

## Ebullición

Si se calienta un cuerpo líquido, en primer lugar se eleva su temperatura hasta alcanzar un nivel en que permanece constante. El líquido comienza entonces a hervir. A partir de este momento, todo el calor que se suministra al líquido sirve únicamente para mantener la ebullición. La temperatura a la cual comienza a hervir un líquido se llama punto de ebullición, que es distinto para cada líquido, y depende además de su presión. Aumentando la presión, para lo cual el líquido deberá calentarse en un recipiente cerrado, la temperatura de ebullición se hace más elevada. Si se enfría, el vapor se transforma de nuevo en líquido, y a este fenómeno se le llama condensación. Si la condensación de un vapor se realiza en un recipiente cerrado, desciende entonces la presión. Para transformar un kilogramo de agua a 100 °C en vapor se necesitan 536 calorías. Este calor sirve para vencer la fuerza de cohesión de las moléculas y producir un aumento de su volumen.

Se denomina calor de vaporización, inversamente, a un kilogramo de vapor de agua que, al condensarse, desprende la misma cantidad de calor, el cual recibe entonces el nombre de calor de condensación.

## Evaporación

El tránsito de un líquido al estado gaseoso tiene también lugar a una temperatura inferior a la del punto de ebullición del líquido. Este fenómeno se llama evaporación. La evaporación de un líquido se acelera si se eleva la temperatura y por el roce del aire sobre la superficie del mismo. La velocidad de evaporación depende de las características del líquido; por ejemplo, el éter y la gasolina se evaporan mucho antes que el agua. Puesto que la evaporación, lo mismo que la ebullición, necesita una cantidad de calor relativamente elevada, la cual toma de los cuerpos o medios que rodean el líquido. El fenómeno inverso determinará un enfriamiento.

El paso del estado sólido al gaseoso, debido a una gran cantidad de calor, se denomina sublimación; no obstante, el paso del estado gaseoso al sólido, directamente, también se llama sublimación.

## Clasificación de los elementos

Ordenados todos los elementos en orden creciente por sus pesos atómicos (peso del átomo de un elemento comparado con el del átomo de oxígeno), se observa que sus semejanzas en el comportamiento químico y propiedades físicas se repiten periódicamente, de modo que los elementos se pueden reunir en varios grupos. Todos los elementos situados en cualesquiera de los grupos tienen marcadas semejanzas entre sí.

### Metales

Poseen un brillo característico, son buenos conductores del calor y la electricidad, ofrecen una elevada resistencia mecánica, gran plasticidad y se combinan con el oxígeno formando óxidos. Los metales se pueden dividir en dos grupos: el A y el B. El grupo A es considerado como el de los verdaderos metales y comprende los alcalíneos (litio, potasio, cesio, sodio y rubidio), los alcalíneos térreos (berilio, magnesio, calcio, estroncio y bario), los metales de transición (escandio, titanio, vanadio, cromo, manganeso, hierro, cobalto, níquel, itrio, circonio, niobio, molibdeno, tecnecio, rubidio, rodio, paladio, tántalo, wolframio, renio, osmio, iridio, platino, radio, actinio, torio, proactinio y uranio) y el grupo del cobre (cobre, plata y oro). Las características de estos metales son que su enlace es sólo metálico, es decir, no tienen otro tipo de enlace. Por eso sus características metálicas son más acentuadas que en los del grupo B.

El grupo B está formado por aluminio, cinc, cadmio, mercurio, plomo, bismuto, silicio, galio, indio, germanio, estaño, arsénico, antimonio, selenio y telurio. Estos metales se caracterizan porque sus átomos no tienen un enlace exclusivamente metálico, pues en ellos intervienen enlaces homopolares.

### Metaloides o no metales

No poseen el brillo de los metales, son malos conductores de la electricidad y el calor y se combinan con el oxígeno dando anhídridos que, a su vez, reaccionan con el agua dando ácidos. Los más importantes son: boro, carbono, azufre, silicio, fósforo, oxígeno, nitrógeno y cloro.

### Metales

#### Gases nobles

Son elementos químicos que no reaccionan químicamente en condiciones normales, cuya aplicación conocida es en la fabricación de lámparas de descarga gaseosa. Son gases nobles: helio, neón, argón, xenón, radón y criptón.

### LOS METALES

Los metales poseen propiedades mecánicas y físicas características, tales como la ductilidad, la tenacidad, la resistencia a la tracción, etc., que los hacen adecuados para la fabricación de piezas mecánicas. El color que presentan es generalmente el blanco argentino brillante, a excepción del oro y el cobre que son amarillos rojizo, respectivamente. Todos, excepto el mercurio, son sólidos a temperatura ambiente, siendo el mercurio el único líquido. En estado sólido, el enlace metálico es el responsable del color y la electricidad.

#### Estructura de los metales

Se llama estructura metálica a la disposición ordenada de los constituyentes del metal (átomos, moléculas). La estructura metálica determina el comportamiento mecánico y físico del metal.



mayor parte de los metales cristalizan en las redes siguientes: cúbica centrada, cúbica centrada en las caras y hexagonal compacta.

### Estructura granular

En ésta, el elemento fundamental es el grano, constituido por agrupación de cristales. Los granos tienen gran importancia en las propiedades mecánicas de los metales. Los granos son de forma irregular y su tamaño oscila entre 0,02 y 0,2 mm, lo cual depende, principalmente:

- Del proceso de fabricación del metal.
- De los procesos térmicos a que se haya sometido el metal. A mayor temperatura, mayor es el grano de que está constituido un metal, y peores son, en general, sus propiedades mecánicas. Esto es debido a que los metales de interés técnico contienen siempre cierta cantidad de impurezas insolubles formadas por óxidos, sulfuros, silicatos, etc. Estas impurezas se concentran formando verdaderas capas que envuelven los granos y los separan unos de otros. Para una misma proporción de impurezas, resultan capas más delgadas cuanto más pequeños son los granos, ya que su superficie total es mayor que si los granos son grandes. Además, si las capas son muy delgadas, son en general discontinuas, quedando los granos bien unidos por las discontinuidades.

### Influencia de la estructura

Las propiedades de un metal varían según sea el tamaño de sus granos o cristales. Cuanto

más pequeños sean éstos, tanto más duro y resistente será el metal. Por el contrario, cuanto más grandes sean los granos, tanto más frágil y menos resistente será. El número de granos y su tamaño dependen del proceso de fabricación del metal y de los procesos térmicos a que se haya sometido.

### Curvas de enfriamiento

El estudio de las transformaciones experimentadas por un metal al pasar de un estado a otro se realiza con gran precisión, utilizando las curvas de enfriamiento. Estas curvas son la representación gráfica del proceso de enfriamiento, en función del tiempo, hasta que el metal se solidifica. En los metales puros se pueden representar tres clases de curvas (Fig. 9).

La curva 1 muestra el caso ideal teórico. La solidificación empieza en B y termina totalmente en C. La temperatura de solidificación, « $t_s$ », permanece constante entre B y C y corresponde a un tiempo « $bc$ ». La curva CD es el enfriamiento del metal solidificado.

La curva 2 muestra el enfriamiento de un metal que no experimenta cambio de estado.

La curva 3 es un ejemplo de las curvas que resultan en la práctica, las cuales presentan ciertas irregularidades debidas a fenómenos de sobreenfriamiento que tienen lugar antes de iniciarse la solidificación.

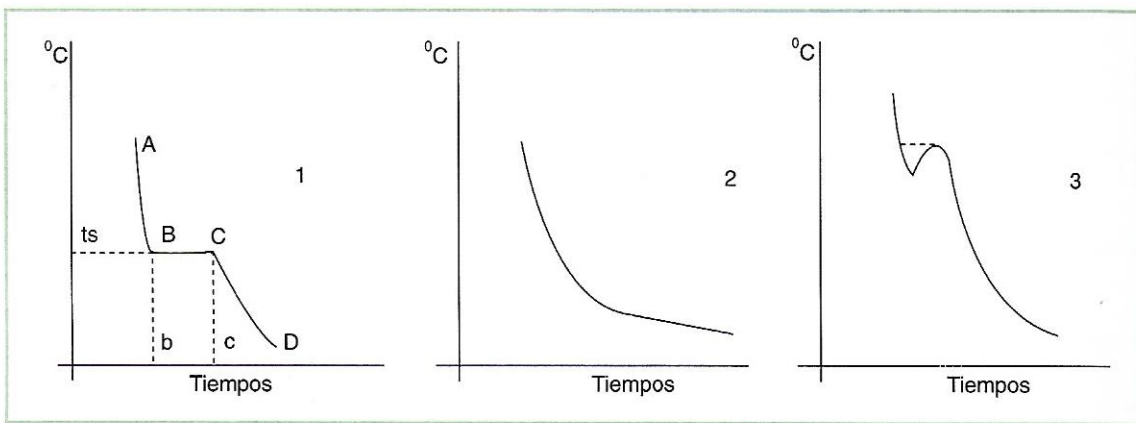


Fig. 9. Curvas de enfriamiento de metales puros.

tanto más duro y res-  
 r el contrario, cuanto  
 os, tanto más frágil y  
 número de granos y su  
 proceso de fabricación  
 os térmicos a que se

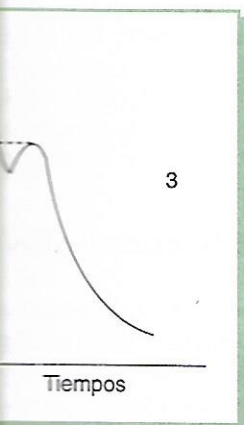
to

transformaciones experi-  
 pasar de un estado a  
 ecisión, utilizando las  
 estas curvas son la re-  
 proceso de enfriamien-  
 hasta que el metal se  
 puros se pueden re-  
 rvas (Fig. 9).

el caso ideal teóri-  
 pieza en B y termi-  
 temperatura de soli-  
 ece constante entre  
 un tiempo «bc». La  
 ento del metal soli-

el enfriamiento de  
 rimenta cambio de

emploto de las curvas  
 ica, las cuales pre-  
 dades debidas a fe-  
 amiento que tienen  
 la solidificación.



## Metales con cambios alotrópicos

Existen metales que pueden experimentar cambios alotrópicos, es decir, cambios de estructura a determinadas temperaturas llamadas puntos críticos. En estos casos, a la curva de enfriamiento básica deben añadirse otras curvas, que representan dichas variaciones de temperatura. Estos cambios son reversibles y a cada variedad alotrópica se la designa con las letras griegas  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , etc. (Fig. 10). Así, por ejemplo, en el caso del hierro puede verse que se solidifica a los 1.536 °C en forma de hierro delta (Fe- $\delta$ ) y, al seguir enfriándose, se transforma en hierro gamma (Fe- $\gamma$ ) a los 1.392 °C, en hierro alfa no magnético (Fe- $\alpha$ ) a los 911 °C y en hierro alfa magnético a los 769 °C.

## Propiedades de los metales

De todas las características de los metales, se deben tener en cuenta aquéllas de las cuales depende su utilidad en la industria metalúrgica. Dichas características son unas veces cualidades, otras veces defectos y, en algunos casos, sólo constantes físicas. Se pueden clasificar en varios grupos según sus propiedades físicas, químicas, tecnológicas y mecánicas.

### Físicas

Dentro de este grupo se reúnen las propiedades primarias o básicas de la materia con otras que son consecuencia de fenómenos motivados por agentes físicos exteriores. Las más importantes son:

**Extensión.**—Propiedad de ocupar espacio. Este espacio ocupado se llama volumen.

**Impenetrabilidad.**—Propiedad que tienen los cuerpos de no poder ser ocupado su espacio, simultáneamente, por otro cuerpo. La impenetrabilidad se debe a la sustancia que llena su volumen, llamada masa.

**Gravidez.**—Todos los cuerpos están sometidos a la acción de la gravedad, por tanto son pesados. Se denomina peso específico el peso de la unidad de volumen de un cuerpo. Comparando los metales se ve que, a igualdad de volumen, unos pesan más que otros, como si su masa fuera más compacta.

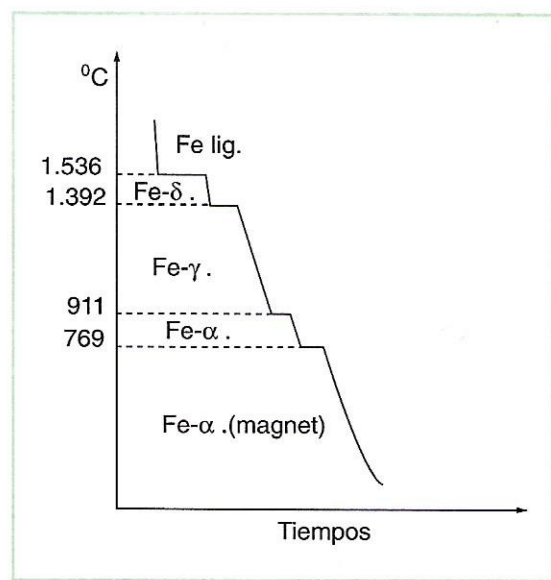


Fig. 10. Curva de enfriamiento del hierro puro.

**Calor específico.**—Es la cantidad de calor necesario para aumentar la temperatura de la unidad de masa de un cuerpo desde 0 °C hasta 1 °C. Se expresa en calorías gramo y es muy elevado en los metales. Su valor tiene gran importancia porque permite conocer la cantidad de calor que se necesita suministrar a una masa de metal para elevar su temperatura hasta la de transformación o de fusión.

**Calor latente de fusión.**—Es la cantidad de calor que absorbe la unidad de masa de un metal al pasar del estado sólido al líquido. Se expresa en calorías gramo.

**Conductividad calorífica.**—Propiedad de los metales que les permite transmitir el calor a través de su masa. El coeficiente de conductividad térmica es la cantidad de calor, en calorías, capaz de atravesar en un segundo y perpendicularmente una placa metálica de 1 cm<sup>2</sup> de superficie y 1 cm de espesor, siendo la diferencia entre las caras de la placa de un grado.

**Dilatación.**—Aumento de volumen que experimentan los cuerpos al aumentar su temperatura. Esta propiedad se suele expresar por el aumento unitario de longitud que sufre el metal al elevarse en un grado su temperatura, llamado coeficiente de dilatación lineal.

**Conductividad eléctrica.**—Propiedad casi exclusiva de los metales, y consiste en la facilidad que poseen de transmitir la corriente eléctrica a través de su masa. La inversa de la

conductividad es la resistividad eléctrica, o sea, la resistencia que oponen al paso de los electrones.

### Químicas

Las dos propiedades más importantes desde el punto de vista químico, y de mayor importancia para nosotros, se refieren a la resistencia que oponen los materiales frente a las acciones químicas y atmosféricas, es decir, a la oxidación y la corrosión.

**Oxidación.**—Efecto producido por el oxígeno en la superficie del metal y se acentúa al aumentar la temperatura. La oxidación directa, sin intervención del calor, aparece en casi todos los metales por dos causas: por la acción del oxígeno en estado atómico (naciente o disociado), que siempre existe en la atmósfera, y por la menor estabilidad de los átomos superficiales del metal, que están enlazados menos energicamente que los del interior, aunque es una oxidación muy débil. Ahora bien, si la temperatura se eleva, la oxidación puede incrementarse por un fenómeno de doble difusión. Por una parte, los átomos de oxígeno exteriores pasan a través de la capa de óxido y atacan el interior del metal; por otra, los átomos del metal se difunden a través de la capa de óxido y son atacados al llegar a la superficie. La película de óxido aumenta por sus dos caras: la exterior y la interior. A medida que aumenta el espesor de la película, aumenta también la dificultad de difusión, hasta que al llegar a un determinado grueso se detiene y, por tanto, cesa también la oxidación. El espesor de óxido necesario para que se produzca una acción protectora, depende y varía mucho no sólo de la naturaleza del metal, sino también de la temperatura a que se encuentre. Se podría pensar que este proceso se detendrá, pero no sucede así, pues, por la diferencia existente entre el coeficiente de dilatación de la capa de óxido y la del resto del metal, aquélla acaba por agrietarse y por las grietas progresa la oxidación e incluso, cuando la capa alcanza cierto espesor, llega a desprenderse en forma de cascarilla, quedando así el metal expuesto nuevamente a toda la intensidad de la oxidación. En resumen, no existe ningún metal que resista la oxidación a cualquier temperatura. Pero puede afirmarse que

todos los metales resisten la oxidación hasta cierta temperatura, por debajo de la cual las películas de óxido que se forman son suficientemente impermeables para impedir la difusión a la temperatura en que se hallan y suficientemente finas para mantenerse adheridas al metal sin sufrir fisuras.

**Corrosión.**—Es el deterioro lento y progresivo de un metal por un agente exterior. La corrosión atmosférica es la producida por el efecto combinado del oxígeno del aire y la humedad. Pero se da también la corrosión química, producida por los ácidos y los álcalis. Como la atmósfera es siempre húmeda a la temperatura ambiente, los metales se destruyen más por corrosión que por oxidación. La primera causa pérdidas enormes y desgracias incalculables, y son numerosos los accidentes producidos por la rotura de piezas debilitadas por ambas.

### Tecnológicas

Son las relativas al grado de adaptación del material frente a distintos procesos de trabajo a los que puede estar sometido. Las más importantes son:

**Maquinabilidad.**—Mayor o menor facilidad al labrado por herramientas o cuchillas de corte.

**Colabilidad.**—Mayor o menor facilidad a llenar bien un molde cuando está en estado líquido.

**Soldabilidad.**—Posibilidad de ser soldado por soldadura autógena o de baja temperatura.

**Ductilidad.**—Aptitud para la deformación de un metal en forma de hilo.

**Maleabilidad.**—Capacidad de un metal para ser deformado en láminas.

**Templabilidad.**—Aptitud que tienen los cuerpos para dejarse penetrar por el temple.

**Fusibilidad.**—Propiedad de fundirse bajo la acción del calor. La temperatura precisa para que se produzca se llama temperatura o punto de fusión, y es una constante bien definida para los metales puros.

### Mecánicas

Son aquellas que expresan el comportamiento de los metales frente a esfuerzos o cargas tendentes a alterar su forma. Tienen gran

la oxidación hasta bajo de la cual las perman son suficiente- impedir la difusión a hallan y suficiente- se adheridas al metal

rioro lento y progre- gente exterior. La co- producida por el efec- del aire y la hume- a corrosión química, los álcalis. Como la eda a la temperatura destruyen más por co- n. La primera causa cías incalculables, y ntes producidos por das por ambas.

do de adaptación del procesos de trabajo a do. Las más impor-

mayor o menor facili- tentas o cuchillas de

o menor facilidad a do está en estado lí-

idad de ser soldado de baja temperatura. para la deformación ilo.

acidad de un metal inas.

itud que tienen los etrar por el temple. ad de fundirse bajo peratura precisa para temperatura o punto te bien definida para

presan el comporta- te a esfuerzos o car- forma. Tienen gran

importancia porque son las que dan a algunos metales su superioridad sobre otros materiales en cuanto a sus aplicaciones mecánicas. Para poder establecer una clasificación de dichas propiedades, debe atenderse a la naturaleza de los esfuerzos que inciden sobre ellos. De este modo, resultan ser las siguientes:

**Resistencia.**—Capacidad de soportar una carga externa. Si el metal debe soportarla sin romperse, se denomina carga de rotura. Como la rotura de un metal puede producirse por tracción, por compresión, por torsión o por cizallamiento, habrá una resistencia a la rotura para cada uno de estos esfuerzos. La resistencia a la rotura se valora en  $\text{kg/cm}^2$  o en  $\text{kg/mm}^2$ , que es la más corriente.

**Dureza.**—Propiedad que expresa el grado de deformación permanente que sufre un metal bajo la acción directa de una carga determinada. Hay que distinguir dos clases de dureza: la física y la técnica.

La dureza física es la resistencia que opone un cuerpo a ser rayado por otro más duro. La dureza técnica es la resistencia que opone a ser penetrado por otro más duro. La dureza se valora en función de los resultados obtenidos de determinados ensayos de rayado, penetración o choque. El primer procedimiento para averiguarla se basa en la escala de Mohs, que consta de diez minerales ordenados de modo que cada uno de ellos es rayado por el que le sigue:

1. Talco.
2. Yeso.
3. Calcita.
4. Fuorita.
5. Apatito.
6. Feldespato.
7. Cuarzo.
8. Topacio.
9. Corindón.
10. Diamante.

Para determinar la dureza de un material, se empieza tratando de rayarlo con el más blando y siguientes, hasta llegar a uno con el cual sea posible. Su dureza estará comprendida entre la de éste y la del anterior en la tabla.

Sin embargo, los ensayos más importantes, por ser los que se utilizan para designar las du-

rezas, son los de penetración, en que se aplica un penetrador (bola, cono o diamante) sobre la superficie del material, con una presión y en un tiempo determinados, a fin de dejar una huella que depende de la dureza del material. Los métodos más utilizados son los de Brinell, Rockwell y Vickers.

— **Método Brinell.** Consiste en comprimir, sobre el material a ensayar, una bola de acero templado de un diámetro determinado, por medio de una carga y durante un tiempo también establecidos. Se mide el diámetro de la huella y se halla la dureza del material por la relación entre la carga citada y el área del casquete de la huella (Fig. 11), pues, evidentemente, y dentro de ciertos límites, esta área será tanto mayor cuanto menos duro sea el material. El área se puede sustituir por el diámetro, de acuerdo con el siguiente cálculo:

$$HB = P (\text{kg}) / S (\text{mm}^2)$$

La superficie del casquete de la huella será  $S$ , siendo  $S$ :

$$S = \pi \times D \times f$$

$$f = 0,5 \times [D - \sqrt{(D^2 - d^2)}]$$

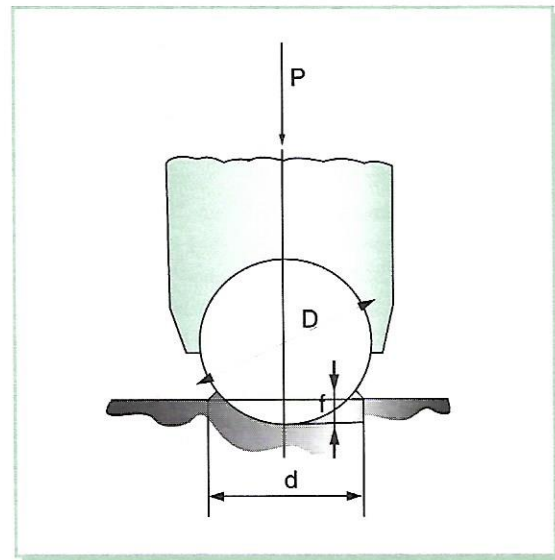


Fig. 11. Esquema de ensayo Brinell.

El método Brinell se practica perfectamente con piezas de perfil grueso de hierro o acero, pues las huellas conseguidas con ellas son claras y de contornos limpios. Sin embargo, al tratar de aplicarlo a materiales de espesores inferiores a 6 mm se encontró que, utilizando la bola de 10 mm de diámetro, se deformaba el material y los resultados obtenidos eran falsos. Para solucionar este inconveniente, se pensó en reducir la carga para que las huellas fuesen menos profundas, disminuyendo también el diámetro de la bola para que el de la huella fuese:

$$d = 0,375 D$$

siendo,  
*d* = diámetro de la huella.  
*D* = diámetro de la bola.

Respecto de las cargas, tienen que ser proporcionales al cuadrado del diámetro a fin de que las huellas resultantes sean semejantes y los valores comparables, es decir:

$$P = K \times D^2$$

El coeficiente *K* empleado depende de la clase de material, siendo mayor para los mate-

riales duros y menor para los blandos. También se emplean, aunque menos, los coeficientes 1,25 y 0,5, para metales muy blandos. Respecto del tiempo que debe durar el ensayo, oscila entre 30 segundos para el acero y 3 minutos para materiales muy blandos. De la tabla adjunta (véase tabla I), son comparables todos los ensayos realizados con cargas que utilicen el mismo coeficiente, aunque las bolas sean de diferente diámetro, o sea, los ensayos con las cargas de cada columna vertical y sus bolas correspondientes. En cambio, no darían resultados coincidentes los ensayos con la misma bola pero con cargas diferentes. La denominación de los ensayos se efectúa mediante el símbolo *HB* (*D/P/T*), en el que *D* es el diámetro de la bola, *P* la carga en kilogramos y *T* el tiempo de duración del ensayo.

— *Método Rockwell*. El método Brinell no permite medir la dureza de los aceros templados, porque con ellos se deforman las bolas. Por esto se emplea la escala Rockwell, y se basa también en la resistencia que oponen los materiales a ser penetrados, pero que determina la dureza en función de la profundidad de esta huella. Los cuerpos penetrantes son un diamante en forma de cono de 120°, con la punta redondeada con un radio de 0,2 mm (llamado penetrador Brale), y bolas de 1/8" y 1/16", y también, aunque menos empleado, de 1/2" y 1/4".

Espesor de la probeta	Diámetro de la bola en mm	Constantes de ensayo K				
		30	10	5	2,5	1,25
		Cargas en kg				
		30 D <sup>2</sup>	10 D <sup>2</sup>	5 D <sup>2</sup>	2,5 D <sup>2</sup>	1,25 D <sup>2</sup>
Superior a 6 mm.....	10	3.000	1.000	500	250	125
De 6 a 3 mm.....	5	750	250	125	62,5	31,2
Menor de 3 mm .....	2,5	187,5	62,5	31,2	15,6	7,8
	1,25	46,9	15,6	7,81	3,91	1,99
	0,625	11,7	3,91	1,953	0,977	0,488

Material	Tiempo
Hierros y aceros.....	10 a 30 segundos
Cobre, bronce y latones.....	30 »
Aleaciones ligeras.....	60 a 120 »
Estaño y plomo.....	120 »
Materiales muy blandos.....	120 »

Tabla I. Diámetro de las bolas y presiones empleadas en el ensayo Brinell.

Método  
 Se utilizan cargas  
 teriales gruesos y  
 riales delgados.  
 — Método  
 ratones y, en un  
 templados...  
 En este método  
 trante una punta  
 y ángulo en el  
 gura 12), con un  
 gundos. Este áng  
 Brinell queda  
 de la huella, que  
 aproximadament  
 que se utilizan se  
 100 y 120 kg, con  
 El tiempo para m  
 los 10 y 30 segun  
 el de 15 segun  
 minante aproxi  
 acero templado  
 tado; si la lima  
 acero es mayor  
 C); si se engancha

Fig. 12. El ángulo de  
 huella angular...

Elasticidad  
 elástico para med  
 que lo ha deform  
 la carga máxima  
 en salir una del  
 terminación de...

los blandos. También los coeficientes muy blandos. Respetar el ensayo, oscila el acero y 3 minutos. De la tabla ad-comparables todos los cargas que utilicen el de las bolas sean de di- ensayos con las car- y sus bolas corres- no darían resultados con la misma bola La denominación de ante el símbolo *HB* diámetro de la bola, *P* el tiempo de dura-

El método Brinell no de los aceros templa- deforman las bolas. a Rockwell, y se basa ue oponen los mate- ro que determina la profundidad de esta 20°, con la punta re- 0,2 mm (llamado pe- 1/8" y 1/16", y tam- eado, de 1/2" y 1/4".

Ensayo K	
2,5	1,25
2,5 D <sup>2</sup>	1,25 D <sup>2</sup>
250	125
62,5	31,2
15,6	7,8
3,91	1,99
0,977	0,488

Se utilizan cargas de 60, 100 y 150 kg para materiales gruesos y de 15, 30 y 45 kg para materiales delgados.

— **Método Vickers.** Se emplea en los laboratorios y, en particular, para piezas delgadas y templadas con espesores mínimos de 0,2 mm. En este método se utiliza como cuerpo penetrante una punta de pirámide de base cuadrada y ángulo en el vértice, entre caras de 136° (Figura 12), con una precisión obligada de 20 segundos. Este ángulo se eligió para que la bola Brinell quedase circunscrita al cono en el borde de la huella, cuyo diámetro se procura que sea aproximadamente igual a 0,375 D. Las cargas que se utilizan son de 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50 100 y 120 kg, con preferencia para el de 30 kg. El tiempo para mantener la carga oscila entre los 10 y 30 segundos, siendo el más empleado el de 15 segundos. En la práctica, puede determinarse aproximadamente la dureza de un acero templado mediante una lima en buen estado; si la lima no se engancha, la dureza del acero es mayor de 60 HRC (60 Rockwell, escala C); si se engancha, es menor de 55 HRC.

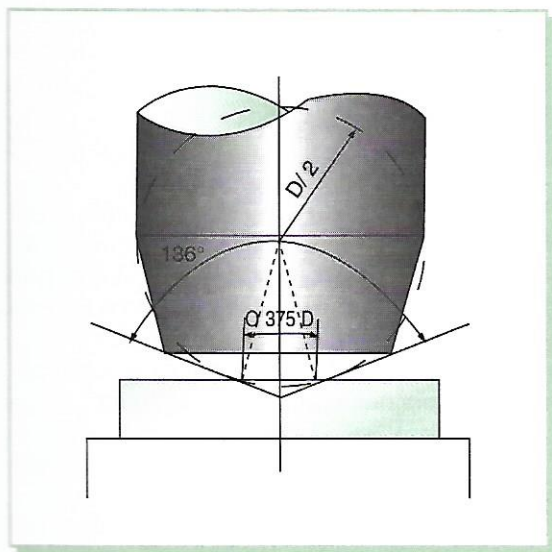


Fig. 12. El ángulo de 136° está elegido para que sea la huella tangente a la de la bola Brinell.

**Elasticidad.**—Capacidad de un cuerpo elástico para recobrar su forma al cesar la causa que lo ha deformado. Se llama límite elástico a la carga máxima que puede soportar un metal sin sufrir una deformación permanente. Su determinación tiene gran interés en el cálculo de

toda clase de elementos mecánicos, ya que se debe tener en cuenta que las piezas trabajan siempre por debajo del límite elástico. Este, normalmente, se expresa en kg/mm<sup>2</sup>.

**Plasticidad.**—Capacidad de deformación de un metal sin que llegue a romperse.

**Tenacidad.**—Resistencia a la rotura por esfuerzos que deforman el metal. La tenacidad requiere la existencia de resistencia y plasticidad.

**Fragilidad.**—Propiedad que expresa falta de plasticidad y, por tanto, de tenacidad. Los materiales frágiles se rompen en el límite elástico, es decir, su rotura se produce bruscamente al rebasar la carga el límite elástico.

**Resiliencia.**—Resistencia de un metal a su rotura por choque. En realidad, es el resultado de un ensayo (ensayo Charpy) constituido por un martillo de 22 kg, que desarrolla 30 kgm en el momento de choque (Fig. 13).

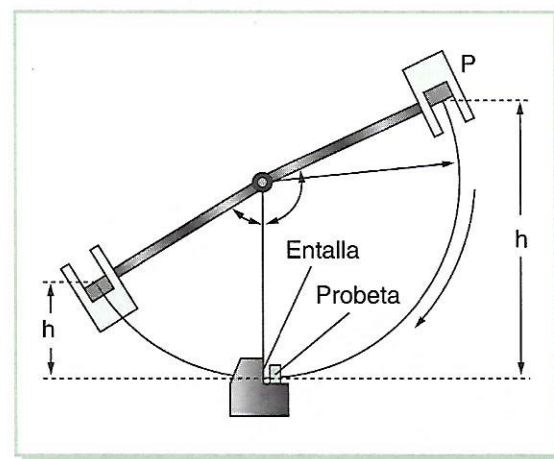


Fig. 13. Esquema de máquina para ensayos de resistencia al choque.

Su arista de choque la forman dos caras inclinadas de 30°, unidas por una curva de radio 2 mm (Fig. 14). Los valores de la resiliencia son mayores a medida que aumenta la tenacidad de un material. Los valores de resiliencia se dan en kgm/cm<sup>2</sup>.

**Fluencia.**—Propiedad que tienen algunos metales de deformarse lenta y espontáneamente bajo la acción de su propio peso o de cargas muy pequeñas. Esta deformación lenta se denomina también *creep* o *creeping* (Fig. 15).

**Fatiga.**—Si se somete una pieza a la acción de cargas periódicas (alternativas o intermitentes), se puede llegar a producir su rotura, in-



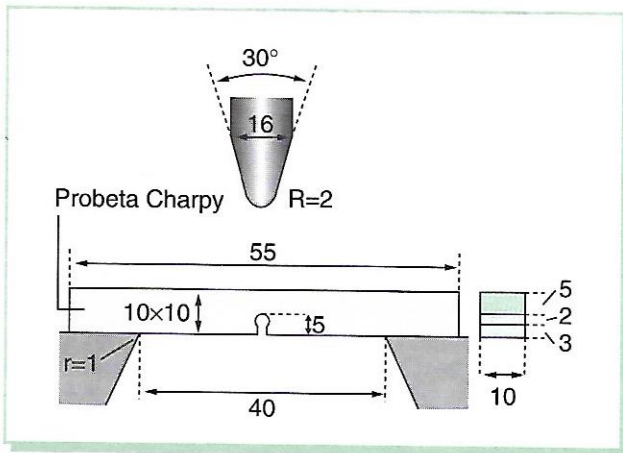


Fig. 14. Dimensiones de la cabeza del martillo, del soporte y de la probeta del ensayo Charpy.

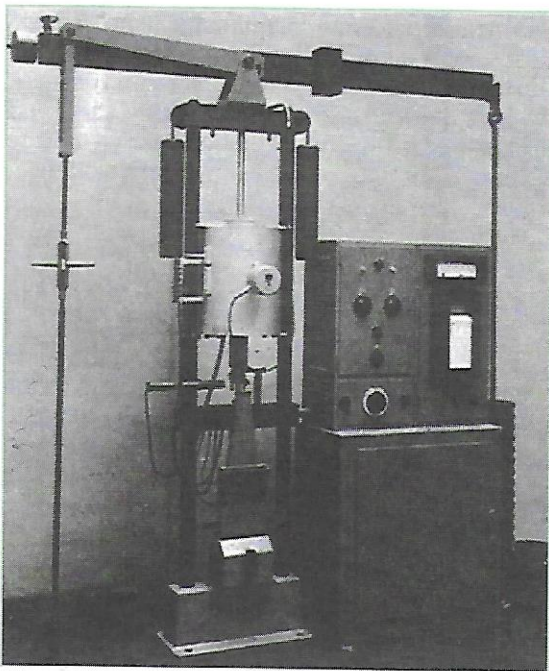


Fig. 15. Máquina Amsler para ensayos de fluencia.

cluso con cargas que, si actuasen de manera continua, no producirían deformaciones. Este efecto de desfallecimiento del metal motivado por cargas periódicas se llama fatiga.

## ALEACIONES

Se llama aleación a la unión que resulta de dos o más elementos químicos, uno de los cua-

les al menos es un metal, y que presenta carácter metálico. Los metales se alean con otros, para conseguir un conjunto de características muy difíciles de hallar en los metales puros, los cuales no tienen una utilización industrial salvo en casos muy específicos. Debido a esto, el número de aleaciones posible es elevadísimo, y su interés es excepcional. En toda aleación se pueden distinguir dos clases de componentes: el metal predominante o base, que es el que entra en mayor proporción y determina principalmente las propiedades de la misma, y los elementos aleantes, que modifican, complementan o acentúan dichas propiedades. Para obtener una aleación se funden al mismo tiempo el metal base y los aleantes, y a continuación se los deja enfriar y solidificar.

Para que dos o más elementos formen una aleación, deben reunir dos condiciones básicas:

- Todos los componentes deben ser totalmente miscibles en estado líquido para que, cuando se solidifiquen, formen un cuerpo homogéneo.
- El producto obtenido debe tener un carácter metálico.

Según el número de elementos que componen las aleaciones, éstas se llaman binarias (dos), ternarias (tres), etc. Hay aleaciones que contienen hasta seis o siete elementos (aceros rápidos con Fe, C, Co, W, Cr, V y Mo).

Considerando la naturaleza de sus componentes, se pueden clasificar como sigue:

**Aleaciones férricas.**—Las que tienen el hierro como metal predominante.

**Aleaciones no férricas.**—Aquellas cuyo metal predominante no es el hierro.

**Aleaciones pesadas.**—Contienen principalmente metales cuyo peso específico es mayor que 7, como son el hierro, cobre, níquel, plomo, etc.

**Aleaciones ligeras.**—Los metales que intervienen en ellas tienen un peso específico inferior a 7. Generalmente se llaman aleaciones ligeras las de aluminio y ultraligeras, las de magnesio.

metal, y que presenta  
 Los metales se alean  
 seguir un conjunto de  
 difíciles de hallar en  
 los cuales no tienen  
 industrial salvo en casos  
 debido a esto, el núme-  
 rable es elevadísimo, y  
 ronal. En toda alea-  
 distinguir dos clases de  
 metal predominante o  
 entra en mayor pro-  
 a principalmente las  
 isma, y los elementos  
 can, complementan  
 propiedades. Para ob-  
 se funden al mismo  
 aleantes, y a conti-  
 y solidificar.  
 elementos formen una  
 condiciones básicas:

entes deben ser to-  
 en estado líquido  
 e solidifiquen, for-  
 ogéneo.  
 do debe tener un

elementos que com-  
 se llaman binarias  
 Hay aleaciones que  
 de elementos (aceros  
 Cr, V y Mo).  
 aleza de sus compo-  
 r como sigue:

as que tienen el hie-  
 nte.

as.—Aquellas cuyo  
 el hierro.

—Contienen princi-  
 peso específico es  
 hierro, cobre, níquel,

os metales que inter-  
 peso específico infe-  
 llaman aleaciones li-  
 ligeras, las de mag-

## Constituyentes

Al solidificarse, las aleaciones dan origen a la formación de constituyentes estructurales no homogéneos, es decir, pues en ellas hay granos de distinta composición, a diferencia de los metales puros, que tienen todos los granos de igual composición. Este cambio en la estructura del metal base es debido a la influencia de los elementos aleantes. Los constituyentes estructurales formados al solidificarse las aleaciones pueden ser los siguientes:

**Granos de metales puros.**—Solidificados de forma independiente.

**Soluciones sólidas por sustitución.**—Si los átomos disueltos (aleantes) ocupan el lugar que ocupaban los átomos del metal base (Fig. 16). Si bien han de cumplir los siguientes requisitos:

— Los cristales deben cristalizar en el mismo sistema.

— La diferencia en los radios atómicos de los elementos sea inferior o igual al 15%.

— Afinidad química. Todo lo mayor que es ésta, menor es la solubilidad y la tendencia a formar soluciones sólidas.

— Si se cumplen las tres primeras condiciones, la solubilidad sólida por sustitución aumenta cuanto más próximas sean sus valencias.

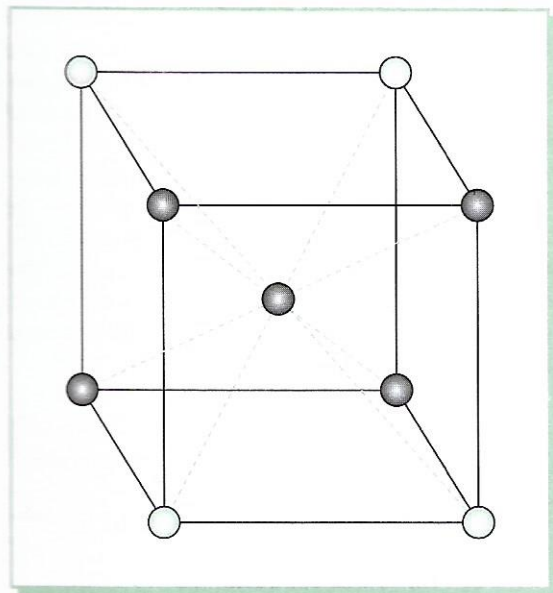


Fig. 16. Cristal de una disolución sólida por sustitución de cuatro átomos de un cristal de la red cúbica centrada.

**Soluciones sólidas por inserción.**—Cuando los átomos del elemento soluto son de diámetro muy pequeño con relación a los del disolvente, pueden formarse soluciones sólidas por inserción, en las que los átomos de soluto se insertan en los espacios interatómicos de los cristales de disolvente (Fig. 17).

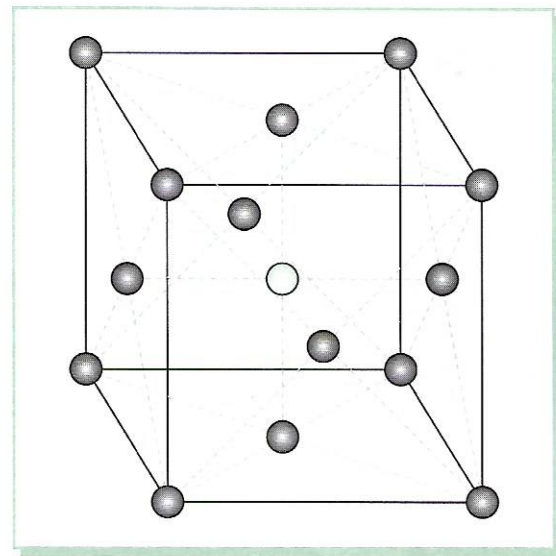


Fig. 17. Cristal de una disolución sólida por inserción de un átomo en el centro de la red cúbica centrada en las caras.

Los elementos que actúan como soluto pueden ser: hidrógeno, boro, carbono y nitrógeno. Los elementos disolventes son los de transición: Cr, Mn, Fe, Co y Ni.

**Compuestos químicos.**—Formados por proporciones determinadas y fijas de los elementos de la aleación. La heterogeneidad química en los cristales de la aleación se debe a que, así como en el estado líquido los metales y metaloides que la forman se hallan completamente disueltos unos en otros, formando un líquido homogéneo. Al solidificarse puede desaparecer total o parcialmente esta unión por separarse unos constituyentes de otros, puesto que, a medida que se va haciendo sólida la aleación, los metales y metaloides dejan de ser solubles unos en otros y dan lugar a cristales de diferente composición química. Por consiguiente, las propiedades de las aleaciones dependen, además del tamaño del grano, de los constituyentes formados al solidificarse y de la proporción o concentración en que éstos se encuentran.

## Variaciones de las propiedades de los metales con la aleación de elementos

La influencia que aportan los elementos de aleación a los metales base es muy variada. El carbono, por ejemplo, endurece el hierro; el silicio reduce el coeficiente de dilatación del aluminio; el níquel y el cromo dan resistencia a la corrosión, etc.

Cuando las aleaciones están formadas por soluciones sólidas, resulta más elevada su dureza y resistencia a la tracción que las del metal base, e inferior su plasticidad y su conductividad eléctrica y calorífica (Fig. 18).

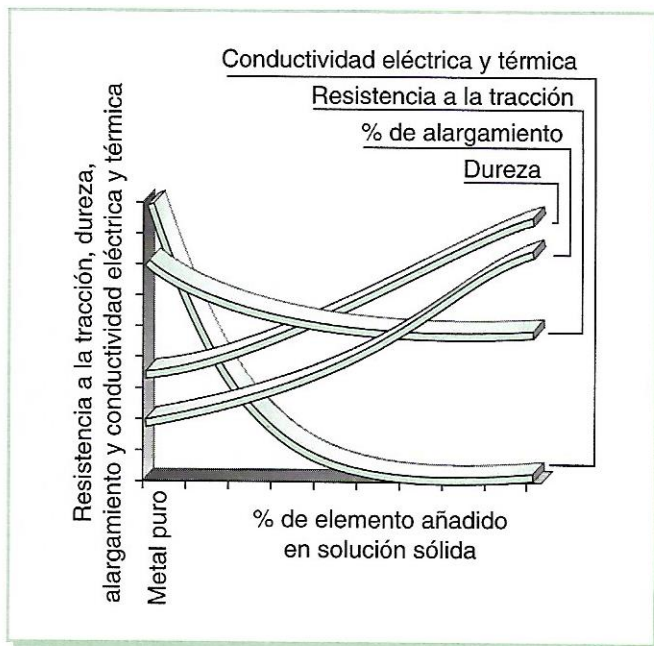


Fig. 18. Influencia de los elementos aleados en forma de solución sólida en las propiedades mecánicas de los metales base.

## Curvas de enfriamiento

Estas curvas muestran el proceso de enfriamiento, en función del tiempo, que experimentan los metales y las aleaciones en estado líquido hasta que se solidifican. Las curvas de enfriamiento (Fig. 19) de las aleaciones son distintas de las obtenidas en el caso de los metales puros, pues, aunque en éstos la temperatura de transformación permanece constante, en las aleaciones tiene lugar en un intervalo variable.

En el metal puro, la curva *AB* representa el enfriamiento del líquido, empieza a solidificar-

se en *B* y queda ya completamente sólido al llegar a *C*. La rama *CD* corresponde al enfriamiento posterior del sólido. En el caso de las aleaciones de los metales en solución, *AB* muestra el enfriamiento del líquido, cuya solidificación se inicia en el punto *B*, finaliza en el *C* y tiene lugar en el intervalo de temperaturas  $T_1$  y  $T_2$ , habiendo a la vez una fase sólida y una fase líquida (aleación líquida en presencia de cristales de solución sólida). El tramo *CD* representa el enfriamiento del sólido. Al empezar el proceso, el sólido que se forma es más rico en el elemento cuyo punto de fusión es más elevado, y al final es más rico en el que tiene el punto de fusión más bajo.

Si los metales puros y las aleaciones, al variar su temperatura en el estado sólido, experimentan cambios alotrópicos (variaciones en la estructura cristalina), ello se acusa en las curvas de enfriamiento. Si el enfriamiento no se realiza según las normas establecidas para cada metal, en el tratamiento térmico posterior puede quedar inservible o mal templado, por lo que, según sea su función, puede dar lugar a desgastes prematuros.

## Diagramas de equilibrio

El proceso de solidificación de las aleaciones se representa gráficamente mediante diagramas obtenidos con ayuda de las curvas de enfriamiento. Estos diagramas permiten conocer el estado y la estructura cristalina. El estudio de dichos diagramas es muy complejo, debido al elevado número de aleaciones factibles y a las distintas formas en que pueden realizarse. Así pues, atendiendo a la solubilidad de los metales en estado líquido y en estado sólido, es posible formar tres grupos principales:

- De sus componentes en estado líquido y completamente solubles.
- De dos componentes en estado líquido y parcialmente solubles.
- De los componentes en estado líquido y totalmente insolubles.

etamente sólido al lle-  
sponde al enfriamien-  
n el caso de las alea-  
solución, AB muestra  
o, cuya solidificación  
aliza en el C y tiene  
temperaturas  $T_1$  y  $T_2$ ,  
e sólida y una fase lí-  
n presencia de crista-  
tramo CD representa  
Al empezar el proce-  
es más rico en el ele-  
ón es más elevado, y  
que tiene el punto de  
Si los metales puros y  
variar su temperatura  
o, experimentan cam-  
variaciones en la es-  
, ello se acusa en las  
amiento. Si el enfria-  
za según las normas  
cada metal, en el tra-  
posterior puede que-  
nal templado, por lo  
u función, puede dar  
prematurados.

**Equilibrio**

de solidificación de las  
presenta gráficamente  
mas obtenidos con  
vas de enfriamiento.  
permiten conocer el  
tura cristalina. El estu-  
gramas es muy com-  
elevado número de  
es y a las distintas for-  
arse. Así pues, aten-  
los metales en estado  
o, es posible formar

en estado líquido  
ubles.  
s en estado líqui-  
ubles.  
en estado líquido  
les.

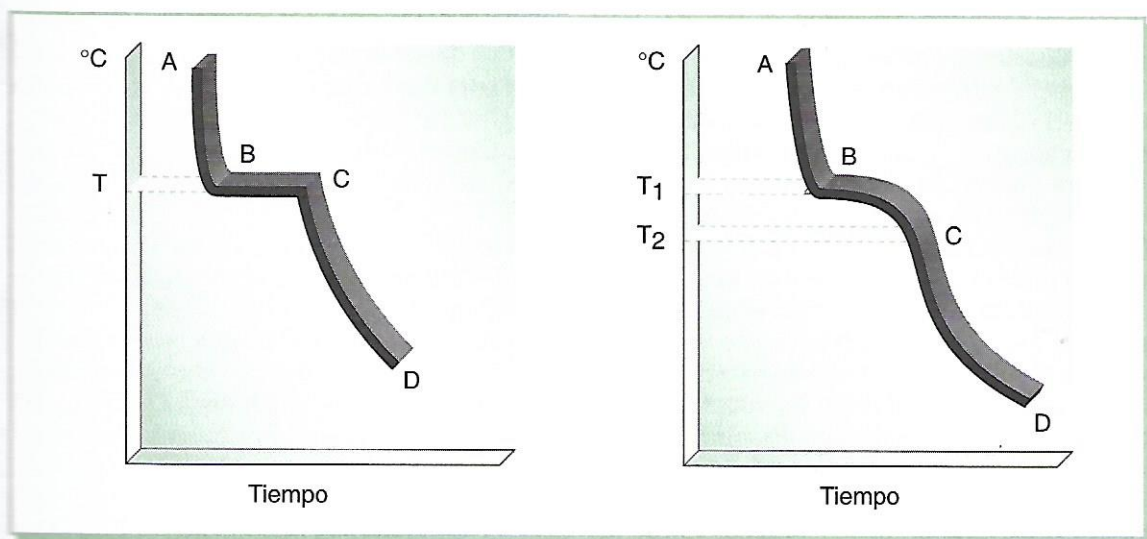


Fig. 19. 1) curva de solidificación de un metal puro, y 2) curva de solidificación de una aleación de los metales.

Los diagramas de equilibrio de la solubilidad permiten la combinación de diferentes elementos a fin de obtener distintas aleaciones que normalmente no se encuentran en la naturaleza.

**Ejemplo práctico de un diagrama-tipo**

Para comprender la forma de trazar un diagrama de equilibrio y su posterior utilidad, nos referiremos a un ejemplo sencillo (Fig. 20): la aleación de dos metales, A y B, completamente solubles en estado líquido y en estado sólido.

Primero se trazan las curvas de enfriamiento que corresponden a los metales puros A (I) y B (VI) y las cuatro intermedias (II, III, IV y V) que corresponden a cuatro aleaciones de A y B con diversos contenidos de uno y otro metal.

Trasladando, por medio de líneas de trazos, las temperaturas de transformación al sistema situado en la derecha (temperatura-porcentaje), resultan los puntos A y B, que corresponden a las temperaturas de transformación de los metales puros, y las parejas de puntos  $m_1$  y  $m_2$ ,  $n_1$  y  $n_2$ ,  $p_1$  y  $p_2$ ,  $q_1$  y  $q_2$ , que corresponden a las

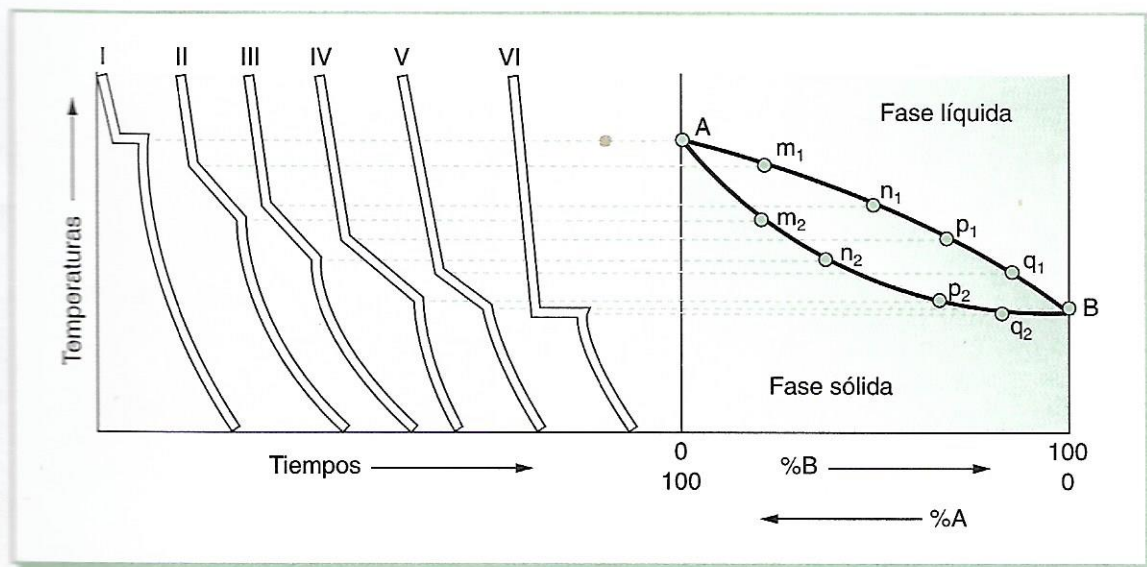


Fig. 20. Diagrama de solubilidad total en los estados sólido y líquido.

temperaturas de transformación para cada una de las aleaciones formadas.

Uniendo los puntos  $A, m_1, n_1, p_1, q_1$  y  $B$ , se obtiene la línea que indica el comienzo de la solidificación, llamada línea de «líquidus», ya que, por encima de ella, la aleación es líquida en todos los porcentajes de sus componentes. Uniendo los puntos  $A, m_2, n_2, p_2, q_2$  y  $B$ , se obtiene la línea que indica el final de la solidificación, o línea de *sólidus*, por debajo de la cual la aleación es sólida en todos los porcentajes.

Entre ambas líneas, la aleación está parcialmente sólida y parcialmente líquida. El diagrama obtenido así se puede completar trasladando y uniendo, por la llamada línea de transformación, todos los puntos en que se producen cambios de constitución en el enfriamiento de la aleación sólida, resultando en conjunto el denominado diagrama de equilibrio.

### Mezclas eutécticas

Aleaciones formadas por metales completamente solubles en estado líquido pero insolubles en estado sólido, que para una proporción fija y determinada de los elementos que las componen hay una estructura especial, denominada mezcla eutéctica, cuya composición es la del punto  $E$  (Fig. 21). La aleación eutéctica se caracteriza por:

— Estar formada por una composición fija para cada elemento.

— Solidificarse a temperatura constante.  
 — Tener la temperatura de solidificación más baja entre todas las de las aleaciones que pueden formarse con los elementos que la constituyen. Volviendo al diagrama de la figura 21, se aprecia que:

- a) La línea de *líquidus* es la  $AEB$ , por encima de la cual toda la aleación está líquida.
- b) La línea de *sólidus* es la  $MEN$ , y por debajo de ella toda la aleación está sólida.
- c) En la zona comprendida entre  $AE$  y  $ME$  hay cristales del metal  $A$  y aleación líquida.
- d) En la zona comprendida entre  $EB$  y  $EN$  se hallan cristales del metal  $B$  y aleación líquida.
- e) Debajo de la línea de *sólidus*  $MEN$  hay dos zonas que corresponden a las siguientes aleaciones: hipoeutécticas, formadas por el metal puro  $A$  y la eutéctica, e hipereutécticas, formadas por el metal puro  $B$  y la eutéctica.

### Otros diagramas-tipo

Con el fin de completar la información sobre los diagramas de equilibrio de las aleaciones, se representan aquí cuatro ejemplos de los casos considerados como más importantes (Fig. 22):

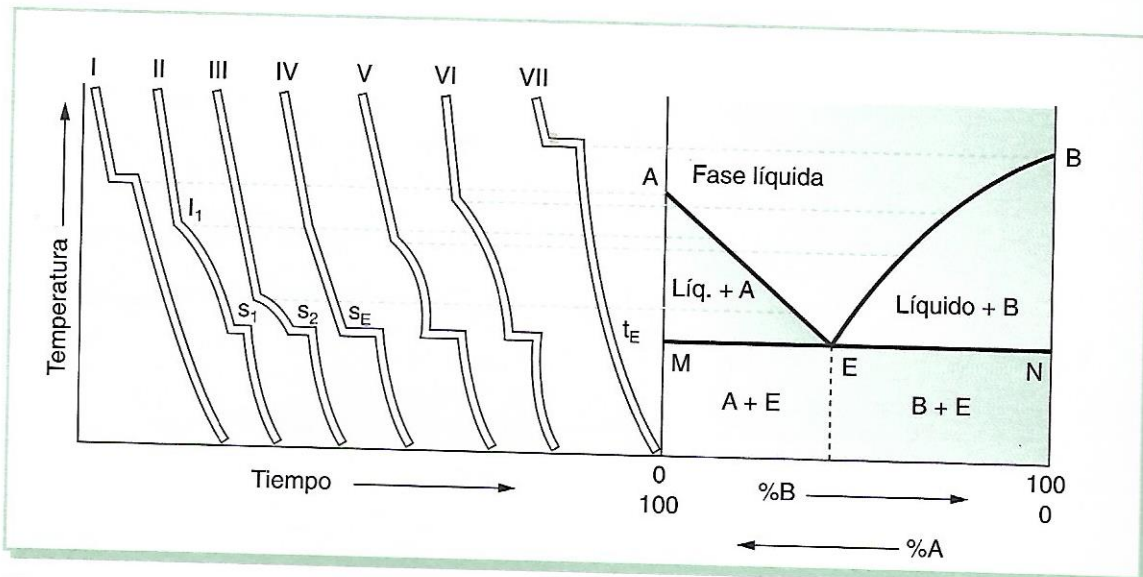


Fig. 21. Diagrama de insolubilidad total en estado sólido.

a temperatura constante.  
 Temperatura de solidificación  
 las de las aleaciones que  
 en los elementos que la  
 al diagrama de la figu-

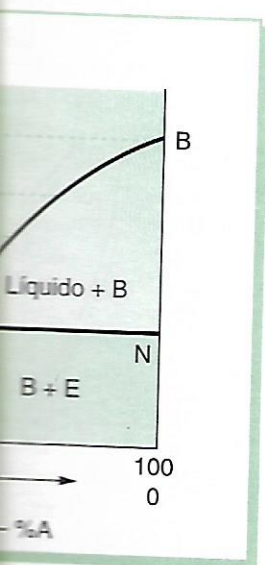
idus es la AEB, por enci-  
 toda la aleación está lí-

idus es la MEN, y por de-  
 la aleación está sólida.  
 comprendida entre AE y ME  
 el metal A y aleación lí-

comprendida entre EB y EN  
 ales del metal B y alea-

nea de sólidos MEN hay  
 corresponden a las si-  
 ones: hipoeutécticas, for-  
 metal puro A y la eutécti-  
 cticas, formadas por el  
 la eutéctica.

o  
 completar la información  
 equilibrio de las alea-  
 qué cuatro ejemplos de  
 como más importantes



1. Corresponde a las aleaciones formadas por metales completamente solubles en estado líquido y parcialmente solubles en estado sólido. Resulta muy semejante al anterior (solidificación eutéctica).

2. Pertenece al mismo caso anterior, pero solidificando con un punto de transición o peritético. La isoterma DHC se llama peritética.

3. Corresponde a aleaciones que forman compuestos intermetálicos. En el caso representado, viene dado por C.

4. Este diagrama muestra las transformaciones correspondientes a dos componentes

que forman una solución sólida y en que cada uno de ellos presenta dos estados alotrópicos, siendo nula la solubilidad después de la transformación.

PRODUCTOS SIDERURGICOS

Se denominan así las sustancias férricas que han sufrido un proceso metalúrgico. Se clasifican en hierros, fundiciones, aceros, ferroaleaciones, aleaciones férricas especiales y congl-

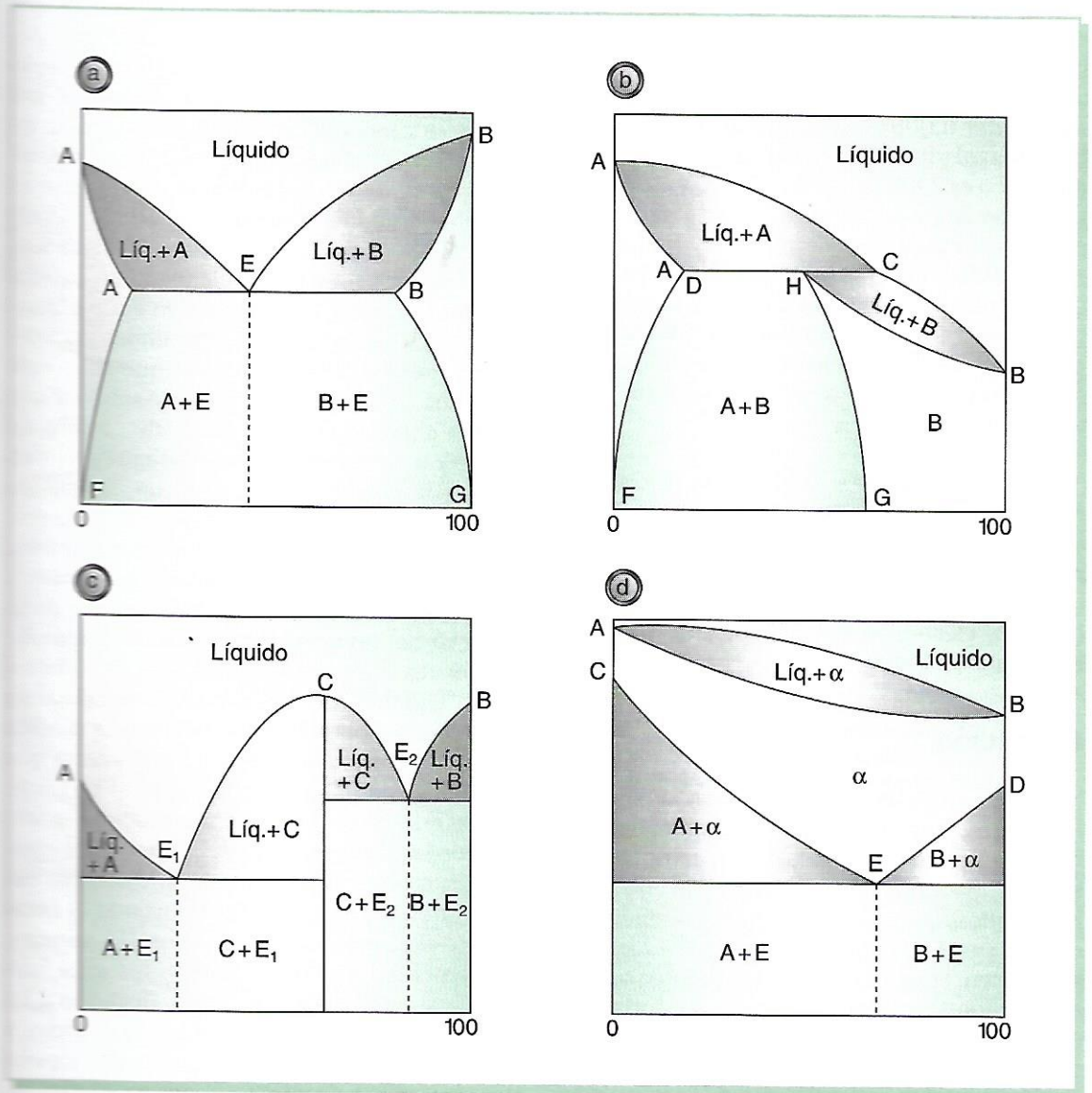


Fig. 22. Ejemplo de diagramas-tipo.

merados féreos. El carbono forma parte de los productos metalúrgicos en la proporción siguiente:

Hierro dulce.....	hasta 0,03% C
Aceros.....	0,03% a 1,76% C
Fundiciones .....	1,76% a 6,67% C

### Hierro. Propiedades

Con la palabra «hierro» se designa al elemento químico de este nombre y ciertos productos siderúrgicos que sólo como impurezas pueden entrar a formar parte de otros elementos. El hierro técnicamente puro, es decir, con menos del 0,008% de carbono, es un metal blanco azulado, dúctil y maleable, cuyo peso específico es 7,87. Funde a 1.536 °C y 1.539 °C, reblandeciéndose antes de llegar a esta temperatura, lo cual permite forjarlo y moldearlo con facilidad. La temperatura de fusión es baja cuando está maleado con carbono, siendo entonces de 145 °C. Es un buen conductor del calor y la electricidad, y se imanta fácilmente. Deben tomarse en consideración las siguientes variedades:

*Hierro puro.*—Es el obtenido por algún procedimiento industrial por el cual la cantidad de impurezas es tan reducida, que puede despreciarse.

*Hierro electrolítico.*—Es el depósito originado por electrólisis selectiva de una sustancia que contenga hierro.

### Obtención

El hierro es un metal muy abundante en la naturaleza, que se encuentra combinado con otros elementos formando óxidos, carbonatos y sulfuros. Para obtener el hierro y hacerlo utilizable industrialmente, se parte de los minerales de este metal, generalmente de los óxidos, que se reducen. Los carbonatos y los sulfuros se calcinan y tuestan, respectivamente, para obtener óxidos. La reducción del oxígeno con que va combinado el hierro se efectúa mediante un agente que produzca calor, como el carbón o la electricidad.

### Alto horno

La reducción de los óxidos de hierro se realiza en los altos hornos. El producto así obtenido es hierro en estado líquido y con un alto contenido de carbono e impurezas. Se llama arrabio o fundición de primera fusión y se utiliza para elaborar aceros o para obtener piezas moldeadas después de otra fusión. El alto horno se utiliza en el procedimiento indirecto a fin de obtener el hierro en la primera operación, es decir, para reducir el óxido de hierro para la fundición como producto intermedio. El alto horno (Fig. 23) está formado por dos troncos de cono unidos por sus bases mayores. Esta zona de unión recibe el nombre de vientre. El cono inferior se llama atalaje, el superior, cuba, y la abertura superior de éste, por donde se carga el horno, tragante. La parte inferior de los atalajes es cilíndrica, en sus paredes hay varios agujeros por los que penetran las toberas de inyección de aire, y en su fondo se halla el crisol, donde se reúne el hierro fundido recubierto por la escoria, también líquida. La altura del alto horno varía de veinte a treinta metros. La operación es continua, sin interrupciones en todo el tiempo que dura una campaña. Se alimenta por la parte superior con cargas alternadas de mineral, de carbón de coque y de un fundente, cuyo objeto es formar, con las impurezas del mineral, un compuesto (fusible) que, siendo más ligero que el hierro, flota sobre él. Este fundente es piedra calcárea, «castina», cuando las impurezas son silíceas, y arena silícea, cuando son calcáreas. La parte estrecha del horno se limita hasta la región de las toberas y, a partir de ellas, se le da la forma de un embudo, de modo que va aumentando el diámetro de las distintas secciones a medida que es mayor su altura. No es conveniente que el diámetro aumente hasta llegar al tragante, de hacerlo imposibilitaría una buena repartición de las materias cargadas. A partir del vientre, disminuye gradualmente el diámetro del horno hasta el tragante, disminuyendo el frotamiento del material cargado con las paredes. La capacidad de producción de los altos hornos varía entre extensos límites, llegando a las mil toneladas en 24 horas los más grandes y consumiendo aproximadamente tantas toneladas de carbón de coque como toneladas de fundición producen.





gran superficie anular al efecto de que esté en contacto con la mayor superficie del carbón, debiendo penetrar hasta el centro del horno. El aire no debe tener mucha presión, porque en este caso el coque se quemaría rápidamente; en vez de la presión, se aumenta la cantidad, para así obtener una temperatura suficiente. El objeto del fundente empleado es el de separar las impurezas del coque y el lingote, formando una escoria muy fluida que las arrastra flotando en la fundición líquida. El producto obtenido es la fundición de segunda fusión, utilizada para fabricar piezas.

### Estructura del hierro

El caso del hierro es particularmente típico (Fig. 24), ya que presenta varias modificaciones alotrópicas de sistema cristalino diferente:

- Hierro alfa ( $\text{Fe-}\alpha$ ): cúbica centrada.
- Hierro beta ( $\text{Fe-}\beta$ ): cúbica centrada.
- Hierro gamma ( $\text{Fe-}\gamma$ ): cúbica de caras centradas.
- Hierro delta ( $\text{Fe-}\delta$ ): cúbica centrada.

Si se enfría lentamente una probeta de hierro puro, fundido, es decir en estado líquido, se observa que se solidifica a la temperatura constante de  $1.539^\circ\text{C}$ . Si la temperatura sigue descendiendo, a los  $1.390^\circ\text{C}$  hay una detención y en el descenso por producirse un cambio en la estructura de la probeta que motiva desprendimiento de calor. A los  $900^\circ\text{C}$  sucede otra detención y, finalmente, otra a una temperatura cercana a los  $750^\circ\text{C}$ .

Estas temperaturas se denominan temperaturas o puntos críticos y se representan por  $\text{Ar}_4$  ( $1.390^\circ$ ),  $\text{Ar}_3$  ( $900^\circ$ ) y  $\text{Ar}_2$  ( $750^\circ$ ). Si en lugar de enfriarse, se calienta el hierro puro desde la temperatura ambiente, se ve que se repiten las mismas anomalías, pero a temperaturas ligeramente superiores:  $\text{Ac}_2 = 780^\circ$ ,  $\text{Ac}_3 = 920^\circ$  y  $\text{Ac}_4 = 1.410^\circ$ . Los puntos críticos encontrados al enfriar son designados con la letra «A» y el subíndice «r», del francés «refroidissement» (enfriamiento), y los obtenidos al calentar con el subíndice «c», del francés «chauffage» (calentamiento). Las diferencias entre las temperaturas de calentamiento y de enfriamiento son tanto mayores cuanto mayor es la velocidad con que se desarrollan

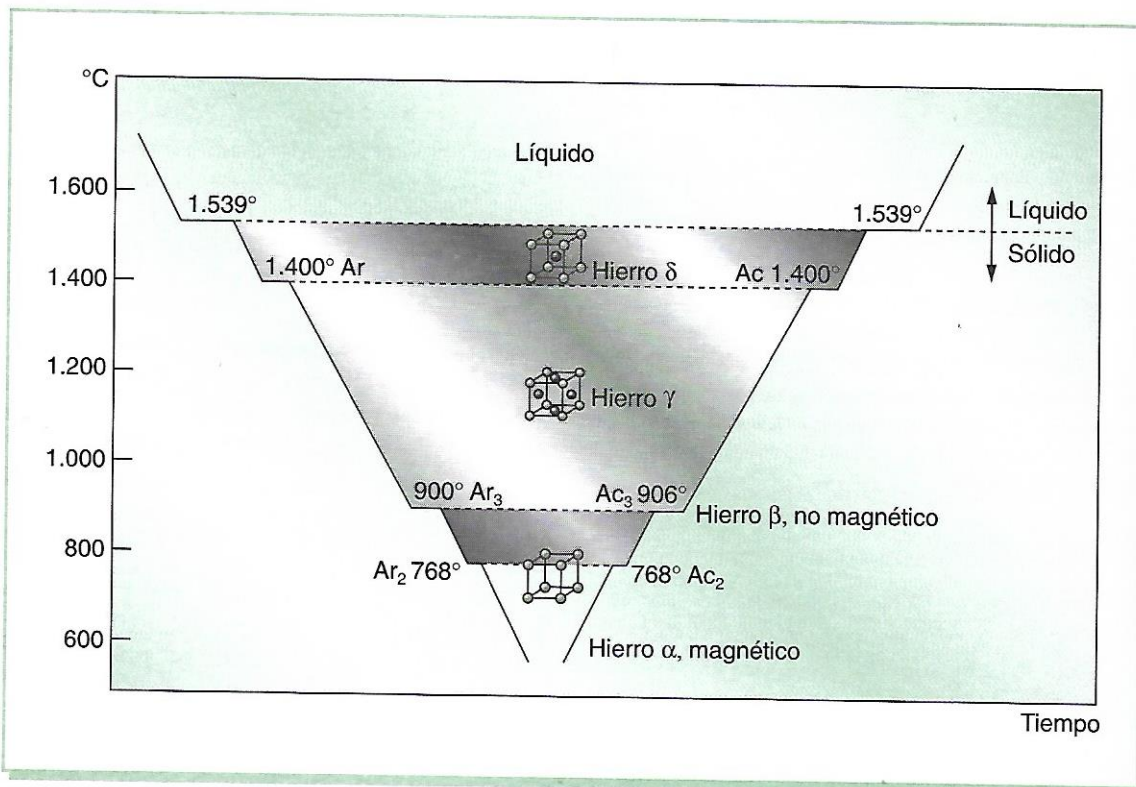
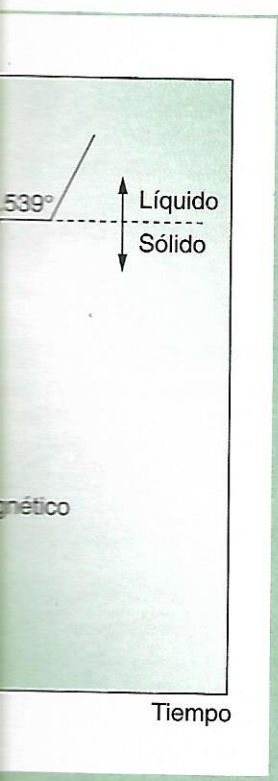


Fig. 24. Transformaciones alotrópicas del hierro puro.

mente una probeta de hie-  
decir en estado líquido, se  
ca a la temperatura cons-  
la temperatura sigue des-  
0 °C hay una detención y  
producirse un cambio en la  
ta que motiva desprendi-  
s 900 °C sucede otra de-  
otra a una temperatura

s se denominan tempera-  
y se representan por  $A_2$ ,  
 $A_3$  (750°). Si en lugar de  
hierro puro desde la tem-  
ve que se repiten las mis-  
temperaturas ligeramente  
0°,  $A_3 = 920^\circ$  y  $A_4 =$   
cos encontrados al enfriar  
letra «A» y el subíndice  
«issement» (enfriamiento),  
ntar con el subíndice «c»,  
(calentamiento). Las di-  
peraturas de calentamien-  
on tanto mayores cuanto  
con que se desarrollan



los dos procesos, y se explica por la resistencia a transformarse que oponen los sistemas cristalinos. Si el calentamiento o el enfriamiento se hiciesen a una velocidad infinitamente lenta, se obtendrían otras temperaturas, comprendidas entre  $A_c$  y las  $A_r$  que se han denominado  $A$  (sin ningún subíndice), y son las mismas para ambos fenómenos. Para el hierro puro son  $A_2 = 768^\circ$ ,  $A_3 = 910^\circ$  y  $A_4 = 1.400^\circ$ , y marcan los puntos de transformación de los cristales de hierro. Otras variedades alotrópicas de un cuerpo son las de la misma composición y distinta cristalización. Así, hasta el punto  $A_2 = 768^\circ$ , el hierro cristaliza en la variedad alfa; de  $A_2$  a  $A_3$ , o sea de  $768^\circ$  a  $910^\circ$ , en la variedad beta; de  $A_3$  a  $A_4$ , o sea de  $910^\circ$  a  $1.400^\circ$ , en la variedad gamma, y de  $A_4$  hasta la fusión, a  $1.539^\circ$  en la variedad delta.

### Aleaciones hierro-carbono

El hierro puro carece de importancia industrial, pero, formando aleaciones con el carbono y otros ingredientes, es el metal más utilizado, por las utilísimas propiedades que le confiere el citado elemento. Las aleaciones con un contenido de carbono entre 0,08% y 1,76% tienen unas características muy definidas y se denominan aceros. Estos, a su vez, pueden alearse con otros elementos para formar los aceros especiales o aceros aleados. Cuando la proporción de carbono es mayor de 1,76%, las aleaciones hierro-carbono se llaman fundiciones y pueden contener hasta un 6,67% de carbono. El carbono se encuentra en los productos siderúrgicos en tres formas: disuelto en hierro gamma, combinado con el hierro y libre, formando láminas o nódulos. En las aleaciones hierro-carbono hay varios constituyentes estructurales, o clases de cristales, con composiciones y características propias, que se relacionan a continuación.

### Constituyentes

**Ferrita.**—Aunque la ferrita es una solución sólida de carbono en hierro alfa, su solubilidad a la temperatura ambiente es tan pequeña, que no llega a disolverse a 0,008% de carbono, por eso se la considera como hierro alfa puro. La máxima solubilidad del carbono en el hierro

alfa es del 0,02% a  $723^\circ\text{C}$ . La ferrita es el más blando y dúctil de los constituyentes de los aceros. Cristaliza en la red cúbica centrada, tiene una dureza de 90 HB, con una resistencia a la rotura de  $28\text{ kg/mm}^2$ , y un alargamiento del 40%. Es magnética (Fig. 25).

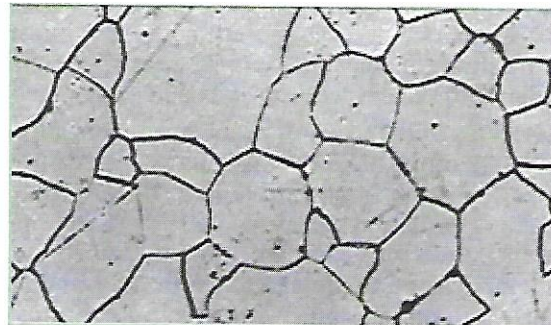


Fig. 25. Cristales de ferrita  $\times 1.000$ .

**Cementita.**—Es el carburo de hierro,  $\text{CFe}$ , y contiene, por tanto, el 6,67% de carbono y el 93,33% de hierro. Es el constituyente más puro y frágil de los aceros, alcanzando una dureza Brinell de 700 (aproximadamente, 68 HRC). Es magnética hasta los  $210^\circ\text{C}$ , a partir de los cuales pierde su magnetismo. Esta temperatura recibe el nombre de «punto de Curie». Cristaliza en la red ortorrómbica.

**Perlita.**—Está compuesta por un 86,5% de ferrita y un 13,5% de cementita. Tiene una dureza de aproximadamente 200 HB, una resistencia a la rotura de  $80\text{ kg/mm}^2$  y un alargamiento de un 15%. El nombre de la perlita se debe a las irisaciones que adquiere al ser iluminada, parecidas a las de las perlas. Cada grano de perlita está formado por láminas o placas alternadas de cementita y ferrita. Esta estructura laminar se observa en la perlita formada por enfriamiento muy lento; si éste es brusco, la estructura queda más borrosa y se denomina sorbita. Si la perlita laminar se calienta durante algún tiempo a una temperatura un poco inferior a la crítica (inferior a  $723^\circ\text{C}$ ), la cementita adopta la forma de glóbulos incrustados en la masa de la ferrita, recibiendo entonces la denominación de perlita globular (Fig. 26).

**Austenita.**—Es el constituyente más denso de los aceros y está formada por una solución sólida de carbono en hierro gamma. La proporción de carbono disuelto varía desde el 0% hasta el 1,76%, correspondiendo este último

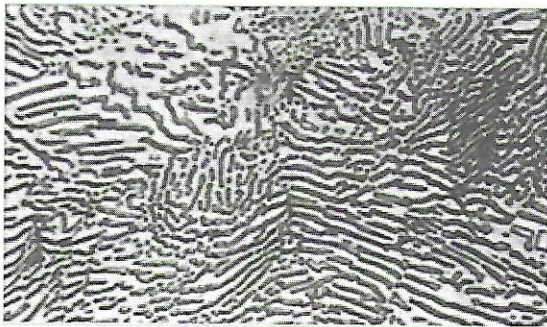


Fig. 26. Perlita laminar  $\times 1.000$ .

porcentaje de máxima solubilidad a la temperatura de  $1.130\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

La austenita, en los aceros al carbono, es decir, sin ningún otro elemento aleado, empieza a formarse a la temperatura de  $723\text{ }^{\circ}\text{C}$  y, a partir de la temperatura crítica superior  $A_{c3}$ , la totalidad de la masa de acero está ya formada por cristales de austenita. Puede obtenerse una estructura austenítica en los aceros, a la temperatura ambiente, enfriando muy rápidamente una probeta de acero de alto contenido de carbono, o muy alta aleación, desde una temperatura por encima de la crítica superior. Pero como esta austenita no es estable, con el tiempo se transforma en ferrita y perlita, o bien en cementita y perlita. Se presenta como cristales cúbicos de hierro gamma, con los átomos de carbono intercalados en las aristas y en el centro. Tiene una dureza Brinell de 300, una resistencia a la rotura de  $100\text{ kg/mm}^2$  y un alargamiento de un 30%. No es magnética (Fig. 27).

**Martensita.**—Después de la cementita, es el constituyente más duro de los aceros. La martensita es una solución sólida sobresaturada

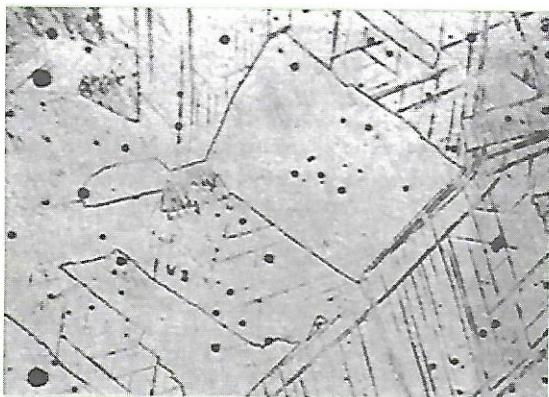


Fig. 27. Austenita  $\times 200$ .

de carbono en hierro alfa. Se obtiene por enfriamiento muy rápido de los aceros, una vez elevada su temperatura lo suficiente para conseguir su constitución austenítica. La martensita se presenta en forma de agujas (Fig. 28) y cristaliza en la red tetragonal en lugar de hacerlo en la red cúbica centrada, la del hierro alfa, debido a la deformación que la inserción de los átomos de carbono produce en su red cristalina (Fig. 29). La dureza de la martensita puede atribuirse precisamente a la tensión originada en sus cristales por este fenómeno, de la misma manera que los metales deformados en frío deben a los granos deformados y en tensión el aumento de dureza que experimentan. La proporción de carbono no es constante en la martensita, pues varía hasta un máximo del 0,89%, aumentando ésta en dureza, resistencia mecánica y fragilidad con el contenido de carbono. Su dureza varía de 50 a 68 HRC; su resistencia mecánica, de  $175$  a  $250\text{ kg/mm}^2$ , y su alargamiento, del 2,5% al 0,5%. Es magnética.

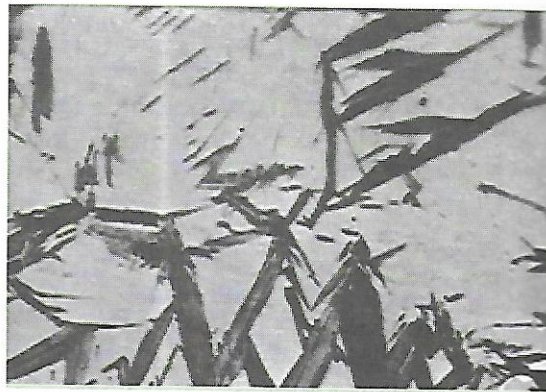


Fig. 28. Agujas de martensita sobre un fondo de austenita  $\times 1.000$ .

**Troostita.**—Se produce por transformación isotérmica de la austenita entre los  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , es decir, enfriándola rápidamente hasta la temperatura indicada y manteniéndola a este nivel constante hasta que toda la austenita se haya transformado en troostita. También se obtiene ésta enfriando la austenita a una velocidad algo inferior a la crítica. La troostita se presenta en forma de nódulos compuestos de laminillas radiales, de cementita sobre ferrita, parecidas a las de la perlita, pero más finas. Su dureza es de 450 HB; su resistencia, de  $250\text{ kg/mm}^2$ , y su alargamiento del 7,5% (Fig. 30).

Se obtiene por enfriamiento de los aceros, una vez ele-  
 do suficiente para conse-  
 austenítica. La martensita  
 agujas (Fig. 28) y crista-  
 en lugar de hacerlo en  
 la del hierro alfa, debi-  
 la inserción de los áto-  
 uce en su red cristalina  
 la martensita puede atri-  
 la tensión originada en  
 fenómeno, de la misma  
 deformados en frío  
 formados y en tensión el  
 experimentan. La pro-  
 es constante en la mar-  
 un máximo del 0,89%,  
 dureza, resistencia mecá-  
 contenido de carbono.  
 a 68 HRC; su resistencia  
 50 kg/mm<sup>2</sup>, y su alarga-  
 5%. Es magnética.



...ta sobre un fondo

uce por transformación  
 nita entre los 500 °C y  
 ndola rápidamente hasta  
 y manteniéndola a este  
 ue toda la austenita se  
 troostita. También se ob-  
 austenita a una velocidad  
 La troostita se presenta  
 ompuestos de laminillas  
 obre ferrita, parecidas a  
 s finas. Su dureza es de  
 de 250 kg/mm<sup>2</sup>, y su  
 Fig. 30).

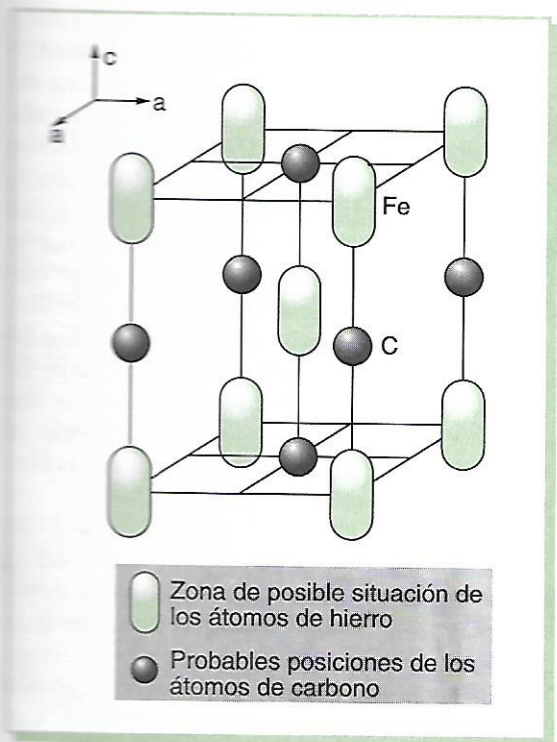


Fig. 29. Cristal elemental de martensita, con los átomos de hierro en vértices y centro, y átomos de carbono en centros de aristas y caras.

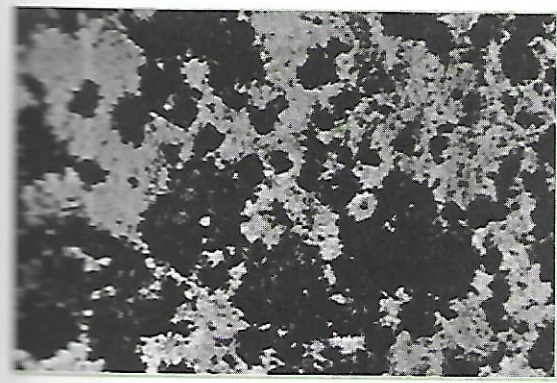


Fig. 30. Troostita sobre una matriz de martensita x 250.

**Sorbita.**—Se produce también por transformación isotérmica de la austenita, aunque entre los 600 °C y 650 °C, es decir, enfriando rápidamente la austenita, que deberá estar en temperaturas por encima de la crítica superior, hasta la temperatura indicada y manteniéndola a este nivel constante hasta su total transformación en sorbita. También se obtiene enfriando la austenita a una velocidad bastante inferior a la crítica. Por eso aparece en los ace-

ros forjados y laminados, en los cuales la velocidad de enfriamiento no es suficientemente rápida para el temple, o sea, para la formación de la martensita, ni aun para la de la troostita, y tampoco es bastante lenta para la formación de la perlita. Tiene la sorbita una dureza de 350 HB, una resistencia de 100 kg/mm<sup>2</sup> y un alargamiento de un 15 % (Fig. 31).

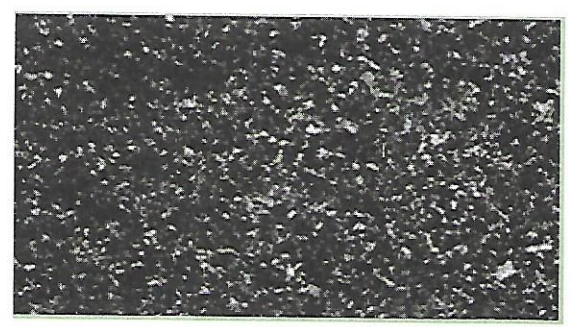


Fig. 31. Sorbita x 500.

**Bainita.**—Se obtiene por la transformación que sufre la austenita entre los 250 °C y 550 °C. Se enfría ésta rápidamente hasta la temperatura indicada y se la mantiene luego a este nivel constante hasta la total transformación de la austenita en bainita. La bainita no se produce, como la troostita y la sorbita, con un temple normal (por defecto de la velocidad de enfriamiento), sino que resulta de un temple, llamado isotérmico o bainítico, cuyo fin no es transformar la austenita en martensita, como ocurre con el temple clásico, sino la transformación íntegra de la austenita en bainita.

**Ledeburita.**—No es un constituyente de los aceros, sino de las fundiciones. Se encuentra en las aleaciones hierro-carbono cuando el porcentaje de carburo de hierro aleado es superior al 25%, es decir, con un contenido total mayor de 1,76% C. Es eutéctica. Se forma al enfriar la fundición líquida del 4,3% de carbono desde los 1.130 °C, siendo estable hasta los 723 °C y descomponiéndose en ferrita y cementita a partir de esta temperatura. Contiene un 52% de cementita y un 48% de austenita de 1,76%. El contenido total de carbono en la ledeburita es del 4,3%.

**Steadita.**—Es un constituyente de naturaleza eutéctica, de fluidez perfecta, que aparece en las fundiciones con más del 0,15% de fósforo. Como la steadita se compone de un 10% de

fósforo y casi todo el fósforo de la fundición se encuentra en este constituyente, se puede calcular el porcentaje de steadita que contiene la fundición por su contenido en fósforo. Es muy dura y frágil. Funde a los 960 °C. En las fundiciones grises, está compuesta por un eutéctico de ferrita y fósforo de hierro; en las fundiciones blancas y atruchadas, por un eutéctico de ferrita, fósforo de hierro y cementita.

**Grafito.**—Es uno de los tres estados alotrópicos en que se encuentra el carbono libre en la naturaleza, siendo los otros dos el diamante y el carbono amorfo. El grafito es blando, untuoso, de color gris oscuro y de peso específico 2,25. Se presenta formando láminas en las fundiciones grises, como nódulos en las fundiciones maleables, y en forma esferoidal en algunas fundiciones especiales. Las fundiciones que lo contienen tienen la dureza, la resistencia mecánica, la elasticidad y la plasticidad más bajas. En cambio, mejora la resistencia al desgaste y la corrosión y sirve de lubricante en los roces.

### Diagrama de hierro-carbono

Es el diagrama de fases para el acero y la fundición, en el cual se indican los constituyentes que existen a cualquier temperatura, y para cualquier contenido de carbono, cuando la aleación se enfría y calienta con la suficiente lentitud para que aquéllos permanezcan en estado de equilibrio. Este diagrama no señala el tamaño relativo del grano de los constituyentes presentes, tampoco indica lo que le ocurre a la estructura cuando se emplean diferentes velocidades de enfriamiento. Observándolo (Fig. 32), se puede apreciar que en el eje de las abscisas hay unos puntos bien definidos:

a) El límite del diagrama corresponde a una proporción de carbono del 6,67%, que es la de la cementita pura. Las aleaciones hierro-carbono con carbono en una proporción superior a la citada lo contendrán en forma de grafito y, por tanto, están excluidas de las que consideramos como constituidas por carbono y hierro formando el carburo de hierro.

b) El punto *C*, denominado eutéctico, corresponde a una proporción de carbono del 4,3% y de carburo de hierro en un total de 64,5%. La aleación con un 4,3% de carbono es

la de más bajo punto de fusión (1.130 °C). Además, la totalidad de la masa se funde o solidifica a una sola temperatura en lugar de dos (una del principio y otra del fin del cambio de estado, como ocurre con las aleaciones de contenido de carbono superior o inferior al 4,3%). Por eso, la línea *ABCD* del principio de solidificación tiene, con la *AHJECF* el punto común *C*, que es el eutéctico. Con contenidos inferiores de carbono entre el principio y el fin de la solidificación, se va precipitando austenita. Para aleaciones de contenidos superiores al 4,3%, se precipitan cristales de cementita. Las aleaciones con un 4,3% de carbono se solidifican formando un solo constituyente, que también se denomina eutéctico, y es la ledeburita.

c) El punto *E* marca la máxima solubilidad del carbono en hierro gamma y corresponde a un contenido de carbono del 1,76%. Este punto en el eje de las abscisas divide las aleaciones de hierro-carbono en dos clases: aceros de contenido de carbono inferior al 1,76%, hasta 0,03%, y las fundiciones de contenido de carbono comprendido entre 1,76% y 6,67%. Los aceros son las aleaciones que, a partir de una temperatura marcada en el diagrama por las líneas *A<sub>3</sub>* (*GS*) y *A<sub>cm</sub>* (*SE*), se transforman íntegramente en austenita, y ésta, al enfriarla rápidamente, en martensita.

d) El punto *S*, denominado eutectoide, es análogo al *C*. La diferencia está en que en el punto eutéctico tiene lugar un cambio de estado de líquido a sólido, o viceversa, y en el eutectoide se produce solamente un cambio de constitución de la aleación, que es sólida. Así, el punto *C* marca la composición que permanece líquida a más baja temperatura, y el punto *S* indica la composición de la austenita, que es estable a más baja temperatura. La masa de austenita, al pasar por el punto *S*, se transforma toda ella en perlita. Para contenidos de carbono superiores o inferiores al del punto *S*, la transformación de la austenita en perlita tiene lugar a través de una fase intermedia durante la cual va dando un constituyente nuevo, hasta que, al llegar a la temperatura de 723 °C, la austenita tiene la composición eutectoide y se transforma íntegramente en perlita. Para porcentajes de carbono superiores al 0,89% la austenita, al enfriarse por debajo de la línea *A<sub>cm</sub>*, segrega cementita hasta llegar a los 723 °C; para porcentajes inferiores al 0,89% la austenita, al pasar a

de fusión (1.130 °C). Además, la masa se funde o solidifica en lugar de dos (una del cambio de estado, relaciones de contenido de inferior al 4,3%). Por eso, la principio de solidificación el punto común C, que es tenidos inferiores de carbono y el fin de la solidificación austenita. Para aleaciones superiores al 4,3%, se precipita. Las aleaciones con se solidifican formando un se también se denomina urita.

ca la máxima solubilidad gamma y corresponde a no del 1,76%. Este punto divide las aleaciones de clases: aceros de contenido inferior al 1,76%, hasta nes de contenido de carbono entre 1,76% y 6,67%. Los nes que, a partir de una en el diagrama por las líneas (SE), se transforman íntegramente, y ésta, al enfriarla rápidamente.

ominado eutectoide, es encia está en que en el lugar un cambio de estado o viceversa, y en el eulamente un cambio de ción, que es sólida. Así, mposición que permanece temperatura, y el punto S de la austenita, que es temperatura. La masa de el punto S, se transforma a contenidos de carbono al del punto S, la transformación en perlita tiene lugar ermedia durante la cual ente nuevo, hasta que, al de 723 °C, la austenita ectoide y se transforma a. Para porcentajes de 0,89% la austenita, al en línea Acm, segrega carbono 723 °C; para porcentajes la austenita, al pasar a

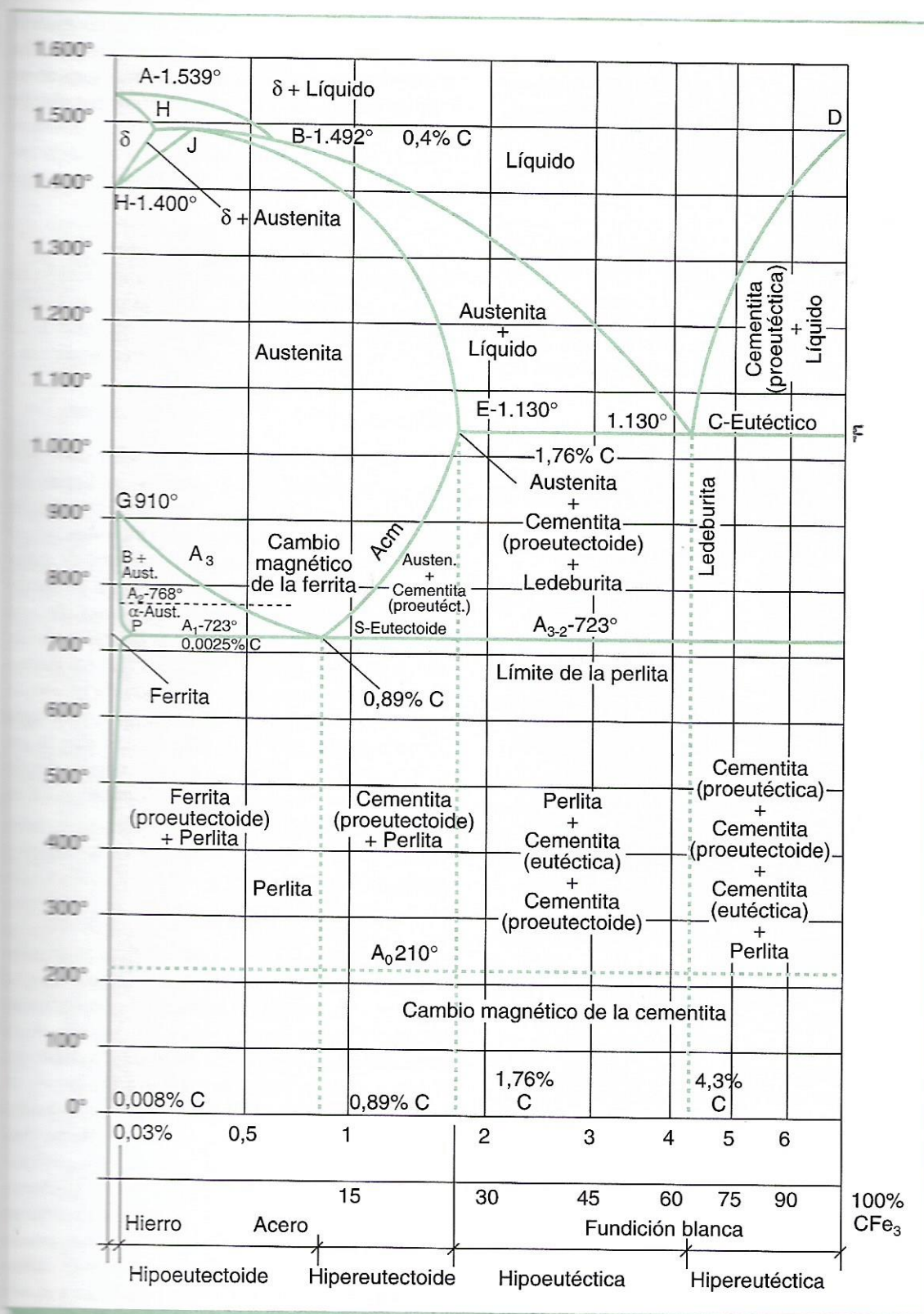


Fig. 32. Diagrama de hierro-carbono.

temperaturas inferiores a las de la línea  $A_3$  (GS), segrega ferrita hasta los 723 °C.

e) El punto  $J$ , cuyo porcentaje de carbono es del 0,18%, es el de la austenita que permanece estable a la más alta temperatura de 1.492 °C. Este punto se denomina peritético y puede muy bien considerarse como un punto eutéctico al revés.

f) El punto  $H$ , del 0,08% de carbono, es el máximo porcentaje que puede contener el hierro delta en solución sólida.

g) El punto  $P$ , del 0,025% de carbono, es el máximo porcentaje de carbono que puede disolver la ferrita. En el eje de las ordenadas hay los siguientes puntos críticos:

- $A_0 = 210$  °C, en el cual tiene lugar el cambio magnético de la cementita, que deja de ser magnética por encima de esta temperatura.
- $A_1 = 723$  °C, que es el límite de la perlita.
- $A_2 = 768$  °C, que es el punto de cambio magnético de la ferrita, no magnética por encima de esta temperatura.
- $A_3 =$  (línea SG), que es el límite de la ferrita (este punto crítico varía desde 723 °C hasta 910 °C, según el porcentaje de carbono).
- $A_{cm} =$  (línea SE), que es el límite de la cementita (este punto crítico varía desde 723 °C hasta 1.130 °C). Línea  $EF = 1.130$  °C, que es el límite de la ledeburita. La línea  $AHJECF$  es la de las temperaturas en que se inicia la fusión al calentar o se termina la solidificación al enfriar. Por debajo de esta línea, todo el metal está sólido. La línea  $ABCD$  es la de las temperaturas del término de la fusión al calentar o del inicio de la solidificación al enfriar. Por encima de ella todo el metal está en estado sólido. Entre esta línea y la anterior existe una mezcla de líquido y sólido.
- Línea  $A_1 =$  (línea HB), que es el límite superior de la austenita.

las cuales el porcentaje de carbono no excede de 1,76%, aunque en algunos casos especiales se puede superar dicho límite, como sucede en ciertos aceros con un elevado contenido de carbono.

### Obtención

El acero se obtiene sometiendo el arrabio a un proceso de descarburación y eliminación de impurezas llamado afino. Este afino, u oxidación del exceso del elemento carbono, se puede realizar según varios procedimientos.

#### Afino al crisol

Este método de fusión se emplea para producir aceros de calidad superior partiendo de fundición, o acero, si se trata de refinarlo. Se efectúa en hornos de crisol, aunque éstos tienen los inconvenientes de un gran consumo de combustible, de dar una pequeña cantidad de fundición en un proceso relativamente largo, de una mano de obra numerosa y de un desgaste rápido de los crisoles. Los más sencillos son los llamados de viento libre. En general, son de grafito, el cual se coloca encima de una pieza refractaria llamada queso, que evita su contacto con la parrilla y, además, consigue que el metal a fundir quede en la zona en que la temperatura es mayor, por estar rodeada.

#### Refusión bajo escoria electroconductora (ESR)

Este procedimiento para fabricar aceros especiales consiste en conectar el lingote que se quiere purificar con un borne de la corriente alterna y el fondo del crisol con el otro borne. Al principio de la operación, en el fondo del crisol existe cierta cantidad de chatarra de la misma composición que el lingote, y encima, óxidos de aluminio y de calcio convenientemente deshidratados y fluoruro cálcico para que, al calentarse, fundan y originen una escoria electroconductora. El calentamiento de la escoria se logra, al aplicar la corriente eléctrica, por el efecto Joule. La escoria fundida continúa calentándose por resistencia eléctrica y llega a fundir el acero del fondo del crisol (chatarra). El acero líquido, pues, queda recubierto con una capa

### ACEROS

Son aleaciones de hierro-carbono aptas para ser deformadas en frío y en caliente y en