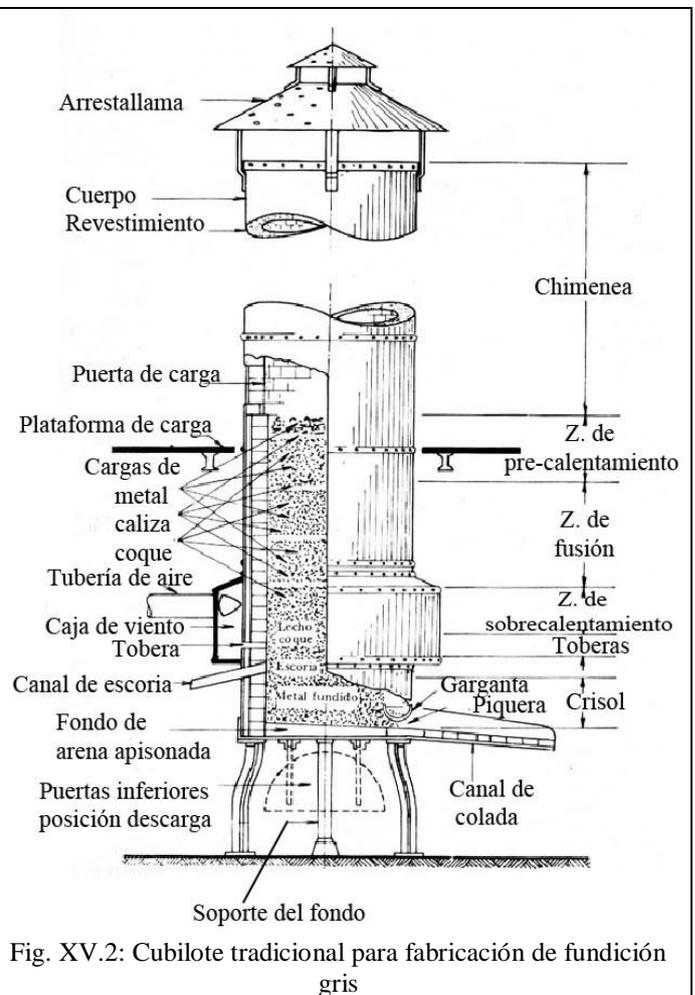
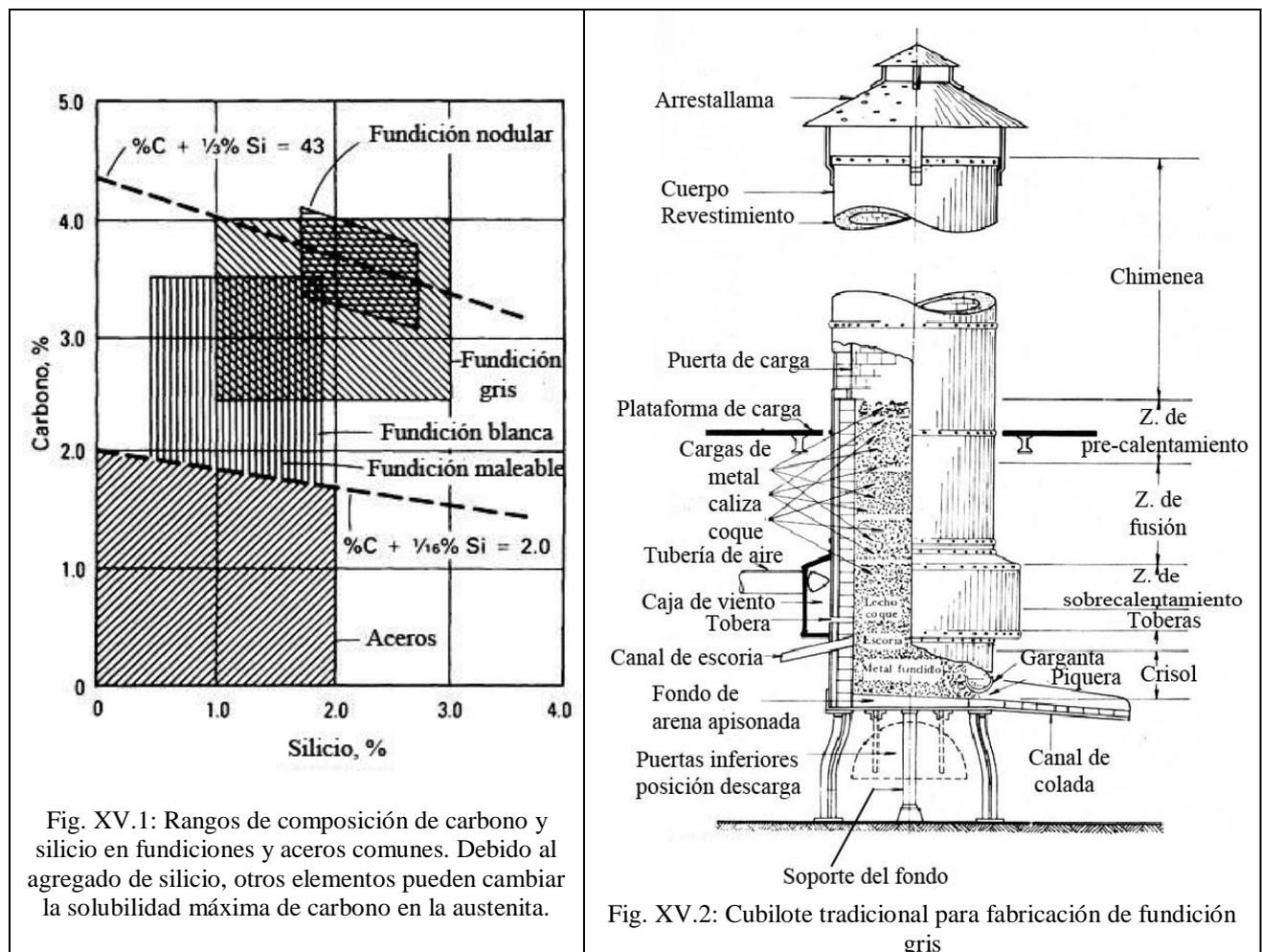


## XV- TRATAMIENTOS DE FUNDICIONES DE HIERRO

Dentro de las aleaciones Fe-C, las fundiciones de hierro tienen gran importancia industrial, no sólo debido a las características inherentes al propio material sino también por el hecho de que mediante la introducción de elementos de aleación, aplicación de tratamientos térmicos adecuados y el desarrollo de la fundición nodular, ha sido viable su empleo en algunas aplicaciones que, en cierto modo, eran exclusivas de los aceros. Se utilizan en la fabricación de diferentes elementos de máquinas que se obtienen por colada: bancadas, bloques de motores, aros, árboles de leva y otros, siempre que no soporten elevadas cargas mecánicas, sobre todo si son dinámicas. Las fundiciones nunca son sometidas a procesos de deformación plástica en frío ni en caliente; no son dúctiles ni maleables y no pueden forjarse ni laminarse.

Son aleaciones de hierro, carbono y silicio en las que el contenido de carbono que excede el límite de solubilidad del metal sólido (la línea más baja en la Fig. XV.1) precipita como grafito o como carburo de hierro.



El cubilote es la instalación más empleada para su fabricación, Fig. XV.2. No obstante, para la obtención de piezas de fundiciones de calidad, fundiciones aleadas y de alta resistencia, se emplean los hornos eléctricos. Generalmente se utiliza como materia prima fundamental el arrabio, chatarras de fundición y cantidades variables de chatarra de acero. Durante los procesos de fabricación, algunas veces se hacen adiciones de ferrosilicio y ferromanganeso, y en ocasiones especiales se añade también ferrocromo, níquel,

etc, para obtener en cada caso la composición deseada.

Su contenido de carbono, superior al 2%, en la práctica, varía de 2 a 4,5%, siendo lo más frecuente encontrarlo entre 2,75 y 3,5%. El **Si** suele oscilar de 0,5 a 3,5% y el **Mn** de 0,4 a 2%. Excepcionalmente, estos elementos pueden llegar a 4% y en ocasiones se fabrican fundiciones especiales de hasta 15 % Si. Los porcentajes de S oscilan de 0,01 a 0,20% y los de P de 0,04 a 0,8%. Para conseguir ciertas características especiales, se fabrican fundiciones aleadas que, además de los elementos citados, contienen porcentajes variables de Cu, Ni, Cr, Mo, etc.

Las propiedades de las fundiciones de hierro (y por consiguiente su estructura) quedan determinadas por factores distintos de los que intervienen en el diagrama Fe-C metaestable. Un aspecto fundamental en esto, es la inestabilidad de los carburos de hierro, que tienden a descomponerse a todas las temperaturas:



Sin embargo, a bajas temperaturas, esta reacción se produce tan lentamente que el carburo de hierro puede existir durante miles de años, por lo que se dice que es metaestable. A temperaturas más elevadas, especialmente en presencia de silicio, puede producirse la grafitización rápida del carburo de hierro; cuando ésta es completa, la estructura real queda representada en el diagrama de equilibrio Fe-grafito. Para muchas aleaciones comerciales, en las que solamente se produce la descomposición parcial del carburo de hierro, deben utilizarse los dos diagramas, el metaestable (Fe-cementita) y el estable (Fe-grafito), XV.3. No obstante, la elevada cantidad de Si que contienen las fundiciones de hierro, obliga a considerarlas como una aleación ternaria. En la Fig. XV.4 se observa la modificación del diagrama Fe-C por el agregado de 2 % de Si. Se ve que este elemento altera significativamente las composiciones eutectoide y eutéctica, y la solubilidad máxima del carbono en la austenita; así también eleva las temperaturas de ambas reacciones y éstas ocurren dentro de un rango y no a temperatura constante.

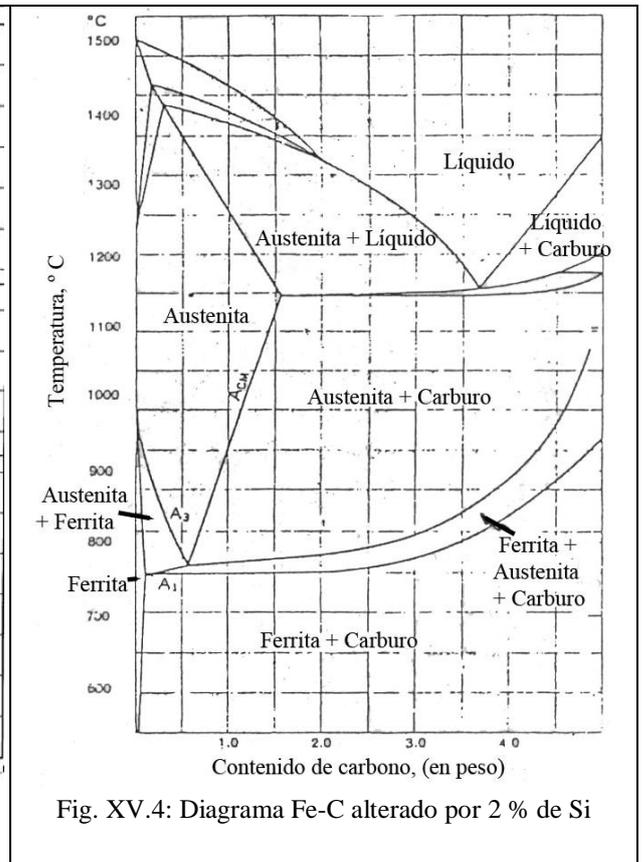
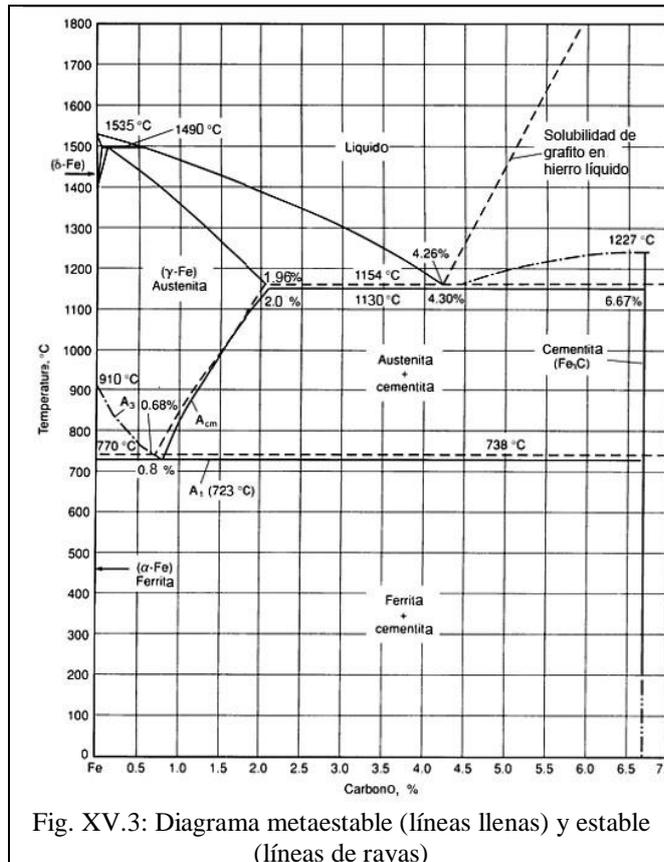


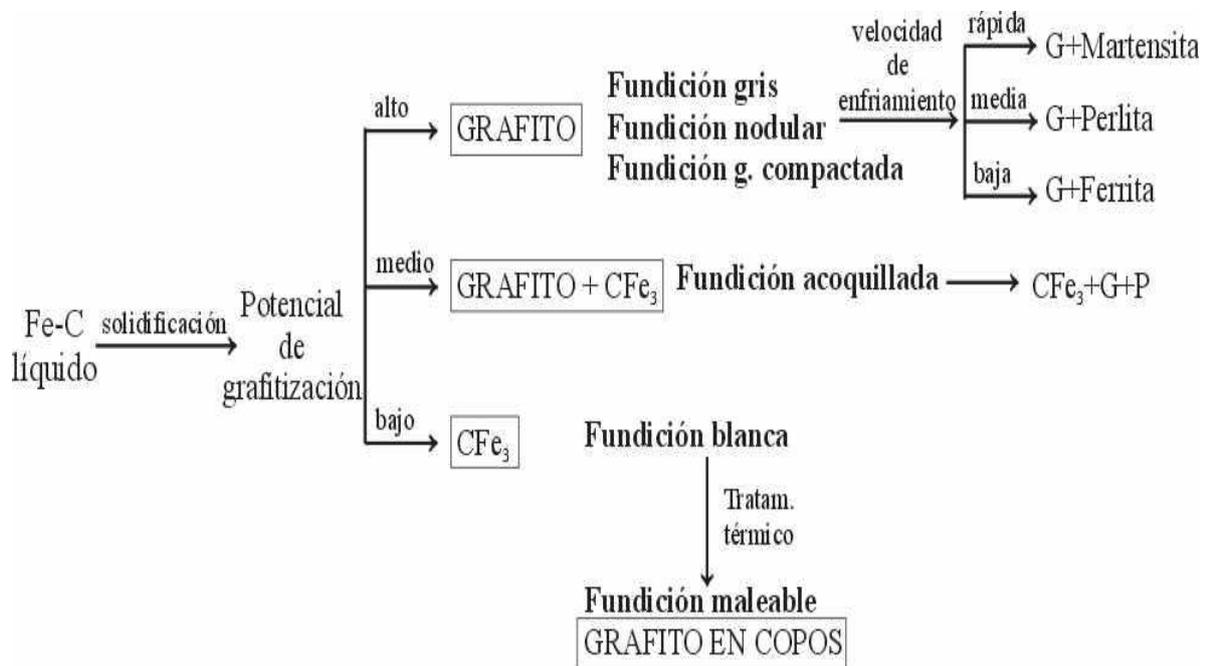
Fig. XV.3: Diagrama metaestable (líneas llenas) y estable (líneas de rayas)

Fig. XV.4: Diagrama Fe-C alterado por 2 % de Si

De acuerdo con las consideraciones anteriores, las fundiciones se clasifican en:

Tipos	Características	Resist. máx.	Ej. de aplicación
Fundición blanca	Todo el carbono está formando cementita; su fractura es blanca, brillante		bolas de molinos
Fundición gris laminar	Una parte o todo el carbono se encuentra como grafito y éste aparece en forma de láminas. Su fractura es de color gris oscuro	250 MPa	Block de motor
Fundición gris nodular	El grafito se presenta en forma globular; también se la denomina fundición de alta resistencia.	550 MPa	Tapa de motor; cigüeñal
Fundición gris de grafito compactado o vermicular	Intermedia entre las anteriores, con menor agregado de elemento nodulizante.	400 MPa	Caja de diferencial
Fundición maleable	Parte o todo el carbono aparece como grafito, pero precipitando éste en forma de copos. Su fractura, según la base metálica, es oscura o color acero.	440 MPa	Caja de embrague

La obtención de cada uno de los distintos tipos, depende del denominado "**Potencial de grafitización**", concepto que resume integralmente las variables composición química y velocidad de enfriamiento desde el estado líquido. Las propiedades finales quedarán determinadas por él, y por la estructura de la base metálica de la fundición, que depende de la velocidad con que se producen las transformaciones en estado sólido.



Para potenciales de grafitización altos y bajos, influye principalmente la composición química; para potenciales medios, tiene mayor influencia la velocidad de enfriamiento. Sobre ésta puede actuarse colocando coquillas en las áreas que deben resistir al desgaste.

### XV.1. Principales propiedades de las fundiciones

Las fundiciones tienen amplias aplicaciones debido a las siguientes ventajas:

1. Las piezas de fundición son, en general más baratas que las de acero y su fabricación es también más sencilla por emplearse instalaciones menos costosas y realizarse la fusión a temperaturas relativamente poco elevadas, bastante más bajas que las del acero. Por lo tanto es fácil lograr muy buena fluidez, lo que permite la obtención de piezas de pequeños espesores.

2. Son, en general, mucho más fáciles de mecanizar que los aceros.
3. Se pueden fabricar con relativa facilidad piezas de grandes dimensiones y también piezas pequeñas y complicadas, en las que se puede lograr gran precisión de formas y medidas.
4. Sus propiedades mecánicas son suficientes para numerosos elementos de motores, maquinarias, etc. Su resistencia a la compresión es muy elevada (50 a 100 kg/mm<sup>2</sup>), y su resistencia a la tracción puede variar en general de 12 a 90 kg/mm<sup>2</sup>. Tienen buena resistencia al desgaste y absorben muy bien (mucho mejor que el acero), las vibraciones a las que se encuentren sometidos máquinas, motores, etc.
5. Su fabricación exige menos precauciones que la del acero.

### XV.1.1. Fundiciones blancas

Las fundiciones blancas (Fig. XV.5) son aleaciones Fe-C cuyos procesos de solidificación y transformaciones en estado sólido, se realizan siguiendo las leyes generales del diagrama metaestable: su estructura está constituida principalmente por perlita y cementita: grupos de colonias de perlita derivados de la austenita primaria (libre), rodeados por ledeburita transformada, formada por cementita y perlita.

Se producen principalmente por moldeo de la aleación en moldes metálicos con un ajuste apropiado de la composición química.

Se caracterizan por su gran dureza y fragilidad, causadas por la presencia de cantidades importantes de cementita. En general no son maquinables y el acabado se realiza siempre por rectificado.

Aplicaciones: para equipos de movimiento de tierra minería y molienda, para bolas de molinos de bolas, como materia prima para fabricar aceros, para obtener fundiciones maleables, etc.

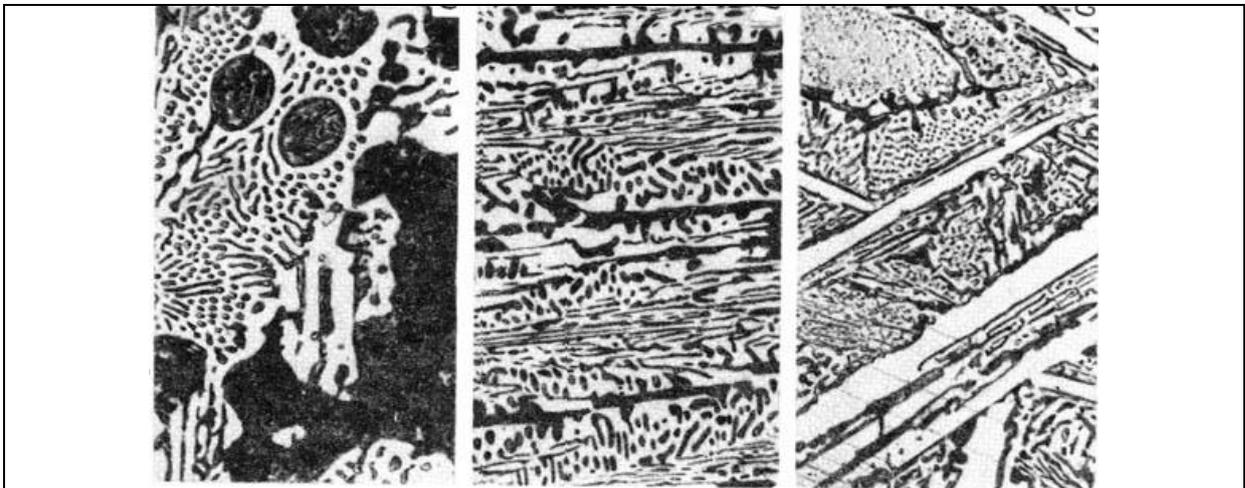


Fig. XV.5: Microestructuras de fundiciones blancas:  
a) hipoeutéctica, b) eutéctica, c) hipereutéctica

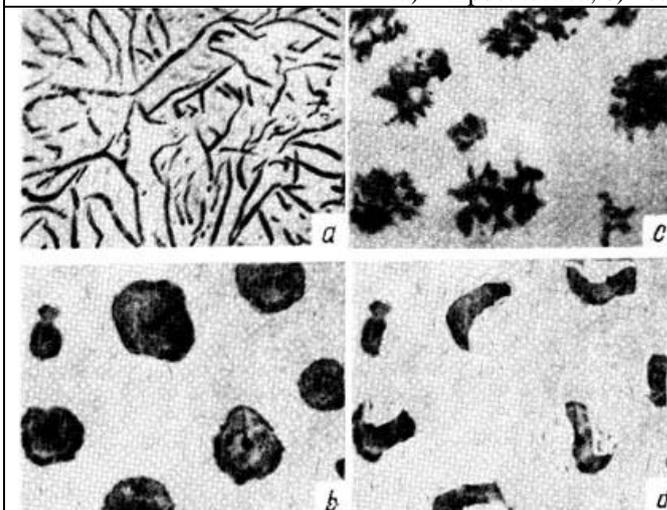


Fig. XV.6: Distintos tipos de grafito:  
a) laminar, b) copos, c) esférico, d) vermicular

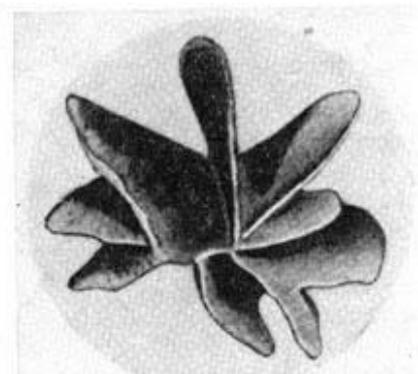


Fig. XV.7: Aspecto tridimensional del grafito común

### XV.1.2. Fundiciones grises laminares

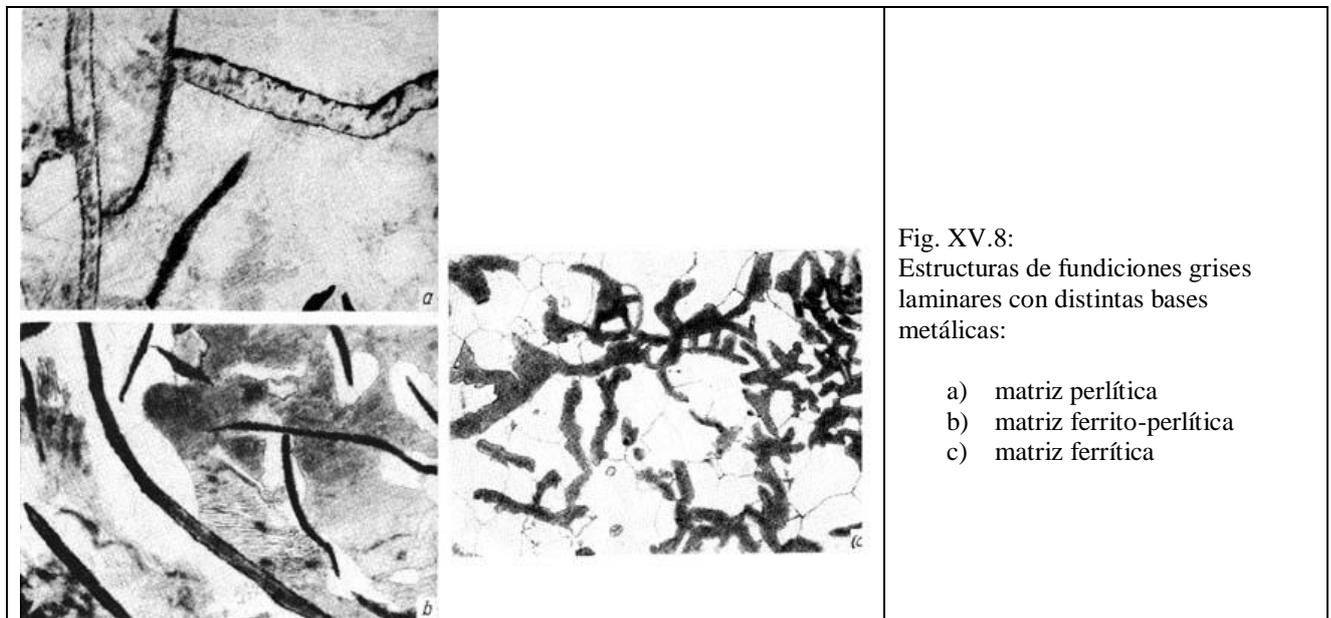
La Fig. XV.6 muestra las diferentes formas que puede adoptar el grafito en las fundiciones grises, y que de proporciona el típico color oscuro de sus fracturas.

Industrialmente, las laminares son las más importantes; en ellas, la mayor parte del C se encuentra en forma de láminas de grafito y el resto se presenta principalmente como perlita. Durante la solidificación y posterior enfriamiento, el grafito crece a partir de un centro, en forma de pétalos (Fig. XV.7), lo que origina discontinuidades en la matriz y es la causa de que sus propiedades mecánicas sean, en general, muy inferiores a las de los aceros, aún siendo suficientes para muchísimas aplicaciones. La presencia de grafito en cantidad importante baja la dureza, la resistencia y el módulo de elasticidad y reduce casi a 0 la ductilidad, tenacidad y plasticidad. En cambio mejora la resistencia al desgaste y a la corrosión, y la maquinabilidad.

En general contiene más Si (1,5 a 3,5%) que la blanca (menos del 1%), lo que eleva su potencial de grafitización. El S y el Mn, en cambio, favorecen la formación de fundición blanca.

Para piezas de fundición que requieren una superficie exterior muy dura y el núcleo más blando, se trabaja con potenciales de grafitización medios y moldes metálicos denominados **coquillas**, de manera que la velocidad de enfriamiento sea la conveniente para impedir la formación de grafito en la zona exterior y permitirlo en la zona del interior, más blanda. Los contenidos en C y Si deben ser muy precisos, y suelen ser intermedios entre los de la fundición gris y la blanca.

Los principales constituyentes metalográficos de las fundiciones grises son ferrita, perlita, steadita y grafito; la base metálica deseada se obtiene modificando la velocidad de enfriamiento desde la región austenítica. (Fig. XV.8)



El grafito se presenta en forma de láminas, ejerciendo una influencia muy importante en sus propiedades y características, que dependen fundamentalmente del tamaño, cantidad y distribución de las mismas (Fig. XV.9 y 10). Las láminas de grafito de gran longitud interrumpen la matriz perlítica provocando concentración de tensiones, lo que disminuye la resistencia a la tracción y la ductilidad. Las laminillas pequeñas y homogéneamente distribuidas son menos perjudiciales.

La steadita (Fig. XV.11) aparece cuando el contenido de fósforo presente en la fundición gris es mayor de 0,15%; es un eutéctico ternario formado por ferrita, fosfuro de hierro y cementita. Debido a que la steadita es dura y frágil, resulta muy perjudicial por lo que es conveniente limitar el contenido de P.

La fundición gris perlítica es de gran interés industrial. Está constituida por laminillas de grafito embebidas en una masa de perlita laminar, puede considerarse como un acero eutectoide en el que se hallan incrustadas innumerables láminas de grafito. Tiene muy buenas propiedades mecánicas y se usa en piezas de motores, maquinaria, tubos, camisas de cilindros, pistones de motores de explosión, zapatas de freno, piezas delgadas de alta resistencia, lingoteras, ruedas, etc. Tiene relativamente buena tenacidad y gran resistencia al desgaste.

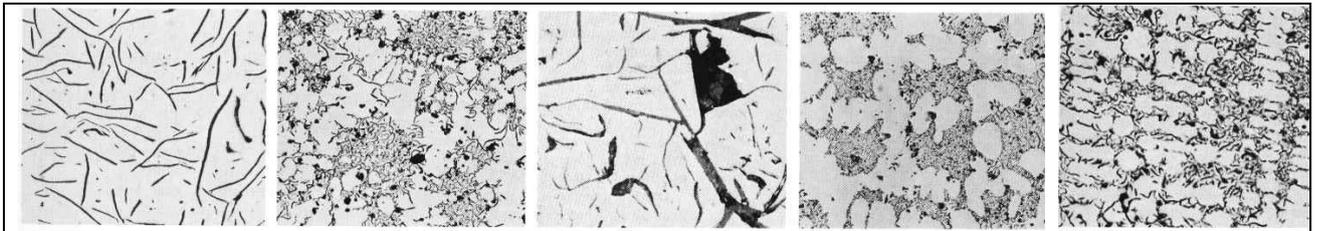


Fig. XV.9: Tipos de grafito

A: distribución uniforme, orientación al azar; B: Agrupación en rosetas; C: Láminas superpuestas;  
D: Segregación interdendrítica, orientación al azar; E: Segregación interdendrítica, orientación preferencial

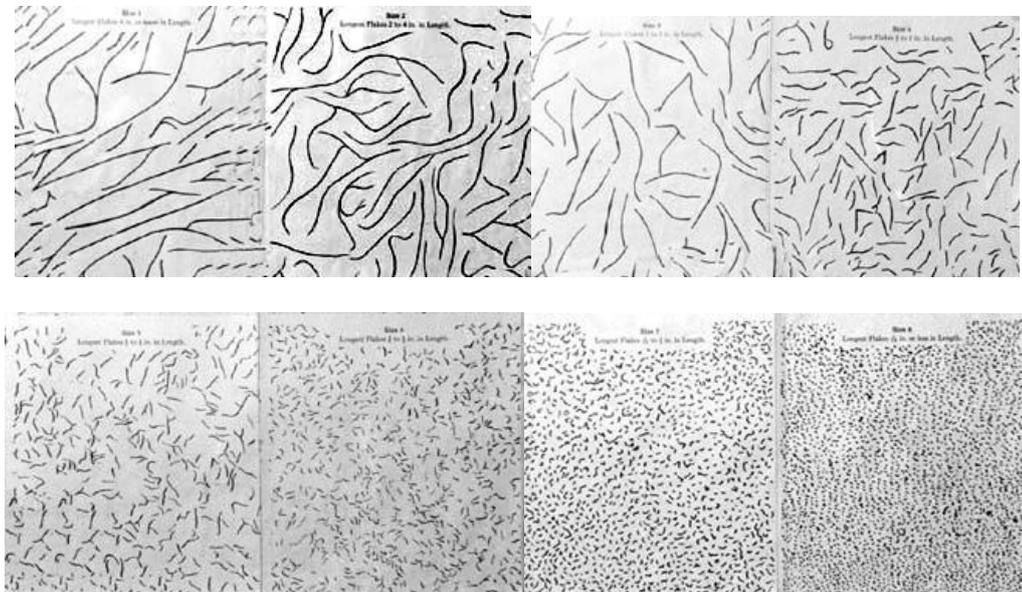


Fig. XV.10: Tamaños de grafito 1 al 8

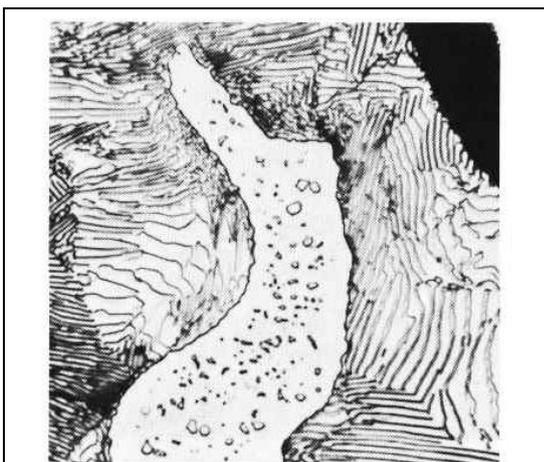


Fig. XV.11: Steadita en una fundición gris laminar perlítica.

### XV.1.3. Fundiciones maleables

Se obtienen por recocido de fundiciones blancas en condiciones especiales. La designación de fundición maleable utilizada por la mayoría de los países, es en realidad un término impropio que puede inducir al error de pensar que el fin del tratamiento térmico es obtener productos fácilmente forjables. En realidad se producen para reemplazar piezas que deberían ser fabricadas por forjado.

Existen dos procedimientos de fabricación que dan lugar a:

- Fundición maleable europea* o de corazón blanco (zona exterior decarburada -ferrita- y zona interior de ferrita y perlita)
- Fundición maleable americana* o de corazón negro (ferrita y copos de grafito).

Ambos procesos consisten en la fabricación de las piezas en fundición blanca, seguido de un recocido.

### **XV.1.3.1. Maleable europea**

Las piezas de fundición blanca se colocan dentro de cajas cerradas, con un material oxidante tal como mineral de Fe, óxidos, cascarilla de laminación, etc y sometidas a un recocido a alta temperatura (900 a 1100° C) durante 3 a 6 días. Es frecuente emplear aproximadamente 1 día en calentar, 3 en mantener el material a temperatura y 2 en enfriar. En este recocido la fundición blanca se descarburiza por difusión de C desde el interior de la pieza hacia el exterior por el efecto oxidante del mineral o cascarilla que la rodea, quedando así convertida en un nuevo material que es muy tenaz y parecido en cierto modo a un acero de bajo carbono. Si la pieza es de grandes dimensiones se obtiene una capa superficial de ferrita y un núcleo de ferrita y perlita, siendo posible encontrar copos de grafito. Fig. XV.12(a).

### **XV.1.3.2. Maleable americana**

En este procedimiento las piezas se colocan en cajas cerradas rodeadas con materias neutras como la arena, en lugar de ser recubiertas con materias oxidantes. En el sistema americano la fundición blanca no se descarburiza y el carbono no emigra sino que, durante el recocido precipita bajo la forma de copos de grafito, resultando entonces un material muy tenaz también parecido en cierto modo al acero dulce pero con los copos de grafito en una matriz de ferrita.

Al mantener la fundición blanca durante cierto tiempo a temperaturas de recocido entre 850-950°C, la cementita secundaria y eutéctica, se descompone en grafito y austenita. El grafito precipita alrededor de ciertos núcleos potenciales, y crece aproximadamente con la misma velocidad en todas direcciones, tomando la forma final de nódulos irregulares o copos, quedando a su alrededor zonas pobres en carbono.

La segunda fase del recocido consiste en un enfriamiento muy lento al atravesar la zona crítica en que tiene lugar la reacción eutéctica. Esto permite a la austenita descomponerse en las fases estables ferrita y grafito. Fig. XV.12(b)

Bajo la forma de copos compactos (Fig. XV.13), el grafito rompe muy poco la continuidad de la matriz ferrítica tenaz, lo que da lugar a una mayor resistencia y tenacidad con relación a los valores que presenta la fundición gris. Los copos de grafito sirven para lubricar las herramientas de corte, lo que explica la elevada maquinabilidad de la fundición maleable.

Fundición maleable perlítica: en su estructura, parte del carbono se encuentra combinado formando perlita. Tiene aplicación en aquellos casos en que se requiere más dureza y resistencia que las exigibles a las maleables ferríticas, con la consiguiente pérdida de ductilidad y maquinabilidad. Fig. XV.12 (c).

Las fundiciones maleables encontraron su aplicación particular en la fabricación de piezas de forma complicada, en sustitución del acero moldeado. Con el tiempo fueron reemplazadas por las fundiciones nodulares, evitándose así el costo de los tratamientos de tiempos prolongados.

### **XV.1.4. Fundiciones nodulares**

Para reducir el problema de la fragilidad de las fundiciones con grafito laminar, y su baja resistencia al impacto, se desarrollaron fundiciones con el grafito en forma de pequeñas esferas o nódulos.

Su técnica consiste en lograr la precipitación del grafito mediante el agregado de sustancias llamadas nodulizantes. Se fabrican directamente en bruto de fusión sin necesidad de tratamiento térmico posterior, añadiendo cerio o magnesio a la fundición en estado líquido inmediatamente antes de ser coladas en los moldes.

La adición de estos elementos altera el normal mecanismo de solidificación de la fundición, provocando la separación del grafito en forma nodular. La microestructura de estas fundiciones suele estar constituida por esferoides de grafito rodeados por aureolas de ferrita sobre un fondo o matriz de perlita (ojo de buey), Fig. XV.14. De este modo la continuidad de la matriz se interrumpe mucho menos que cuando el grafito se encuentra en forma laminar, provocando una resistencia a la tracción y tenacidad mayores.

Teniendo propiedades similares, la ventaja de la fundición nodular con respecto a la maleable es que se obtiene directamente de fusión sin necesidad de tratamiento térmico posterior. Además los nódulos presentan una forma más esférica que los aglomerados de copos más o menos irregulares que aparecen en la fundición maleable.

Aplicaciones: cigüeñas, árboles de leva, ciertos mecanismos de biela-manivela, etc

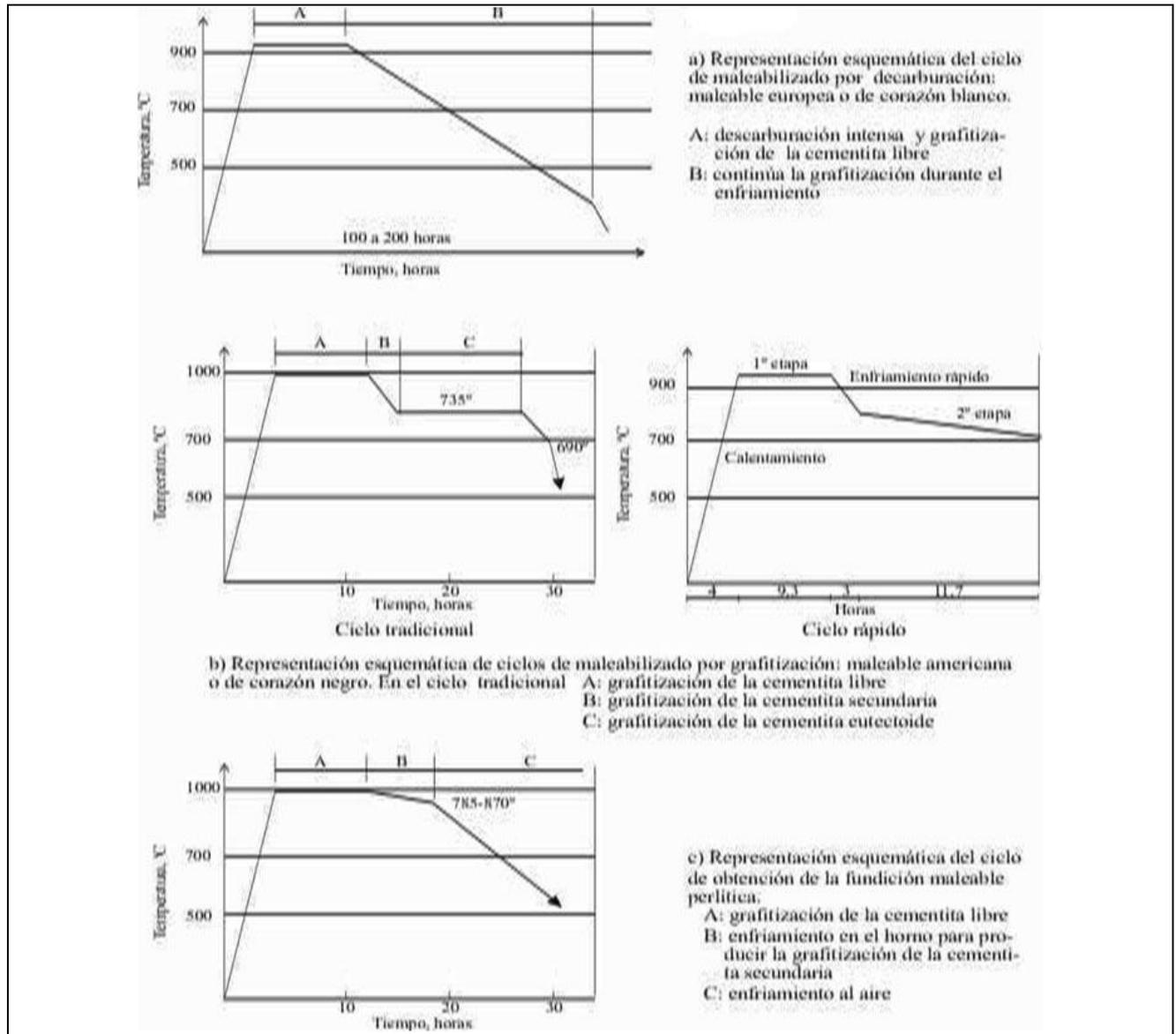


Fig. XV.12: Tratamientos de maleabilizado

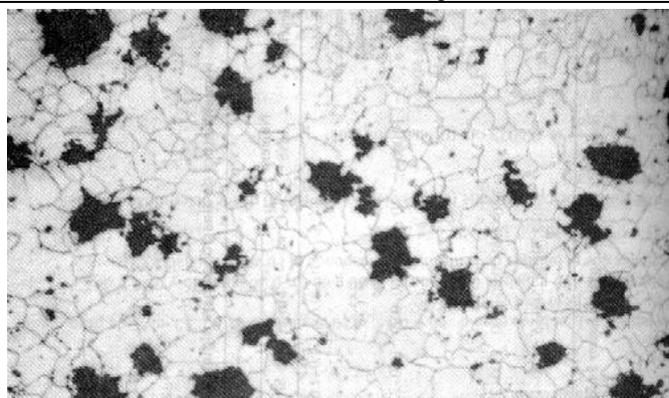


Fig. XV.13: Estructura metalográfica de una fundición maleable de matriz ferrítica

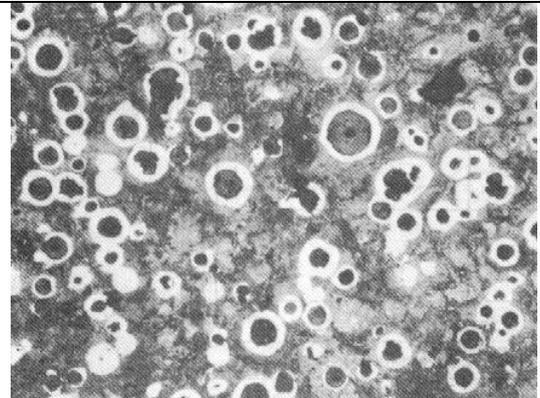


Fig. XV.14: Estructura metalográfica de una fundición nodular, ojo de buey

### XV.1.5. Propiedades de las fundiciones

Las gráficas de la Fig. XV.15 muestran algunas propiedades mecánicas de fundiciones grises y nodulares en diferentes condiciones.

a) y b) Las denominaciones corresponden a las normas IRAM (tomadas de ASTM). En el caso de las fundiciones grises, el número indica la resistencia a la tracción, coincidente con el límite elástico, ya que la

ductilidad es nula por el efecto enfragilizador de las láminas de grafito. En cambio, las fundiciones nodulares se identifican con tres números, que refieren a la resistencia máxima, el límite elástico y el alargamiento porcentual de rotura, respectivamente.

Los tratamientos térmicos modifican la base metálica, que puede ser ferrítica, ferrito-perlítica, perlítica o martensítica, como se verá en el apartado siguiente.

- c) El módulo de elasticidad es una propiedad insensible a la estructura; no obstante el grafito laminar tiene una notable influencia, disminuyendo su valor en función a la forma, tamaño y distribución de las láminas.
- d) Debido a la importante capacidad de amortiguación de las fundiciones grises, éstas se aplican en bases y fundaciones de maquinarias.

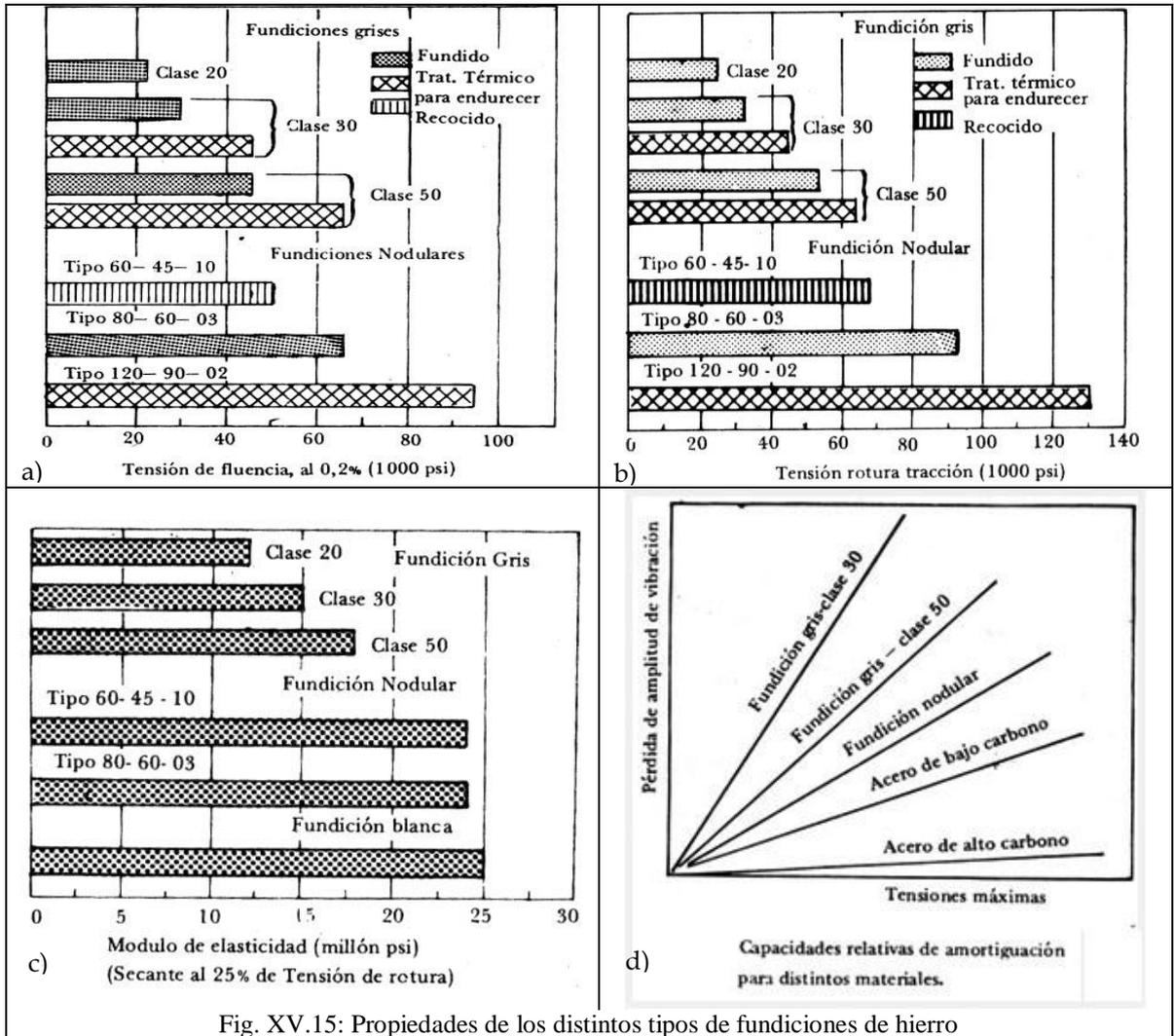


Fig. XV.15: Propiedades de los distintos tipos de fundiciones de hierro