el contrario, es un elemento gammaógeno, o sea aumenta la estabilidad del campo de existencia de γ . Ver figura 20.

Los aceros de bajo C y 24% de Ni o más, son austeníticos, a temperatura ambiente. La cantidad de Ni necesario para que esto suceda es menor, cuanto menor es el contenido de C. Aunque el contenido de Ni sea menor que lo que señala el diagrama de equilibrio a temperatura ambiente, es posible que estos aceros sean austeníticos, dado que a temperaturas bajas la transformación de la austenita es muy lenta.

En los aceros inoxidables es común la presencia conjunta de elementos alfaógenos y gammaógenos lo que origina estructuras y propiedades muy variadas.

Es posible realizar la siguiente clasificación:



Estos distintos tipos de aceros han sido normalizados por diversos institutos bajo distintas denominaciones. Por ejemplo la A.I.S.I. (American Iron and Steel Institute) los divide en tres series: AISI 300, AISI 200 y AISI 400.

La serie 300 son aceros que contienen un mínimo de 16% Cr y 6% Ni, los elementos de aleación están balanceados de forma tal que tienen una estructura austenítica. Se los conoce genéricamente como aceros inoxidable austeníticos al Cr-Ni.

La serie 200 es una modificación de la serie 300, de menor contenido de Ni o sea más económicos, donde la estructura austenítica se estabiliza aumentando el contenido de Mn y N, que al igual que el Ni son elementos gammágenos. Genéricamente se los denomina como aceros inoxidable austeníticos al Cr-Ni-Mn.

La serie 400 son aceros con un mínimo de 11,5% Cr y no más de 2,5% de otros aleantes. Se los conoce como aceros al Cr, y pueden dividirse en dos grupos: martensíticos y ferríticos. Cuando el contenido de Cr, en la aleación Fe-Cr (ver figura 19 para 0%C) supera el 13% la aleación es ferrítica a cualquier temperatura. En los aceros, que además de Fe y Cr contienen C, Mn y otros elementos de aleación, el Cr necesario para cerrar el lazo de existencia de la fase γ , es algo variable y está comprendido entre 12 y 18%. Los aceros inoxidable martensíticos más comunes contienen entre 11,5 y 13,5% de Cr y se los conoce comunmente como 12%Cr. Estos aceros en estado recocido son ferríticos. A temperaturas elevadas son austeníticos, lo que permite su posterior transformación a martensita, aun enfriando al aire; dado que como ya dijimos el Cr es uno de los elementos que más retrasa la transformación de la austenita a ferrita, o sea aumenta la templabilidad.

Los aceros de transformación controlada tienen la composición balanceada de tal forma que la temperatura M_s , de comienzo de la transformación martensítica, es algo inferior a temperatura ambiente, por lo que a esta temperatura son austeníticos, ya sea por enfriamiento al aire o por templado desde la temperatura de solubilización (aproximadamente 1050°C). En esta condición es fácil realizar operaciones de fabricación tales como doblado o estampado. Luego la austenita se transforma a martensita enfriando por debajo de M_s (generalmente por debajo de 0°C) o mediante un tratamiento intermedio que consta de un calentamiento a 700-800°C, que produce la precipitación de carburos, con el consiguiente empobrecimiento de la austenita en C y elementos aleantes, que hace que se eleve M_s y en el enfriamiento posterior la austenita se transforma a martensita.

La composición base aproximada de estos aceros inoxidable es 15% Cr, 6% Ni y de 0.05 a 0.1% de C.

La resistencia de los aceros inoxidables, tanto a temperaturas elevadas como a temperatura ambiente, puede incrementarse mucho por endurecimiento por precipitación. Esto es de aplicación comercial tanto en aceros austeníticos como martensíticos, mientras que solo se realiza a nivel de laboratorio en el caso de los ferríticos. Usualmente se utiliza como endurecedores la precipitación de compuestos intermetálicos, y en particular la fase Ni_3 (Ti, Al).

En estos materiales, como en el caso general, interesa la posibilidad de fabricación que ofrecen. Consideraremos solo dos aspectos, que son la posibilidad de deformarlos y de soldarlos.

Los aceros austeníticos son fácilmente deformables en frío, tanto por estirado como embutido, tienen muy alta ductilidad y baja resistencia, aproximadamente la mitad de la de los aceros ferríticos y la cuarta parte de los martensíticos. Es por eso que como ya dijimos se desarrollaron los aceros de transformación controlada, que se deforman primero y se transforman después.

Los aceros ferríticos son más difíciles de deformar, sobre todo en operaciones de estirado, donde se comportan mal dada su baja ductilidad. El uso de estos aceros se justifica debido a su bajo costo, comparado con los otros inoxidables y por sus buenas características a la corrosión en algunos medios, por ejemplo en presencia de cloruros. Respecto de la soldabilidad, los más fácilmente soldables son los inoxidables austeníticos, aunque pueden presentar algunos problemas de distorsión dado que tienen menor conductividad térmica que los otros inoxidables y casi el doble de coeficiente de dilatación térmica.

Los martensíticos son susceptibles de un endurecimiento excesivo con riesgo de aparición de fisuras.

En los aceros ferríticos, la falta de una transformación de fase hace que se produzca un excesivo crecimiento de grano, lo que reduce sus propiedades a impacto.

En general los aceros inoxidables son susceptibles de precipitar carburos de Cr, dentro de un rango de temperatura dada. El fenómeno es más pronunciado en aceros austeníticos donde se produce entre 450-850°C, en los ferríticos se produce a mayor temperatura. La precipitación de carburos se produce preferencialmente en borde de grano, por ejemplo en zonas cercanas a las soldaduras y durante su paso por las temperaturas indicadas, produce un empobrecimiento de Cr en zonas cercanas a los bordes de grano. Estas zonas pobres en Cr son menos resistentes a la corrosión y se atacan preferencialmente. A este fenómeno se lo denomina sensitización. Para evitar su aparición se recurre a estabilizadores (Ti o Nb) que forman carburos estables a alta temperatura, lo que evita la presencia de

C en solución, o a aceros de muy bajo contenido de C (0.03 o menos), lo que impide la precipitación de carburo de Cr. Otra posibilidad es usar aceros con mayores contenidos de Cr, para que a pesar de la precipitación quede suficiente Cr en solución; esta solución es anti-económica.

Si la sensitización se ha producido es posible de eliminar, calentando a 1000-1100°C para solubilizar los carburos precipitados y enfriar rápidamente para evitar la reprecipitación.

Otra posibilidad es realizar un tratamiento a temperaturas cercanas a las de la zona de sensitización (900°C) para producir, por difusión, la homogeneización del Cr pero se requiere de tratamientos muy prolongados y generalmente antieconómicos.

REQUERIMIENTOS ESPECIALES DE LA INDUSTRIA NUCLEAR

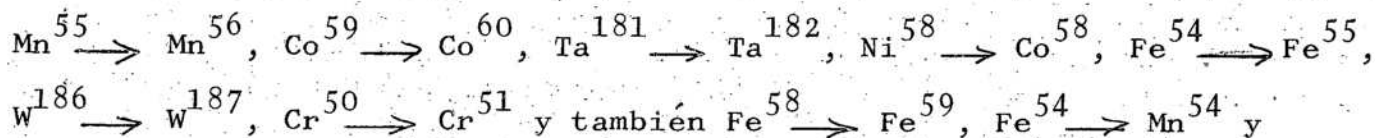
Los requerimientos nucleares se reflejan en la tecnología de los aceros en general y en los inoxidables en particular en tres áreas principales:

- a. Calidad del acero
- b. Pérdida neutrónica
- c. Radioactividad inducida.

Las dos últimas han forzado ciertos cambios en la composición de los aceros, mientras que la primera ha llevado a un mejoramiento en general en la calidad. En la mayoría de las industrias, el reemplazo de una parte involucra a lo sumo la parada de la planta pero en la industria nuclear la radioactividad inducida puede crear serios problemas. Esto hace que se incrementen los cuidados en la selección de aceros y con un énfasis especial en su calidad.

En un reactor termonuclear, la economía de neutrones se mantiene minimizando la cantidad de materiales de alta sección de captura en la parte activa del reactor. La sección de captura promedio del acero inoxidable es de 2 a 3 barns con contribuciones particulares hechas por Manganeseo, tantalio, tungsteno, cobalto, boro y las tierras raras.

Este mismo factor de pérdida de neutrones, importante para la economía del reactor, está involucrado en el problema de radioactividad inducida, la absorción produce varios fuertes emisores gamma y transmutaciones del tipo.





Uno de los resultados de estas consideraciones ha sido la especificación para los aceros tipo 348 en la cual el Ta frecuentemente es adicionado con Nb en cantidades importantes, debe mantenerse en un nivel mínimo. En los aceros tipo 349 tanto el Co como el Ta deben mantenerse bajos.

Desde el punto de vista de las propiedades mecánicas y debido a la radiación, el efecto más comúnmente observado es un endurecimiento, aumenta la resistencia a la tracción y disminuye la ductilidad. Ocurren, además, variaciones más extravagantes, como elevación de la tensión de fluencia, reaparición del fenómeno de Luders, y aumento de la temperatura de transición.

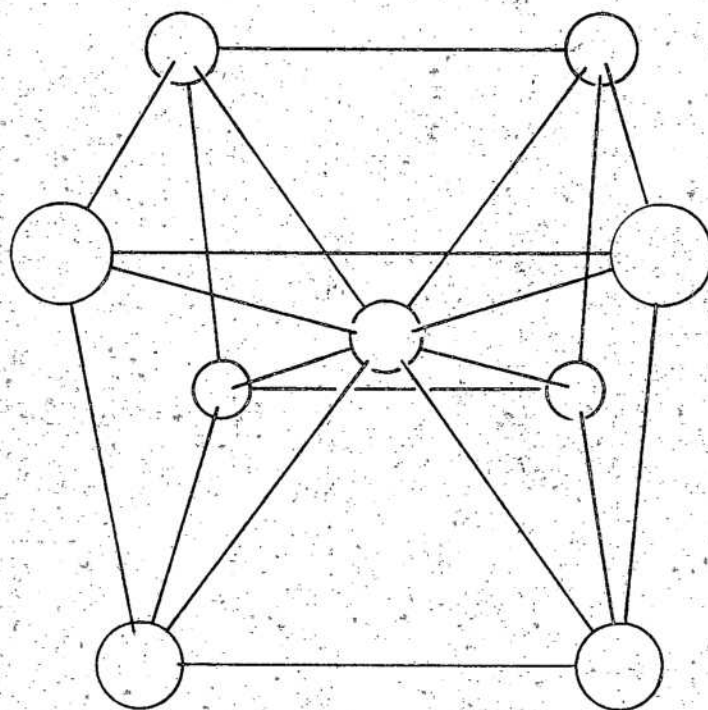
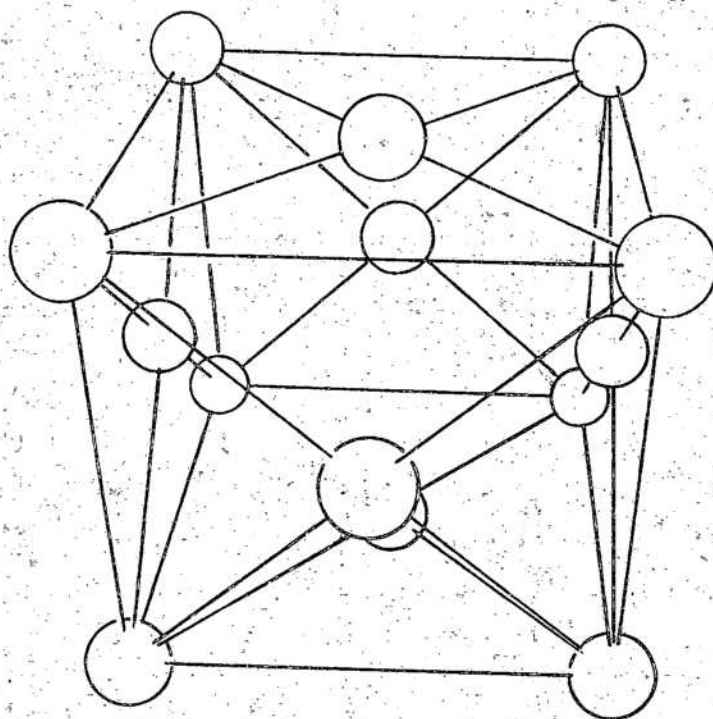
*HIERRO α* *HIERRO γ*

Fig. 1

DIAGRAMA DE EQUILIBRIO METAESTABLE DE LA ALEACION Fe-C

TRATAMIENTOS TERMICOS Y MECANICOS MAS USUALES

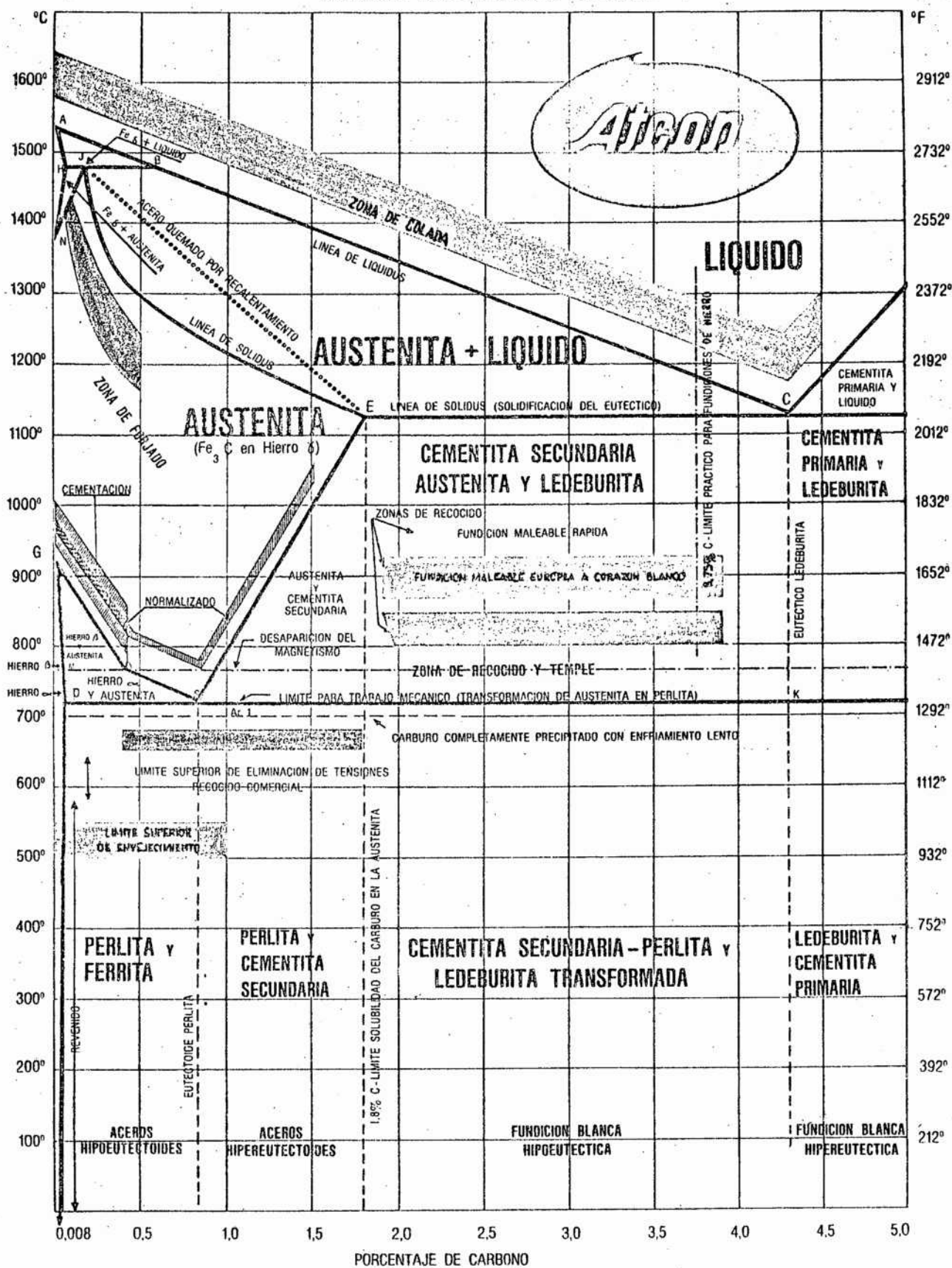


Figura 2

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni	V
0.44	0.22	0.66	0.022	0.029	0.15	—	—	—	0.02

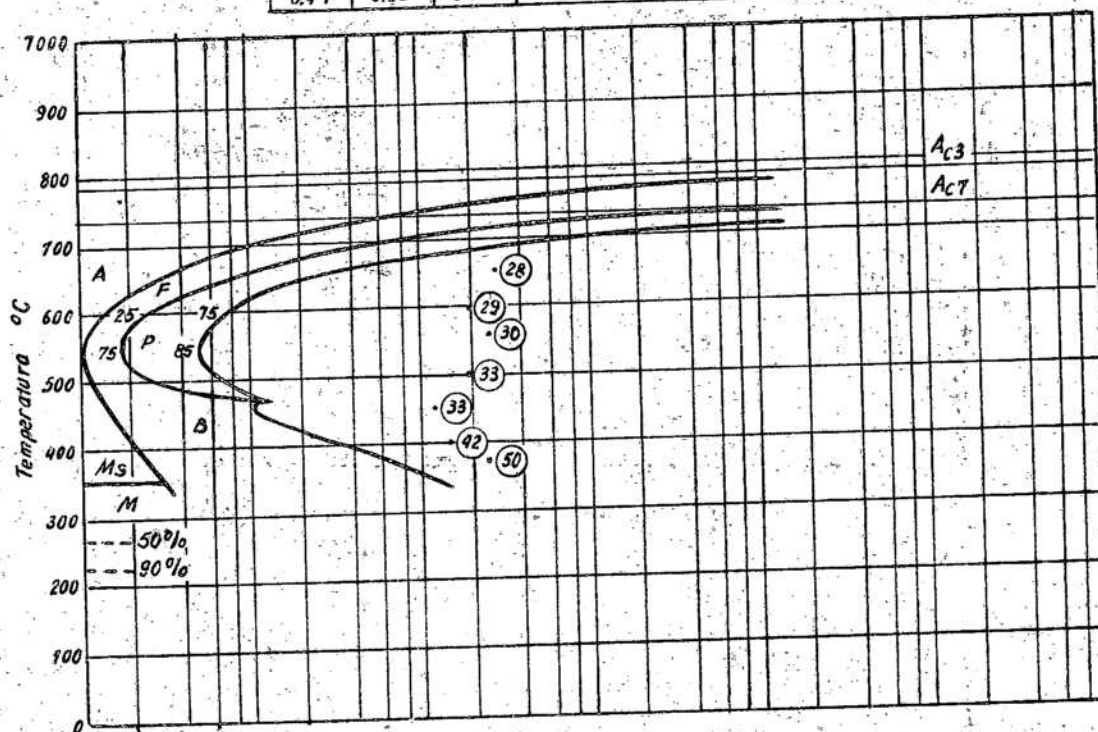


Fig. 3

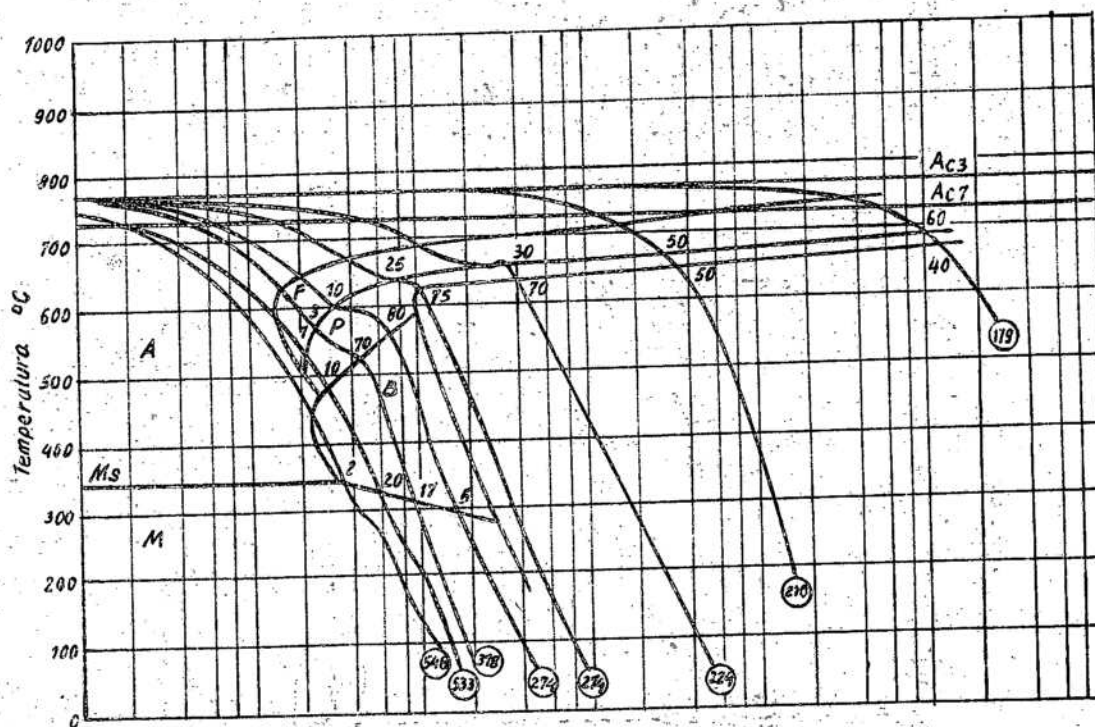


Fig. 4

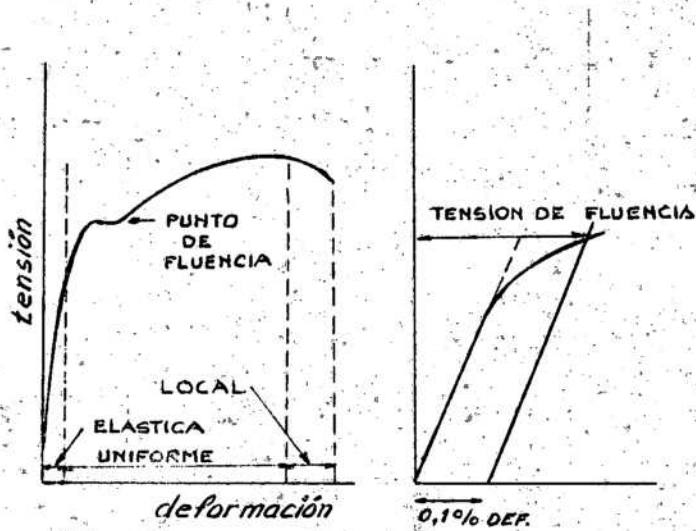
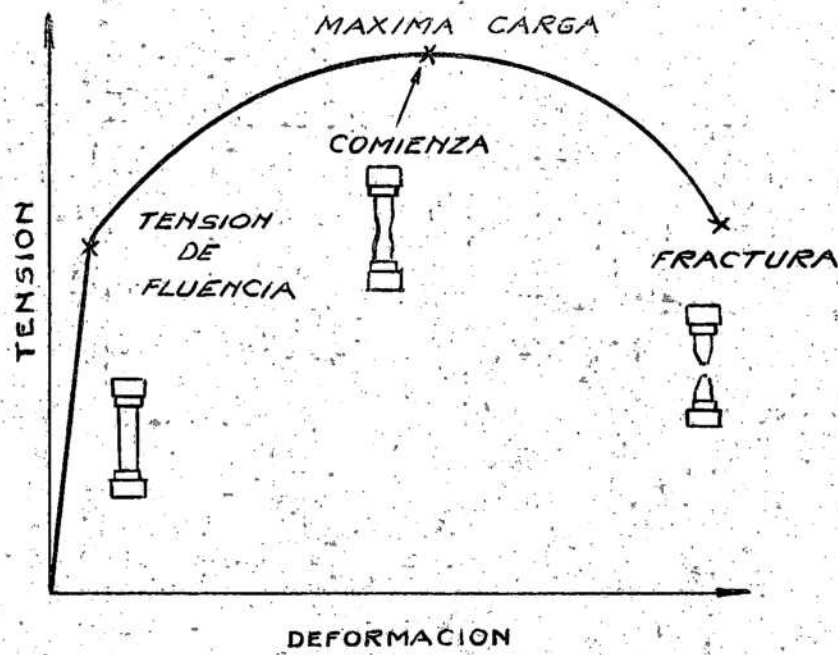


Fig. 5

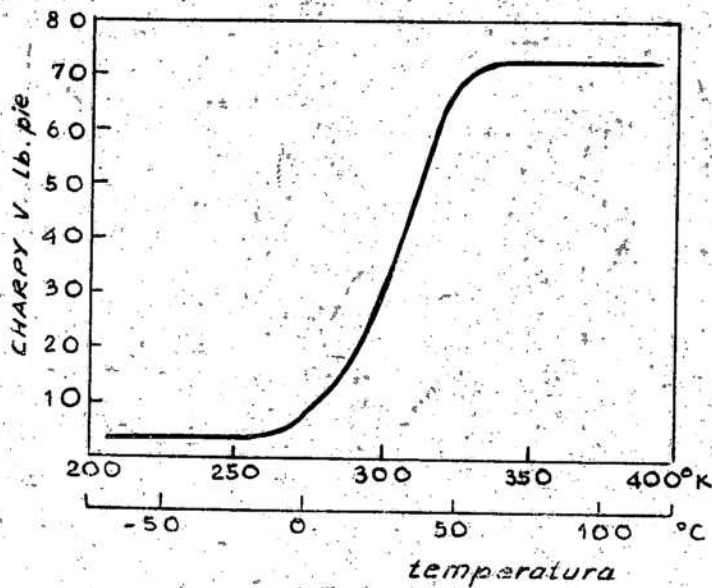


Fig. 6

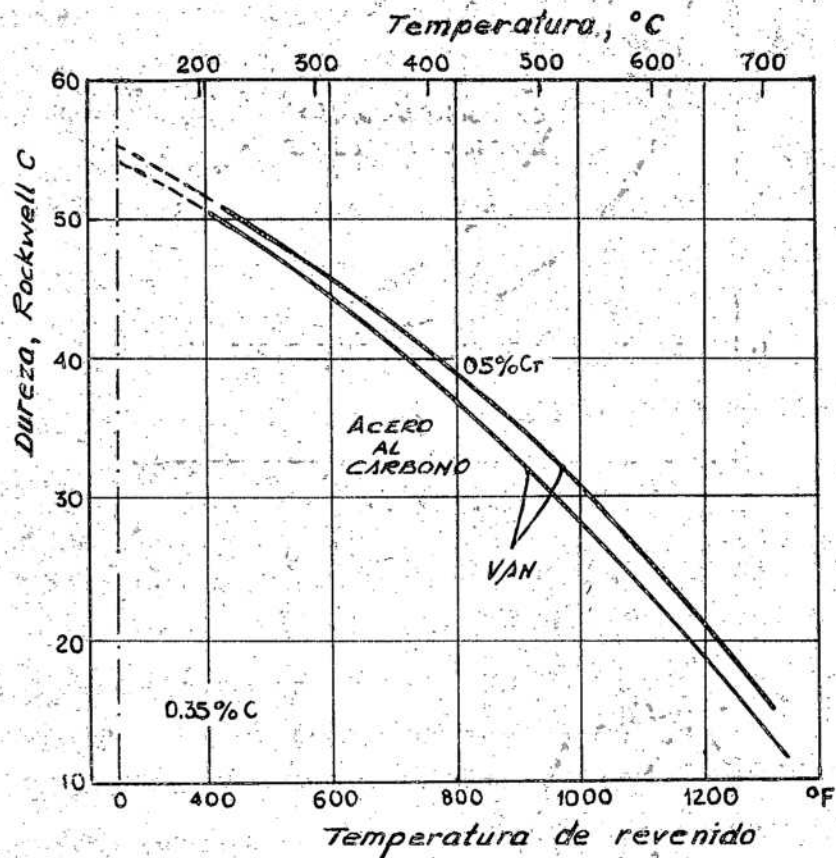


Fig. 7

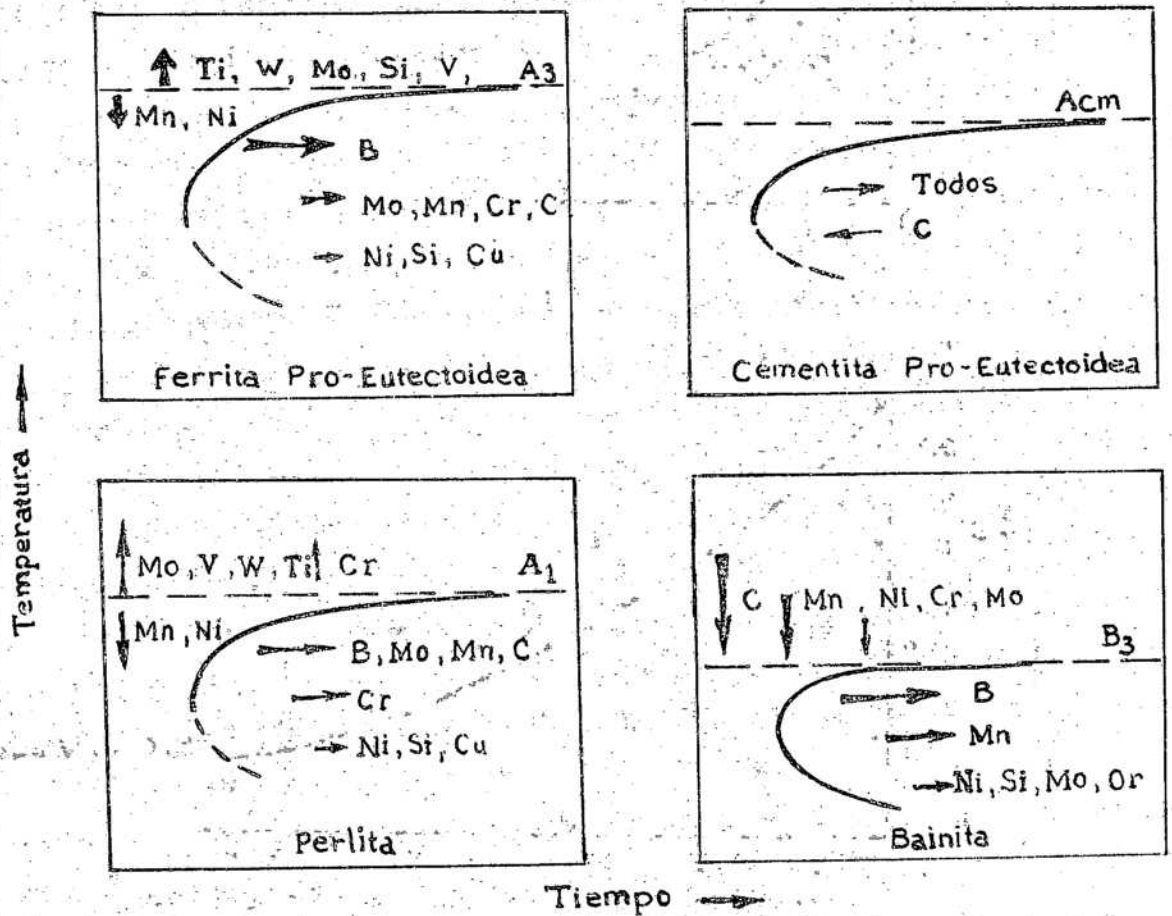


Fig. 8

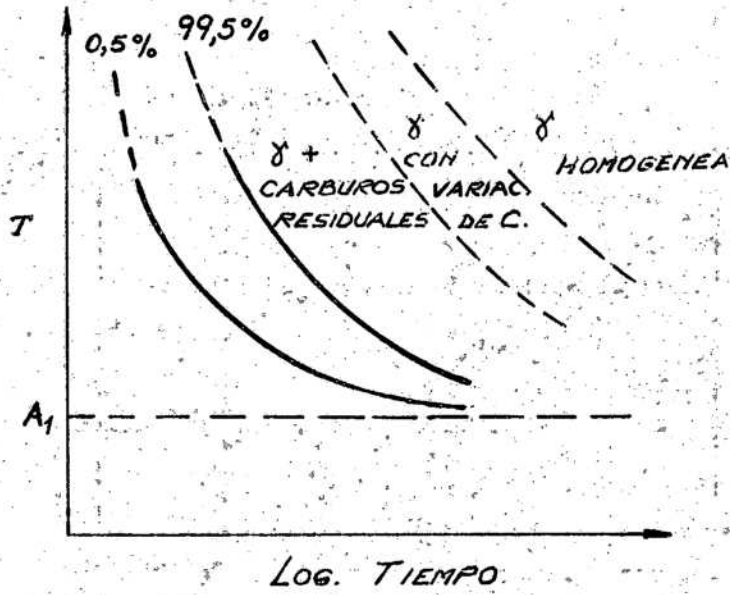


Fig. 9

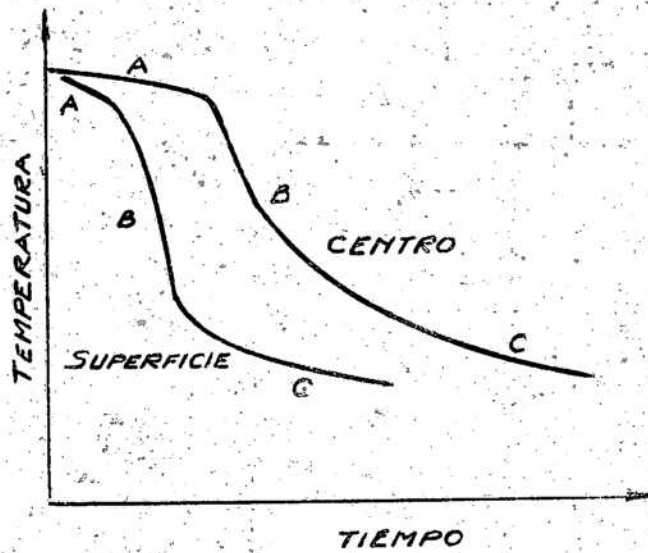


Fig. 10

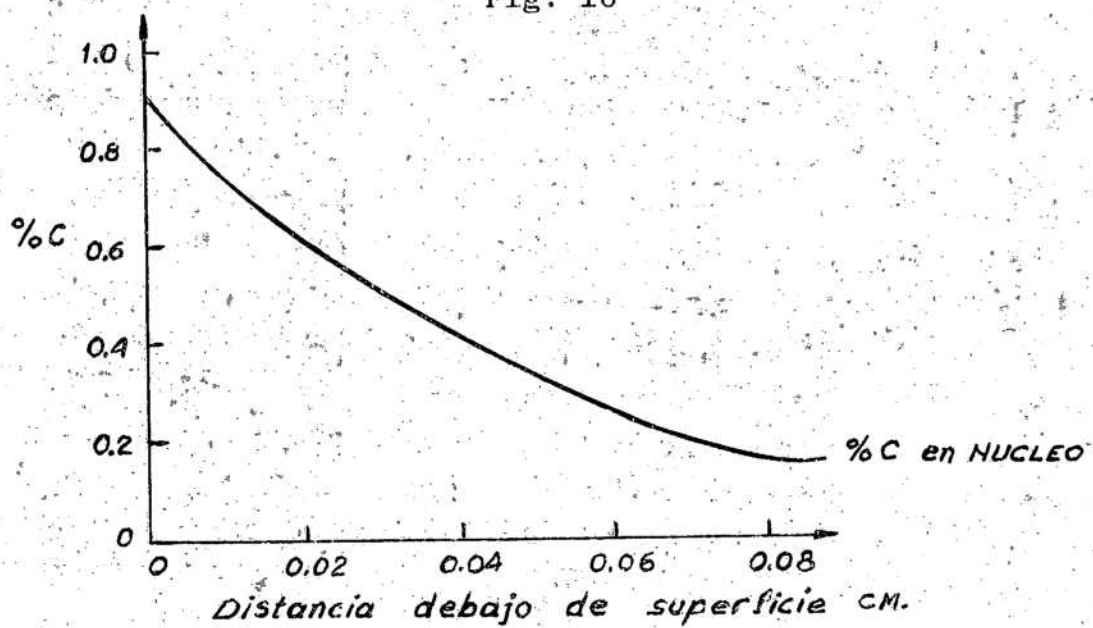


Fig. 11

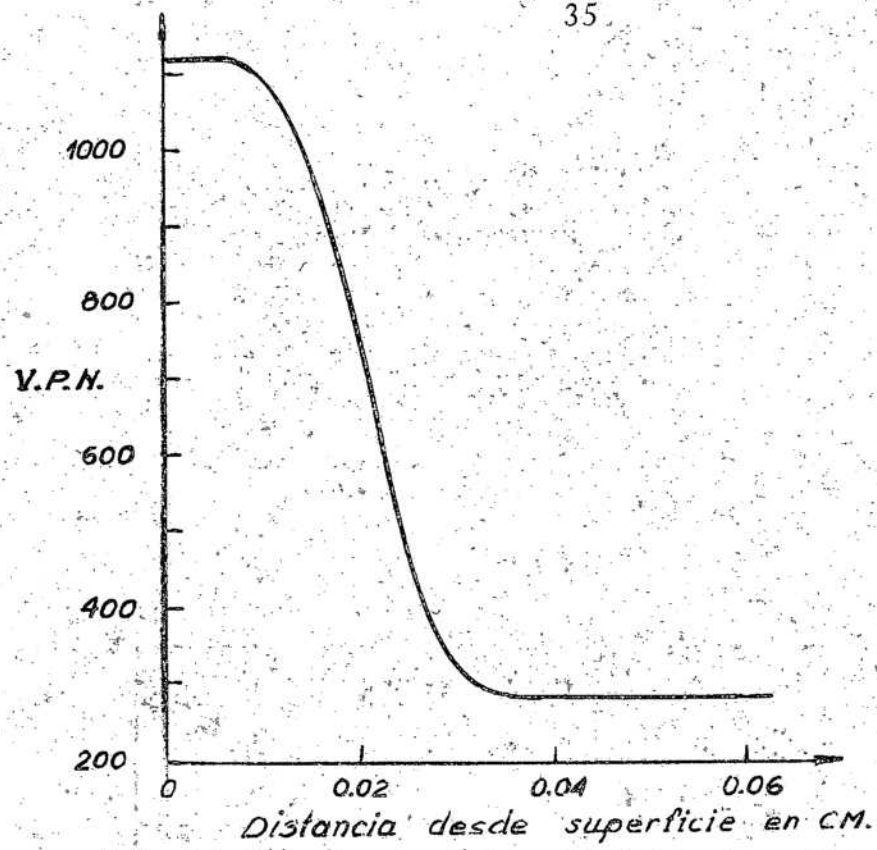


Fig. 12

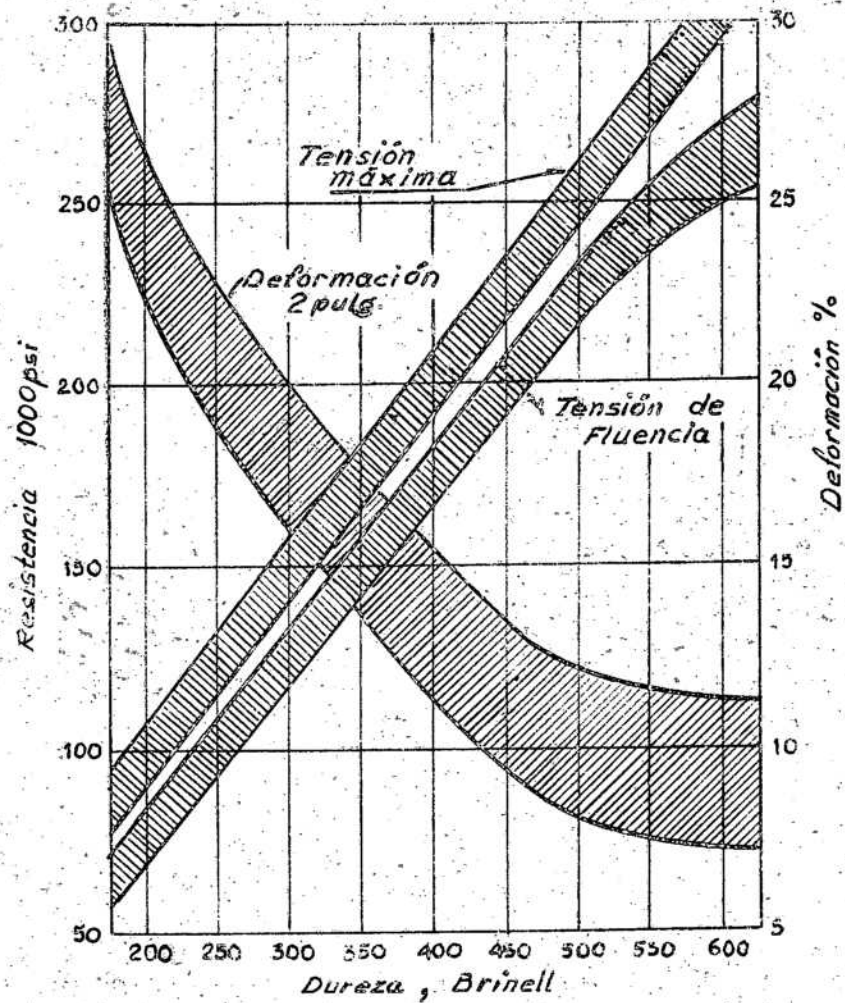


Fig. 13

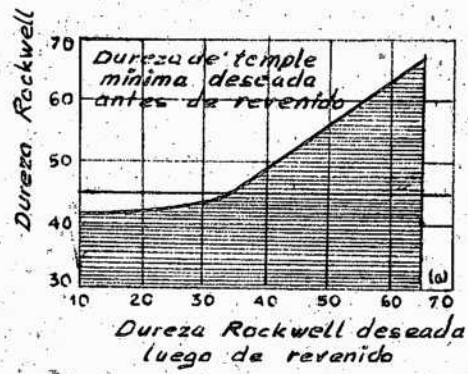


Fig. 14

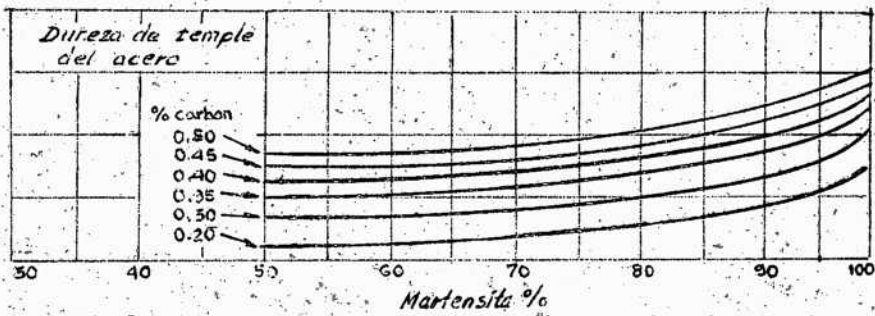
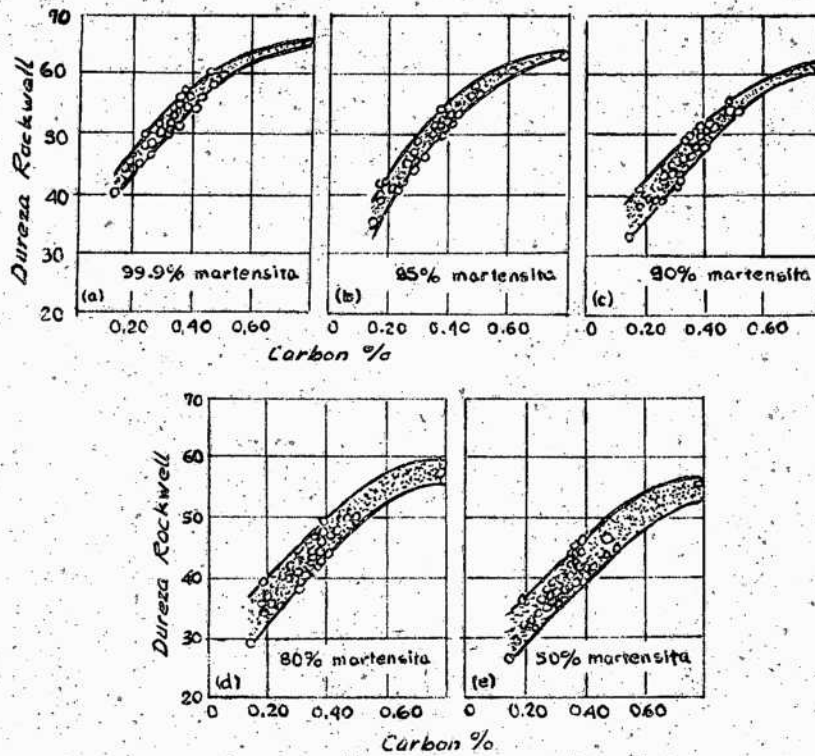


Fig. 15

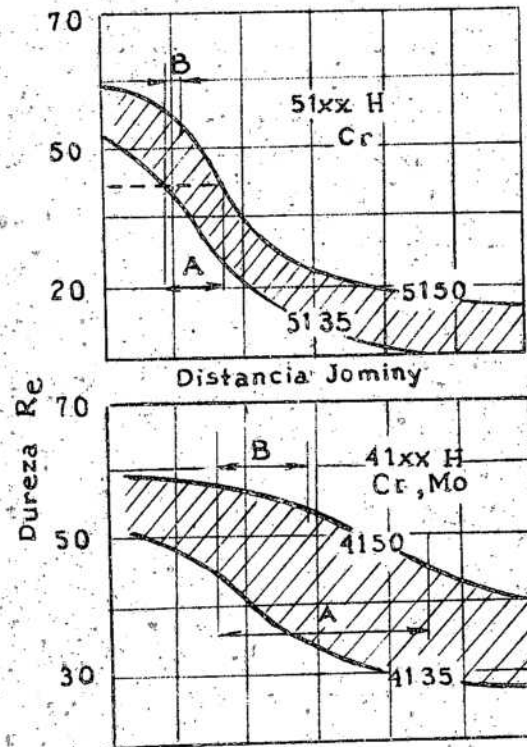


Fig. 16

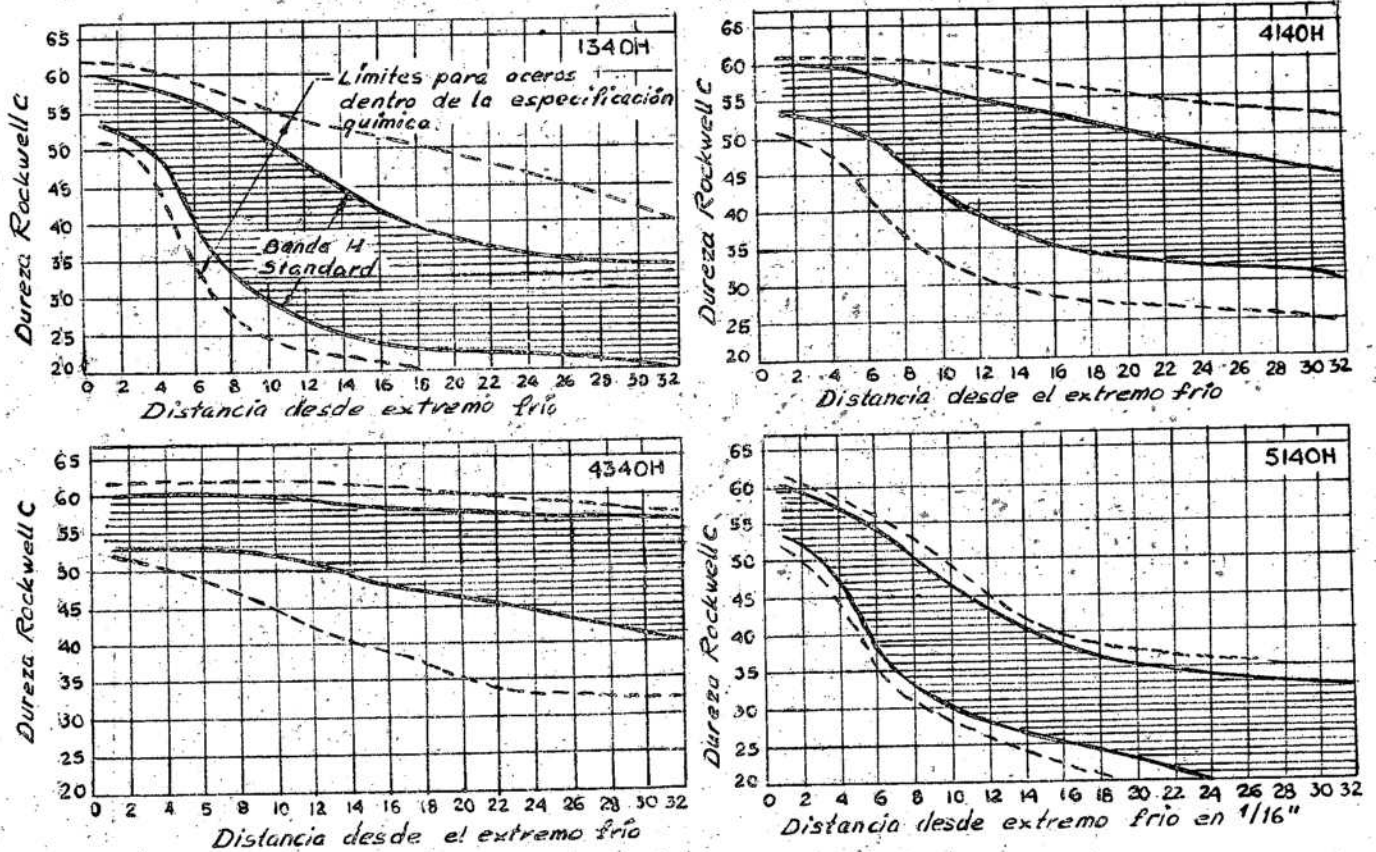


Fig. 17

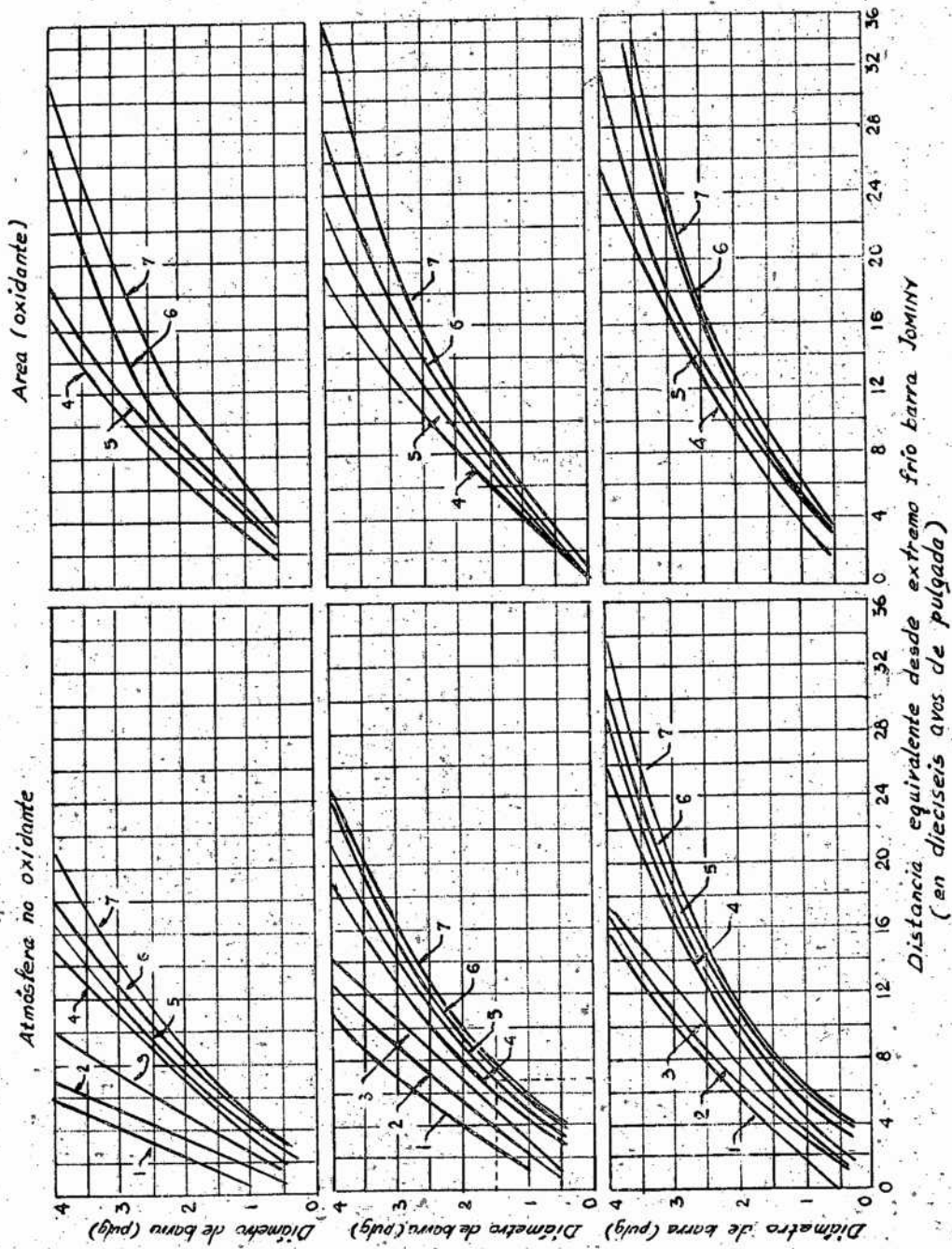


Fig. 18

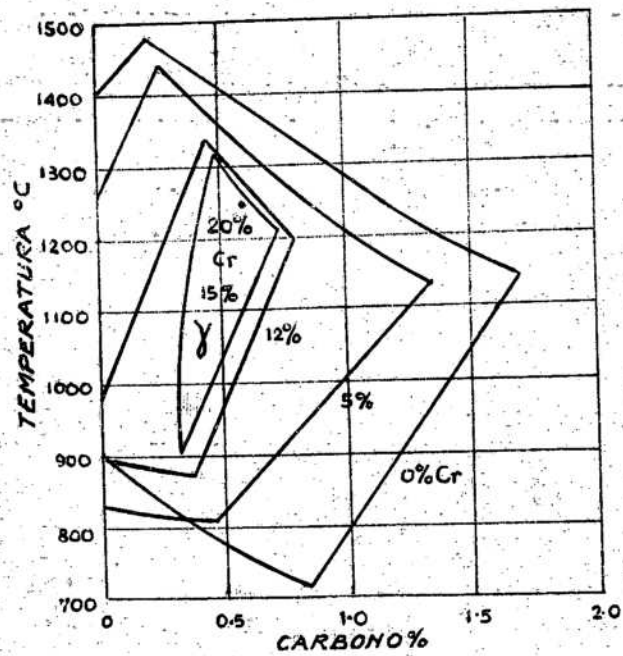


Fig. 19

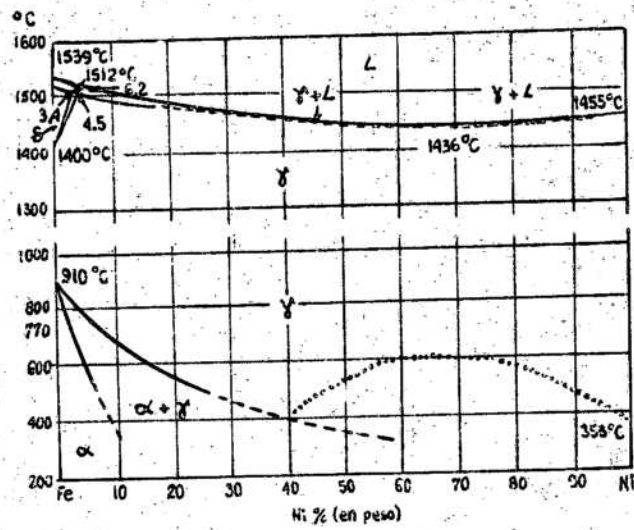


Fig. 20