

TEMA 6

ALEACIONES PARA MOLDEO. MECANISMOS DE SOLIDIFICACIÓN

Hierro colado.

El hierro colado es la aleación más profusamente empleada en la fabricación de piezas fundidas. Es una aleación de hierro y carbono, y difiere del acero por el contenido de C, que es superior al 1,75%; a ambos es usual la presencia de otros elementos, tales como el Si, el Mn, el P y el S, cuyo contenido varía según los casos.

Análogamente a cuanto ocurre en el acero, además de los elementos arriba citados, y cuando se quiere obtener propiedades particulares, se añaden muchas veces a la aleación base otros metales como el Ni, el Mo, el Cr, el Cu, el V, el Ti, el Mg, etc.

Nos encontramos, pues, ante una aleación bastante compleja que no puede ser representada por los métodos gráficos normales.

Los constituyentes menores de la fundición, que en pequeño porcentaje respecto al constituyente principal que es el hierro (en el complejo representan un 5 a 7% de la aleación), tienen una decisiva influencia sobre las características y propiedades del metal.

a) Carbono:

El carbono es sin duda, después del hierro, el elemento más importante; se le puede encontrar combinado con el hierro (*carbono combinado*) en forma de carburo (*cementita*, Fe_3C con 6,67% de C), o en estado libre (*carbono libre* o *grafito*).

El que se tenga en estado combinado o gráfico no se debe al azar. Son muchos los factores que pueden favorecer una forma o la otra, como la velocidad de enfriamiento y la presencia de otros elementos grafitizantes o estabilizantes.

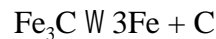
Conforme a su aspecto en la fractura, las fundiciones se pueden clasificar en *fundiciones grises*, *fundiciones atruchadas* (con puntos blancos sobre fondo gris, o viceversa) y *fundiciones blancas*; dependiendo de la mayor o menor cantidad de carbono libre o gráfico.

Una fundición común tiene de ordinario un grafito de grandes laminillas que interrumpen netamente la continuidad de la matriz metálica; afinando y reduciendo estas laminillas se pueden aumentar las características mecánicas.



b) Silicio:

El silicio es el elemento que tiene un efecto más favorable sobre la formación del carbono grafitico. Normalmente acelera la disociación del carburo de hierro, esto es, de la cementita, durante la solidificación y el enfriamiento del metal fundido según la ecuación:



Por eso el silicio contenido en una fundición debe ser calculado teniendo en cuenta el carbono total, la velocidad de enfriamiento y el espesor de las piezas.

c) Manganeso:

Una acción contraria a la del silicio es la ejercida por el manganeso. Este elemento favorece la formación del carburo de hierro, y, a su vez, se combina fácilmente sea con el carbono, sea con el azufre. Dada su gran facilidad para formar sulfuros, su acción puede ser considerada en un primer aspecto benéfica, porque obstaculiza la acción inhibidora a la grafitización ejercida por el azufre, mientras en un segundo tiempo, formando a su vez carburos, endurece la matriz misma de la fundición y disminuye el contenido de carbono libre.

d) Fósforo:

El fósforo queda en la fundición del tratamiento del alto horno, en forma de fosfuros de hierro. Esto confiere a la fundición líquida una particular fluidez porque disminuye el punto de solidificación, pero al mismo tiempo aumenta la fragilidad y la dureza. Dada la tendencia actual de obtener fundiciones con excelentes cualidades mecánicas, el contenido de fósforo debe permanecer entre bajos límites y precisamente no superar el 0,2%. Mientras, hace algunos años, las fundiciones fosforosas o semifosforosas eran las mayormente utilizadas en los talleres, hoy su empleo está limitado a las piezas particularmente delicadas o en las cuales no requieren elevadas características mecánicas.

e) Azufre:

El azufre existe en las fundiciones en dos formas: como sulfuro de hierro o como sulfuro de manganeso. Esto es siempre perjudicial, porque obstaculiza la grafitización, hace la fundición dura y frágil y provoca graves defectos en las piezas por rechupes, sopladuras, roturas, etc.

Como hemos dicho, su acción es en parte contrarrestada por la presencia de manganeso, mas en todo caso su contenido debe ser el mínimo posible.

f) Componentes de las aleaciones: Análogamente a cuanto ocurre con los aceros, para mejorar las características técnicas de las fundiciones se recurre alguna vez al empleo de elementos de adición llamados componentes de aleación.

Los componentes de aleación actúan según los casos y su porcentaje, sobre la solidificación, sobre la grafitización y sobre la estructura metalográfica y por consiguiente

confieren particulares propiedades de resistencia a la tracción y a la flexión, de dureza, de facilidad para trabajarla, de resistencia al desgaste, al calor y a la corrosión. Entre los principales componentes de aleación citaremos los siguientes: níquel, cromo, molibdeno, cerio y magnesio.

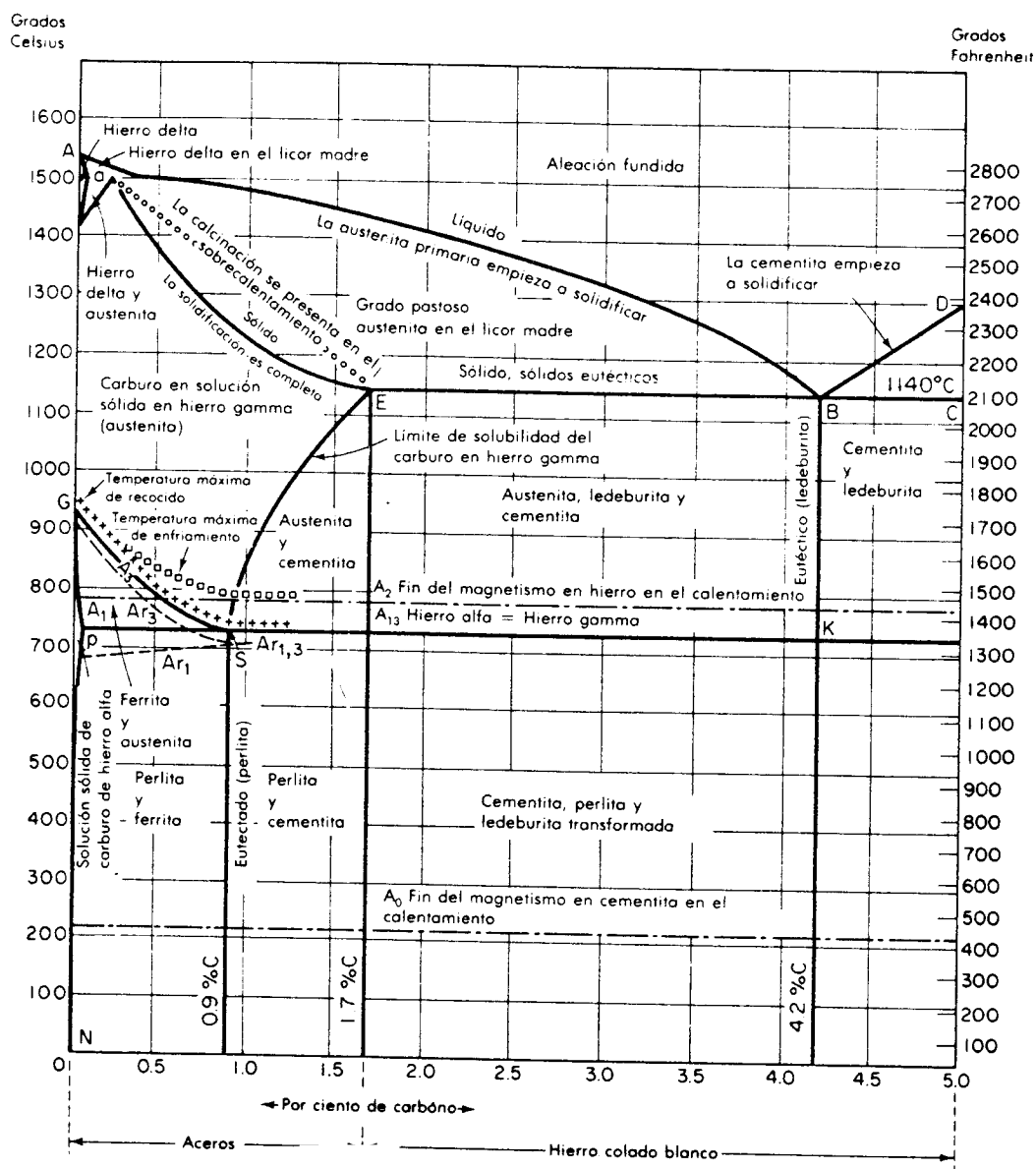


Fig. 6.1

Fundiciones de gran resistencia.

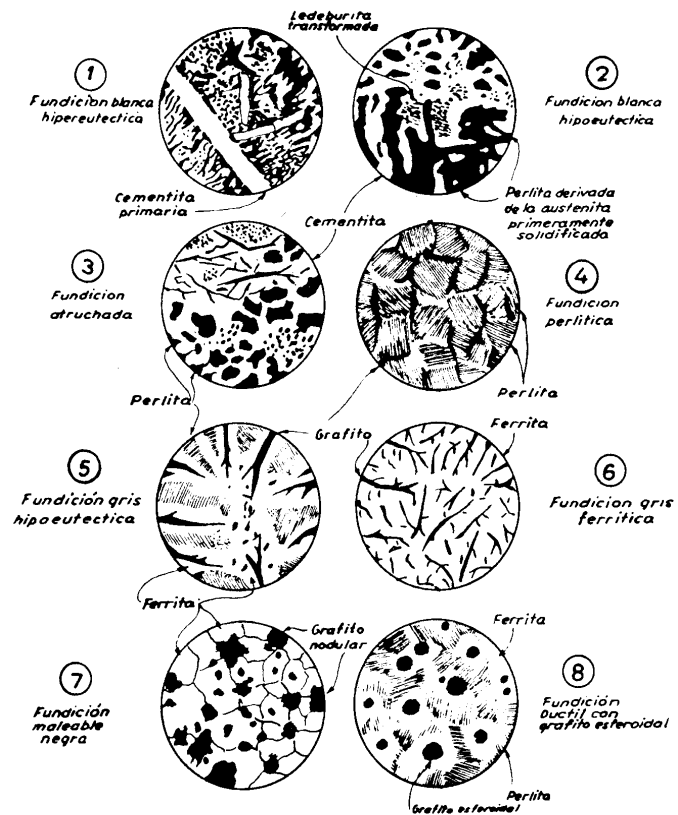
La fundición se puede considerar como una matriz de acero y laminillas de grafito distribuidas en la misma. Hasta que se pudo profundizar en esta naturaleza de la fundición, a principios del siglo actual, mediante las investigaciones químicas (análisis de los componentes) y físicas (observaciones al microscopio), no fue posible mejorar la calidad.

Las propiedades de la fundición dependen directamente de las propiedades de los dos componentes anteriormente citados, a saber, la matriz metálica y las laminillas de grafito en ella

diseminadas.

La matriz está constituida por hierro químicamente combinado con el carbono. Se tienen tres casos principales: *matriz ferrítica*, *perlítica* y de *cementita*.

Se han estudiado muchas fórmulas para representar la proporción más ventajosa de carbono en la fundición. La más aceptada es la de tomar como base la relación entre la cantidad de carbono que debe existir para obtener una concentración eutéctica y la que efectivamente hay, teniendo en cuenta una corrección debida a la influencia del porcentaje de los otros elementos presentes. Esta relación toma el nombre de *grado de saturación* y se expresa por:



$$S_c = \frac{[C_f]}{4,23 + 0,312[Si] + 0,33[P] + 0,66[Mn]}$$

Por ejemplo, una fundición con el siguiente análisis:

$$\begin{array}{lll} [C_f] = 3,25\% & [Si] = 1,78\% & [Mn] = 0,6\% \\ [P] = 0,45\% & [S] = 0,09\% & \end{array}$$

tendrá un grado de saturación igual a:

$$S_c = \frac{3,25}{4,23 + 0,312 \cdot 1,78 + 0,33 \cdot 0,45 + 0,66 \cdot 0,6} = \frac{3,25}{3,975} = 0,82$$

El diagrama de la figura 6.8 indica cuál es el valor del grado de saturación que se debe alcanzar para obtener la mayor resistencia mecánica. En el intervalo de un grado de saturación entre 0,75 y 0,95 la estructura de la base será casi totalmente perlítica. Pero no sólo el porcentaje de los elementos químicos influye en la formación de la perlita. Hay otras muchas causas que actúan sobre las estructuras de la matriz, como son: la naturaleza de las materias empleadas, la conducción de la fusión, la presencia de centros de cristalización, la velocidad de enfriamiento, etc.



Considerando en conjunto los factores que influyen principalmente en la formación de la estructura de la matriz, Maurer trazó el diagrama de la figura 6.3, punto de partida en la marcha del proceso de los talleres de fundición. De él se deduce que, para un determinado espesor, si se quiere obtener una estructura concreta, se deben elegir contenidos de C y de Si bien especificados.

Para obtener las estructuras adecuadas a fundiciones de gran resistencia, dos son los caminos en los que es posible actuar:

- 1.- Modificando y mejorando la estructura de la base o matriz.
- 2.- Modificando en la forma, en las dimensiones y en la cantidad el grafito libre.

Se pueden resumir los procedimientos para obtener fundiciones de gran resistencia en la siguiente tabla.

1) <u>Actuando sobre la matriz</u>	2) <u>Actuando sobre el grafito</u>
a) Con análisis químico apropiado.	a) Con análisis químico apropiado
b) Con análisis químico apropiado y aditivos catalíticos (inoculación).	b) Con recalentamientos de la fundición líquida.
c) Con componentes de aleación.	c) Con elementos químicos que provocan la formación de grafito nodular.
d) Regulando el enfriamiento.	d) Acelerando el proceso de enfriamiento.
e) Con tratamientos térmicos.	e) Con tratamientos térmicos (maleabilización).

Diagramas de uso en las fundiciones.

La figura 6.4 representa el diagrama de Griner y Klingenstein e indica la estructura probable (para un enfriamiento normal) de una fundición según el contenido de C + Si y el espesor de la pieza; por ejemplo, una pieza con contenido C + Si = 5% y de espesor 15 mm resultará de estructura perlítica.

La figura 6.5 representa la relación entre el contenido de C, el de C + Si y el espesor de las piezas, para obtener fundiciones perlíticas, es decir, con un contenido en $C_c = 0,8\%$; por ejemplo, si la pieza tiene un espesor de 20 mm deberá tener C + Si = 5%, Si = 2% y, por consiguiente, C = 3%.

La figura 6.6 representa la relación entre el contenido de C + Si y la resistencia a la tracción **R** para fundiciones comunes; por ejemplo, para una fundición con C + Si = 5,5%, **R** será 18 a 23 kg/mm².

La figura 6.7 representa la influencia del espesor de la pieza sobre la resistencia a la



tracción de las fundiciones, con contenido de C + Si creciente; por ejemplo, en una pieza con espesor de 50 mm y $C + Si = 3,25 + 2,25 = 5,5$, serán $C_c = 0,42\%$ y $R = 22 \text{ kg/mm}^2$.

La figura 6.8 indica la relación entre el grado de saturación S_c y la resistencia a la tracción, siempre en una fundición común; por ejemplo, para $S_c = 0,9$ será $R = 24$ a 32 kg/mm^2 .

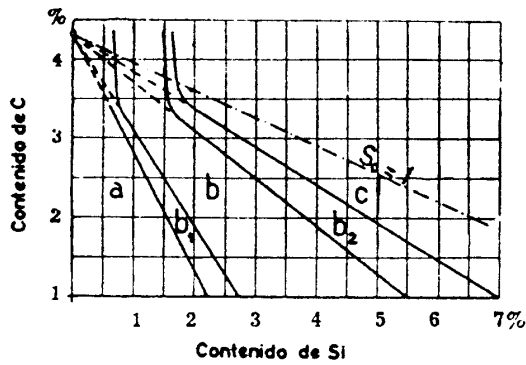


Fig. 6.3 Diagrama de Maurer modificado. Indica la estructura de la fundición según el contenido de C y de Si y se refiere a una rapidez de enfriamiento normal. En a, la estructura es ledeburita + perlita (blanca); en b₁, ledeburita + perlita + grafito (mezclada o atruchada); en b₂, perlita + grafito (perlítica); en b₂, ferrita + perlita + grafito (semiferrítica); en c, ferrita + grafito (ferrítica). $S_c = 1$ es la línea correspondiente al grado de saturación (S_c) igual a 1.

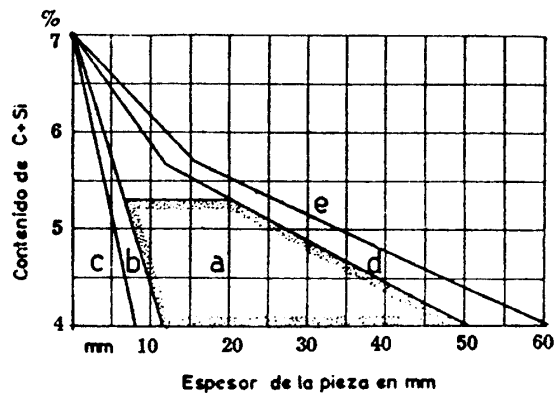


Fig. 6.4 Diagrama de Greiner y Klingenstein. Indica la estructura de la fundición según el contenido C + Si y el espesor de la pieza. En a, la estructura es perlítica; en b, atruchada; en c, blanca; en d, perlítico-ferrítica; en e, ferrítica.

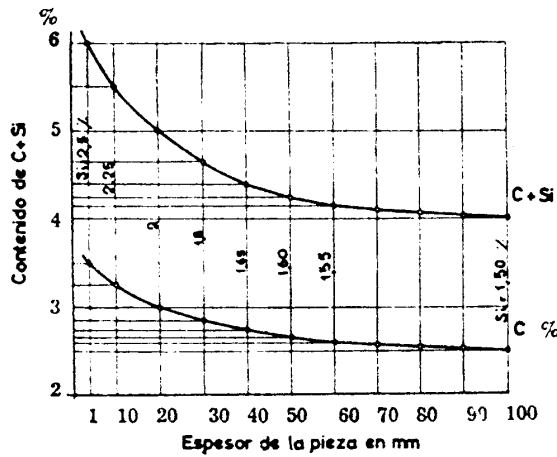


Fig. 6.5 Relación entre el contenido de C, el de C + Si y el espesor de las piezas, para obtener fundiciones perlíticas, es decir, con un contenido de $C_c = 0,8\%$.

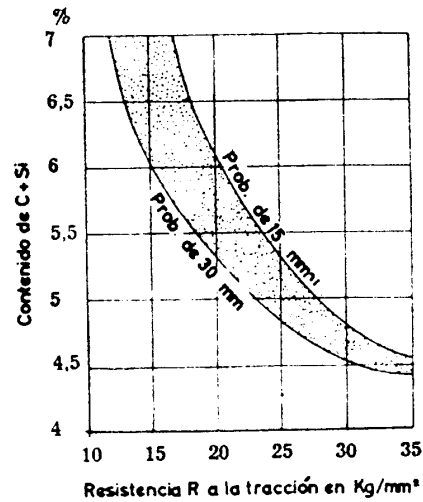


Fig. 6.6 Relación entre la suma C + Si y la resistencia a la tracción, para fundiciones comunes.

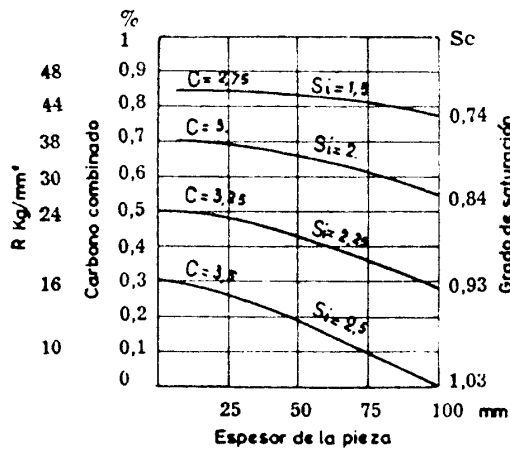


Fig. 6.7 Influencia del espesor de la pieza sobre la resistencia a la tracción de las fundiciones con contenido de C + Si creciente.

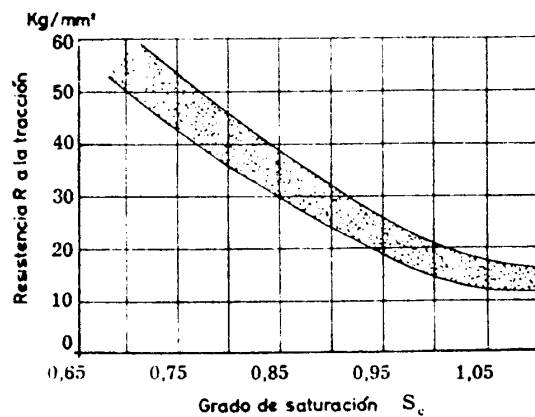


Fig. 6.8 Relación entre el grado de saturación S_c y la resistencia a la tracción.

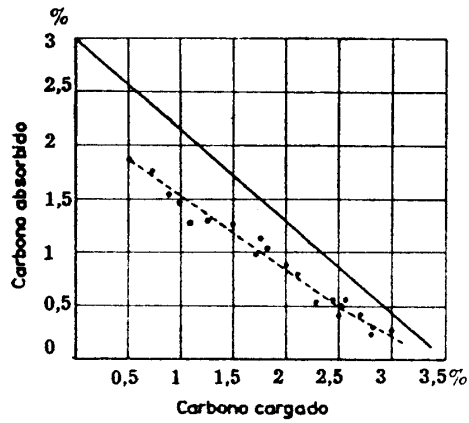


Fig. 6.9 Absorción de C en los cubilotes. La línea llena se refiere a un cubilote del diámetro de 1,5 m; la de trazos, a un cubilote del diámetro de 0,7 m.

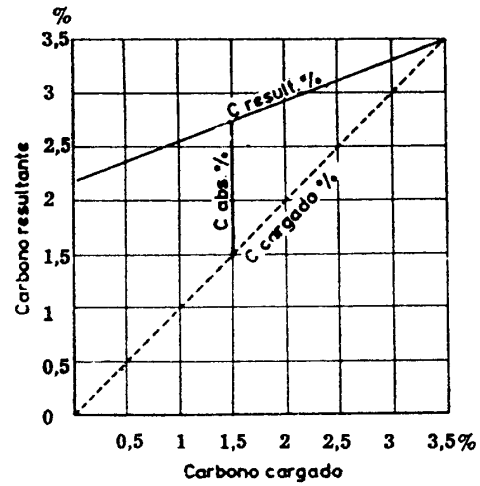


Fig. 6.10 Absorción de C en un cubilote de 0,7 m de diámetro.

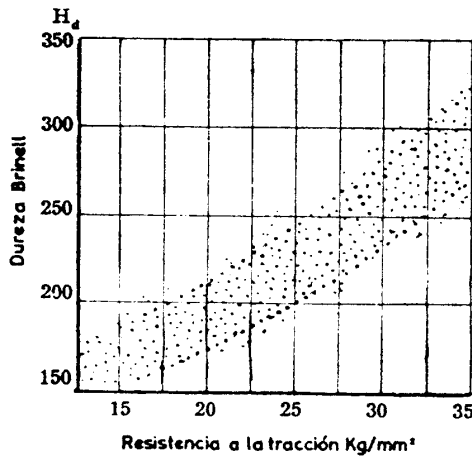


Fig. 6.11 Relación entre la resistencia a la tracción y la dureza Brinell.

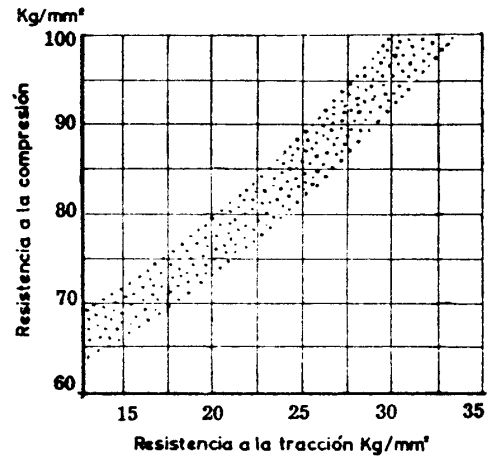


Fig. 6.12 Relación entre la resistencia a la tracción y la resistencia a la compresión en las fundiciones grises.

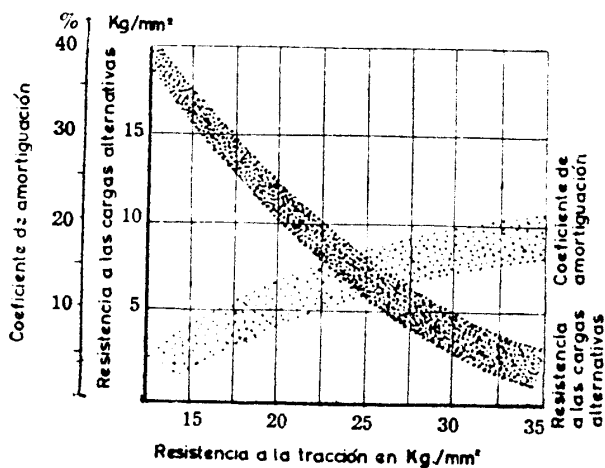


Fig. 6.13 Relación entre la capacidad de amortiguamiento de las vibraciones, la resistencia a las cargas alternativas y la resistencia a la tracción: las fundiciones de gran resistencia vibran mucho más que las de baja resistencia.

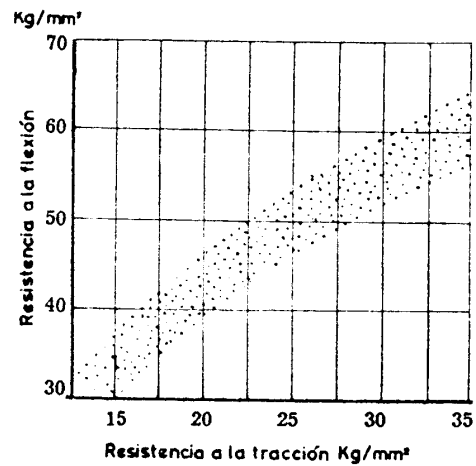


Fig. 6.14 Relación entre la resistencia a la tracción y la resistencia a la flexión en las fundiciones grises.



La figura 6.9 indica la absorción de carbono en el cubilote de 0,7 a 1,5 m de diámetro; por ejemplo, en un cubilote de diámetro 0,7 m, si el carbono introducido en total con las cargas es del 2,5%, la fundición absorberá el 0,5% de C, de modo que este elemento, en la fundición producida, alcanzará cerca del 3%; viéndose que el carbono total está siempre en el cubilote entre 3 y 3,5%.

La figura 6.10 representa la absorción de carbono en un cubilote de 0,7 m de diámetro; por ejemplo, si el carbono introducido en total con las cargas en un cubilote de diámetro 0,7 m es del 1,5%, la fundición absorberá el 1,25% de C, de modo que este elemento, en la fundición producida, alcanzará cerca de 2,75%.

La figura 6.11 indica la relación entre la resistencia a la tracción en una fundición gris y la dureza Brinell Hd; por ejemplo, una fundición con resistencia a la tracción $R = 25 \text{ kg/mm}^2$ tendrá una dureza Brinell comprendida entre cerca de 200 y 250 Hd.

La figura 6.12 indica la relación entre la resistencia a la tracción en una fundición gris y la resistencia a la compresión; por ejemplo, una fundición con $R = 27 \text{ kg/mm}^2$ tendrá una resistencia a la compresión en torno a los 90 kg/mm^2 .

La figura 6.13 indica la relación entre la capacidad de amortiguación de las vibraciones, la resistencia a las cargas alternativas y la resistencia a la tracción; por ejemplo, una fundición con resistencia a la tracción $R = 30 \text{ kg/mm}^2$ tendrá una resistencia a las cargas alternativas (de tracción y como presión) de 17 kg/mm^2 y un coeficiente de amortiguamiento de cerca del 10%.

La figura 6.14 indica la relación entre la resistencia a la tracción y la resistencia a la flexión, siempre en las fundiciones grises; por ejemplo, una fundición gris con $R = 25 \text{ kg/mm}^2$ tendrá una resistencia a la flexión de 50 kg/mm^2 .

Aceros fundidos.

1) Aceros al carbono:

Están constituidos en su mayoría por aleaciones complejas, teniendo como constituyentes fundamentales, además del hierro y el carbono, también el silicio y el manganeso, y como impurezas el fósforo, el azufre, el cobre, etc.

Estos aceros forman la gran masa de los aceros empleados en la industria (casi el 80%) y, según el contenido de carbono, se subdividen a su vez en:

Aceros extradulces	.....	% C # 0,15
" dulces	.....	% C = 0,15 ÷ 0,30
" semiduros	.....	% C = 0,30 ÷ 0,45
" duros	.....	% C = 0,45 ÷ 0,65
" extraduros	.....	% C = 0,65 ÷ 1,70

El carbono es el elemento del cual dependen en gran parte la estructura de la aleación y, según las posibilidades de tratamiento térmico, las características mecánicas del producto.



Los aceros al carbono más usados en fundición pertenecen a las tres primeras clases citadas arriba sólo ocasionalmente se emplean para piezas aceros con carbono superior al 0,45%.

2) Aceros aleados:

Normalmente, por aceros aleados se entienden aquellas aleaciones complejas del hierro que tienen como constituyentes fundamentales, además de los elementos presentes en los aceros al carbono (C, Si, Mn), también otros como Ni, Cr, Mo, V, W, Zr, Cu. Se consideran igualmente aleados los que tienen Si y Mn en porcentaje muy superior al normal de los aceros comunes o al carbono.

Hoy día no ha sido todavía bien definida una neta clasificación de los aceros aleados o especiales atendiendo a sus características fisicomecánicas, sobre todo dado el continuo desarrollo de la técnica de la producción y del empleo de tales aceros. De todos modos, para intentar una subdivisión en tan vastísimo campo de las aleaciones, atendiendo a los empleos más comunes en la industria, podemos distinguir, entre los aceros aleados, las siguientes clases:

a) Aceros especiales para la construcción: Son aceros con pequeños porcentajes de elementos especiales en aleación, suficientes para alcanzar características elevadas. Los principales elementos de aleación de tales aceros de construcción son el níquel, el cromo, el molibdeno y el vanadio.

b) Aceros inoxidables: Bajo esta denominación genérica se agrupan todas las aleaciones férricas caracterizadas por una elevada resistencia a la oxidación y corrosión por obra de agentes externos. Tal familia de aceros está en continuo desarrollo y hoy se puede afirmar prácticamente que para cada condición de ejercicio ha sido encontrado el acero apto para resistirla. Los más importantes son los aceros al cromo y al como-níquel.

c) Aceros resistentes al calor: Son empleados para piezas sometidas a corrosiones a alta temperatura y por eso muy usados en el campo de los motores térmicos y en las instalaciones químicas, como las columnas de síntesis, válvulas para elevadas presiones de vapor, hornos torres de cracking, en la industria petrolífera, etc. En principio, también los aceros inoxidables propiamente dichos deben ser considerados como aceros resistentes al calor. Pero normalmente son muy usados los aceros de medio contenido en cromo, o molibdeno, o silicio, o ambos.

d) Aceros resistentes al desgaste: Se caracterizan por una elevada dureza y tenacidad. Se emplea mucho el acero al 12 ÷ 14% de manganeso. Los límites entre los cuales varían los análisis de tales aceros son: C = 0,9 ÷ 1,5%, Mn = 10 ÷ 14% y Si = 0,4 ÷ 0,6%. A menudo se añade también un 2 ÷ 3% de níquel. Tales aceros son austeníticos y de difícil trabajo. Las piezas brutas de fusión contienen normalmente carburos y son poco tenaces; adquieren particular resistencia y tenacidad después del tratamiento del temple de 1000 a 1100EC. A tal temperatura es necesario el recalentamiento para estabilizar los carburos.

e) Aceros para imanes permanentes: En muchas construcciones la técnica actual requiere materiales fuerte y permanentemente magnéticos; son de común empleo en magnetos, motores, contadores, reguladores, chapas magnéticas para máquinas herramientas, altavoces. micrófonos, etc.

Las propiedades magnéticas de un acero son relacionadas en general con la dureza, por cuanto las aleaciones que mayormente presentan la característica de magnetizarse permanentemente, sometidas al oportuno campo magnetizante, son normalmente muy duras. Tales aleaciones pueden ser utilizadas como planchas o como piezas fundidas. Ya los aceros al 0,9 ÷ 1,2% de carbono son imanes permanentes discretos, pero mejor resultado se tiene con aceros al cromo, y mejores aún con aceros al cromo-cobalto-tungsteno. Los más elevados valores de la fuerza coercitiva en tales aceros se obtienen después de un temple de elevada temperatura.

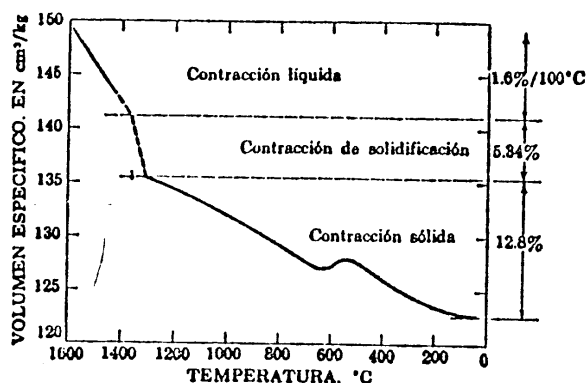
f) Aceros para herramientas: Los aceros al carbono comunes no soportan grandes velocidades de corte por cuanto, recalentándose durante el trabajo en la máquina herramienta, pierden el temple. Los aceros especiales para herramientas, llamados comúnmente *aceros rápidos*, permiten, al contrario, gran velocidad de corte, por cuanto no pierden el temple en caliente. Elementos bases de tales aceros son el wolframio o tungsteno, el cromo y, eventualmente, el vanadio.

	W	Cr	V	C
Aceros semirrápidos	12 ÷ 14	2 ÷ 3	-	0,3
" rápidos	18	3 ÷ 6	0,1	0,7
" extrarrápidos	18 ÷ 19	4 ÷ 7	0 ÷ 1,8	0,7

El tungsteno forma con el hierro y el cromo un carburo doble. El temple (en aire o en aceite) se hace a temperaturas que varían de los 1050 a los 1200EC. Son aceros autotemplantes.

Contracciones volumétricas.

Cuando los metales o sus aleaciones se solidifican y enfrían, sufren siempre una contracción de volumen (con la excepción del bismuto y el antimonio). Algunas fundiciones grises, sin embargo, pueden solidificar sin contracción e incluso con aumento de volumen como consecuencia de la presencia del grafito, que produce un efecto de hinchamiento durante la solidificación. La contracción se produce en tres etapas diferentes: contracción líquida, al enfriarse desde la temperatura de colada a la de solidificación; contracción de solidificación; y contracción sólida, al enfriarse la pieza ya sólida hasta la temperatura ambiente.



La siguiente figura representa las contracciones que aproximadamente ocurren cuando una masa de acero fundido de 0,15% de carbono se enfría y solidifica.

Solidificación de los metales puros y eutécticos.

Los metales puros solidifican a temperatura constante y forman cristales de una sola fase. La recristalización se inicia en la zona periférica, en contacto con la pared fría del molde, donde el subenfriamiento es grande y la velocidad de nucleación también; esto produce una delgada

capa de grano muy fino. A continuación los cristales se desarrollan preferentemente en dirección perpendicular a las paredes del molde, dando origen a una *zona basáltica* o de *cristales columnares* (fig. 6.20 a). El fenómeno se debe a que el calor liberado en la solidificación se transmite por conducción a través de la pared del molde (y de la capa de metal solidificado) y crea un elevado gradiente de temperatura, que hace que la solidificación se propague en forma de frente continuo en función del tiempo. El espesor de la capa solidificada nos lo da la expresión $x = k \sqrt{t}$, donde x es el espesor, t es el tiempo, y k una constante que depende de la naturaleza del molde y del sobrecalentamiento del metal fundido.

Las aleaciones de composición eutéctica solidifican a temperatura constante y forman cristales muy finos de dos o más fases (fig. 6.20 b). La cristalización se inicia en la zona periférica y progresa en forma de frente continuo, como en los metales puros, pero con más rapidez, ya que hay que disipar menos calor al exterior (como consecuencia de la energía que se requiere para formar los numerosos bordes de grano).

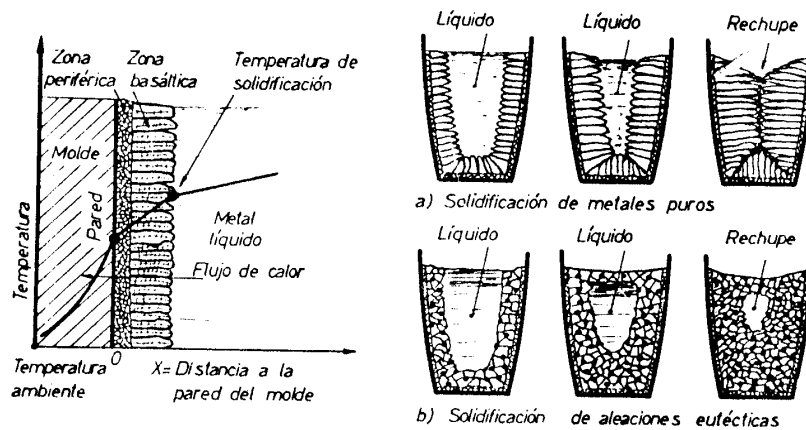


Fig. 6.20

La figura 6.16 presenta la solidificación progresiva de un lingote de acero de bajo carbono. El esquema muestra que, según se van formando capas sólidas, el nivel de líquido baja.

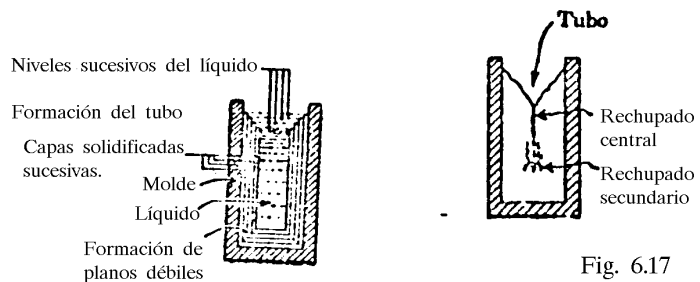


Fig. 6.16

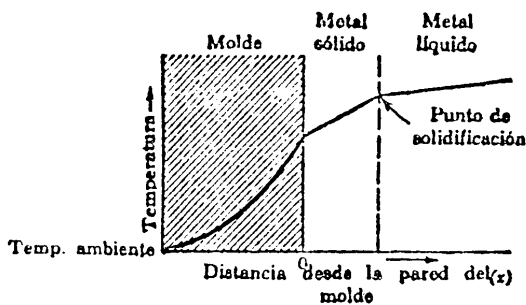


Fig. 6.18

El proceso es continuo, y el resultado final se muestra en el esquema 6.17. Queda una oquedad en forma de tubo que, en algunos lingotes de paredes delgadas y colados sin mazarotas, suele llegar hasta las proximidades del fondo. Es lo que se llama *rechupe*.

Si colamos en un molde de paredes

planas y con las mismas a la temperatura ambiente, el calor se evacuará por las paredes, y se depositará una capa sólida de metal. Según continúe la evacuación, el espesor de la capa irá creciendo y una distribución de temperatura puede quedar representada por el esquema de la figura.

El régimen con que se mueve la frontera sólido-líquido es función del calor evacuado en cada instante.

En la figura anterior se ve como, al penetrar la gráfica de temperaturas en el molde, la misma cae bruscamente. Ello se debe a que la arena tiene una conductibilidad calorífica muy débil, en consecuencia, el calor cedido por el metal penetra en la arena con mucha lentitud. Las partes en contacto con el metal alcanzan rápidamente la temperatura del mismo, mientras que a pocos centímetros el molde apenas se calienta. De hecho, no es la arena la que sirve de vehículo, sino los gases que se forman como consecuencia del contacto de moldes y machos con el metal.

Si se cuela en moldes de las mismas características, piezas geoméricamente semejantes, el tiempo para la completa solidificación será proporcional al cuadrado de sus dimensiones lineales. Por ejemplo, un cubo de acero de 50 mm de lado solidifica en una cuarta parte del tiempo requerido para un cubo de acero de 100 mm de lado, en iguales condiciones totales.

Para comparar y extender esta ley a piezas de forma diferente se ha generalizado la misma en la conocida *regla de Chvorinov*, aplicada con mucha aproximación:

$$\text{Tiempo de solidificación} = \text{Constante} \cdot (\text{Volumen} / \text{Área})^2$$

o lo que es lo mismo: $T = K \cdot M^2$ (donde $M = \text{módulo de enfriamiento}$).

En realidad, el régimen de formación de la piel sólida está afectado por la forma de la pieza, y la solidificación es más rápida en los ángulos externos de la pieza porque el calor se disipa más fácilmente en estos puntos. Inversamente, en los ángulos internos la solidificación es más lenta (puntos calientes).

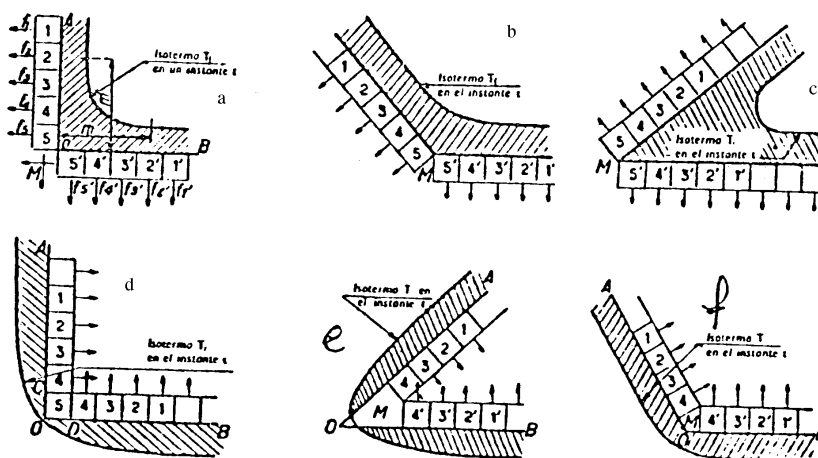


Fig. 6.29

Solidificación de las aleaciones.

En las aleaciones no eutécticas, aunque éstas sean con porcentajes débiles de los componentes, el mecanismo de la solidificación es distinto que el de un metal puro o el de un eutéctico.

En efecto, en un acero con 0,05 a 0,10% de C (débil aleación) se forma primero una

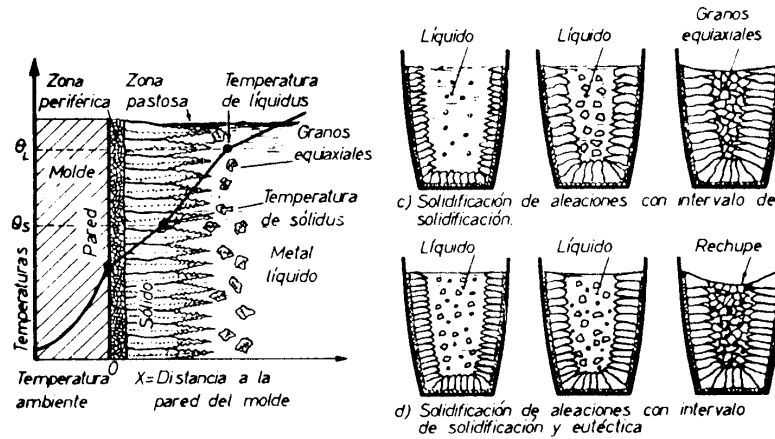


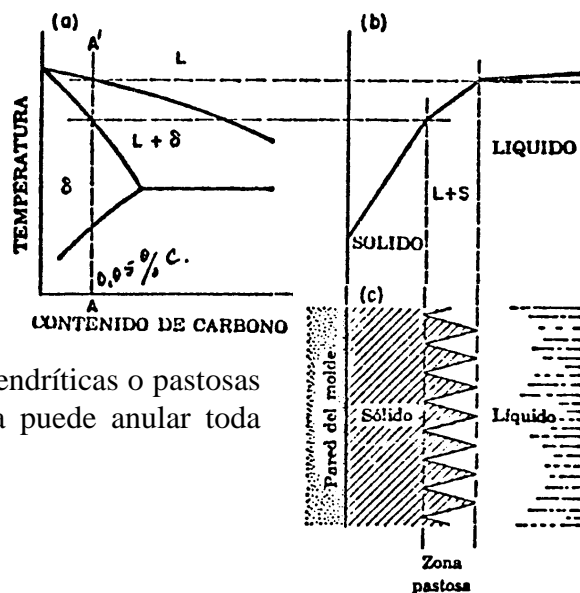
Fig. 6.21

costra sólida, adosada a las paredes del molde, tras haber segregado una buena parte del carbono disuelto que quedaba en el líquido inmediato (fig. 6.21 c). Este aumento de carbono baja el punto de fusión de la mezcla restante, por lo que la solidificación progresa en aquellas partes de la mezcla que, siendo vecinas de la costra, tienen mayor punto de fusión, es decir, aquellas que son menos ricas en carbono. Pero como la mezcla es homogénea de hierro y carbono, la solidificación ocurre en forma arborescente o *dendrítica* en aquellas partes más ricas en hierro, quedando las más ricas en carbono en estado líquido y bañando las arborescencias o dendritas.

En definitiva, tras la primera costra sólida de pequeño espesor y adosada a las paredes del molde, se forma una zona *pastosa* constituida por dendritas sólidas y líquido entremezclado. Esta capa pastosa solidifica a su vez y hace nacer una segunda capa, y así sucesivamente. Es decir, de cada sólida nace un frente de dendritas que hacen progresar la solidificación.

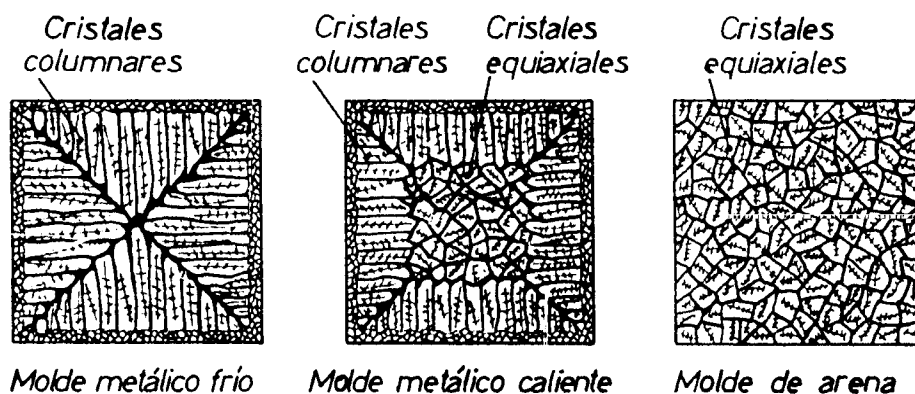
En la figura siguiente se traza el cuadro térmico de las dendritas que penetran en el líquido. Queda representado un acero de 0,05% de carbono mediante el diagrama de fases y la línea de solidificación AA'.

De la misma manera que un intervalo de solidificación pequeño origina una zona pastosa estrecha, los gradientes de temperatura elevados o de gran pendiente también provocan zonas dendríticas o pastosas estrechas, e incluso una solidificación rápida puede anular toda dendrita.



Metal o Aleación	% en Volumen	A Contracción mm·m	C Contracción mm·m
Aceros no aleados	7	16	22
Aceros muy aleados	10	20	25
Fundición blanca	6 ÷ 7	16	20
Fundición gris ($C_{eq}=2,5\div2,7$)	5	11	14
Fundición gris ($C_{eq}=3\div3,25$)	4	9	12
Fundición gris ($C_{eq}=3,4\div4$)	2 ÷ 0,5	5	8
Níquel	6	20	16
Bronces	4,5	13	15
Latones	6,5	15	18
Bronce al aluminio	5,5	14	20
Cuproníquel 80/20	5,5	18	23
Cobre	5	16	20
Aluminio	7	17	19
Aleaciones ligeras	4 ÷ 5	10	12
Zinc	4	11	16

En el cuadro anterior se dan los valores de la contracción desde el estado líquido (con sobrecalentamiento de 150EC) hasta el final de la solidificación para diversos metales y aleaciones, así como las contracciones lineales de los mismos para piezas coladas en arena **A** y en coquilla **C**. Obsérvese en dicho cuadro como el níquel, contrariamente a los demás, presenta una contracción menor cuando se cuela en coquilla.



Mecanismos de la formación de rechupes.

a) Molde colado con metal puro o eutéctico:

Solidificando según hemos visto en lo que ha dado en denominarse solidificación en *capa delgada*. Es un frente de solidificación bien definido que progresa sin paso por el estado pastoso. A él pertenecen los metales puros, los eutécticos y las aleaciones con intervalo de solidificación menor de 40EC.

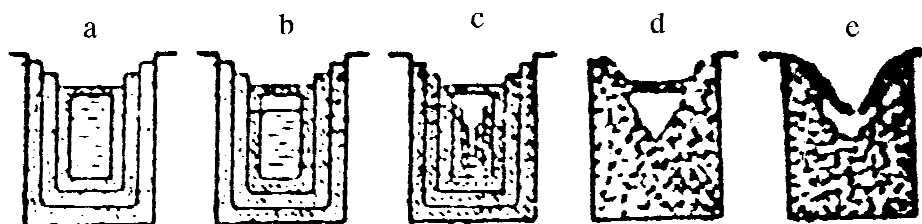
Estas aleaciones, por esta forma de solidificar, producen un rechupe franco, central, concentrado y macroscópico, que puede ser abierto, cerrado o presentar uno abierto y otro cerrado.

Ejemplos: Aceros de % C < 0,3
 Latones 60-40
 Aluminio puro
 Cobres % Cu > 98

La figura 6.16 da una idea de la formación del rechupe externo conforme progresa la solidificación en un molde colándose al descubierto.

La formación del rechupe interno se debe a que la superficie libre del líquido se enfría (aunque más lentamente que las paredes), llega a solidificar y empieza a formar una corteza que aumenta de espesor durante un cierto tiempo t . Este período t termina cuando, por las causas de las diversas contracciones, el volumen del líquido interno es insuficiente para llenar la cavidad y llegaa no mojar el techo. A partir de aquí, la concentración líquida continúa, así como el aumento del espesor en las paredes, creándose una cavidad que podemos considerar vacía y poderse despreciar la insignificante tensión de vapor debida a la aleación.

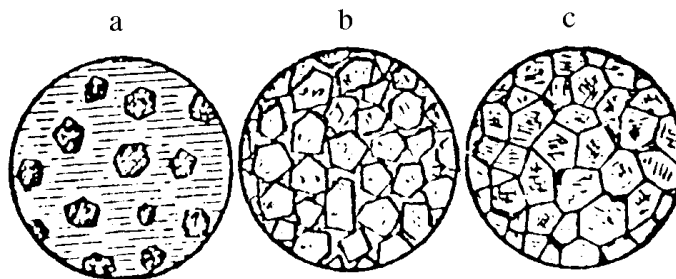
Si en lugar de considerar los períodos de tiempo consideramos los mismos infinitamente pequeños, como realmente ocurre, los espesores de las cargas son así mismo infinitamente delgados y, al final, la pieza fundida se presentará en esquema según la figura (d).



b) Molde colado con aleación con intervalo de solidificación:

Solidifican, según hemos visto, mediante una zona pastosa que se viene denominando, por contraposición, *capa gruesa*. Este término significa que una cierta solidificación parcial se establece casi de modo uniforme en toda la masa del metal (por lo menos en una capa gruesa)

apareciendo desde el principio un estado pastoso característico de la mezcla de sólido y líquido. No puede hablarse propiamente de un frente de solidificación, ya que el avance de éste se produce en puntos muy distintos de la masa. En fase avanzada, unos cristales tocarán con otros y entre ellos quedarán unos canales líquidos que solidificarán en último término (crecimiento dendrítico). Al hacerlo producirán un *microrrechupe* repartido en general en las juntas de los granos solidificados.



A este grupo pertenecen las aleaciones que solidifican en un intervalo grande de temperaturas (mayor de 70EC).

Ejemplos: Aluminio de pureza 99%
 Aleaciones ligeras
 Aleaciones de magnesio
 Bronces
 Fundición nodular

c) Aleaciones con características de solidificación intermedias:

Existe un tercer grupo de aleaciones cuya solidificación participa de características de las de *capa delgada* y *capa gruesa*. Hay frente de solidificación y estado pastoso, aunque ambos menos definidos, como era de esperar.

Ejemplos: Cuproníqueles
 Latones 70-30
 Acero de % de C > 0.4
 Fundición blanca