

TM  
Z5853  
.M2  
FIME  
1981  
P8

TM

Z5853

.M2

FIME

1981

P8



1020070562

TM  
Z58=

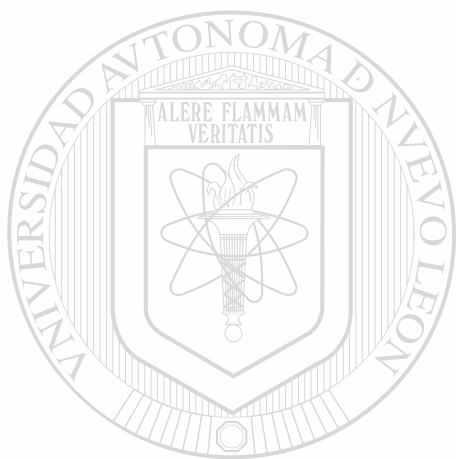
M2

M=

2

P8

2



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

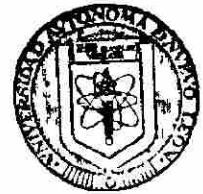


162073

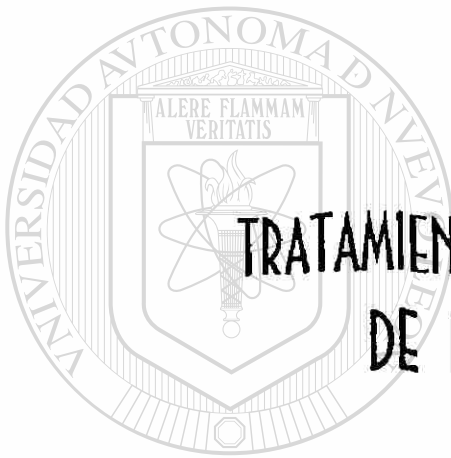
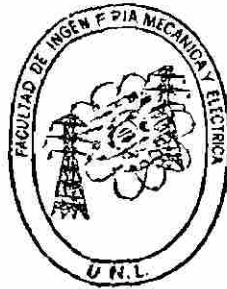
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS SUPERIORES



DIRECCIÓN GENERAL DE  
ESTUDIOS DE POSTGRADO



TRATAMIENTO TÉRMICO DE TEMPLADO  
DE LOS ACEROS ALEADOS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

TESIS

DIRECCIÓN QUE PARA OBTENER EL GRADO DE LICENCIADO  
MAESTRO EN CIENCIAS DE INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA

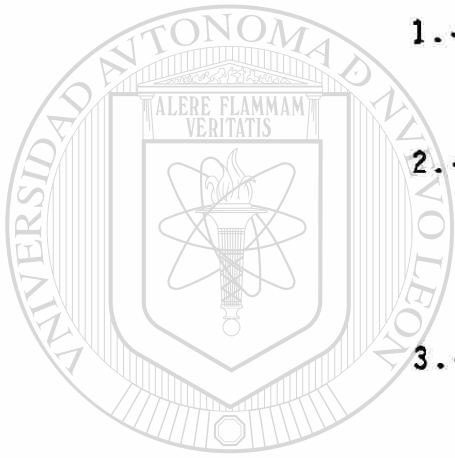
Joel Puente Sánchez

MONTERREY, N. L.

MARZO DE 1981

# I N D I C E

		pág.
CAPITULO I.-	Generalidades . . . . .	2
CAPITULO II.-	Clasificación de los Aceros Aleados.. . . .	7
	1.- De acuerdo a su utilización. . . . .	7
	2.- Por su estructura microscópica. . . . .	8
	3.- Por su composición química. . . . .	12
CAPITULO III.-	Elementos de Aleación. . . . .	14
	1.- Forma en que se encuentran los elemen tos de aleación. . . . .	14
	2.- Influencia de los elementos de alea- ción en el diagrama de equilibrio Fe- Fe <sub>3</sub> C. . . . .	20
	3.- Constituyentes microscópicos de los - aceros. . . . .	33
<hr/>		
CAPITULO IV.-	Temple de los aceros Aleados. . . . .	46
	1. Influencia de los elementos de alea- ción sobre su templabilidad. . . . .	46
	2.- Métodos para temprar. . . . .	42
	3.- Curva de transformación Triple "T"	45
	4.- Influencia de los elementos de alea- ción sobre las propiedades mecánicas. . . . .	70



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## CAPITULO I

### GENERALIDADES

Se da el nombre de aceros aleados a los aceros que además de los cinco elementos: carbono, silicio, manganeso, fósforo y azufre, contienen también cantidades relativamente importantes de otros elementos como el cromo, níquel, molibdeno, etc., que sirven para mejorar alguna de sus características fundamentales. También pueden considerarse aceros aleados los que contienen alguno de los cuatro elementos diferentes del carbono que antes había citado, en mayor cantidad que los porcentajes que normalmente suelen ser generalmente los siguientes: Si=0,50%; Mn=0,90%; P=0,100% y S=0,100%.

Los elementos de aleación que más frecuentemente suelen utilizarse para la fabricación de aceros aleados son: níquel, manganeso, cromo vanadio, wolframio, molibdeno, cobalto, silicio, cobre, titanio, circonio, plomo, selenio, niobio, aluminio y boro.

La influencia que ejercen esos elementos es muy variada y, empleados en proporciones convenientes, se obtienen aceros con ciertas características que, en cambio, no se pueden alcanzar con los aceros ordinarios al carbono.

Utilizando aceros aleados es posible fabricar piezas de gran espesor, con resistencias muy elevadas en el interior de las mismas. En elementos de máquinas y motores se llegan a alcanzar grandes durezas con gran tenacidad. Es posible fabricar mecanis-

mos que mantengan elevadas resistencias, aunque lleguen a calentarse a altas temperaturas. Hay aceros inoxidable que sirven para fabricar elementos decorativos, piezas de máquinas y herramientas, que resisten perfectamente a la acción de los agentes corrosivos. Se pueden construir herramientas que realicen trabajos muy forzados y que a pesar de calentarse no pierden dureza. Es posible preparar troqueles de formas muy complicadas que no se deformen ni agrieten en el temple, etc.

Todas estas características se llegan a conseguir por la presencia en los aceros aleados, de ciertos microconstituyentes de gran interés, que en igualdad de condiciones de tratamiento no aparecen en los aceros al carbono, encontrándose esos constituyentes en los aceros aleados porque las velocidades críticas de temple de los aceros con elementos de aleación son diferentes de las de los aceros al carbono; porque también son diferentes sus temperaturas críticas, las zonas de solubilidad de los diversos constituyentes, etc., realizándose las modificaciones de microestructura en los aceros aleados de forma diferente a como se producen en los aceros al carbono precisamente por la presencia, en cada caso, de determinadas cantidades de elementos de aleación.

Por lo tanto, para llegar a conocer las verdaderas posibilidades de utilización de estos aceros, es necesario estudiar las circunstancias que deben concurrir para que se produzcan en la forma deseada las diferentes variaciones microestructurales, que son en definitiva las que regulan las propiedades de los aceros.



Así, por ejemplo, es fácil de comprobar experimentalmente cómo es posible obtener con un acero cromo-níquel-molibdeno de  $C=0,32\%$ ;  $Cr=1,20\%$ ;  $Ni=3\%$  y  $Mo=0,25\%$ , de 100 mm de diámetro, después del temple y revenido, una resistencia de  $120 \text{ Kg/mm}^2$  en el centro de la pieza, mientras que con una barra de acero al carbono de  $0,32\%$  de C del mismo diámetro, después del temple y revenido, en el interior de la misma no se pasa de  $65 \text{ Kg/mm}^2$ .

También se puede observar que una herramienta de acero rápido al wolframio conserva su dureza de 63 Rockwell-C, a pesar de calentarse durante el trabajo a unos  $600^\circ$ , mientras una herramienta de acero al carbono de esa dureza inicial al calentarse a esa temperatura de  $600^\circ$ , se ablanda rápidamente y queda con una dureza de 20 Rockwell-C.

Es también fácil comprobar que una chapa de acero inoxidable 18-8 resiste a la intemperie indefinidamente sin oxidarse, mientras una chapa de acero al carbono está completamente oxidada a las 24 horas de quedar expuesta a los agentes atmosféricos.

En los hornos de calentamiento se emplean piezas de acero cromo-níquel 25-20 por ejemplo, que resisten indefinidamente una temperatura de  $950^\circ$  sin estropearse, mientras que en las piezas de acero al carbono a  $800^\circ$  se forma una gran cascarilla, y a las 100 horas de permanencia están casi destruidas.

Esos ejemplos y otros muchos que podrían citarse, des-

tacan las ventajas del empleo en ciertos casos de los aceros aleados en vez de los aceros al carbono. Pero para conocer en cada caso la acción de esos elementos de aleación, es necesario señalar primero la influencia que ejercen sobre los puntos críticos, zona de solubilidad de los diferentes constituyentes, etc., fenómenos que son algo más complicados y más difíciles de entender -- que los anteriores.

Al indicar antes que los elementos de aleación modifican los diagramas de equilibrio, he pretendido agrupar en ese apartado los siguientes fenómenos a) Elevación o descenso de las temperaturas críticas de los diagramas de equilibrio y de las temperaturas Ac y Ar correspondientes a calentamientos y enfriamientos relativamente lentos. b) Modificaciones en el contenido en carbono del acero eutectoide. c) Tendencia a ensanchar o disminuir los campos austeníticos o ferríticos correspondientes a los diagramas de equilibrio, y d) Otras influencias también relacionadas con el diagrama hierro-carbono, como la tendencia a grafitizar el carbono, a modificar el tamaño de grano. ®

#### DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Entre todas las variaciones a que dan lugar los elementos de aleación destacan por su importancia e influencia en otros fenómenos y que mencionaré más adelante, la acción de estos elementos en los dos aspectos siguientes: 1° Preferencia de los elementos de aleación a formar solución sólida con la ferrita o preferencia a formar carburos, y 2° Tendencia de ciertos elementos aleados a desarrollar estructuras ferríticas o a favorecer la formación de estructuras austeníticas.

## CAPITULO II

### CLASIFICACION DE LOS ACEROS ALEADOS.

#### 1.- De acuerdo con su utilización.

Señalaré brevemente una clasificación general de las -  
clases más importantes.

Aceros en los que tiene  
una importancia funda-  
mental la templabilidad

Aceros de gran resistencia  
Aceros de cementación  
Aceros de muelles  
Aceros indeformables

Aceros de construcción

Aceros de gran resistencia  
Aceros de cementación  
Aceros para muelles  
Aceros de nitruración  
Aceros resistentes al desgaste  
Aceros para imanes  
Aceros para chapa magnética  
Aceros inoxidables y resisten-  
tes al calor

Aceros  
aleados

Aceros rápidos

Aceros de herramientas

Aceros de corte no rápidos  
Aceros indeformables  
Aceros resistentes al desgaste  
Aceros para trabajo de choque  
Aceros inoxidables y resisten-  
tes al calor

En esta tabla se señalan los aceros aleados de uso más común clasificados en tres grupos. Se señalan los dos grupos clásicos de aceros de construcción y de herramientas, y además otro grupo en el que destaca la importancia de la templabilidad, y en él se incluyen los aceros de gran resistencia, muelles, cementa-

ción, etc., que aun perteneciendo a los otros dos grupos, interesa destacar por separado por la gran importancia que en ellos tiene la templabilidad.

En realidad lo que se desea con ello es señalar que -- uno de los efectos más importantes que ejercen los elementos de aleación en estos aceros, es facilitar el temple cuando se trata de piezas de gran espesor y perfiles complicados.

## 2.- Por su estructura microscópica.

En ocasiones se suelen usar las denominaciones de aceros perlíticos, martensíticos, austeníticos, ferríticos y con carburos, según sea la estructura con que suelen quedar normalmente los aceros, cuando después de un calentamiento a elevada temperatura son enfriados al aire. A pesar de que en general estas denominaciones se suelen emplear para materiales enfriados al aire, conviene aclarar un poco este punto. En la mayoría de los casos se obtienen efectivamente estas estructuras con enfriamiento al aire, pero en algunos aceros y en piezas de grandes dimensiones, si el enfriamiento se hace de esa forma la estructura no corresponde completamente a la que se suele emplear para denominar el acero, y en ese caso para obtener la estructura típica conviene hacer el enfriamiento de otra forma. Esta excepción se presenta sobre todos en los aceros austeníticos en los que en piezas de cierto espesor es necesario hacer el enfriamiento en agua para conseguir la estructura totalmente austenítica. En cambio, cuando se trata, por ejemplo, de chapas muy delgadas de 1 ó 2 mm de espesor por ejemplo, es suficiente enfriarles al aire

desde elevada temperatura para alcanzar el estado austenítico.

En todos los casos, en el calentamiento debe alcanzarse una temperatura suficiente para austenizar el material, tomándose generalmente como referencia los resultados que se obtienen con redondas de 25 mm de espesor. A continuación mencionaré las particularidades de cada una de estas diferentes clases de aceros.

1º Aceros perlíticos.-Además de los aceros al carbono, pertenecen también a este grupo los aceros de baja y media aleación. Se caracterizan porque en el enfriamiento al aire desde elevada temperatura (750°-900°), cuando se trata de perfiles de espesor superior a 25 mm, la transformación de la austenita en otros constituyentes ocurre en la zona de 600° a 700° y en el examen microscópico se observa la presencia de perlita y ferrita o de perlita y cementita. El temple de estos aceros suele hacerse con enfriamiento en agua o en aceite, según el espesor.

2º Aceros martensíticos.-Aceros clásicos de este grupo son los llamados aceros de temple al aire, como los cromo-níquel (C=0,35%; Cr=1%; Ni=4%), o cromo-níquel-molibdeno empleados para la construcción de engranajes, y los aceros al cromo inoxidable de C=0,30%; Cr=13%. En estos aceros en el enfriamiento al aire desde elevada temperatura (1.050°-800°), la austenita se transforma en la zona de 20°-350°, apareciendo en la microestructura un gran porcentaje de martensita. El temple de estos aceros suele hacerse al aire o en aceite, según el espesor.

3º Aceros austeníticos.-Los aceros más importantes de -

Este grupo son los aceros cromo-níquel inoxidables 18-8 y los 12-12; 25-20; 20-12, etc., y también el acero de 12% de manganeso. En estos aceros al ser enfriados desde elevada temperatura (900° a 1.100°), la mayor parte de la austenita queda sin transformarse. En estos aceros el tratamiento de austenización se suele hacer con enfriamiento al aire cuando se trata de perfiles muy pequeños o con enfriamiento en agua o en aceite cuando se trata de grandes espesores, para tener seguridad de que la estructura que se obtiene es totalmente austenítica, y evitar que aparezcan otros constituyentes diferentes.

4° Aceros ferríticos.- Reciben este nombre ciertos aceros cuya estructura es normalmente ferrítica. Entre los aceros de esta clase, de uso más frecuente, se encuentran los aceros inoxidables al cromo de bajo contenido en carbono (0,10% a 0,30%) y elevado contenido de cromo generalmente superior al 16% y ciertos aceros al silicio de más de 3% de este elemento, empleados para usos eléctricos. En estos aceros se puede considerar que el constituyente microscópico único es la ferrita y en ellos no se puede alcanzar el estado austenítico por calentamiento a elevada temperatura, por lo que como ya se explicará más adelante es imposible realizar el temple. Estos aceros pertenecen a una clase especial que exige muchos cuidados en los procesos de transformación y que poseen propiedades muy particulares.

5° Aceros con carburos.- Estos aceros suelen ser de elevado contenido en los elementos de aleación y su porcentaje de carbono suele ser generalmente superior a 0,60%, aunque en ocasiones hay también aceros con carburos hasta de 0,30% de carbono.

Se caracterizan por presentar lo mismo en estado recocido, que en cualquier otro estado de tratamiento, un porcentaje de carburos en su microestructura muy superior a lo que se suele observar en los aceros al carbono. A ello contribuye, en gran parte, el elevado porcentaje de elementos de aleación que rebaja extraordinariamente el contenido en carbono necesario para formar la perlita, sirviendo el exceso de carbono que hay sobre la cantidad precisa para ello, para formar carburos.

El porcentaje de carburos con que quedan estos aceros después de un calentamiento de austenización a elevada temperatura, varía con la temperatura alcanzada en el calentamiento y con la velocidad de enfriamiento. Con velocidades lentas de enfriamiento (recocido) aparecen más carburos que con enfriamientos rápidos (temple).

A esta clase de aceros pertenecen, entre otros, los aceros indeformables, que en su microestructura suelen tener hasta un 25% de carburos, los aceros rápidos, los aceros para trabajos en caliente, etc.

El temple de estos aceros se hace en general a temperatura (950°-1.300°) mucho más elevada que la que corresponde a los aceros ordinarios, con objeto de llegar a conseguir la disolución del mayor porcentaje de carburos posible, compatible con su composición y la utilización posterior del material.

Hay algunos aceros de este grupo que a veces suelen -

ser llamados aceros ledeburíticos. Esto es debido a que en el proceso de solidificación y enfriamiento que se realiza de acuerdo con un diagrama, en cierto modo análogo al clásico diagrama hierro-carbono, se solidifica en algunas zonas un eutéctico que presenta una estructura ledeburítica, análoga a la de las fundiciones. Los carburos correspondientes al eutéctico son muy gruesos no pueden ser afinados por tratamiento térmico, siendo la forja el único método útil que puede emplearse para romperlos. A este grupo pertenecen los aceros rápidos e indeformables de alto porcentaje de cromo que deben ser forjados, laminados y tratados con precauciones muy especiales.

### 3.- Por su composición química.

Los aceros aleados se clasifican mediante dígitos, según normas de la AISI y la SAE, indicando el primer dígito el ó los elementos de aleación, el segundo el % del elemento de aleación y los dos últimos dígitos el contenido del % de carbono; a continuación se indica las especificaciones de algunos de estos aceros en forma representativa.

## DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

En las normas AISI, los números van precedidos de una letra que indica el método de fabricación utilizado en la obtención del acero. Las normas SAE utilizan actualmente el mismo sistema de designación a base de cuatro dígitos que las normas AISI, aunque no utilizan ningún prefijo literal.



## Especificaciones de algunos de los aceros aleados más representativos

AIISI No	% C	% Mn	% Ni	% Cr	% Mo	% V	SAE No	Tipo
1330	0,28 - 0,33	1,60 - 1,90	...	...	...	...	1330	} Aceros al Mn
1340	0,38 - 0,43	1,60 - 1,90	...	...	...	1340		
2317	0,15 - 0,20	0,40 - 0,60	3,25 - 3,75	...	...	...	2315	} Aceros de 3% Ni
2330	0,20 - 0,33	0,60 - 0,80	3,25 - 3,75	...	...	...	2330	
E2512*	0,09 - 0,14	0,45 - 0,60	4,75 - 5,25	...	...	...	...	} Aceros de 5% Ni
2515	0,12 - 0,17	0,40 - 0,60	4,75 - 5,25	...	...	...	2515	
3115	0,13 - 0,18	0,40 - 0,60	1,10 - 1,40	0,55 - 0,75	...	...	3115	} Aceros Cr-Ni
3130	0,28 - 0,33	0,60 - 0,80	1,10 - 1,40	0,55 - 0,75	...	...	3130	
3140	0,38 - 0,43	0,70 - 0,90	1,10 - 1,40	0,55 - 0,75	...	...	3140	
E3310	0,08 - 0,13	0,45 - 0,60	3,65 - 3,75	1,40 - 1,75	...	...	3310	
4023	0,20 - 0,25	0,70 - 0,90	...	...	0,20 - 0,30	...	4023	} Aceros al Mo
4032	0,30 - 0,33	0,70 - 0,90	...	...	0,20 - 0,30	...	4032	
4042	0,40 - 0,45	0,70 - 0,90	...	...	0,20 - 0,30	...	4042	
4118	0,18 - 0,23	0,20 - 0,90	...	0,40 - 0,60	0,08 - 0,15	...	4118	} Aceros Cr-Mo
4130	0,28 - 0,33	0,40 - 0,60	...	0,80 - 1,10	0,15 - 0,25	...	4130	
4140	0,38 - 0,43	0,75 - 1,00	...	0,80 - 1,10	0,15 - 0,25	...	4140	
4150	0,48 - 0,53	0,75 - 1,00	...	0,80 - 1,10	0,15 - 0,25	...	4150	
4320	0,17 - 0,22	0,45 - 0,60	1,65 - 2,00	0,40 - 0,60	0,20 - 0,30	...	4320	} Aceros Cr-Ni-Mo
4340	0,38 - 0,43	0,60 - 0,80	1,65 - 2,00	0,70 - 0,90	0,20 - 0,30	...	4340	
4620	0,17 - 0,22	0,45 - 0,60	1,65 - 2,00	...	0,20 - 0,30	...	4620	} Aceros Ni-Mo
4640	0,38 - 0,43	0,60 - 0,80	1,65 - 2,00	...	0,20 - 0,30	...	4640	
4820	0,18 - 0,23	0,50 - 0,70	3,35 - 3,75	...	0,30 - 0,30	...	4820	
5120	0,17 - 0,22	0,70 - 0,90	...	0,70 - 0,90	...	...	5120	} Aceros al Cr
5130	0,28 - 0,33	0,70 - 0,90	...	0,80 - 1,10	...	...	5130	
5140	0,38 - 0,43	0,70 - 0,90	...	0,70 - 0,90	...	...	5140	
5150	0,48 - 0,53	0,70 - 0,90	...	0,70 - 0,90	...	...	5150	
E52100*	0,95 - 1,10	0,25 - 0,45	...	1,30 - 1,60	...	...	52100	
6120	0,17 - 0,22	0,70 - 0,90	...	0,70 - 0,90	...	0,10	6120	} Aceros Cr-V
6150	0,48 - 0,53	0,70 - 0,90	...	0,80 - 1,10	...	0,15	6150	
8620	0,17 - 0,24	0,60 - 0,95	0,35 - 0,75	0,35 - 0,65	0,15 - 0,25	...	8620	} Aceros Cr-Ni-Mo de baja aleación
8630	0,27 - 0,34	0,60 - 0,95	0,35 - 0,75	0,35 - 0,65	0,15 - 0,25	...	8630	
8640	0,37 - 0,45	0,70 - 1,05	0,35 - 0,75	0,35 - 0,65	0,15 - 0,25	...	8640	
8720	0,17 - 0,24	0,60 - 0,95	0,35 - 0,75	0,35 - 0,65	0,20 - 0,30	...	8720	}
8740	0,37 - 0,45	0,70 - 1,05	0,35 - 0,75	0,35 - 0,65	0,20 - 0,30	...	8740	
E9310*	0,08 - 0,13	0,45 - 0,65	3,00 - 3,50	1,00 - 1,40	0,08 - 0,15	...	9310	
9840	0,38 - 0,43	0,70 - 0,90	0,85 - 1,15	0,70 - 0,90	0,20 - 0,30	...	9840	
9850	0,48 - 0,53	0,67 - 0,90	0,85 - 1,15	0,70 - 0,90	0,20 - 0,30	...	9850	

\* E = Acero obtenido en horno eléctrico básico. Todos los demás se obtienen normalmente en horno Martin Siemens básico

### CAPITULO III

#### ELEMENTOS DE ALEACION

##### 1.- Forma en que se encuentran los elementos de aleación.

Los elementos de aleación que se utilizan para mejorar las propiedades de los aceros se pueden encontrar en la masa metálica en formas muy diversas, según sea la composición o estado de tratamiento. Al señalar la forma en que se presenta cada uno de ellos en los aceros, haré referencia primero a los aceros en estado recocido, por ser el caso más sencillo y que me permitirá analizar, luego otros más complicados.

En los aceros recocidos elementos de aleación se pueden encontrar: a) Disueltos en la ferrita. b) Formando carburos. c) En forma de inclusiones no metálicas, y d) Como elementos simples. A continuación analizaré con más detalle, los diferentes casos que se pueden presentar.

#### UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

a) Elementos aleados que en los aceros recocidos se encuentran disueltos en la ferrita.

De los diferentes elementos de aleación unos tienen -- tendencia a disolverse en la ferrita y otros a formar carburos.- Aunque el comportamiento y la tendencia a combinarse de los di-- versos elementos es diferente de unos casos a otros, cuando los aceros son de muy bajo contenido en carbono todos los elementos se disuelven en la ferrita. Sin embargo, de todos ellos, tienen una gran tendencia a disolverse en la ferrita el níquel, silicio,

aluminio, cobre, cobalto y fósforo, que se caracterizan precisamente por encontrarse siempre disueltos en ella, y no combinarse casi nunca ninguno de esos elementos con el carbono para formar carburos. En cambio, el manganeso, cromo, wolframio, molibdeno, vanadio y titanio tienen preferencia a formar carburos, pero cuando se encuentran en los aceros de muy bajo contenido en carbono se comportan como los del primer grupo y se disuelven en la ferrita.

Disueltos en la ferrita	Tendencia a disolverse en la ferrita o formar carburos	Combinados en forma de carburos	Formando inclusiones no metálicas	En forma de elementos simples
Níquel	●			
Silicio	●		Silicio	
Aluminio	●		Aluminio	
Cobre	●			Cobre
Cobalto	●			
Manganeso	●	→ Manganeso	Manganeso	
Cromo	●	→ Cromo	Cromo	
Tungsteno	●	→ Tungsteno		
Molibdeno	●	→ Molibdeno		
Vanadio	●	→ Vanadio	Vanadio	
Titanio	●	→ Titanio	Titanio	
Fósforo	●			
Azufre			Azufre	
Plomo				Plomo

Los elementos señalados en la Tabla a partir del manganeso, tienen una tendencia cada vez más fuerte a formar carburos. El tamaño de los círculos negros indica la tendencia relativa que tiene cada uno de ellos a comportarse de una u otra forma.

La repartición de un elemento entre la ferrita y los carburos depende, también, de las proporciones relativas de los diferentes elementos. Así, por ejemplo, una pequeña cantidad de wolframio en un acero de alto contenido en carbono pasará comple

tamente al estado de carburo, mientras que si hay una cantidad grande de wolframio, parte pasará al estado de carburo y parte se disolverá en la ferrita.

Un elemento como el titanio que tiene una tendencia -- muy fuerte a la formación de carburos, se combinará con todo el carbono que haya en el acero y nada más que el exceso (en el caso de que lo haya) se disolverá en la ferrita.

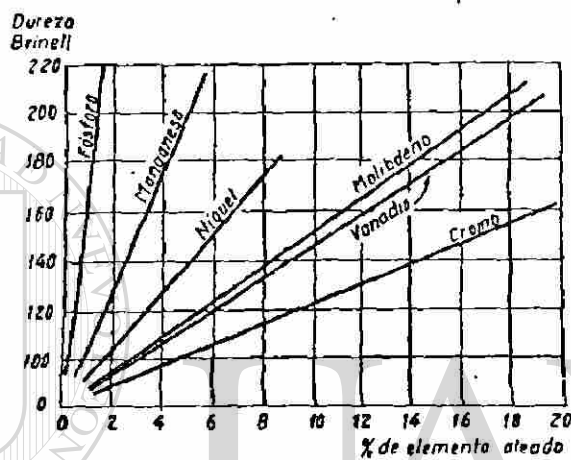


Fig. 1

Todos los elementos aleados al disolverse en la ferrita, aumentan su dureza y resistencia, como se indica en la figura 1, siendo el fósforo, manganeso y níquel los que en ese sentido ejercen una influencia más destacada.

## DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

b) Elementos que en los aceros recocidos se encuentran formando carburos.

Tienen tendencia a formar carburos, como ya se explicó antes, el cromo, manganeso, molibdeno, vanadio, wolframio, y titanio. Estos elementos se caracterizan, por lo tanto, porque en los aceros, en presencia de una cantidad suficiente de -- carbono, tienden a formar carburos y, en cambio, cuando el acero es de muy bajo contenido en carbono, son también, como los --

del grupo anterior, solubles en la ferrita. Los carburos formados por estos elementos no son siempre carburos simples; con bastante frecuencia se presentan asociados con el carburo de hierro y, a veces, se forman carburos complejos de dos o más elementos. La naturaleza de estos compuestos depende del porcentaje de carbono y del contenido en elementos de aleación, siendo diferente la aptitud, que en este sentido tiene cada uno de ellos. Así, por ejemplo, mientras el vanadio, titanio y molibdeno tienen una tendencia muy fuerte a formar carburos, el wolframio y el cromo la tienen bastante moderada, y el manganeso es de todos esos elementos aleados el que tiene una tendencia más débil.

Los carburos que forman los diferentes elementos de aleación son duros y frágiles. Algunos, como los de cromo y vanadio, son más duros y resistentes al desgaste que los demás. Otros, como los de molibdeno, wolframio y vanadio, se caracterizan por tener gran estabilidad a elevada temperatura.

La solubilidad de los carburos aleados en la austenita es bastante parecida a la del carburo de hierro, ya que tienden a disolverse en el calentamiento y precipitarse en el enfriamiento. Estos carburos difieren, sin embargo, del carburo de hierro en el grado de solubilidad y en los tiempos y temperaturas necesarios para que se realice su disolución en la austenita.

En algunos aceros de alto contenido de carbono y alta aleación, la solución de los carburos es incompleta a las temperaturas ordinarias de tratamiento (760°-900°). Cuando se calie

tan para el temple los aceros rápidos, a  $1.250^{\circ}$ - $1.300^{\circ}$ , quedan todavía, por lo menos, una tercera parte de los carburos sin disolver. La existencia de un exceso de carburos sin disolver en cualquier microestructura, contribuye directamente a mejorar su dureza, su resistencia al desgaste y sus cualidades de corte. Sin embargo, cuando en el calentamiento para el temple, quedan en la masa metálica excesiva cantidad de carburos sin disolver, reducen la templabilidad de la matriz o la penetración de la dureza en el temple, ya que al no disolverse esos carburos en la austenita, el contenido en el carbono y en elementos de aleación de austenita, y luego el de la martensita, será inferior a los porcentajes medios que de esos elementos tiene el acero. La templabilidad también puede quedar reducida, en algunos casos, porque esos carburos actúan de núcleos de cristalización, disminuyendo el tamaño de grano y con ello se reduce en el temple la penetración de la dureza hacia el interior. Un ejemplo típico de este fenómeno se da en los aceros de 1% de carbono y 0,20% de vanadio, que tienen menos penetración de temple que los aceros ordinarios al carbono de 1% de carbono.

Una de las ventajas del empleo de elementos que forman carburos, se manifiesta en el calentamiento o revenido de los aceros templados, cuyo ablandamiento no comienza a realizarse más que a temperatura bastante elevada, generalmente de  $500^{\circ}$  a  $600^{\circ}$ , debido a que la presencia de elementos de aleación en la martensita dificulta y retrasa la precipitación y coalescencia de los carburos, retardando la transformación de la martensita en otros constituyentes más estables. El wolframio y molibdeno son los que tienen más influencia en este sentido. El cromo ejerce

de sólo una ligera influencia y el manganeso ninguna. Por ello, generalmente, son necesarias más altas temperaturas de revenido para ablandar los aceros aleados, que los aceros al carbono.

De una forma general, puede decirse que los elementos aleados formadores de carburos y señalados en este segundo grupo, son elementos endurecedores, siendo su influencia mayor en los aceros de contenido medio alto en carbono, que en los bajos. La dureza, resistencia al desgaste y otras características de los aceros aleados y ricos en carburos, depende, en gran parte, de la cantidad, tamaño y distribución de estas partículas duras, y estos factores dependen de la composición, método de fabricación y clases de tratamientos térmicos empleados en cada caso.

c) Elementos aleados que se presentan en forma de inclusiones no metálicas.

Algunos elementos aleados se presentan con frecuencia en los aceros en forma de inclusiones no metálicas embebidas en la masa del material. El silicio, manganeso y aluminio, que son elementos que se añaden en los procesos de fabricación para desoxidar los aceros, aparecen frecuentemente en forma de óxidos o de silicatos complejos. El manganeso suele presentarse también en forma de sulfuro de manganeso. La adición de manganeso se hace principalmente durante los procesos de fabricación para evitar que el azufre, que contiene el acero, aparezca en forma de sulfuro de hierro, que es muy perjudicial. Si el porcentaje de manganeso es el adecuado (por lo menos unas cinco veces mayor que el contenido en azufre), el azufre se presenta en forma

de sulfuro de manganeso y su efecto no es tan pernicioso.

El silicio suele presentarse en forma de silicatos que son más peligrosos que el sulfuro de manganeso, y su presencia en los aceros rebaja sus propiedades y calidad.

El aluminio suele aparecer en forma de alúmina.

d) Elementos aleados que en los aceros recocidos se encuentran en estado libre sin combinar.

Este caso suele dar con poca frecuencia y el plomo, es casi el único elemento que aparece en esa forma, en los aceros al plomo de fácil mecanización. En algunos casos excepcionales de aceros con elevado contenido en cobre, utilizados para grandes construcciones metálicas, que deben resistir a los agentes atmosféricos, también suele presentarse el cobre libre.

Ambos elementos, plomo y cobre suelen encontrarse en un grado de dispersión tan elevado que son muy difíciles de distinguir en el examen microscópico.

## 2.- Influencia de los elementos de aleación en el diagrama hierro-carbono.

Cuando un acero, además de hierro y de carbono, contiene también cantidades relativamente apreciables de un tercer elemento, el diagrama hierro-carbono clásico queda modificado y no nos sirve para representar las condiciones teóricas de equilibrio de la aleación. Como son un poco complicadas las repre-



representaciones de los diagramas de equilibrios ternarios, en los que se señalan las temperaturas críticas correspondientes a diferentes tipos de aceros constituidos por tres elementos, se suelen construir diagramas binarios, en los que para el tercer elemento se toma un valor constante. Se utilizan diagramas (figs. 2 y 3) análogos al diagrama hierro-carbono, que corresponden en cada caso a un determinado contenido en elemento de aleación fijo (1,3 ó 5% de níquel, por ejemplo), y en ellos se puede conocer fácilmente la temperatura eutectoide, las temperaturas críticas y, como consecuencia, las temperaturas de temple y de recocido de los aceros que, con diferentes contenidos de níquel (1,3 ó 5%) por ejemplo, tienen 0,2, 0,3 y 0,4% de carbono, etc.

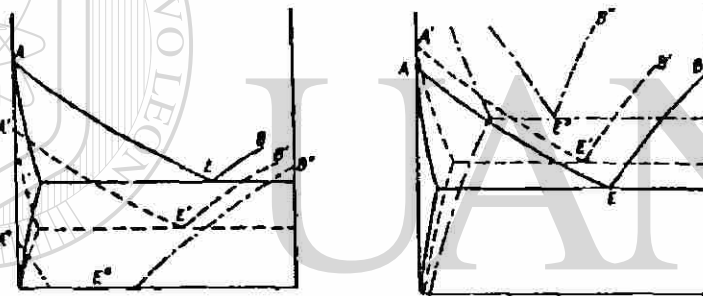


Fig. 2

Fig. 3

A continuación explicaré separadamente la acción que ejercen los elementos aleados, señalando: a) La situación de los puntos críticos. b) El contenido en carbono del acero eutectoide. c) La situación de los campos correspondientes a los hierros alfa gamma. d) La tendencia grafitizante de ciertos elementos, y e) La influencia que ciertos elementos tienen sobre el tamaño de grano.

a) Efecto sobre los puntos críticos.

La adición de elementos de aleación cambia la situación de los puntos críticos  $A_1$  y  $A_3$  en los aceros. El níquel, manganeso y cobre, que, como mencionaré más adelante, son más solubles en el hierro gamma que en el alfa, favorecen la estabilización de la fase gamma y tienden a bajar los puntos críticos de transformación (fig. 2), es decir, las temperaturas de cambio de una fase a otra. En cambio, molibdeno, aluminio, vanadio, wolframio y silicio, que son más solubles en el hierro alfa que en el gamma, tienden a elevar esas temperaturas (fig. 3). El efecto del cromo depende del contenido en carbono y del porcentaje de cromo empleado. Dentro de ciertos límites (para contenidos en cromo inferiores a 12%) se puede decir que en los aceros altos en carbono, el cromo tiende a elevar los puntos críticos y en los bajos tiende a bajarlos.

Aquí conviene explicar para evitar confusiones, algunos detalles sobre los puntos críticos que se suelen señalar al estudiar los aceros. Al hablar de los puntos críticos, generalmente me referiré, principalmente, a los siguientes: 1º A los puntos  $A_1$  y  $A_3$  correspondientes a calentamientos e enfriamientos

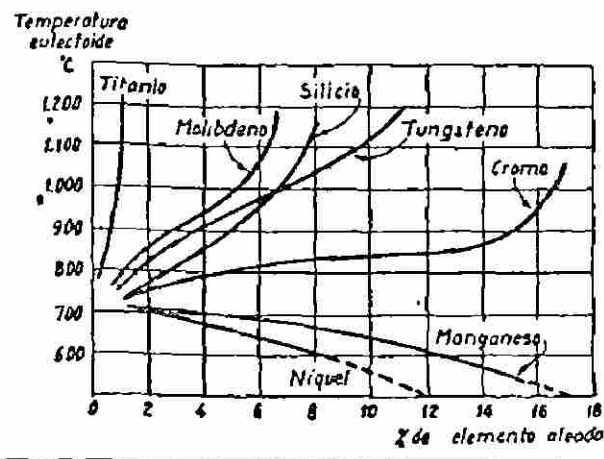


Fig. 4

infinitamente lentos y, por lo tanto, correspondientes a los diagramas teóricos de equilibrio; y 2º A los puntos críticos  $Ac_1$  y  $Ac_3$  que aparecen en los calentamientos y a los puntos  $Ar_1$  y  $Ar_3$  que se presentan en los enfriamientos correspondientes a procesos realizados con velocidades relativamente lentas (del orden de -- 10ª a 50ª hora). De este segundo grupo los puntos Ar que corresponden al enfriamiento son, en general, más interesantes que los puntos Ac, por presentarse en esos puntos (Ar) entre unos casos y otros diferencias más interesantes y dignas de tenerse en cuenta que en los calentamientos.

Mientras la situación de los puntos Ac está bastante bien definida en cada tipo de acero y no experimentan variaciones importantes al modificarse la velocidad del calentamiento que, por otra parte, varía poco de unos casos a otros, en cambio en un mismo acero la situación de los puntos Ar, correspondientes al enfriamiento lento depende, fundamentalmente, de la velocidad de enfriamiento, por lo que los ensayos conviene hacerlos en condiciones muy fijas y con velocidades de enfriamiento definidas. Además, de unos aceros a otros hay diferencias muy importantes, debidas a la presencia de elementos aleados que modifican notablemente la situación de estos puntos Ar, y 3º Finalmente se pueden citar los puntos  $Ar'$  y  $Ar''$  que corresponden a enfriamientos relativamente rápidos y en los que la transformación de la austenita se realiza ya a temperatura inferior a 600°.

A veces, también, se presentan dudas y se suele confundir la variación de las temperaturas críticas de equilibrio, por efecto de la influencia de los elementos de aleación, con el des

censo de las temperaturas de transformación con diferentes clases de enfriamiento (aire, aceite, etc.), debido al aumento de la -- templabilidad, como consecuencia del efecto de los mismos elemen-- tos aleados que es un fenómeno relacionado con el temple. Es in-- teresante observar y estudiar la figura 12 (Diagrama de equilibri-- o de los aceros al níquel) y la figura 5 (Diagrama de equilibri-- o de los aceros al níquel con enfriamiento al aire). Si el -- enfriamiento se hiciese en aceite o en agua los puntos Ar apare-- cerían todavía a temperatura más baja que en la figura 5. Se --

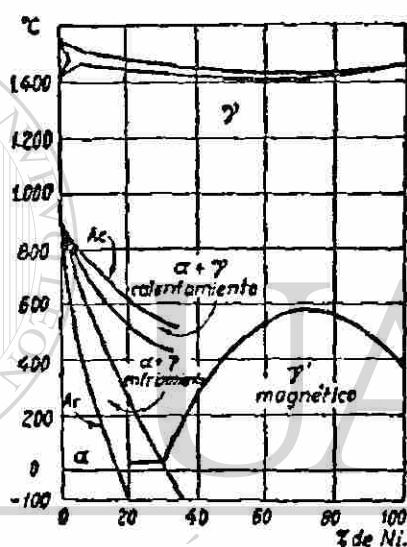


Fig. 5

puede observar en el diagrama de la figura 5, que para una compo-- sición fija y determinada del acero, en la que el contenido de -- todos los elementos menos uno son constantes, al aumentar el por-- centaje de un elemento de aleación (níquel) el punto de transfor-- mación Ar (680°) baja hasta 500° ó 400°, por ejemplo, y se trans-- forma ya en los puntos Ar' o Ar'''. De unos aceros a otros hay -- diferencias en la situación de los puntos de transformación Ar -- correspondientes a una velocidad de enfriamiento determinada de-- 50°, 100° y 200°/hora, según sea el porcentaje de elementos de -- aleación, y en el caso extremo de los aceros de muy alta aleación (austeníticos), no llega a presentarse la transformación de la --

austenita en otros constituyentes. Hay que tener por lo tanto - en cuenta, que en los diagramas teóricos de equilibrio, se consideran a enfriamientos infinitamente lentos, en los que no tienen influencia los fenómenos relativos al temple, y posteriormente haré referencia a diagramas con enfriamientos más o menos lentos y de velocidad variable según la clase de tratamiento.

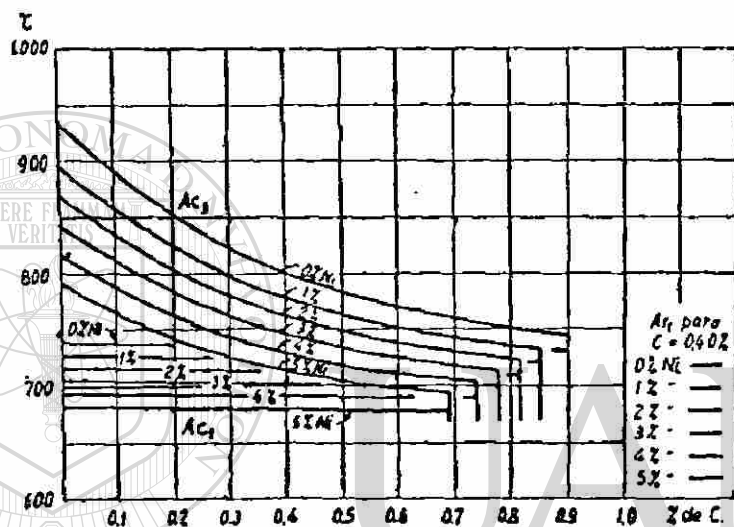


Fig. 6

La adición de 0,01% del elemento aleado actúa en la forma en que se señala en la Tabla siguiente.

Descenso del punto $Ac_3$	Elevación del punto $Ac_3$
Carbono (Valor medio para 0 a 0,9% de C) . . . . . $2,1^\circ$	Fósforo . . . . . $8^\circ$
Manganeso . . . . . $0,5^\circ$	Molibdeno . . . . . $1,3^\circ$
Níquel . . . . . $0,4^\circ$	Vanadio . . . . . $0,6^\circ$
	Silicio . . . . . $0,5^\circ$
	Wolframio . . . . . $0,5^\circ$

En los enfriamientos lentos, casos interesantes que no serán tratados en este tema algunos elementos tales como el níquel y el manganeso tienen una gran tendencia a bajar el punto  $Ar_1$ , sobre todo en los aceros alto en carbono. El cromo, como

ya se ha dicho antes, tiende a elevar la temperatura Ar en los aceros de alto contenido en carbono y a bajarla en los de bajo y medio carbono. Cuando el cromo se encuentra aleado con el níquel tiende a oponerse al efecto depresivo del níquel. Ese efecto contrario de unos y otros elementos, se produce en los aceros con varios elementos aleados.

El descenso de los puntos Ar como consecuencia de la presencia de níquel, se puede ver en las figuras 5 y 6. En la figura 6 se señalan los puntos críticos Ac. correspondientes a calentamiento a velocidad moderada, y Ar enfriamiento al aire, y -

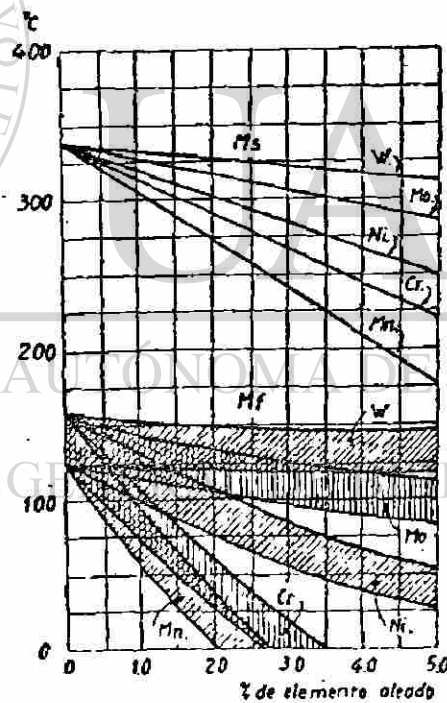


Fig. 7

en cambio, los de la figura 12 corresponden al equilibrio teórico, es decir, a calentamientos o enfriamientos infinitamente lentos. Con los enfriamientos que normalmente se suelen usar en la industria, los aceros al níquel de bajo porcentaje de carbono son austeníticos, cuando el porcentaje de níquel es superior al 20% (los aceros al manganeso son austeníticos cuando ese elemento

es superior al 10% aproximadamente). Las figuras 2 y 3 sirven para tener una idea aproximada de las transformaciones de microestructura que se producen en los calentamientos y enfriamientos de los aceros.

En la figura 6 se señalan los puntos críticos  $Ac_1$ ,  $Ac_3$  y  $Ar_1$ , correspondientes a los aceros de 1 a 5% de níquel y 0 a 0,9% de carbono.

Los elementos de aleación también modifican la situación de los puntos  $M_s$  de comienzo de formación de martensita, y  $M_f$  de fin de formación. Todos los elementos excepto el cobalto hacen descender esas temperaturas. En la figura 7 se ve que el manganeso es el que ejerce una acción más intensa, siguiendo luego el cromo, níquel, molibdeno y wolframio.

De todos los elementos que contienen los aceros, el carbono es el que más hace descender el punto  $M_s$  como se ve al

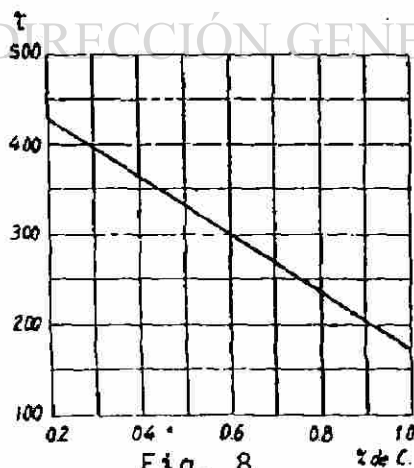


Fig. 8

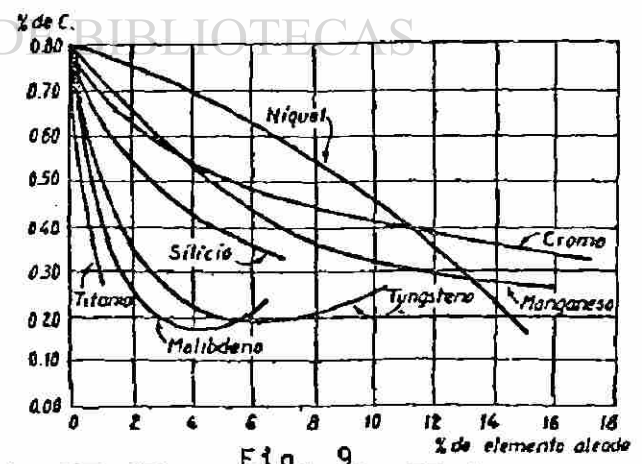


Fig. 9

comparar las curvas de la figura 7 con la de la figura 8.

b) Efecto de los elementos especiales sobre el contenido

do en carbono del acero eutectoide.

La presencia de los elementos aleados hace descender el contenido en carbono del acero eutectoide. Esto quiere decir, que un acero perlítico aleado tiene un porcentaje de carbono inferior al que corresponde a los aceros al carbono. El titanio, molibdeno y wolframio son los elementos que ejercen más influencia en ese sentido, siendo en cambio menor la influencia del manganeso, cromo y níquel. En la figura 9, se señala para los aceros aleados con níquel, cromo, molibdeno, etc., y para diversos porcentajes de elemento aleado variables de 0 a 18%, el contenido en carbono que en cada caso corresponde a la composición eutectoide.

c) Efecto de los elementos de aleación en los campos alfa y gamma y tendencias a estabilizar la ferrita o a estabilizar la austenita.

La influencia de los elementos aleados en el diagrama hierro-carbono se manifiesta también por la tendencia de ciertos aceros a formar estructuras ferríticas o estructuras austeníticas y a modificar la amplitud de las zonas ferrítica y austenítica. En la figura 14 se señalan los diagramas correspondientes a elementos que, como el cromo, silicio, molibdeno, aluminio y vanadio, tienden a favorecer la formación de estructuras ferríticas, y en las figuras 12 y 13 los diagramas correspondientes al níquel y manganeso que tienden a estabilizar las estructuras austeníticas. En la figura 14 se ve como la influencia de los diferentes elemen



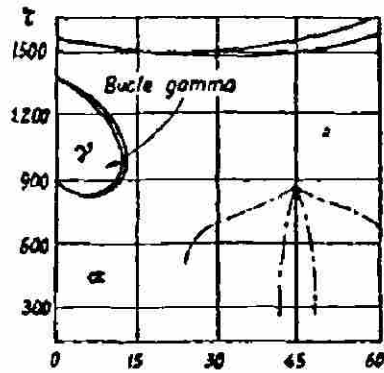


Fig. 10 % Cromo

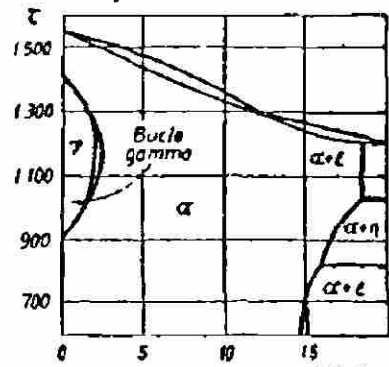


Fig. 11 % Silicio

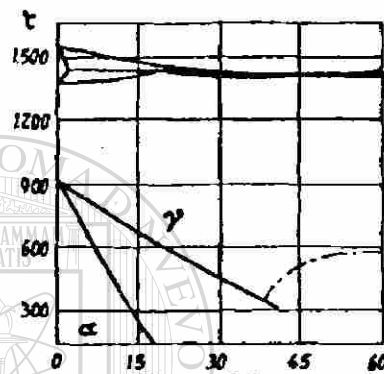


Fig. 12 % Niquel

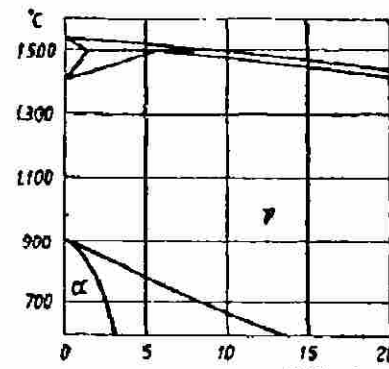


Fig. 13 % Manganeso

tos estabilizadores de la ferrita es diferente, pues mientras -- que para obtener una estructura totalmente ferrítica hace falta -- 1,20% de aluminio o de vanadio aproximadamente, son necesarios -- 2,60% de silicio, 3,10% de molibdeno y 12,70% de cromo. En la -- figura 15 se ve cómo el campo austenítico del clásico diagrama -- hierro-carbono varía al modificarse en los aceros el porcentaje -- de elemento aleado.

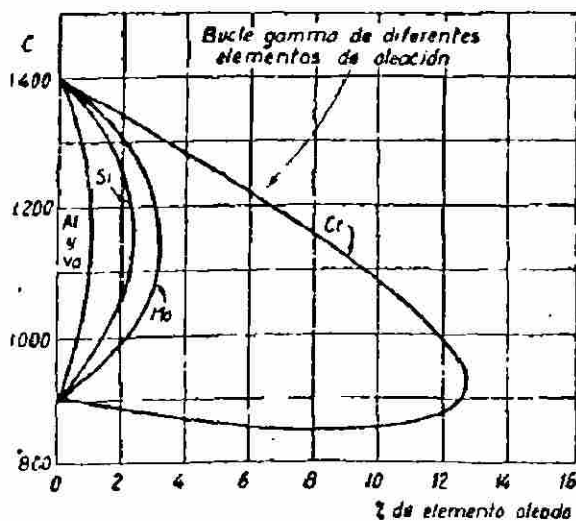


Fig. 14

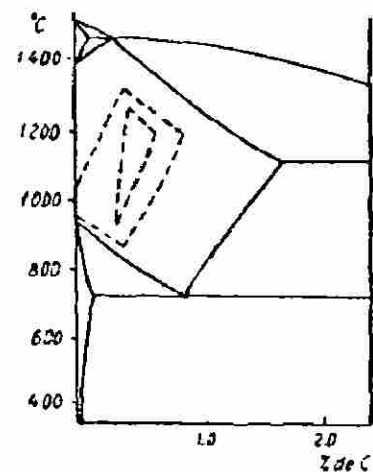


Fig. 15

En la figura 16 se ve cómo al aumentar el contenido en manganeso aumenta el campo austenítico y, en cambio, al aumentar el cromo, molibdeno y silicio disminuye el campo austenítico. En la figura 18 se puede observar cómo los aceros extradulces de más de 13% de cromo, son siempre ferríticos y, en cambio, con menos de 13% se ve que hay una zona austenítica de 900° a 1.400°.- En la figura 18 se señala también cómo los aceros de más de 13% de cromo y menos 0,12% de carbono, de 22% de Cr y menos de 0,25% de C, etc., son ferríticos. Finalmente, en la figura 13 se observa cómo el manganeso aumenta el campo austenítico y, en la figura 11 cómo, en cambio, el silicio tiende a disminuirlo.

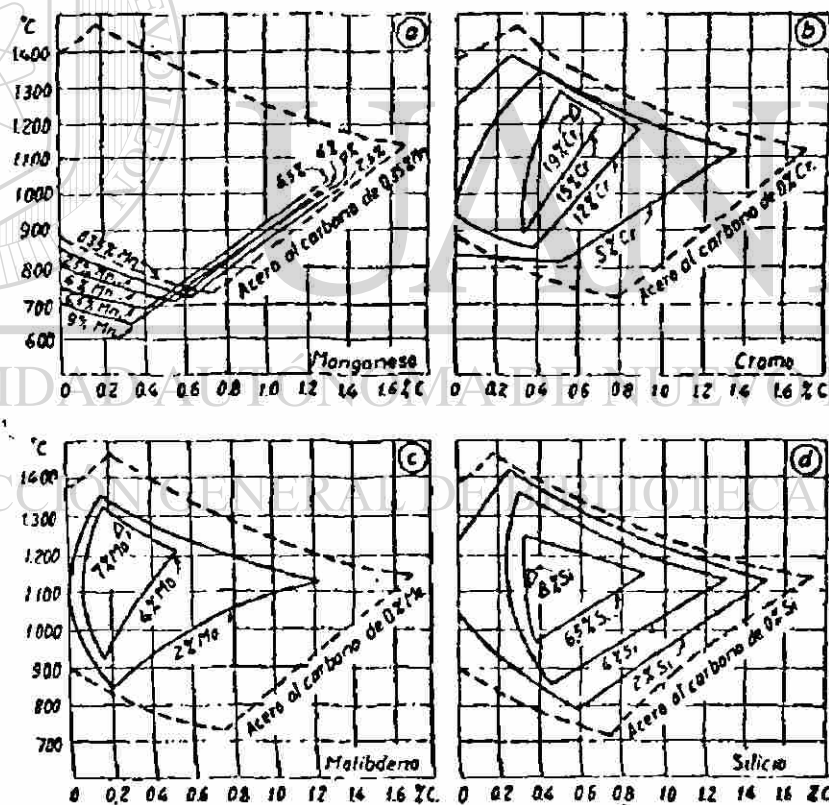


Fig. 16®

En los cuadros de la figura 19 se puede ver el efecto combinado del cromo y níquel sobre la amplitud y situación de los campos ferríticos y austeníticos.

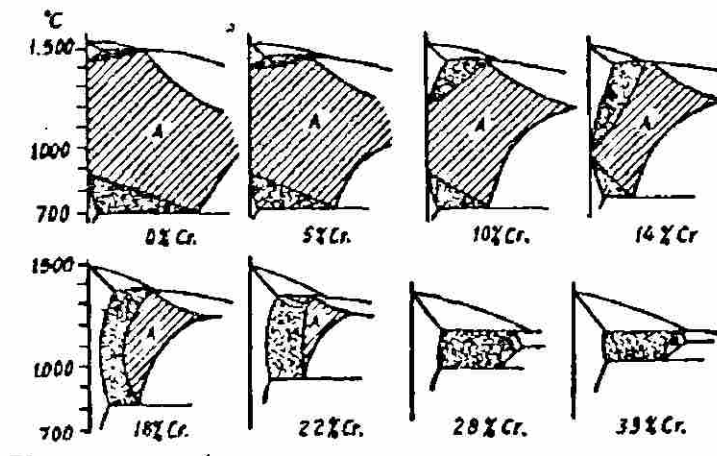


Fig. 17

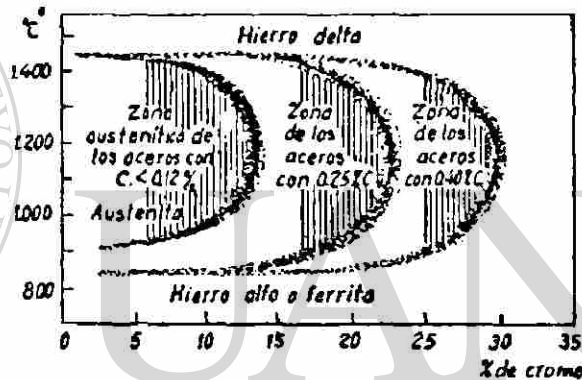


Fig. 18

d) Tendencia grafitizante de algunos elementos.

## DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Aunque para el caso de los aceros este problema no tiene prácticamente importancia, mencionaré la influencia destacada del silicio que, con aleaciones hierro-carbono de elevado contenido en carbono, cuando se encuentra en porcentajes variables de 1,50 a 3,50% da lugar a la formación de grafito. El aluminio, el níquel y el cobre también favorecen la grafitización, mientras el cromo, molibdeno, manganeso y azufre tienen el efecto contrario y muestran tendencia a favorecer la formación de carburos.

e) Influencia sobre el tamaño de grano.

Hay algunos elementos, como el aluminio, el vanadio y el titanio, que tienden a disminuir el tamaño de grano de los aceros. Se puede decir de una forma general, que si se tienen tres aceros idénticos entre sí, con la sola excepción de que a dos de ellos se les ha añadido a uno aluminio y a otro titanio, estos dos últimos aceros, tendrán menor tamaño de grano que el acero que no contiene esos elementos.

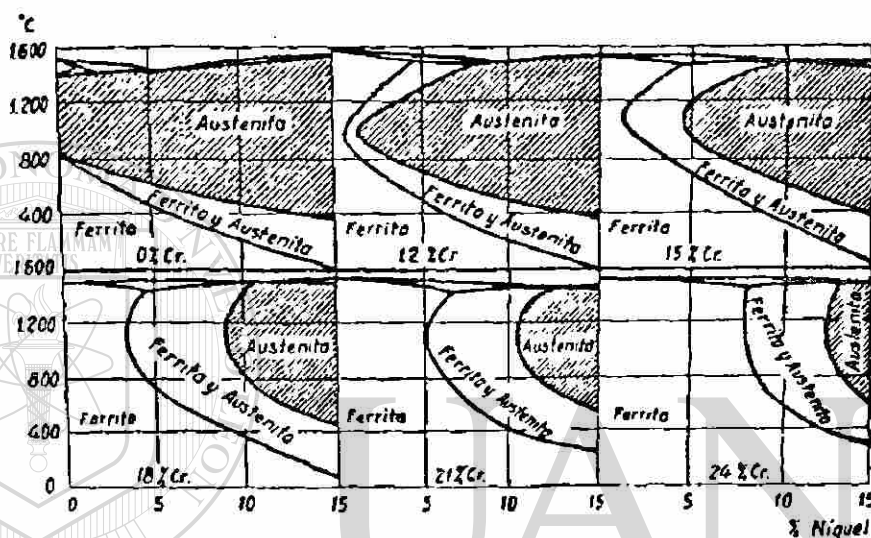


Fig. 19

Los aceros con aluminio tienen menor tamaño de grano, por la formación en el baño de acero de pequeñísimas partículas de alúmina, que actúan de centros de cristalización y reducen el tamaño de los cristales.

El vanadio se emplea con frecuencia en los aceros de herramientas para afinar el grano e impedir su crecimiento, cuando el temple se realiza a temperaturas incorrectas, demasiado elevadas hasta de 850° a 875°. La presencia de vanadio evita el crecimiento del grano, porque los carburos de vanadio que existen en esos aceros no llegan a disolverse en la austenita mas que cuando se calienta el acero a temperaturas superiores a 900°, y a

temperaturas inferiores esos carburos que quedan dispersos en la masa impiden el crecimiento de los cristales. En cambio, en los aceros ordinarios el carburo de hierro se disuelve a temperaturas más bajas que las anteriormente citadas y como no puede actuar como núcleo de cristalización como en el caso del vanadio, puede llegar a producirse con relativa facilidad en el calentamiento de los aceros al carbono de herramientas, el sobrecalentamiento que en los temple de las herramientas es muy peligroso.

Clase de acero	Velocidad crítica de temple aprox.
Acero al carbono de C = 0,30% . . . . .	400°/segundo
Acero al carbono de C = 0,90% . . . . .	200°/segundo.
Acero cromo-níquel-molibdeno de C=0,32%.	de 0,5 a 5°/segundo.
Acero indeformable de 12% de cromo . . .	inferior a 1°/segundo.

### 3.- Constituyentes microscópicos de los aceros.

A continuación se indica las principales características y propiedades de los diversos constituyentes que forman las microestructuras de los aceros.

#### Ferrita.

La ferrita es hierro alfa, o sea hierro casi puro, que puede contener en solución pequeñas cantidades de silicio, fósforo y otras impurezas. En los aceros aleados, suelen formar solución sólida con la ferrita o hierro alfa, el níquel, manganeso, - cobre, silicio, aluminio, etc.

Cristaliza, como se ha explicado anteriormente en el sistema cúbico, de cuerpo centrado, estando el cubo elemental formado por 8 átomos, situados en los vértices y uno en el centro. Tiene aproximadamente una resistencia de  $28 \text{ Kg/mm}^2$ , 35% de alargamiento y una dureza de 90 unidades Brinell. Es el más blando de todos los constituyentes del acero, muy dúctil y maleable. Magnética y de pequeña fuerza coercitiva.

En los aceros puede aparecer bajo formas muy diversas:

1° Como elemento proeutectoide que acompaña a la perlita. En este caso se presenta: 1° En forma de cristales mezclados con los de perlita en los aceros de menos de 0,55% de carbono aproximadamente. 2° Formando una red o malla que limita los granos de perlita en los aceros de 0,55 a 0,85% de carbono, aproximadamente y 3° En forma de agujas o bandas aciculares orientadas en la dirección de los planos cristalográficos de la austenita. Esta estructura es típica de los aceros en bruto decolada, en los que parte de la ferrita proeutectoide se precipita en forma de agujas dirigidas hacia el interior de los granos, en lugar de depositarse en la envolvente reticular o formar cristales independientes.

A este tipo de cristalización se denomina estructura de Widmanstätten.

2° También aparece como elemento eutectoide de la perlita, formando láminas paralelas, separadas por otras láminas de cementita.

3º En la estructura globular, propia de los aceros -  
 1 carbono de herramientas (de 0,9 a 1,4%) recocidos a tempera-  
 turas próximas a  $721^{\circ}(A_{321})$ , aparece formando la matriz que ro-  
 dea a los glóbulos de cementita.

4º En los aceros hipoeutectoide templados, puede tam-  
 bién aparecer mezclada con la martensita o con los demás elemen-  
 tos de transición formando zonas blancas irregulares o agujas -  
 finas, cuando las temperaturas de calentamiento han sido bajas-  
 que la crítica ( $A_{c3}$ ), el tiempo de calentamiento insuficiente o  
 ha habido interrupciones en el enfriamiento.

#### Cementita.

La cementita es carburo de hierro,  $Fe_3C$ , contiene - -  
 6,67% de carbono y 93,33% de hierro. Es el constituyente más -  
 duro y frágil de los aceros al carbono, su dureza es superior a  
 68 Rockwell-C y cristaliza formando un paralelepípedo ortorróm-  
 bico de gran tamaño ( $4,5 \times 5 \times 6,7 \text{ \AA}$ ).

Aunque con un poco de experiencia se distingue de la-  
 ferrita, en caso de duda, como ambas, ferrita y cementita, que-  
 dan blancas después del ataque con ácidos, se pueden diferenciar  
 una de otra atacando el acero con picrato sódico en caliente --  
 (baño maría) que colorea de oscuro a la cementita dejando blan-  
 ca a la ferrita. La perlita es coloreada ligeramente.

Es magnética a la temperatura ordinaria, pero pierde -  
 su magnetismo a  $218^{\circ}$ .

Examinando los aceros con el microscopio puede aparecer:

1° Como cementita proeutectoide en los aceros con más de 0,90% de C, 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 en las estructuras en bruto de colada.

2° Formando parte de la perlita, y en ese caso se le llama cementita perlítica o eutectoide, y toma la forma de láminas paralelas separadas por otras de ferrita.

3° Como cementita globular se presenta en forma de pequeños glóbulos o granos redondos dispersos en una matriz de ferrita cuando los aceros de 0,9 a 1,4% de carbono han sufrido un recocido a temperaturas próximas a 721°.

4° En los aceros hipereutectoides templados, cuando la temperatura alcanzada ha sido superior a  $Ac_{321}$ , pero inferior a  $Ac_{cm}$  o cuando el tiempo de calentamiento no ha sido suficiente aparece la cementita rodeada de martensita o de otros constituyentes de transición.

5° Como cementita terciaria, de forma alargada vermicular (forma de gusano) en las uniones de los granos de los aceros de más alto contenido en carbono la cementita terciaria con frecuencia se confunde con la eutectoide.



### Perlita.

Es un constituyente eutectoide formado por capas alternadas de hierro alfa y carburo de hierro  $\text{CFe}_3$ , o lo que es lo mismo, de ferrita y cementita. Es de composición química constante y definida y contiene aproximadamente seis partes de hierro y una de carburo, que corresponden a 13,5% de  $\text{CFe}_3$  y 86,5% de Fe y a 0,9% de C y 99,1% de Fe. Tiene una resistencia de  $80 \text{ Km/mm}^2$  y un alargamiento de 15% aproximadamente.

La perlita aparece en general en el enfriamiento lento de la austenita o por transformación isotérmica de la austenita en la zona de los  $650^\circ$  a  $725^\circ$ .

La ferrita y cementita que componen la perlita aparecen formando láminas paralelas y alternadas que tienen reflejos nacarados, por lo que a esta fase se le dió el nombre de constituyente perlítico. Según la velocidad de enfriamiento, esas laminillas aparecen más o menos separadas, y cuando el enfriamiento ha sido bastante rápido, las láminas se acercan mucho, de forma que en el microscopio, aun con grandes aumentos, no se pueden distinguir.

La distancia interlaminar de la perlita sirve para clasificarla en: perlita gruesa con una separación entre las láminas de unas 400uu (1) y una dureza de 200 Brinell, que se obtiene por enfriamiento muy lento dentro del horno; la perlita normal tiene 350uu y 220 Brinell de dureza y la perlita fina, que se obtiene cuando se enfría dentro del horno bastante rápidamente o cuando se deja enfriar el acero al aire, tiene 250uu

y 300 Brinell de dureza. Para observar con claridad las laminillas de la perlita gruesa, suele ser necesario emplear unos 500 aumentos

#### Austenita.

Es una solución sólida de carbono o carburo de hierro en hierro gamma. Puede contener desde 0 a 1,7% de carbono y es, por lo tanto, un constituyente de composición variable. Todos los aceros se encuentran formados por cristales de austenita -- cuando se calientan a temperatura superior a las críticas ( $Ac_3$  - ó  $Ac_{cm}$ ). Aunque generalmente es un constituyente inestable, se puede obtener esa estructura a la temperatura ambiente por enfriamiento rápido de aceros de alto contenido en carbono o de muy alta aleación.

En algunos aceros de alta aleación, como los cromo-níqueles inoxidables 18-8, 24-12 y los aceros altos en manganeso ( $Mn = 12\%$ ), aparece la austenita a la temperatura ambiente por simple enfriamiento al aire.

Templando perfiles muy delgados de aceros de elevado contenido en carbono, desde alta temperatura en agua muy fría, aparecen grandes cristales blancos de austenita mezclados con agujas en zigzag de martensita.

El nombre de austenita fué dado en memoria del metalurgista inglés Robert Austen.

En los aceros austeníticos de alta aleación se presen

ta formando cristales poliédricos parecidos a los de la ferrita, pero se diferencia de éstos por ser sus contornos más rectilíneos y los ángulos vivos.

Su resistencia es de 88 a 105 Kg/mm<sup>2</sup> aproximadamente, su dureza de 300 Brinell y su alargamiento de 30 a 60%. Es poco magnética, blanda, muy dúctil y tenaz. Tiene gran resistencia al desgaste, siendo el constituyente más denso de los aceros.

A la temperatura ordinaria, es muy raro encontrarla en la microestructura de las piezas o herramientas fabricadas con aceros de baja aleación. Aparece, en cambio, más frecuentemente aunque en cantidades muy pequeñas y casi siempre mezclada con la martensita en los aceros muy aleados, enfriados rápidamente desde alta temperatura, siendo, como es natural, el constituyente fundamental de los aceros cromo-níqueles austeníticos (18-8, 25-20, 20-12, etc.) y de los aceros con 12% de manganeso.

#### Martensita.

Es el constituyente típico de los aceros templados. Se admite que está formado por una solución sólida sobresaturada de carbono o carburo de hierro en hierro alfa, y se obtiene por enfriamiento rápido de los aceros desde alta temperatura. Su contenido en carbono suele variar generalmente desde pequeñas trazas hasta 1% de C y algunas veces, en los aceros hipereutectoides, aún suele ser más elevado.

Sus propiedades físicas varían con su composición, aumentando su dureza, resistencia y fragilidad con el contenido -

en carbono, hasta un máximo para  $C = 0,90\%$  aproximadamente. Después de los carburos y de la cementita, es el constituyente más duro de los aceros. Tiene una resistencia de 170 a 250  $\text{Kg/mm}^2$ , - una dureza de 50 a 68 Rockwell-C y alargamiento de 2,5 a 0,5%. Es magnética.

El nombre de martensita fué dado por Osmond en honor de Martens, notable metalurgista alemán.

Presenta un aspecto marcadamente acicular, formando agujas en zigzag, con ángulos de  $60^\circ$ .

Cuando aparecen las agujas de martensita sobre un fondo blanco de austenita, la observación con grandes aumentos es bastante clara. Esta estructura se suele obtener en los aceros de alto contenido en carbono y alta aleación, templados desde elevada temperatura, en los que no se ha conseguido la completa transformación de la austenita en martensita, quedando en algunas ocasiones hasta 30% de austenita sin transformar. En cambio, cuando la transformación es completa, al no existir el fondo blanco de austenita, la observación es más difícil. Cuando el temple se hace a la temperatura correcta, en general se obtienen estructuras de martensita muy fina, de aspecto difuso, que suelen exigir a 1000 ó más aumentos para su interpretación.

La martensita cristaliza en el sistema tetragonal, estando formada su redícula por un paralelepípedo que difiere muy poco del cubo de cuerpo centrado del hierro alfa. Parece que en la martensita son los átomos de carbono los causantes de la defor

maación de la redícula cúbica del hierro alfa, que se transforma en tetragonal, teniendo el paralelepípedo elemental dos lados -- iguales, y el tercero, que es un poco mayor, guarda con los otros dos una relación que varía desde 1,06 a 1 cuando el contenido en carbono disminuye aproximadamente desde 1% hasta 0.

Por calentamiento a baja temperatura (50°-250°) la redícula tetragonal inestable de la martensita se transforma en redícula cúbica idéntica a la del hierro alfa, precipitándose el carbono en forma de pequeñísimas partículas submicroscópicas. Para diferenciar ambos tipos de martensita, se llama martensita-alfa a la de la redícula tetragonal obtenida en el temple y martensita beta, a la de redícula cúbica, obtenida calentando a baja temperatura la martensita alfa.

#### Troostita.

Es un agregado extremadamente fino de cementita y de hierro alfa. Se produce por enfriamiento de la austenita a velocidad ligeramente inferior a la crítica de temple, o por transformación isotérmica de la austenita a temperaturas de 500° a 600° aproximadamente según sea la composición de los aceros. Aparece en los aceros enfriados desde el estado austenítico a velocidades ligeramente inferiores a las de temple y en el corazón de grandes piezas templadas en agua, y de otras pequeñas templadas en aceite.

Sus propiedades físicas son intermedias entre la martensita y la sorbita. Es magnética.

Tiene una resistencia de 140 a 175 Kg/mm<sup>2</sup>, su dureza es de 400 a 500 Brinell, y el alargamiento de 5 a 10%.

Es constituyente nodular, obscuro, con estructura radial, y aparece generalmente acompañando a la martensita y a la austenita, situándose en los contornos de los cristales.

La troostita se oscurece con más intensidad que ningún otro constituyente al ser atacada por cualquiera de las soluciones alcohólicas de ácido nítrico o pícrico.

Examinada con grandes aumentos, se puede apreciar la presencia de laminillas que revelan la existencia de una estructura análoga a la de la perlita, orientadas hacia un nódulo central. En recientes investigaciones, se ha encontrado que la distancia interlaminar, en la troostita, es aproximadamente de 100 $\mu$ .

#### Sorbita.

Es un agregado fino de cementita y hierro alfa. Se obtiene por enfriamiento de la austenita a velocidad bastante inferior a la crítica de temple o por transformación isotérmica de la austenita en la zona de 600° a 650° aproximadamente.

Su resistencia es de 88 a 140 Kg/mm<sup>2</sup>; su dureza de 300 a 400 Brinell y su alargamiento es de 10 a 20%. Es el constituyente de máxima resistencia de los aceros.

Con pocos aumentos aparece mal definida en forma de

manchas difusas, pero con grandes amplificaciones se ve en forma de pequeños gusanillos y a veces como granos blancos muy finos - sobre un fondo obscuro.

A veces se confunde con la perlita y aparece muy frecuentemente en la estructura de los aceros hipo e hipereutectoides normalizados o recocidos, pero se diferencia de aquélla por su aspecto más confuso. La distancia entre las laminillas que forman la sorbita es de 100 a 250 $\mu$  aproximadamente.

Es el constituyente de casi todos los aceros forjados y laminados pues la velocidad de enfriamiento en estos procesos no suele ser suficientemente lenta para la formación de la perlita.

Antiguamente se solía dar también el nombre de sorbita al constituyente con que quedaban los aceros tratados (templados y revenidos) que habían sufrido un revenido a alta temperatura (550°-675°). Esto era debido a que observando con el microscopio con 100 a 500 aumentos estos aceros, en ese estado, se apreciaba una microestructura similar a la de los aceros que, después de austenizados, se enfriaban con una velocidad inferior a la crítica.

En la actualidad y como consecuencia del mejor conocimiento de los procesos de nacimiento y desarrollo de los diversos constituyentes microscópicos, existe una gran tendencia a agrupar la troostita y sorbita junto con la perlita en una familia de constituyentes laminares. De acuerdo con los estudios derivados

de la curva de la S se ha visto que se diferencian entre si -- fundamentalmente por su zona o temperatura de formación. La perlita se forma a elevada temperatura próxima a la eutectoide, la sorbita a temperatura un poco inferior y finalmente la troostita a más baja temperatura, de 500° a 600°.

#### Bainita.

Se diferencian dos tipos de estructuras. La bainita superior de aspecto arborescente, formada a 500°-550°, que difiere bastante de la bainita inferior, formada a más baja temperatura 250°-400°, que tiene un aspecto acicular bastante parecido a la martensita. La bainita superior está formada por una matriz ferrítica conteniendo carburos (en los aceros al carbono, cementita). Las placas discontinuas de los carburos tienden a tener una orientación paralela a la dirección de las agujas de la propia bainita.

La bainita inferior está constituida por agujas alargadas de ferrita que contienen delgadas placas de carburos. Estas pequeñas placas son paralelas entre sí y su dirección forma un ángulo de 60° con el eje de las agujas de ferrita.

Existe una variación de otra bainita de tipo intermedio que por su aspecto recuerda a la bainita superior. Sin embargo, en ella los carburos son más pequeños y peor orientados que en la superior.

#### Carburos

Son cuerpos muy duros que se forman al combinarse algu-



Estos conceptos se aclaran observando la Tabla indicada en capítulo anterior, en la que se señalan las velocidades de enfriamiento que hay que rebasar para conseguir industrialmente un temple aceptable (obtención de más de un 50% de martensita en la microestructura) con diferentes tipos de aceros.

Considerando las cifras que se señalan en la Tabla mencionada, y conociendo los problemas que los enfriamientos rápidos ocasionan en el temple de las piezas y herramientas (grietas, deformaciones, roturas, etc.), se comprende que es mucho más fácil y seguro el tratamiento de los aceros aleados (de baja velocidad crítica de temple), que el de los aceros al carbono que exigen altas velocidades.

Esas cifras revelan claramente las ventajas que tiene el empleo de los aceros aleados sobre los aceros al carbono.

La influencia de los diversos elementos varía bastante de unos casos a otros, siendo diferente la acción de cada uno de ellos. El manganeso y el molibdeno son los elementos que ejercen una influencia más intensa en la templabilidad. La acción del cromo es aproximadamente sólo un 80% de la del manganeso y molibdeno; la del silicio es sólo un 30% y la influencia del níquel en la templabilidad es sólo un 15% de la de esos elementos citados al principio.

En la figura 1 se ven los valores del factor de templabilidad de los diferentes elementos, determinados prácticamente en el laboratorio, que dan una idea de la influencia de

## CAPITULO IV

## TEMPLE DE ACEROS ALEADOS

## 1.- Influencia de los elementos de aleación sobre la templabilidad.

Como ya mencioné anteriormente, la acción que ejercen los elementos aleados sobre la templabilidad, es quizás una de las influencias más importantes y que más parece ser destacada.

En general, los elementos de aleación facilitan el temple. En la práctica normal, los aceros se templean para conseguir mayor resistencia y dureza. Con los aceros al carbono esto es a veces difícil de conseguir, sobre todo cuando se trata de perfiles gruesos y con piezas de formas complicadas. En cambio, ese problema se resuelve bastante fácilmente con los aceros de aleación.

El temple de los aceros al carbono es a veces difícil porque, para conseguirlo, el enfriamiento del acero debe ser muy rápido. Como en las piezas gruesas, en especial en su parte central, ese enfriamiento rápido no se puede conseguir aun enfriándolas en agua, no se llega a conseguir tampoco que el acero temple. Las piezas complicadas enfriadas rápidamente sufren a veces, deformaciones importantes que en ocasiones impiden su utilización posterior. Esas dificultades no se presentan en los aceros aleados que, entre otras propiedades, tienen la de templear con enfriamientos poco rápidos. Los aceros aleados pueden ser templeados en aceite, y a veces también templean con sólo enfriarlos al aire; en cambio, los aceros al carbono, en general, sólo pueden ser templeados en agua.

Estos conceptos se aclaran observando la Tabla indicada en capítulo anterior, en la que se señalan las velocidades de enfriamiento que hay que rebasar para conseguir industrialmente un temple aceptable (obtención de más de un 50% de martensita en la microestructura) con diferentes tipos de aceros.

Considerando las cifras que se señalan en la Tabla mencionada, y conociendo los problemas que los enfriamientos rápidos ocasionan en el temple de las piezas y herramientas (grietas, deformaciones, roturas, etc.), se comprende que es mucho más fácil y seguro el tratamiento de los aceros aleados (de baja velocidad crítica de temple), que el de los aceros al carbono que exigen altas velocidades.

Esas cifras revelan claramente las ventajas que tiene el empleo de los aceros aleados sobre los aceros al carbono.

La influencia de los diversos elementos varía bastante de unos casos a otros, siendo diferente la acción de cada uno de ellos. El manganeso y el molibdeno son los elementos que ejercen una influencia más intensa en la templabilidad. La acción del cromo es aproximadamente sólo un 80% de la del manganeso y molibdeno; la del silicio es sólo un 30% y la influencia del níquel en la templabilidad es sólo un 15% de la de esos elementos citados al principio.

En la figura 1 se ven los valores del factor de templabilidad de los diferentes elementos, determinados prácticamente en el laboratorio, que dan una idea de la influencia de

cada uno de los elementos, y sirven para calcular teóricamente,

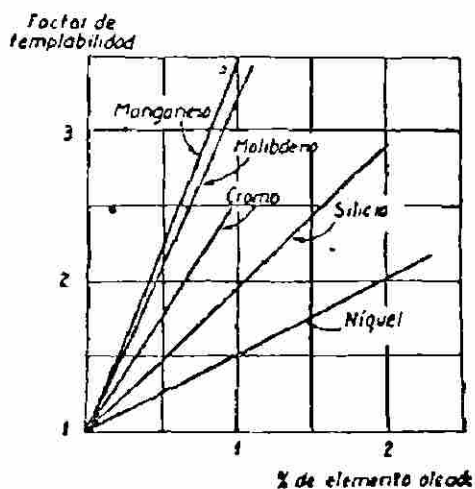


Fig. 1

en función de la composición, la templabilidad y penetración de temple de los aceros, pudiendo observarse que el orden de su influencia es: manganeso, molibdeno, cromo, silicio y níquel.

Las variaciones que los elementos de aleación introducen en el temple de los aceros, se pueden apreciar con toda claridad con ayuda de las curvas de la S (fig. 2)

En general la presencia de elementos de aleación mueve hacia la derecha a la curva de la S, lo que quiere decir que se necesita más tiempo en los aceros aleados que en los aceros al carbono, para que se transforme la austenita, a cualquier temperatura inferior a  $A_1$ , en otros constituyentes. Una excepción es el cobalto, que mueve la parte superior de la curva de la S ligeramente hacia la izquierda.

El manganeso y el níquel ejercen un efecto parecido, y contenidos de 1 a 1,5% de manganeso en aceros de 0,30 a 0,60%

de carbono hacen aproximadamente el mismo efecto que porcentajes de 3 a 4,5% de níquel. La acción del cobre es en cierto modo si milar a la del níquel pero, si influencia es mucho más débil.

El cromo tiene una gran tendencia a retrasar las trans formaciones en la zona de 400° a 600°, mucho más que en otras zo- nas. El molibdeno actúa en forma parecida, pudiéndose decir que, en general, todos los elementos formadores de carburos tienden a- desplazar la situación de la curva hacia la derecha. Esos elemen- tos tienden a elevar las zonas de transformaciones perlíticas y- tienden a descender la temperatura correspondiente a las reaccio- nes intermedias.

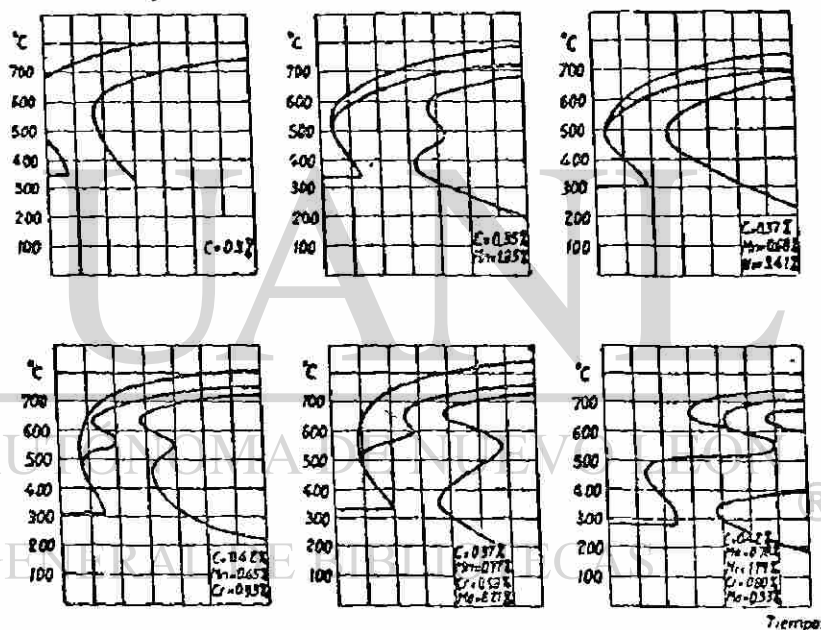


Fig. 2

Por eso, en los aceros cromo-molibdeno suele existir- una zona de estabilidad hacia 500°.

En los aceros al cromo las transformaciones en la zona superior se suelen producir bastante más rápidamente que en los- aceros con molibdeno.

El vanadio retrasa la curva hacia la derecha, pero ele

va la parte superior, y el cobalto, como lo he indicado antes, -  
desplaza la curva hacia la izquierda.

Influencia que tienen los elementos de aleación en el  
revenido.

Puesto que el revenido es un proceso posterior al tem-  
ple conviene observar la influencia que ejercen los elementos -  
de aleación.

En general, estos elementos tienden a dificultar el --  
ablandamiento de los aceros en el revenido. En el revenido de -  
los aceros al carbono, al descomponerse la martensita se van for-  
mando, a medida que se eleva la temperatura, diversos constituyen-  
tes. Primero a baja temperatura (150-250°) se va transformando-  
la martensita tetragonal en cúbica. Luego, al elevarse la tempe-  
ratura de 400° a 600°, comienza a aparecer el carburo de hierro-  
(cementita) y cuando la temperatura de revenido es ya muy eleva-  
da, de unos 700°, aproximadamente, la martensita ha quedado ya -  
transformada en ferrita y perlita. En cambio, en el revenido de  
los aceros aleados aparecen en lugar de cementita, carburos alea-  
dos complejos como producto de la descomposición de la martensita

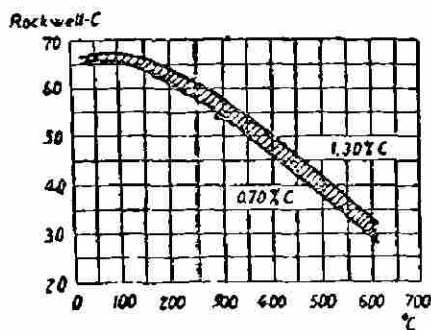


Fig. 3

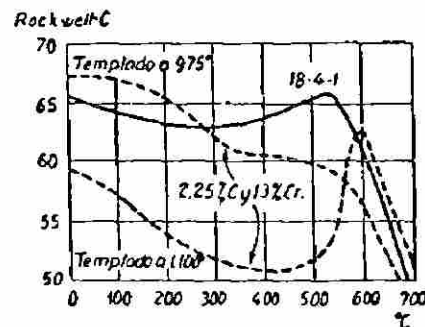


Fig. 4

y las leyes de su formación son muy diferentes. Ese fenómeno se

aprecia fácilmente al analizar las curvas de variación de dureza por el revenido, en las que se aprecian fácilmente diferencias - importantes (figs. 3 y 4). Al observar las curvas de revenido - de los aceros aleados se ve que el cromo, molibdeno y wolframio, que son elementos formadores de carburos, son los que ejercen -- más influencia y modifican completamente la forma clásica de esas curvas de revenido, llegando a existir zonas de endurecimiento - secundario características de algunos aceros de alta aleación.

Es interesante, también, señalar el problema de fragilidad en el revenido que presentan los aceros cromo-níqueles, -- cuando éste se hace a unos  $450^{\circ}$ - $550^{\circ}$  o cuando el enfriamiento es muy lento en esa zona.

Influencia de los elementos de aleación en la resistencia a la corrosión y a elevadas temperaturas de los aceros: y - aparte, los elementos de aleación ejercen, también, una influencia destacada en la resistencia a la corrosión de los aceros. - En unos casos, como en el de los aceros con más de 13% de cromo, este elemento da lugar a la formación de una delgadísima capa de óxido de cromo prácticamente invisible y transparente, que impide la corrosión del acero. En otros casos, como, por ejemplo, - el de los aceros cromo-níquel 18-8, además de la formación de la película de óxido de cromo superficial, la presencia de altos -- porcentajes de elementos de aleación, da lugar a la formación de una estructura austenítica que favorece la resistencia de estos - aceros contra la corrosión.

Finalmente, es también muy interesante la acción que -

ejercen ciertos elementos como el cromo, molibdeno y wolframio, que mejoran notablemente la resistencia mecánica en caliente y la resistencia a la oxidación de los aceros a temperaturas elevadas. Siendo cada día de mayor interés la construcción de máquinas, motores e instalaciones que trabajan a elevadas temperaturas, se comprende que aumente de día en día la demanda de esta clase de aceros.

## 2.- Método de Temple.

Temple. Cuando el enfriamiento se realiza a velocidades bajas o moderadas, los átomos de carbono pueden salir, por difusión, de la estructura de la austenita, reagrupándose los átomos de hierro según la estructura de cuerpo centrado. Esta transformación del Fe  $\gamma$  y en Fe  $\alpha$  se realiza por un proceso de nucleación y crecimiento, y es función del tiempo. Si la velocidad de enfriamiento aumenta, el carbono no tiene tiempo suficiente para emigrar, por difusión, de la solución, y aunque los átomos de -- hierro se desplazan ligeramente, no pueden llegar a alcanzar la estructura de cuerpo centrado, porque parte del carbono queda re<sup>®</sup>tenido en la solución. La estructura resultante, denominada mar<sup>®</sup>tensita, es una solución sólida sobresaturada de carbono retenido en una estructura tetragonal de cuerpo centrado. La celdilla -- fundamental tiene dos lados iguales, y el tercero, que es un poco mayor a causa del carbono retenido, guarda con los otros una rela<sup>®</sup>ción c/a que aumenta con el contenido de carbono, alcanzando un -- valor máximo de 1,08. Esta distorsión tan grande de la estructura cristalina es la causa principal de la elevada dureza de la -- martensita. Como la celdilla fundamental de la martensita es menos compacta que la de la austenita, la transformación de ésta en



aquella va acompañada de un aumento de volumen, el cual crea una serie de tensiones internas localizadas que dan lugar a la deformación plástica de la matriz. Después de un enfriamiento brusco (temple), la martensita observada al microscopio aparece en forma de agujas blancas o estructura acicular, la cual, a veces, se describe como un montón de paja. En la mayor parte de los aceros, la estructura martensítica aparece en forma difusa y sin resolver. En las aleaciones altas en carbono, cuyo fondo está formado por austenita retenida, la estructura acicular de la martensita está definida con mayor claridad.

Entre las características más importantes de este proceso destacan:

1. En esta transformación no se presenta el fenómeno de la difusión, realizándose sin variación en la composición química. La transformación consiste en el cambio brusco de la estructura cristalina de pequeñas cantidades de austenita, provocado por dos acciones de cizallamiento.

2. La transformación se realiza solamente durante el enfriamiento, cesando al interrumpirse éste. Por tanto, la transformación depende solamente de la disminución de temperatura y es independiente del tiempo. Además, la cantidad de martensita que se forma no guarda una relación lineal con el descenso de temperatura. Así, al principio, el número de agujas de martensita formado es pequeño; después aumenta y, finalmente, próxima a acabar la transformación, vuelve a disminuir de nuevo (fig. 5) la temperatura de comienzo de formación de la martensita se conoce como  $M_s$ , y la de final, como  $M_f$ .

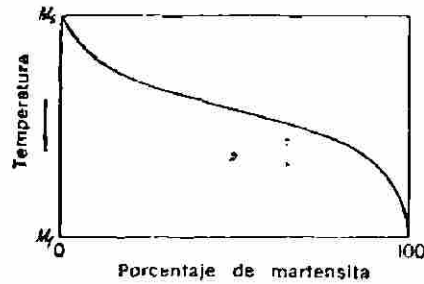


Fig. 5

3. La transformación martensítica de una aleación determinada no se interrumpe ni la temperatura  $M_s$  se modifica al variar la velocidad de enfriamiento. Esta temperatura  $M_s$  parece ser función únicamente de la composición química, y su determinación se efectúa de la manera siguiente:

$$M_s (^{\circ}\text{C}) = 537 - (361 \times \% \text{C}) - (38,8 \times \% \text{Mn}) - (19,4 \times \% \text{Ni}) - (38,8 \times \% \text{Cr}) - (27,7 \times \% \text{Mo})$$

La Fig. 6 muestra la influencia del contenido de carbono en el valor de las temperaturas  $M_s$  y  $M_f$ .

4. La martensita no está probablemente nunca en equilibrio, aunque su estructura se conserve indefinidamente a la temperatura ambiente, o a temperaturas próximas a ésta. Antes bien,

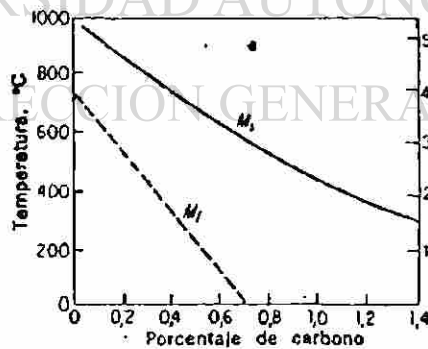


Fig. 6

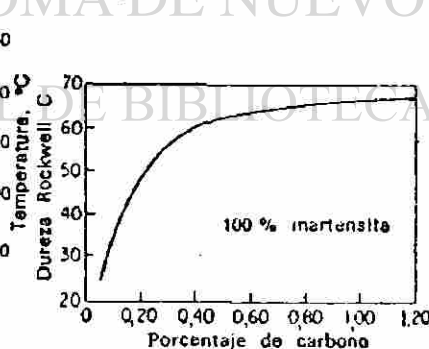


Fig. 7

puede considerarse como una estructura de transición entre la fase de austenita metastable y la ferrita que aparece en el equilibrio final.

5. Aunque la martensita siempre tiene más dureza que la austenita de que procede, las durezas elevadas solo se consi-

guen en los aceros con un contenido de carbono suficiente, siendo la dureza máxima que se obtiene en un acero en estado martensítico función solamente del contenido en carbono (Fig. 7).

Con el temple lo que se pretende es conseguir una estructura totalmente martensítica, y la velocidad mínima de enfriamiento ( $^{\circ}\text{C}$  por segundo) que impida la formación de productos de transformación más blandos, se denomina velocidad crítica de temple. Esta velocidad, función de la composición química del acero y del tamaño de grano austenítico, constituye una propiedad importante del acero, puesto que indica la rapidez con que debe enfriarse para que se forme solo martensita.

Es evidente, por todo lo dicho hasta ahora, que la utilidad que tiene el diagrama hierro-carbono en el estudio de los aceros cuyo enfriamiento no se realiza en condiciones de equilibrio, es pequeña.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

### 3.- Curva Triple "T"

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Para el estudio de los tratamientos térmicos, principalmente el temple, normalizado y recocido de los aceros, es muy interesante la representación gráfica, llamada por unos curva de las S, debido a su forma característica, y por otros diagrama o curva TTT (temperatura, tiempo, transformación) y también diagrama de transformaciones isotérmicas de la austenita, que señala, a diversas temperaturas, el tiempo necesario para que se inicie y complete la isotérmica transformación de la austenita en otros constituyente.

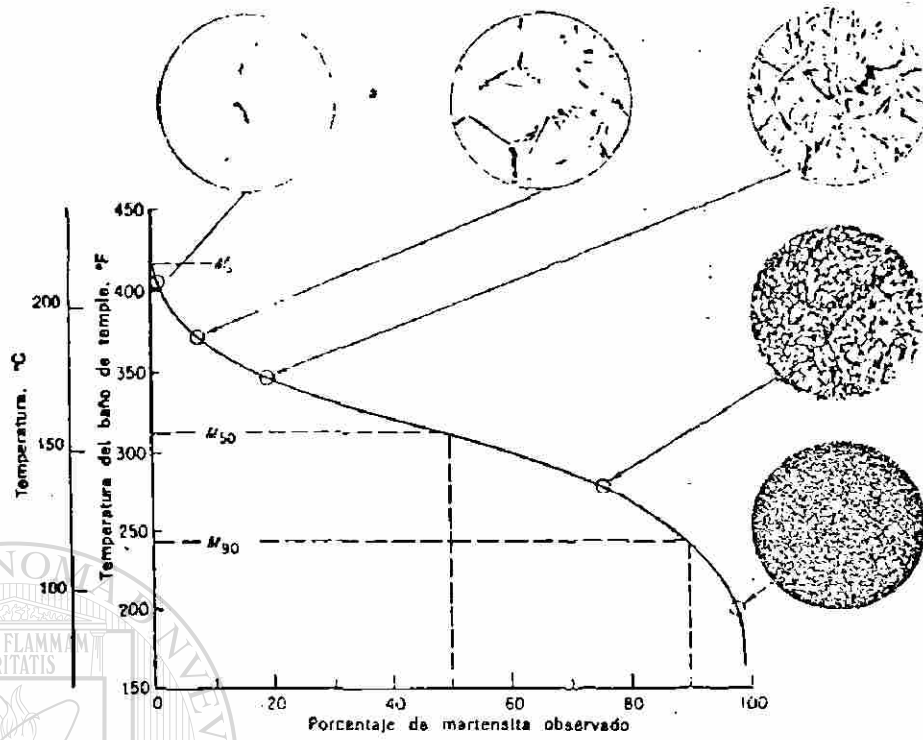


Fig. 8

Como por debajo de la temperatura crítica inferior - -

$Ae_1$  la austenita es inestable, es necesario conocer a una determinada temperatura subcrítica, el tiempo que tarda la austenita en iniciar su transformación, el tiempo que transcurre hasta que se completa la transformación y la naturaleza de los productos que se obtienen en está.

Conviene tener presente que:

1. La martensita se forma únicamente por transformación casi instantánea de la austenita a temperaturas relativamente bajas.

2. Cuando la austenita se transforma a temperaturas más elevadas en estructuras estables a la temperatura ambiente, un posterior enfriamiento rápido no origina ningún cambio en los productos de la transformación.

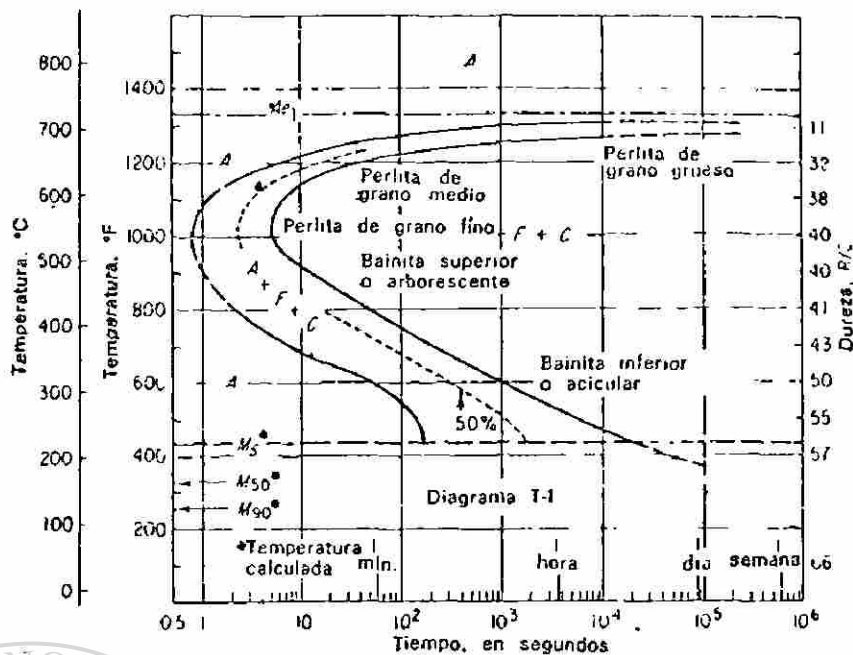
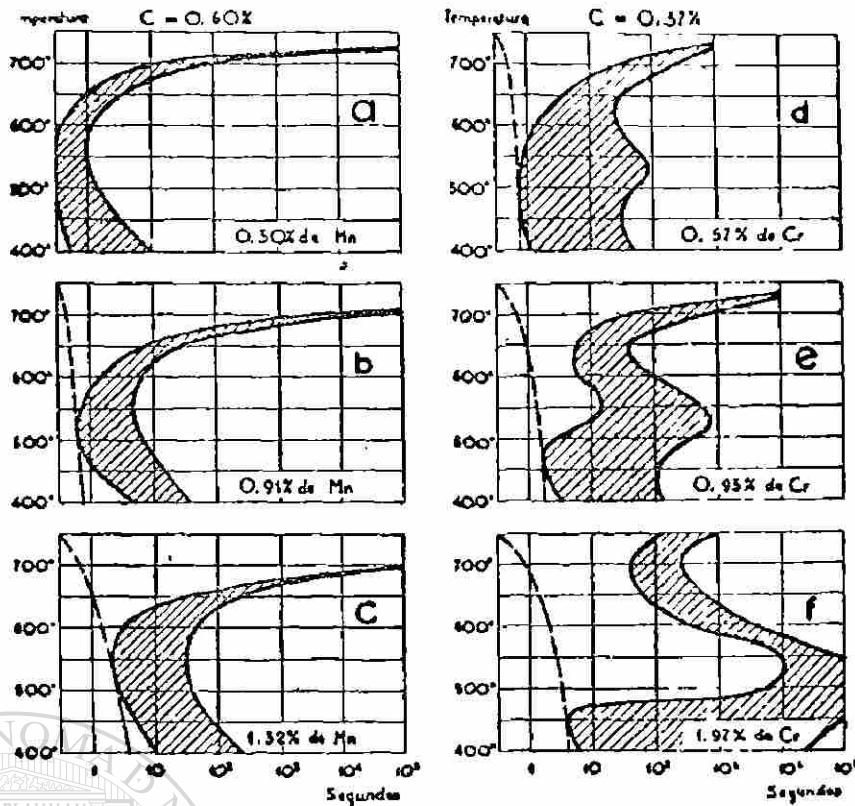


Fig. 9

La Fig. 9 representa el diagrama T-I de un acero eutectoide 1080. Por encima de  $Ae_1$ , la austenita es estable. El área situada a la izquierda de la curva correspondiente al comienzo de la transformación representa la zona en que la austenita es inestable. En el área situada a la derecha de la curva correspondiente al final de la transformación, designada por F + C, las únicas fases presentes son ferrita y cementita, habiéndose transformado toda la austenita en una combinación de estas fases. El área comprendida entre las dos curvas, designada por A + F + C, corresponde a una zona trifásica, formada por austenita, ferrita y cementita, o bien por austenita y el producto en que se está transformando. El punto de la línea de comienzo de transformación situado más a la izquierda se conoce como naris del diagrama.

La temperatura  $M_s$  viene indicada por una línea horizontal y las flechas situadas sobre la escala de temperaturas señalan que a esas temperaturas se transforma en martensita, en el temple, el 50 y el 90% de la austenita total.



Examinando la curva de la S de un acero al carbono de 0,90% de C, se ve que a temperaturas ligeramente inferiores a - .

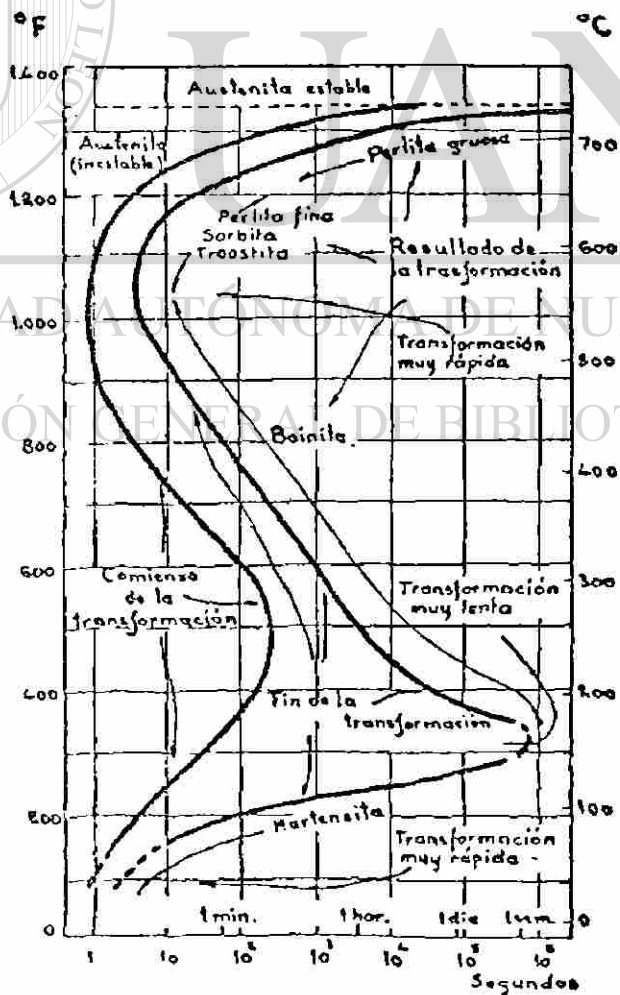
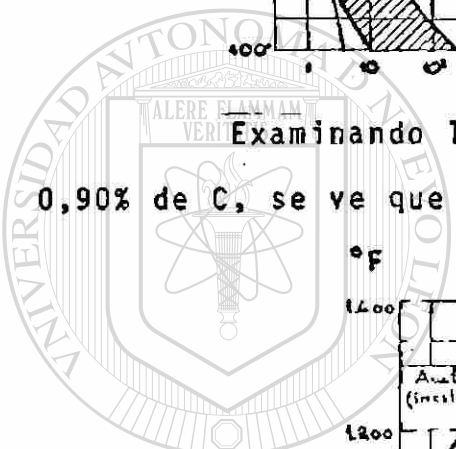
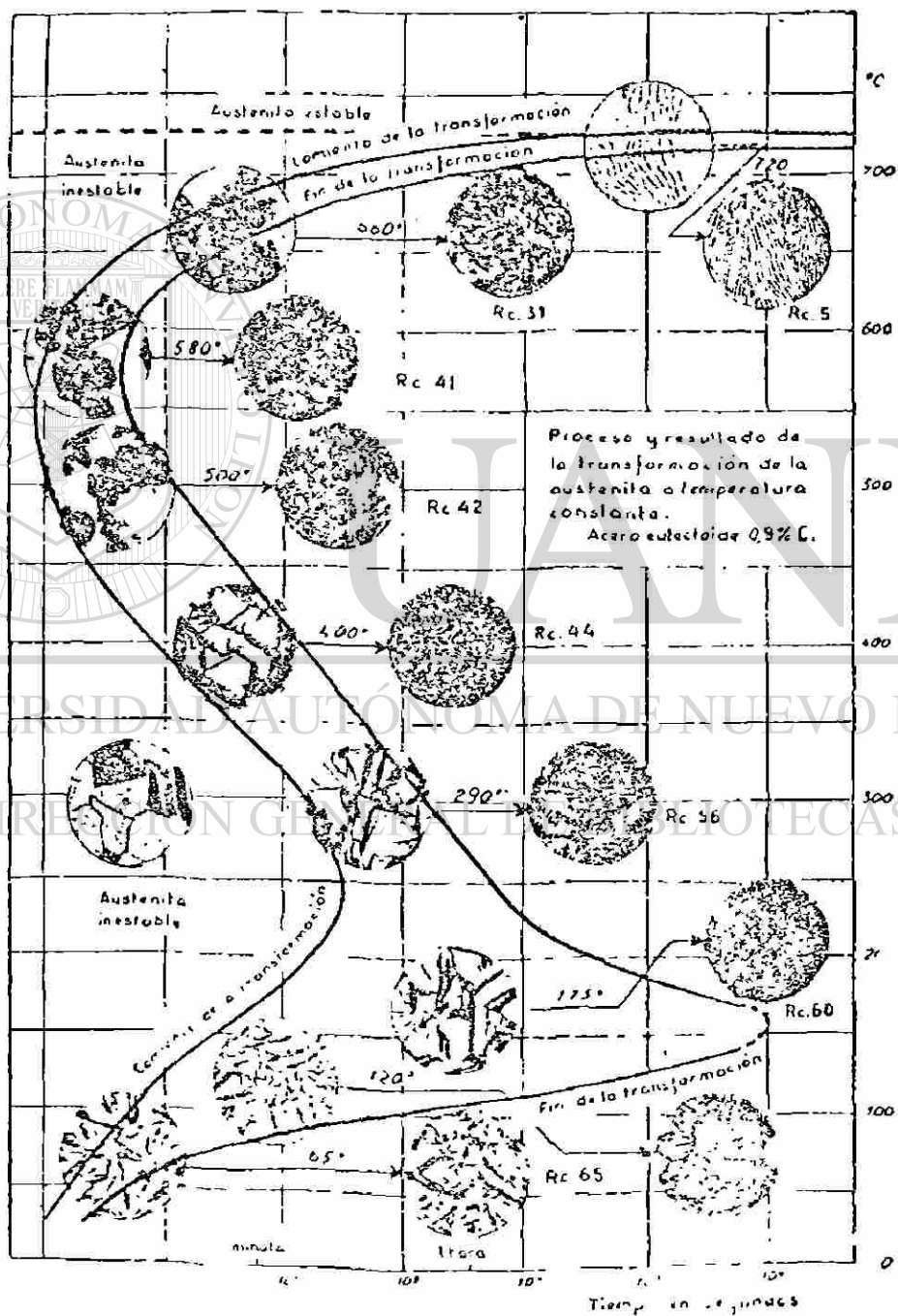


Fig. 10



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
 DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

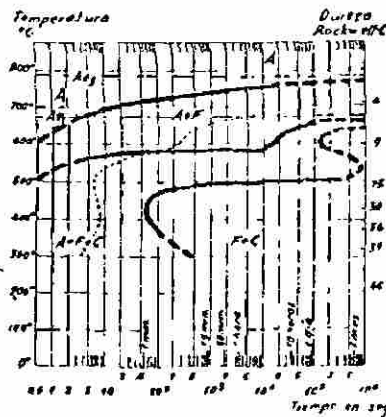
$Ae_1$ , la austenita tiende a descomponerse en agregados de ferrita y cementita, como son la perlita, sorbita, troostita, etc.. Cuando las temperaturas de transformación son próximas a  $Ae_1$ , la formación de perlita es muy lenta, comienza al cabo de varios minutos después de introducida la probeta en el baño, y necesita cerca de un mes para que la transformación sea completa.



Fin 11

En cambio, en la zona de  $525^{\circ}$  a  $575^{\circ}$  la transformación es muy rápida, comienza antes de un segundo y es completa a los

Temperatura de austenización  $900^{\circ}$   
Grano fino (núm. 8-9)



Temperatura de austenización  $980^{\circ}$   
Grano fino (núm. 7)

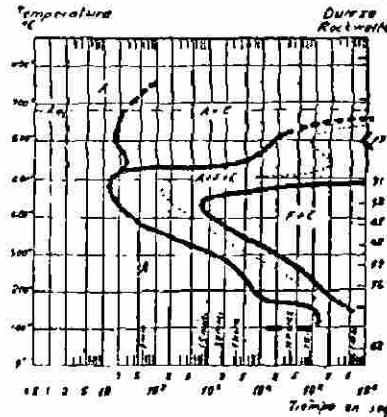


Fig. 12

Fig. 13

Curva "S" de aceros al Níquel-Molibdeno con variación en el tamaño de grano.

cuatro segundos aproximadamente; a  $500^{\circ}$  se inicia al cabo de un segundo y termina a los 12 segundos.

A temperaturas más bajas, el comienzo y fin de la transformación se retarda, y a  $180^{\circ}$ , aunque el comienzo ocurre a los 2 ó 3 minutos, la transformación completa requiere varios días.

Por fin, por debajo de  $125^{\circ}$ , el comienzo y fin de la transformación vuelve a ser rapidísimo.

He señalado, por tanto, que hay dos zonas en las que las transformaciones son bastante lentas, una situada debajo del punto  $Ae_1$  ( $720^{\circ}$ - $700^{\circ}$ ), y otra entre  $250^{\circ}$  y  $150^{\circ}$ ; existiendo también otras dos zonas de rápida transformación, una entre  $600^{\circ}$  y  $500^{\circ}$  y otra por debajo de  $125^{\circ}$ .

Aceros Hipo e Hipereutectoides.- En los diagramas de



transformación isotérmica de estos aceros, existen en la zona superior nuevas líneas de transformación, que no existían en el diagrama del acero eutécticoide, situadas a la izquierda y encima de las ya conocidas, que señalan el comienzo de la transformación de parte de la austenita en ferrita o cementita proeutecticoide.

En ambos diagramas la línea  $Ae_1$  limita la zona de estabilidad de la austenita y en todos los casos la transformación de la austenita en perlita se efectúa siempre a temperaturas inferiores a  $Ae_1$ .

En el diagrama de la figura 13 se ve que en los aceros hipoeutécticos a temperaturas comprendidas entre  $Ae_3$  y  $Ae_1$  la austenita puede transformarse en ferrita señalando la línea superior del diagrama el tiempo necesario para que a cada temperatura se inicie esa transformación.

En la figura 14 se ve que en los aceros hipereutécticos a temperaturas superiores a  $Ae_1$  se precipita cementita o carburos aleados según sea la clase del acero.

La composición química de un acero y en especial el contenido de elementos aleados, es el factor que influye más decisivamente en la forma y situación de la curva de la S. Para una composición determinada, el tamaño de grano y la homogeneidad de la austenita, ejercen también una gran influencia.

Influencia de la composición.- Los primeros estudios de transformación isotérmica de la austenita se hicieron con ace-

ros eutectoides, pero luego, muy pronto, se determinaron las curvas de transformación de otros tipos de aceros, y en la actualidad existen ya diagramas de gran número de ellos.

En las figuras 15 y 16 se puede observar el efecto del manganeso sobre la forma y posición de la curva de la S. La figura 15 corresponde a un acero de 0,35% de carbono y 0,37% de manganeso, y la figura 16 a otro acero con el mismo porcentaje de carbono y mayor contenido de manganeso. Se ve que la curva ha sido desplazada hacia la derecha y que el nivel de todas las transformaciones se ha retrasado y descendido.

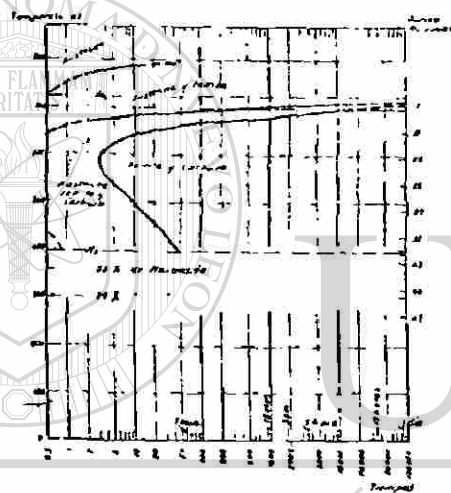
Este desplazamiento es característico de los metales que, como el manganeso, forman solución sólida con la austenita; en general el aumentar el contenido de la aleación, se retrasa el comienzo de las transformaciones y es también mayor el tiempo necesario para que se completen. En algunos diagramas, en lugar de marcarse las zonas de perlita, troostita, se señalan en la región de productos transformados, únicamente las zonas de ferrita y carburo (cementita), que son los constituyentes que en definitiva componen las microestructuras a que hacemos referencia.

Aunque todas las adiciones de elementos de aleación - - tienden, en general, a retardar el comienzo de las transformaciones y aumentar la duración de las mismas, el efecto y la magnitud de la influencia de los diversos elementos es diferente de unos - - casos a otros.

Los elementos que forman carburos, tales como el cromo - y el molibdeno, aun en pequeños porcentajes, son la causa de que - en algunos diagramas aparezcan dos narices; una correspondiente a - la transformación perlítica y otra a la bainita (fig. 18).

En estos aceros debo de considerar dos zonas de templabilidad: la perlítica y la bainita, pudiendo ser una u otra la que señale la velocidad crítica del temple, que, en definitiva, depen-

Temperatura de austenización 850°  
Grano mixto [N.º 2-3 (75%), N.º 7-8 (25%)]



Temperatura de austenización 850°  
Grano mixto [N.º 7 (70%) y N.º 2 (30%)]

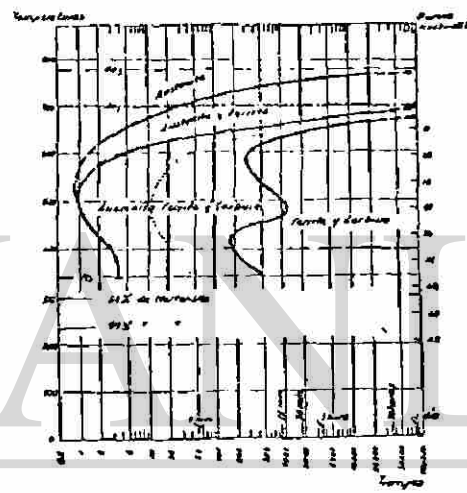


Fig. 14

Fig. 15

Influencia del % de Manganeso en la curva "S".

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

derá de la situación relativa de las narices de las curvas correspondientes a esas estructuras.

Esto ocurre porque estos elementos de aleación actúan -- más intensamente en las regiones perlíticas que en las bainíticas- de la curva de la S , desplazándolas más o menos hacia la derecha- según los casos. Así, por ejemplo, mientras la influencia del man- ganeso es casi la misma en ambas zonas, la acción del molibdeno es aproximadamente 10.000 veces más intensa para retrasar la zona de-

la perlita que la de la bainita.

La figura 17 representa el diagrama de un acero de 0,33% de carbono, 0,45% de manganeso y 1,97% de cromo. Por comparación con el acero al carbono de la figura 15, se ve que la adición de 1,97% de cromo no sólo ha desplazado la curva hacia la derecha, sino que la forma de la curva también ha cambiado. El tiempo para la completa transformación ha aumentado extraordinariamente en la región de temperaturas correspondientes a la sorbita y bainita superior, y en cambio el aumento no es sensible en la región de formación de la bainita inferior.

Los diagramas de los aceros aleados son bastante complejos, como lo es también el mecanismo de las reacciones de transformación. En alguno de ellos se observa que la estructura perlítica

Temperatura de austenización 875°  
Grano fino (N.º 6-7)

Temperatura de austenización, 850°  
Grano fino (N.º 7-8)

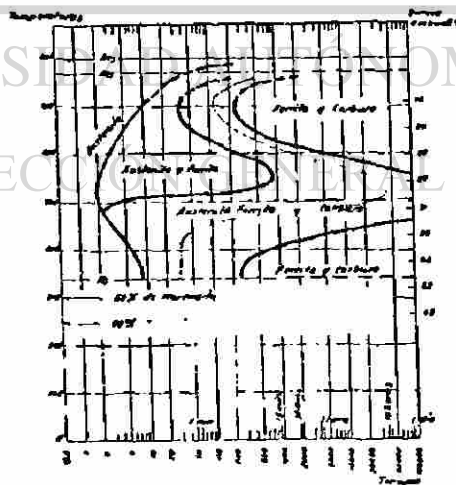


Fig. 16

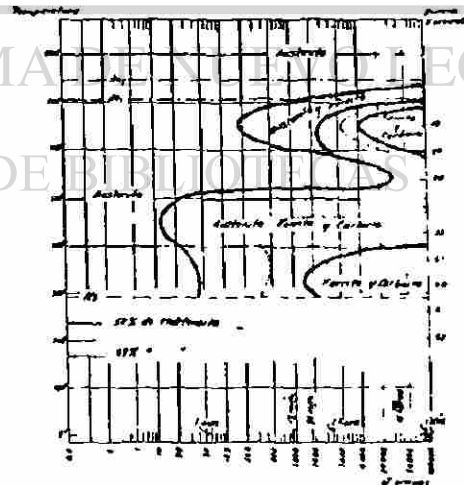


Fig. 17

se forma por encima, y por debajo de la nariz perlítica (fig. 17), lo cual no ocurre en los aceros al carbono y aleados con níquel y

manganeso, en los que la perlita sólo se forma a temperaturas superiores a la nariz.

En algunos aceros hipoeuctectoides aleados se presenta también la anomalía de que la ferrita se forma también por encima y por debajo de la nariz de la perlita, llegando a presentar nariz propia (fig. 18). Este fenómeno de la nariz de ferrita se suele presentar en los aceros al cromo.

La figura 18 representa al diagrama de la S de un acero cromo-níquel-molibdeno de: C = 0,41%; Mn = 0,61%; Cr = 0,68%; Ni = 1,80%; Mo = 0,25%. Se observará que, aunque el contenido de elementos de aleación es pequeño, la curva ha sido desplazada hacia la derecha, más todavía que para el acero de 1,97% de cromo.

Aunque el manganeso y el níquel ejercen en cierto modo un efecto parecido, se diferencian en que el comienzo de formación de martensita  $M_s$  se encuentra en los aceros al níquel a más alta

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

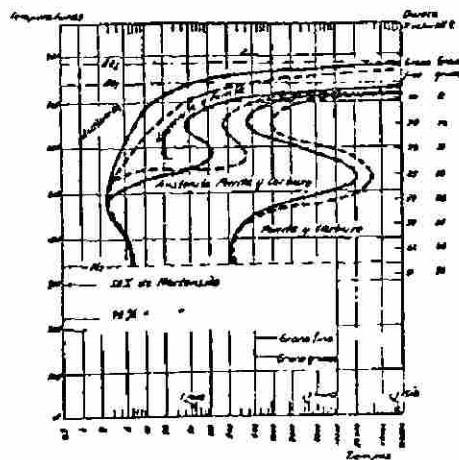


Fig. 18

temperatura que en los aceros al manganeso. Eso es una ventaja y por ello en gran parte hay menos peligro de agrietamiento y son tan solicitados los aceros al níquel. Al formarse la martensita a alta temperatura, cuando el acero tiene todavía cierta plasticidad, hay menos peligro de grietas que si se forma a baja temperatura cuando el acero es poco deformable y más frágil.

El cromo tiene una gran tendencia a retrasar las transformaciones en la zona de  $400^{\circ}$  a  $600^{\circ}$  mucho más que en otras zonas. El molibdeno actúa en forma parecida pudiéndose decir que en general todos los elementos formadores de carburos tienden a desplazar la situación de la curva hacia la derecha.

Estos elementos tienden a elevar las zonas de transformación perlítica y tienden a descender las temperaturas correspondientes a las transformaciones intermedias. Por eso en los aceros cromo-molibdeno suele existir una zona de estabilidad hacia los

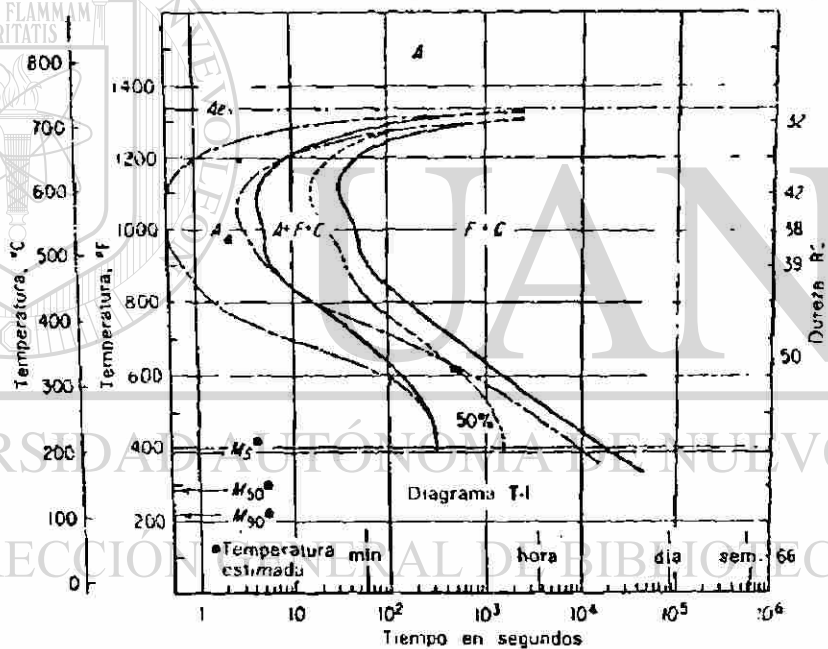
500°

En los aceros al cromo las transformaciones en la zona superior se suelen producir bastante más rápidamente que en los aceros con molibdeno.

Temperatura de temple o de austenización: En el caso de los aceros hipoeutectoides la temperatura de austenización que recomendamos es de unos  $30^{\circ}\text{C}$  por encima de su temperatura crítica superior  $A_3$ . Esta temperatura es la misma que establecí para el recocido. Si el calentamiento se efectúa a temperaturas inferiores a  $A_3$ , quedará sin transformarse cierta cantidad de ferrita proeu-

tectoide, la cual, después del temple, dará origen a la existencia de puntos blandos y a una dureza menor.

En el caso de los aceros ordinarios al carbono hipereutectoides, la temperatura de austenización recomendada se encuentra comprendida normalmente entre las líneas  $A_{cm}$   $A_{31}$ . La primera de ellas tiene una pendiente tan pronunciada que, para que se disuelva toda la cementita proeutectoide, se requieren temperaturas sumamente elevadas con el consiguiente desarrollo del tamaño de grano austenítico y la formación de una fase basta y perjudicial que puede dar origen a la aparición de grietas en el enfriamiento.



Homogeneidad de la austenita. Al hablar de homogeneidad -hago referencia a la uniformidad que presenta los granos de austenita en cuanto al contenido de carbono. Si se calienta un acero hipoeutectoide a la temperatura de temple, cuando atraviesa la línea  $A_1$ , los granos de austenita formados por transformación de la perlita, contendrán 0,8% de carbono. Al proseguir el calentamiento, la ferrita proeutectoide se disolverá y los granos de austenita

formados contendrán muy poco carbono, por lo que, cuando se atravesase la línea  $A_3$ , el contenido de carbono de los granos de austenita no será igual en todos ellos. En el temple, los granos de austenita más pobres en carbono, como tienen una velocidad crítica de temple elevada, tenderán a transformarse en estructuras no martensíticas, mientras que los de mayor contenido de carbono, al poseer una velocidad crítica de temple pequeña, se transformarán en martensita. Esto da lugar a que la microestructura formada no sea uniforme y posea una dureza variable. Este inconveniente puede evitarse calentando el material muy lentamente, con lo cual el carbono se difunde obteniéndose en el temple una microestructura uniforme. No obstante, la excesiva duración de este proceso hace que industrialmente no sea aplicable. Resulta más adecuado mantener el material durante un cierto tiempo a la temperatura de austenización, ya que a esta temperatura el carbono se difunde más rápidamente, y la uniformidad se logra al cabo de un breve período de tiempo. No obstante, para tener la seguridad de que el carbono se ha difundido totalmente, recomendaría mantener el material a la temperatura de austenización una hora por cada pulgada de espesor o diámetro.

Mecanismo de disipación del calor en el temple. La velocidad real de enfriamiento obtenida en el temple determina la estructura resultante del tratamiento térmico, así como los valores de la dureza y la resistencia. Si esta velocidad es superior a la velocidad crítica de temple, la austenita se transformará en martensita; por el contrario, si es menor, la estructura que se obtenga no será totalmente martensita. En este último caso, cuanto-



mayor sea la diferencia entre las dos velocidades de enfriamiento, más blandos serán los productos obtenidos en la transformación y - menor la dureza resultante. Ahora bien, antes de continuar es con- veniente analizar el mecanismo mediante el cual se disipa el calor durante el temple.

En la figura 21 puede verse una curva típica de enfria- miento que corresponde a un cilindro de acero de poco diámetro, - templado en agua caliente. Se puede observar que la velocidad de enfriamiento no es constante en el temple, advirtiéndose tres fa- ses muy señaladas, cuyas características explicaré con más deta- -- lle a continuación.

Etapa A- Enfriamiento por capa de vapor. Cuando el me- tal se introduce en el medio de temple como su temperatura es muy elevada, el líquido en contacto con la superficie del metal se va- poriza, formándose una capa delgada de vapor que rodea el metal -- caliente. El enfriamiento se hace por conducción y radiación a -- través de la capa gaseosa y, como la capa de vapor es mala conduc- tora del calor, la velocidad de enfriamiento en esta fase es rela- tivamente pequeña.

Etapa B - Enfriamiento por transporte de vapor. Cuando- descende la temperatura del metal, llega un momento en que la pelí- cula de vapor desaparece, y el líquido se pone en contacto con la- superficie del metal, originándose una violenta ebullición alrede- dor de éste. El metal cede calor muy rápidamente en forma de ca- -- lor latente de vaporización. Esta fase es la más rápida del proce- so de enfriamiento.

Etapa C - Enfriamiento por líquido. Esta última etapa - comienza cuando la temperatura de la superficie del metal es igual a la temperatura de ebullición del líquido de temple. Entonces, - como ya no se forma vapor, el enfriamiento lo hace el líquido por - conducción y convección. La velocidad de enfriamiento en esta etapa es menor que en las anteriores.

Experimentalmente, se puede determinar la velocidad de - enfriamiento real a una determinada temperatura, conocida la curva de enfriamiento, trazando la tangente a la curva en el punto correspondiente a dicha temperatura y midiendo su pendiente. Cuanto más - se aproxime dicha tangente a la horizontal, menor será la velocidad de enfriamiento. Determinando las velocidades de enfriamiento en - la curva de la Fig. 21, aplicando este procedimiento experimental, - se observa que éstas varían constantemente.

Muchos son los factores que influyen en la velocidad real de enfriamiento. Entre ellos los más importantes son el tipo de - medio de temple utilizado, la temperatura a que éste se encuentra - y el estado superficial, forma y tamaño de las piezas a temprar.

#### 4.- Influencia de los elementos de aleación sobre las propiedades mecánicas.

A continuación señalaré por separado la influencia que tiene cada uno de los elementos aleados que normalmente se suelen emplear para mejorar las propiedades de los aceros.

Una de las ventajas más importantes que reporta el empleo -

del níquel es evitar el crecimiento del grano en los tratamientos térmicos, lo que sirve para conseguir siempre con ellos gran tenacidad. Los aceros al níquel, a pesar de ser sometidos accidentalmente a temperaturas demasiado elevadas, quedan después del temple y revenido con muy buena tenacidad. En cambio, en los aceros sin níquel se acusan claramente los tratamientos defectuosos que con frecuencia se dan inadvertidamente y los materiales, a veces, quedan con cierta fragilidad. El níquel, además, hace descender los puntos críticos y por ello los tratamientos pueden hacerse a temperaturas ligeramente más bajas que las que corresponden a los aceros ordinarios. Experimentalmente se observa que con los aceros aleados con níquel se obtiene para una misma dureza, un límite de elasticidad ligeramente más elevado y mayores alargamientos y resiliencias que con los aceros al carbono. También es muy interesante señalar que para una misma dureza de resistencia a la fatiga es, a veces, un 30% superior a la de los aceros al carbono o de baja aleación.

Entre todos los elementos aleados, el níquel, que cristaliza como la austenita en cubos de caras centradas, es el único que forma con el hierro una serie continua de soluciones sólidas. En ocasiones (aunque muy poco frecuentes) forma un carburo de níquel  $\text{Ni}_3\text{C}$  inestable, que se asocia con el carburo de hierro. El níquel hace descender la temperatura de transformación gamma-alfa y, por lo tanto, tiende a estabilizar a baja temperatura la fase austenita de caras centradas. Las aleaciones con más de 30% de níquel son austeníticas a la temperatura ambiente, y a pesar de su carácter austenítico poseen ciertas propiedades magnéticas de interés para determinadas aplicaciones. Aunque a veces a estos materiales se les da el nombre de aceros al níquel, en realidad deben ser considerados más

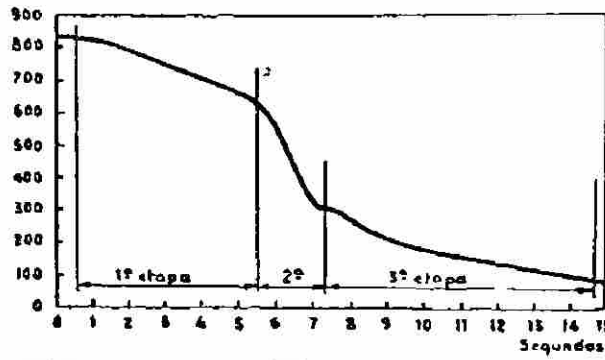
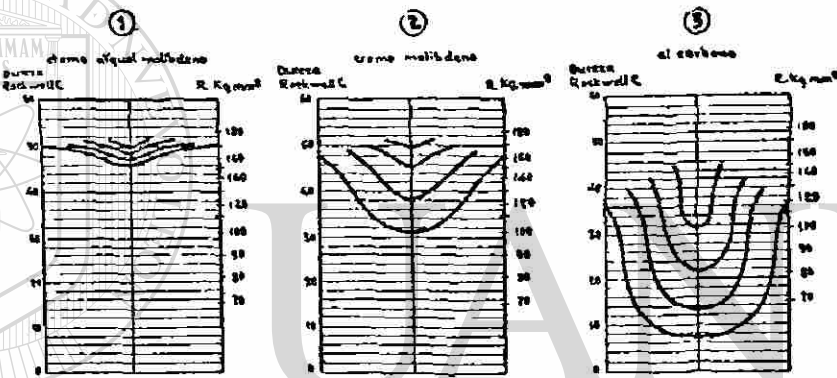


Fig. 20

Curva de enfriamiento del centro de un cilindro de poco diámetro templado en agua caliente.

Temple en agua

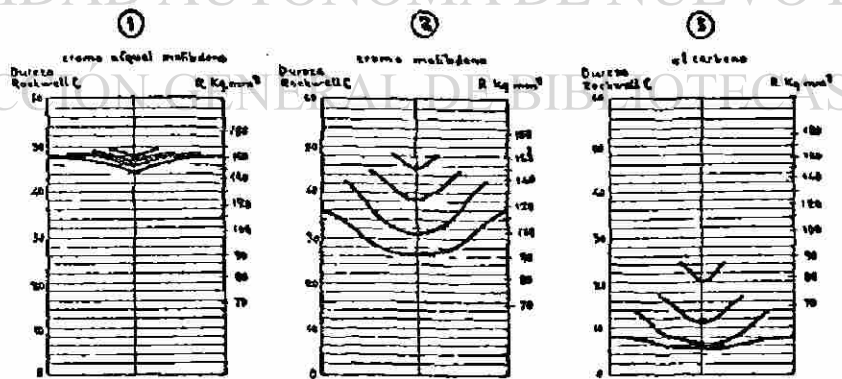


Barros de 25, 50, 75 y 100 mm de diámetro

Fig.

Temple en aceite

20-A



Barros de 25, 50, 75 y 100 mm de diámetro

Curvas de dureza del temple de tres aceros de 0,32% de carbono y diferente aleación.

- Acero Núm. 1. C=0,32%; Cr=0,75%; Ni=2,53%; Mo=0,52%
- Acero Núm. 2. C=0,32%; Cr=1,03%; Mo=0,22%
- Acero Núm. 3. C=0,32%; Mn=0,45%.

bien como verdaderas aleaciones hierro-níquel.

El níquel es un elemento de extraordinaria importancia en la fabricación de aceros inoxidables y resistentes a altas temperaturas, en los que además de cromo se emplean porcentajes de níquel-variables de 8 a 20%. Estos aceros son austeníticos a la temperatura ambiente y no admiten el temple.

Los aceros al níquel más utilizados son los siguientes:

1º Aceros al níquel con 2, 3 y 5%. Con 0,10 a 0,25% de carbono se utilizan para cementación, y con 0,25 a 0,40% de carbono para piezas de gran resistencia.

2º Aceros cromo-níquel y cromo níquel-molibdeno con porcentajes de níquel variables desde 1 a 5% ; carbono (0,10 a 0,22%) para cementación y de 0,25 a 0,40% para piezas de gran resistencia.

3º Aceros de media aleación níquel molibdeno y níquel manganeso. Con porcentajes de carbono variables de 0,25 a 0,40%.

4º Aceros inoxidables y resistentes al calor cromo-níqueles, con 8 a 25% de níquel que son de estructura austenítica.®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Cromo:

Lo mismo que el níquel, es uno de los elementos especiales más empleados para la fabricación de aceros aleados, usándose indistintamente en los aceros de construcción, en los de herramientas, en los inoxidables y en los de resistencia en caliente. Se emplea en cantidades diversas desde 0,30 a 30%, según los casos, y sirve para aumentar la dureza y la resistencia a la tracción de los aceros, mejora la templabilidad, impide las deformaciones en el tem

ple, aumenta la resistencia al desgaste, la inoxidableidad.

Los aceros con cromo de mayor utilidad son:

1º Aceros de construcción de gran resistencia mecánica -- con 0,50 a 1,50% de cromo y 0,30 a 0,45% de carbono, aleados según los casos, con níquel y molibdeno para piezas de gran espesor, con resistencias variables de 70 a 150 Kg/mm<sup>2</sup>.

2º Aceros de cementación con 0,50 a 1,50% de cromo y con níquel y molibdeno.

3º Aceros de nitruración cromo-aluminio-molibdeno.

4º Aceros para muelles cromo-vanadio y cromo-silicio.

5º Aceros inoxidables martensíticos con 12 y 17% de cromo, aceros austeníticos con 14 a 25% de cromo.

El cromo se disuelve en la ferrita y muestra una fuerte tendencia a formar carburos de cromo y carburos complejos. En los aceros aleados con cromo suelen aparecer los siguientes carburos:



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Molibdeno:

Este elemento mejora notablemente la resistencia a la tracción, la templabilidad y la resistencia al creep de los aceros. -- Añadiendo sólo pequeñas cantidades de molibdeno a los aceros cromo-níqueles, se disminuye o elimina casi completamente la fragilidad - Krupp, que se presenta cuando estos aceros son revenidos en la zona de 450° a 550°.

El molibdeno se disuelve en la ferrita, pero tiene una --

fuerte tendencia a formar carburos. Es un potente estabilizador de los carburos complejos y tiende a retardar el ablandamiento de los aceros, durante el revenido.<sup>2</sup> Para ablandar estos aceros, es necesario emplear temperaturas de revenido más elevadas que las usadas normalmente para los aceros sin molibdeno.

Los aceros al molibdeno más utilizados son:

1º Aceros manganeso-molibdeno, cromo-molibdeno y cromo-níquel-molibdeno.

Wolframio (tungsteno):

El wolframio es un elemento muy utilizado para la fabricación de aceros de herramientas, empleándose en especial en los aceros rápidos, aceros para herramientas de corte y aceros para trabajos en caliente. Sirve para mantener la dureza de los aceros a elevada temperatura y evitan que se desafilen o ablanden las herramientas, aunque lleguen a calentarse a 500° ó 600°. También se usa para la fabricación de aceros para imanes.

El wolframio se disuelve ligeramente en la ferrita y tiene una gran tendencia a formar carburos. Los carburos de wolframio tienen gran estabilidad.

Los aceros de wolframio más utilizados son:

1º Los aceros rápidos son 18% de wolframio y cantidades variables de cromo, vanadio y molibdeno y 0,70% aproximadamente de carbono.

2º Aceros para trabajos en caliente con 9 a 15% de wolfra-

mio y 0,30 a 0,40% de carbono.

3º Aceros para la fabricación de herramientas varias con -  
1 a 14% de wolframio.

#### Vanadio:

Se emplea principalmente para la fabricación de aceros de herramientas, tiende a afinar el grano ya disminuir la templabilidad. Es un elemento desoxidante muy fuerte y tiene una gran tendencia a formar carburos.

Al añadirse al acero, forma partículas finísimas de carburo de vanadio,  $V_4C_3$ , que queda repartido en toda la masa, y esos carburos actúan de núcleos de cristalización durante la solidificación, produciendo estructuras de grano fino. Las partículas de carburo impiden el crecimiento de grano cuando el acero es calentado por encima de la zona de tratamiento, evitando el sobrecalentamiento del acero aunque los tratamientos se realicen a temperaturas un poco demasiado elevadas. Una pequeña parte del vanadio que se añade al acero, se disuelve en la ferrita a la que endurece sin disminuir su tenacidad.

Los aceros con vanadio más utilizados son:

1º Aceros rápidos que suelen contener de 0,50 a 1% de vanadio.

2º Aceros de herramientas de diversas clases. Para troqueles indeformables, etc..

#### Manganeso:

El manganeso aparece prácticamente en todos los aceros, de



bido, principalmente, a que se añade como elemento de adición para neutralizar la perniciosa influencia de azufre y del oxígeno, que -- siempre suelen contener los aceros cuando se encuentran en estado líquido en los hornos durante el proceso de fabricación.

Los aceros ordinarios y los aceros aleados en los que el manganeso no es elemento fundamental, suelen contener generalmente porcentajes de manganeso variables de 0,30 a 0,80%.

En ciertos aceros, el manganeso se suele emplear también como elemento de aleación para aprovechar la influencia beneficiosa que ejerce en las propiedades de los aceros. Al aumentar de 0,60 a 1,60% aproximadamente el porcentaje de manganeso en los aceros, se aumenta ligeramente su resistencia, se mejora su templabilidad, siendo interesante destacar que el manganeso, que es un elemento de aleación relativamente barato, es el que tiene una influencia más intensa en la templabilidad, ligeramente superior a la del molibdeno. Experimentalmente se puede ver que es posible templar en aceite, perfiles que con menor porcentaje de manganeso no templarían, siendo el elemento más barato que puede emplearse para mejorar la templabilidad de los aceros. Sin embargo, su uso no está muy extendido con ese fin porque se ha visto experimentalmente que los aceros en los que se emplea ese elemento en cantidades importantes para mejorar la templabilidad, se agrietan a veces con más facilidad que otras clases de aceros aleados.

Empleando el manganeso en porcentajes superiores a 11%, hace austenítico al acero. Esto quiere decir que si un acero de más -

de 11% de manganeso después de ser calentado a  $1.100^{\circ}$ , por ejemplo, es enfriado al agua, la austenita formada a alta temperatura no se transforma en otros constituyentes. Por esa circunstancia, los aceros austeníticos no pueden ser templados y sus propiedades son muy diferentes a las de los aceros ordinarios.

Los aceros al manganeso de uso más frecuente son:

1º Aceros al manganeso de gran resistencia, que generalmente pertenecen al grupo de aceros de media aleación, con manganeso en cantidades variables de 0,80 a 1,60%, y carbono de 0,30 a 0,50%.

2º Aceros indeformables al manganeso con 1 a 3% de Mn y 1%.

3º Aceros austeníticos al manganeso con 12% de Mn y 1% de carbono.

#### Silicio:

Este elemento aparece en todos los aceros. Es un desoxidante más enérgico que el manganeso y se emplea como elemento desoxidante complementario del manganeso con objeto de evitar que aparezcan en el acero poros y otros defectos internos.

#### DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Se emplean aceros de 1 a 4,50% de silicio y bajo porcentaje de carbono para la fabricación de chapa magnética, ya que esos aceros, en presencia de campos magnéticos variables, dan lugar sólo a pérdidas magnéticas muy pequeñas, debido en parte a que el silicio aumenta mucho su resistividad.

El silicio se disuelve en la ferrita y normalmente no forma carburos; favorece la grafitización del carbono. Mejora ligeramente

acero para desoxidarlo y afinar el grano.

#### Titanio:

Se suelen añadir pequeñas cantidades de titanio a algunos aceros muy especiales para desoxidar y afinar el grano. El titanio tiene gran tendencia a formar carburos y a combinarse con el nitrógeno. En los aceros inoxidable cromo-níqueles, actúa como estabilizador de los carburos y evita la corrosión.

#### Cobre:

El cobre se suele emplear para mejorar la resistencia a la corrosión de ciertos aceros de 0,15 a 0,30% de carbono, que se usan para grandes construcciones metálicas. Se suelen emplear contenidos en cobre variables de 0,40 a 0,50%.

#### Boro:

El boro es un elemento de aleación que ha comenzado a ser empleado muy recientemente. Experimentalmente se ha visto que cantidades pequeñísimas de boro del orden 0,001 a 0,006%, mejoran notablemente la templabilidad, siendo en este aspecto el más efectivo de los elementos aleados y el de mayor poder templante de todos. -- Su eficacia para mejorar la templabilidad es extraordinaria, y para 0,40% de carbono puede decirse que su efecto es, aproximadamente, -- unas 50 veces mayor que el del molibdeno, unas 75 veces mayor que el del cromo, 150 veces mayor que el del manganeso y unas 400 veces mayor que el del níquel.

