

FUNDICIONES

**PATRONATO DE PUBLICACIONES DE LA ESCUELA
ESPECIAL DE INGENIEROS INDUSTRIALES**

FUNDICIONES

POR

JOSÉ APRAIZ BARREIRO

Ingeniero Industrial

Profesor de Metalurgia General y Siderurgia de la Escuela Técnica
Superior de Ingenieros Industriales de Bilbao

Director de la Fábrica de Recalde de la S. A. Echevarría, de Bilbao

2.ª EDICIÓN

Distribuido por
Editorial Dossat - Plaza de Santa Ana, 9 - Madrid

MADRID

1 9 6 3

PRÓLOGO A LA PRIMERA EDICIÓN

La escasez de publicaciones técnicas en castellano es uno de los primeros problemas con que tropieza el estudiante, el ingeniero o el especialista que inicia en España sus estudios o trabajos sobre alguna de las cada día más numerosas técnicas metalúrgicas.

El deseo de ayudar en el aprendizaje de estas materias, me ha animado a publicar estas lecciones sobre fundición que desde hace algunos años se venían explicando en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Bilbao.

Aprovecho esta oportunidad para expresar mi agradecimiento a mis queridos amigos y compañeros de trabajo en la S. A. ECHEVARRÍA, D. José María Guinea, D. José María Palacios, D. José Huguet y D. Higinio Alonso, así como a los distinguidos especialistas en fundición don Antonio Alonso Urquijo, D. Asensio Martínez Asúa y D. Santiago y don Luis González, por la valiosa ayuda que me han prestado para la preparación de este libro.

Bilbao, Julio 1960

JOSÉ APRAIZ BARREIRO

N.º Reg. 3.741-60
Depósito legal: BI. 2.363-1962

ARTES GRÁFICAS GRIJELMO, S. A.-BILBAO

ÍNDICE

CAPÍTULO I

FUNDICIONES

CLASIFICACIONES, CALIDADES Y MICROESTRUCTURA

| | <u>Págs.</u> |
|--|--------------|
| 1. Generalidades | 1 |
| 2. Principales propiedades de las fundiciones | 3 |
| 3. Clasificación de las fundiciones. Clasificación de las fundiciones por su fractura. | 5 |
| 4. Principales constituyentes microscópicos de las fundiciones | 10 |
| 5. Fundiciones blancas sin grafito | 13 |
| 6. Fundiciones con carbono en forma de grafito | 14 |
| 7. Influencia del silicio en las fundiciones | 16 |
| 8. Influencia de la velocidad de enfriamiento en las fundiciones | 17 |
| 9. Principales características y composiciones de las fundiciones grises | 19 |

CAPÍTULO II

DIAGRAMA HIERRO-CARBONO ESTABLE

| | |
|---|----|
| 10. Generalidades | 21 |
| 11. Formación de grafito | 23 |
| 12. Estudio de la formación de los constituyentes que aparecen en la solidificación y enfriamiento de una fundición de 3 % de carbono y 2 % de silicio al variar la velocidad de enfriamiento | 28 |
| 13. Influencia del azufre, fósforo, manganeso, oxígeno e hidrógeno en las fundiciones | 32 |

CAPÍTULO III

CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LAS FUNDICIONES

| | |
|--|----|
| 14. Influencia de la composición y de la microestructura en las características mecánicas de las fundiciones | 35 |
| 15. Características mecánicas de las fundiciones grises y clasificación de acuerdo con su resistencia a la tracción. | 39 |
| 16. Ensayo de la flexión transversal de las fundiciones grises | 43 |
| 17. Descripción de algunas otras características importantes de las fundiciones ordinarias | 44 |
| 18. Relación entre la composición de las fundiciones y su microestructura y resistencia | 49 |

CAPÍTULO IV

FUNDICIÓN PERLÍTICA

| | Págs. |
|---|-------|
| 19. Fundición perlítica | 53 |
| 20. Principales empleos de la fundición gris y de la fundición perlítica de acuerdo con su dureza y resistencia | 57 |
| 21. Composición de las fundiciones grises ordinaria de uso más frecuente | 58 |
| 22. Sensibilidad al espesor | 60 |
| 23. Fundiciones de alta resistencia | 63 |
| 24. Inoculación | 65 |
| 25. Tamaño y distribución de las láminas de grafito | 67 |
| 26. Fenómenos de subenfriamiento que se presentan en el proceso de solidificación de las fundiciones | 69 |

CAPÍTULO V

FUNDICIONES ALEADAS

| | |
|--|----|
| 27. Generalidades | 71 |
| 28. Efectos de los elementos de aleación en las fundiciones | 71 |
| 29. Clasificación de las fundiciones aleadas | 74 |
| 30. Fundiciones de baja y media aleación | 76 |
| 31. Fundiciones de alta resistencia a la tracción | 76 |
| 32. Fundiciones martensíticas resistentes al desgaste | 80 |
| 33. Fundiciones resistentes al calor con 1 por 100 de cromo | 82 |
| 34. Fundiciones de alta dureza con 1 a 3 por 100 de cromo | 83 |
| 35. Fundiciones austeníticas de alto contenido en níquel | 84 |
| 36. Fundiciones aleadas al cromo | 89 |
| 37. Fundiciones de alto contenido en silicio resistentes al calor y a la corrosión | 93 |
| 38. Fundiciones aleadas con aluminio | 94 |
| 39. Principales grupos de fundiciones especiales clasificadas por su microestructura | 96 |

CAPÍTULO VI

TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LAS FUNDICIONES

| | |
|---|-----|
| 40. Generalidades | 101 |
| 41. Recocido | 101 |
| 42. Temple y revenido | 105 |
| 43. Endurecimiento superficial de las fundiciones por flameado | 110 |
| 44. Nitruración de las fundiciones | 111 |
| 45. Fundiciones templadas (Fundiciones coladas en coquilla metálica) | 111 |
| 46. Otras fundiciones empleadas para fabricar cilindros de laminación | 113 |
| 47. Microestructura de la fundición blanca | 116 |

CAPÍTULO VII

FUNDICIONES MALEABLES

| | |
|--|-----|
| 48. Generalidades | 117 |
| 49. Maleable europea (blanca) | 118 |
| 50. Maleable americana (negra) | 119 |

Págs.

| | |
|--|-----|
| 51. Teoría de la fabricación de la fundición maleable | 122 |
| 52. Fabricación de la fundición blanca para obtención posterior de fundición maleable de corazón blanco y de corazón negro | 123 |
| 53. Recocido de la maleable europea o blanca | 125 |
| 54. Recocido de la maleable americana o negra | 131 |
| 55. Grafitización en nódulos en el recocido de la fundición blanca | 131 |
| 56. Recocido rápido de las fundiciones maleables | 137 |
| 57. Terminación del recocido | 139 |
| 58. Fundición maleable perlítica | 140 |

CAPÍTULO VIII

FUNDICIONES DE GRAFITO ESFEROIDAL Y OTRAS FUNDICIONES ESPECIALES DE MUY ALTA CALIDAD

| | |
|--|-----|
| 58. Fundiciones con grafito esferoidal (fundiciones dúctiles) | 143 |
| 59. Fabricación de fundiciones con grafito esferoidal con adiciones de magnesio | 144 |
| 60. Propiedades de las fundiciones dúctiles | 147 |
| 61. Tratamientos térmicos | 149 |
| 62. Fundiciones aleadas con grafito esferoidal | 153 |
| 63. Algunos nuevos tipos de fundiciones con grafito nodular o esferoidal de alta resistencia | 154 |
| 64. Fundiciones para cigüeñales y otras piezas de automóviles fabricadas por la Casa Ford | 155 |
| 65. Fundiciones de grafito nodular con azufre y selenio | 157 |
| 66. Aleaciones «centra-steel» fabricadas por la General Motors | 159 |
| 67. Fundiciones de grafito difuso | 163 |
| 68. Propiedades mecánicas de las fundiciones con grafito difuso | 164 |
| APÉNDICE | 166 |

CAPÍTULO I

FUNDICIONES

CLASIFICACIONES, CALIDADES Y MICROESTRUCTURAS (1)

1. Las fundiciones son aleaciones de hierro, carbono y silicio que generalmente contienen también manganeso, fósforo, azufre, etc. Su contenido en carbono (2 a 4,5 %) es superior al contenido en carbono de los aceros (0,1 a 1,5 %). Se caracterizan porque adquieren su forma definitiva directamente por colada, no siendo nunca las fundiciones sometidas a procesos de deformación plástica ni en frío ni en caliente. En general, no son dúctiles ni maleables y no pueden forjarse ni laminarse (2).

En las fundiciones grises, que en la práctica son las más importantes, aparecen durante la solidificación y posterior enfriamiento, láminas de grafito (figs. 2, 3, 4 y 5) que al originar discontinuidades en la matriz, son la causa de que las características mecánicas de las fundiciones grises sean, en general, muy inferiores a las de los aceros, aunque sean, sin embargo, suficientes para muchísimas aplicaciones.

En las fundiciones llamadas blancas, aparece en su solidificación, un constituyente llamado «ledeburita», que es un eutéctico formado por austenita saturada y cementita, que no existe en los aceros y que al enfriarse queda transformado luego a la temperatura ambiente en agrupaciones muy características de cementita y perlita (figs. 1, 6 y 101). La presencia de cantidades importantes de cementita y perlita reunidos en forma similar a la que corresponde a los eutécticos, es la causa de la gran fragilidad de las fundiciones blancas.

(1) En este libro no se explica la terminología propia de las aleaciones hierro-carbono, que se emplea aquí desde las primeras páginas, porque se detalló en otro anterior, *Tratamientos Térmicos de los Aceros*. Creemos que es ventajoso y necesario estudiar primero las microestructuras y propiedades de los aceros y continuar luego con las de las fundiciones. Es muy difícil, casi imposible, poder estudiar las fundiciones sin haber estudiado antes bien los aceros.

(2) Hay algunas fundiciones (que son excepción) que son tenaces y tienen cierta ductilidad. En este grupo de excepción se incluyen las fundiciones maleables y otras especiales como las «fundiciones dúctiles» de grafito esferoidal, cuya fabricación se ha iniciado todavía hace muy pocos años.

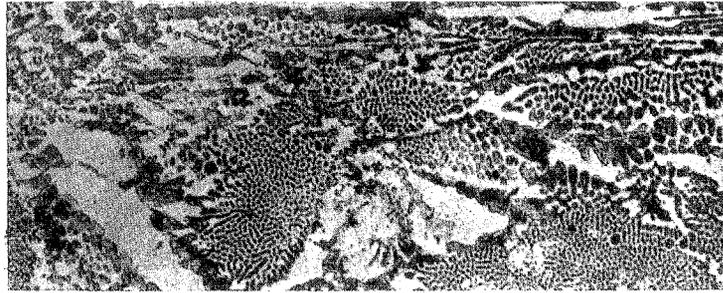


FIGURA 1
× 200

Microestructura de una fundición blanca hipereutéctica. Se observan importantes masas blancas de cementita hipereutéctica. También se observan agrupaciones pseudoeutécticas derivadas de la ledeburita que están constituidas por pequeñas partículas negras de perlita sobre un fondo blanco de cementita.
(HANNEMAN.)

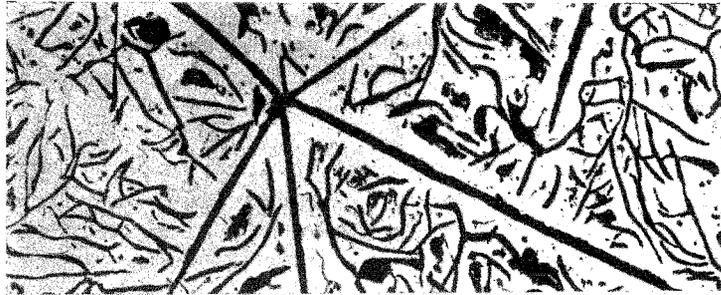


FIGURA 2
× 60

Microestructura de una fundición gris hipereutéctica. Se observan largas láminas de grafito hipereutéctico. La probeta estaba pulida, pero sin atacar.
(HANNEMAN.)

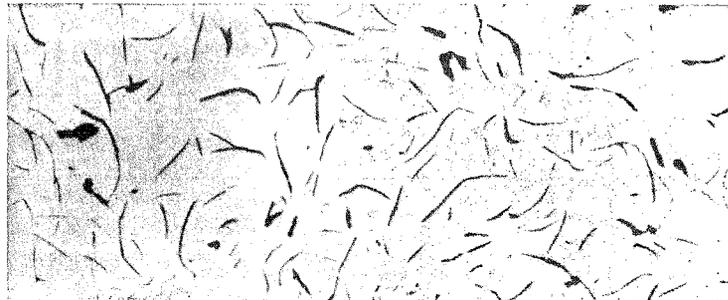


FIGURA 3
× 100

Láminas de grafito de una fundición gris hipoeutéctica. La probeta estaba pulida sin atacar.
(GAGNEBIN.)

El cubilote es la instalación más empleada para la fabricación de la mayoría de las piezas de fundición. Un porcentaje de piezas mucho más pequeño se obtiene utilizando hornos de reverbero, hornos de crisol y hornos eléctricos, siendo estas últimas instalaciones las más utilizadas para la fabricación de fundiciones de calidad, fundiciones aleadas y de alta resistencia. En algunos casos excepcionales se fabrican piezas de gran tamaño, colando directamente la fundición desde el horno alto.

Para la fabricación de piezas de fundición, se emplea generalmente como materia prima fundamental el arrabio o lingote de hierro y además se utilizan también en las cargas de los hornos y cubilotes, chatarras de fundición, y a veces, se emplean también además cantidades variables de chatarra de acero. Durante los procesos de fabricación se suelen hacer algunas veces adiciones de ferrosilicio y ferromanganeso, y en algunas ocasiones especiales, se añade también ferrocromo, níquel, etc., para obtener en cada caso la composición deseada.

Teóricamente, las fundiciones pueden contener de acuerdo con el diagrama hierro-carbono (fig. 20), de 1,7 a 6,67 % de carbono. Sin embargo, en la práctica, como hemos dicho antes, su contenido varía de 2 a 4,5 %, siendo lo más frecuente que oscile de 2,75 a 3,5 %. El contenido en silicio suele oscilar de 0,5 a 3,5 % y el de manganeso de 0,4 a 2 %. Excepcionalmente, los contenidos en silicio y manganeso llegan algunas veces a 4 %, y en ocasiones se fabrican fundiciones especiales hasta de 15 % de silicio. Los porcentajes de azufre suelen oscilar de 0,01 a 0,20 %, los de fósforo de 0,04 a 0,80 % y en algunos casos excepcionales llega a 1,5 %. Para conseguir ciertas características especiales, se fabrican fundiciones aleadas que, además de los elementos citados, contienen también porcentajes variables de cobre, níquel, cromo, molibdeno, etc.

2. Principales propiedades de las fundiciones.

El empleo de la fundición para la fabricación de piezas para usos muy diversos, ofrece, entre otras, las siguientes ventajas:

1.º Las piezas de fundición son, en general, más baratas que las de acero (que es el material que más se utiliza en los talleres y fábricas de maquinaria, motores, instalaciones, etc.), y su fabricación es también más sencilla por emplearse instalaciones menos costosas y realizarse la fusión a temperaturas relativamente poco elevadas, y más bajas que las que corresponden al acero.

2.º Las fundiciones son, en general, mucho más fáciles de mecanizar que los aceros.

3.º Se pueden fabricar con relativa facilidad piezas de grandes di-

mensiones y también piezas pequeñas y complicadas, que se pueden obtener con gran precisión de formas y medidas, siendo además en ellas mucho menos frecuente la aparición de zonas porosas que en las piezas fabricadas con acero fundido.

4.º Para numerosos elementos de motores, maquinaria, etc., son suficientes las características mecánicas que poseen las fundiciones. Su resistencia a la compresión es muy elevada (50 a 100 Kg/mm²) y su resistencia a la tracción (que generalmente suele variar de 12 a 40 Kg/mm²) es también aceptable para muchas aplicaciones. Tienen buena resistencia al desgaste y absorben muy bien (mucho mejor que el acero), las vibraciones de máquinas, motores, etc., a que a veces están sometidas.

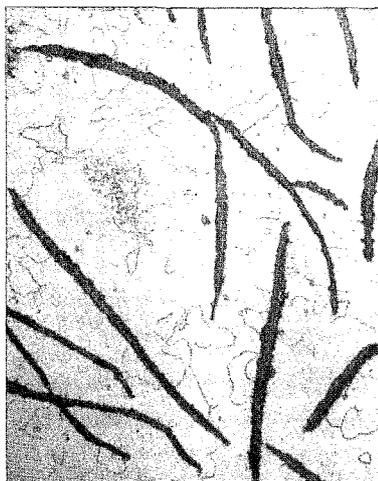


FIGURA 4
× 200

Fundición gris ferrítica. Láminas de grafito sobre un fondo blanco de cristales de ferrita.



FIGURA 5
× 200

Microestructura de una fundición gris hipoeutéctica. Se observan láminas de grafito (negras) sobre un fondo de perlita (oscuro). Aparece algo de ferrita (blanca) junto a las láminas de grafito.

5.º Su fabricación exige menos precauciones que la del acero y, sin necesidad de conocimientos técnicos muy especiales, se llegan a obtener fundiciones con características muy aceptables para numerosas aplicaciones.

6.º Como las temperaturas de fusión de las fundiciones son, como hemos dicho antes, bastante bajas, se pueden sobrepasar con bastante facilidad, por lo que en general suele ser bastante fácil conseguir que las fundiciones en estado líquido tengan gran fluidez, y con ello se fa-

cilita la fabricación de piezas de poco espesor. En la solidificación presentan mucha menos contracción que los aceros y, además, su fabricación no exige como la de los aceros, el empleo de refractarios relativamente especiales de precio elevado.

En los últimos años se han desarrollado nuevos métodos de fabricación y tratamiento, con los que se obtienen fundiciones especiales con características excelentes, que hasta hace poco tiempo no se sospechaba que fuera posible alcanzar con esta clase de materiales, que en muchos casos llegan a hacer una gran competencia al acero.

3. Clasificación de las fundiciones.

Por ser muchos y muy diferentes los factores que hay que tener en cuenta para la calificación y selección de las fundiciones, es difícil establecer una clasificación simple y clara de las mismas. La más antigua y conocida de las clasificaciones establece cuatro grupos: Fundición blanca, gris, atruchada y maleable. A estos cuatro grupos se añade en la actualidad otro grupo, el de las fundiciones especiales, en el que se pueden incluir las fundiciones aleadas que contienen elementos especiales, las fundiciones nodulares, aciculares, inoculadas, etc. A continuación estudiaremos las fundiciones clasificadas de dos formas diferentes: primero de acuerdo con su fractura, y luego, por su microestructura, dejando el estudio de las fundiciones aleadas y especiales para más adelante.

Clasificación de las fundiciones por su fractura.

Por el aspecto de las fracturas que presentan al romperse los lingotes de hierro obtenidos en el horno alto colados en arena y por el aspecto que tienen después de rotas las piezas fundidas, se clasifican las fundiciones en las tres primeras clases citadas anteriormente: Fundición gris, blanca y atruchada. La fundición gris contiene, en general, mucho silicio, 1,5 % a 3,5 %; la blanca, poco silicio, generalmente menos de 1 %, y la atruchada tiene, generalmente, un contenido de silicio intermedio, variable de 0,6 a 1,5 %. El color oscuro que tienen las fracturas de las fundiciones grises y atruchadas, se debe a la presencia en las mismas de gran cantidad de láminas de grafito.

El contenido en silicio de las aleaciones hierro-carbono y la velocidad de enfriamiento, tienen gran influencia en la formación de una u otra clase de fundición. Las velocidades de enfriamiento muy lentas favorecen la formación de fundición gris; el enfriamiento rápido tiende, en cambio, a producir fundición blanca. Finalmente, el azufre y el manganeso ejercen también una cierta influencia contraria a la del silicio,

y favorecen la formación de fundición blanca. Sin embargo, el manganeso y el azufre, cuando se encuentran formando inclusiones no metálicas de sulfuro de manganeso, no ejercen influencia favorable ni desfavorable en la formación de grafito ni en la aparición de fundiciones grises o blancas. Además de estos tres tipos de fundición, se fabrican también desde hace muchos años las fundiciones maleables, que en lugar de obtenerse por simple fusión, como las que acabamos de citar, se fabrican por recocido de la fundición blanca en condiciones especiales.

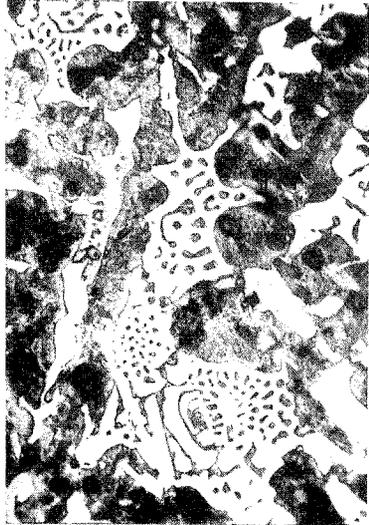


FIGURA 6
× 200

Microestructura de una fundición blanca. Se observan los agrupamientos pseudoeutécticos de pequeñas partículas de perlita (negro) sobre un fondo de cementita (blanco). Estas agrupaciones se derivan de la ledeburita eutéctica. Las grandes masas negras son de perlita.



FIGURA 7
× 200

Grafito esferoidal (negro) sobre un fondo de perlita y ferrita en una «fundición dúctil» fabricada con adición de magnesio.

En la actualidad existen también, como ya hemos dicho antes, además de esas cuatro clases, algunos otros tipos como las fundiciones aleadas o especiales que se han comenzado a fabricar recientemente y que complican algo el estudio clásico de las cuatro clases que acabamos de citar.

Clasificación de las fundiciones por su microestructura.

Al iniciar este estudio consideramos que el lector conoce ya perfectamente los microconstituyentes de los aceros. Por eso, a continuación se

señala la presencia en la fundición de algunos de ellos, sin antes haber explicado aquí sus características.

Las fundiciones que se obtienen en los hornos altos y en los cubilotes se pueden clasificar de acuerdo con la microestructura en tres grandes grupos:

1.º Fundiciones en las que *todo el carbono* se encuentra combinado, formando cementita y que al romperse presentan fractura de fundición blanca (figs. 1, 6, 98, 99, 100 y 101).

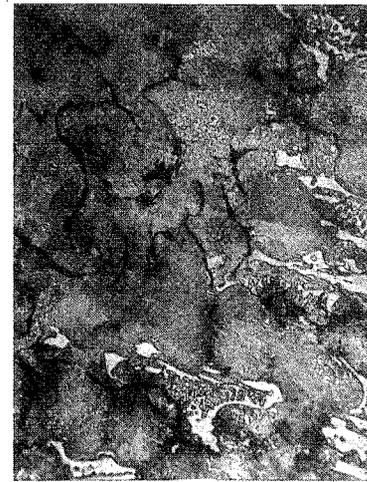


FIGURA 8
× 100

Fundición atruchada. En la zona izquierda y superior se observa la microestructura correspondiente a la fundición gris con láminas de grafito. En la zona derecha e inferior la microestructura es de fundición blanca con cementita libre.

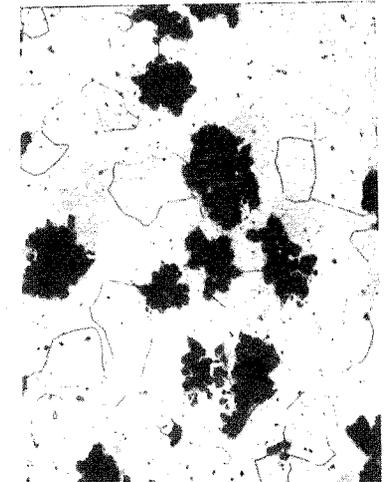


FIGURA 9
× 100

Nódulos de grafito (negro) sobre un fondo de cristales de ferrita (blanca) en una fundición maleable americana de corazón negro.

2.º Fundiciones en las que *todo el carbono* se encuentra en estado libre, formando grafito (fig. 4). Son fundiciones ferríticas.

3.º Fundiciones en las que *parte del carbono* se encuentra combinado formando cementita y parte libre en forma de grafito (figs. 5, 8 y 64). A este grupo, que es el más importante de todos, pertenecen la mayoría de las fundiciones que se fabrican y utilizan normalmente, como son las fundiciones grises, atruchadas, perlíticas, etc.

Es interesante señalar que en la práctica es muy difícil encontrar fundiciones en las que todo el carbono aparezca en forma de grafito, como se acaba de indicar, para las fundiciones del segundo grupo; pero, sin

embargo, se cita esta clase de fundición que casi puede considerarse como teórica, porque creemos que señalándolas se facilita el estudio de todas las demás clases. Las fundiciones de ese grupo reciben el nombre de fundiciones grises ferríticas (fig. 4), y en ellas todo el carbono se encuentra en forma de grafito.

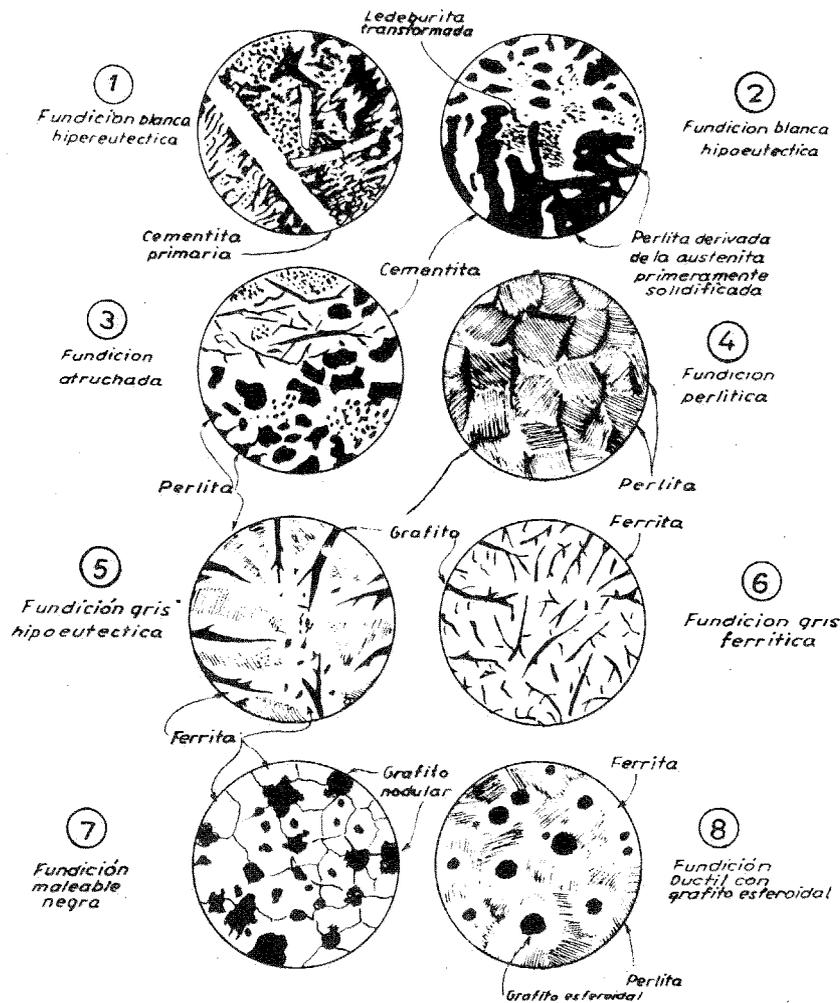


FIGURA 10
× 50

Algunas microestructuras típicas de las fundiciones de uso más frecuente.

Con un criterio amplio, también se podrían incluir en este segundo grupo, aunque no encajan exactamente en él, las fundiciones maleables (figs. 9 y 104), cuya matriz es de ferrita y en las que el grafito se presenta en forma de nódulos. La fundición maleable se obtiene, como ya hemos señalado antes, en dos etapas: primero se fabrica la fundición blanca y luego, por recocido de ésta, se obtiene la fundición maleable, en la que el grafito tiene forma nodular. Hasta hace pocos años las únicas fundiciones con grafito nodular eran las fundiciones maleables, que se obtenían, como hemos señalado, por recocido de las fundiciones blancas. En la actualidad, sin embargo, existen además otras clases de fundiciones con grafito nodular, mejor dicho esferoidal, fabricadas con cerio o magnesio, que estudiaremos más adelante y que se obtienen por fusión directa y cuya microestructura es, en cierto modo, parecida a la de las fundiciones maleables (figs. 7, 122, 123, 126, 128 y 130).

| Calidades | Composición en % | | | | | |
|------------------------|------------------|------|------|-------|------|-------|
| | Número | C | Si | S | Mn | P |
| Fundiciones grises | N.º 1 | 3,25 | 3,50 | | | |
| | N.º 2 | 3,25 | 2,40 | | | |
| | N.º 3 | 3,50 | 2,10 | 0,010 | 0,40 | 0,040 |
| | N.º 4 | 3,50 | 1,80 | a | a | a |
| | N.º 5 | 3,50 | 1,40 | 0,200 | 1,50 | 0,800 |
| Fundiciones atruchadas | 4 | | 0,90 | | | |
| Fundiciones blancas | 4 | | 0,80 | | | |

TABLA I

Composición de los arrabios o lingotes que normalmente se fabrican en los hornos altos en España

En la Tabla I se señalan las composiciones de las principales clases de fundiciones que se fabrican en la actualidad en España en los hornos altos. En la Tabla II se indican los límites de composición de las fundiciones de uso más frecuente, y en la Tabla III se indica la forma de presentarse el carbono en las diferentes fundiciones.

Quando se desea obtener piezas de fundición que tengan una superficie externa muy dura y el núcleo más blando, se utilizan fundiciones de composición muy exacta que se cuecen generalmente en moldes metálicos, de manera que la velocidad de enfriamiento sea la conveniente para impedir que se forme grafito en la zona exterior que interesa que sea dura y permita que se forme grafito en la zona del interior, que debe ser blanda. Para conseguir esos resultados se eligen contenidos en carbono y en silicio muy precisos, y que suelen corresponder a valores intermedios entre los de la fundición gris y la fundición blanca. Esas piezas

constituídas por una capa exterior de fundición blanca y otra interior de fundición gris, suelen recibir impropiamente la denominación de piezas de fundición templada, ya que la significación que se puede dar al temple de estas fundiciones se comprende que es muy diferente del fenómeno de temple que se produce en los aceros.

| Clase de fundición | | Composición en % | | | | |
|---|-------------------|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | C | Si | Mn | P | S |
| Gris | Corriente | 2,50-4,00 | 1,00-3,80 | 0,40-1,00 | 0,05-1,00 | 0,05-0,25 |
| | Alta resistencia | 2,80-3,30 | 1,40-2,00 | 0,50-0,80 | 0,05-0,15 | 0,05-0,12 |
| Blanca | | 1,80-3,20 | 0,50-1,90 | 0,25-0,80 | 0,05-0,20 | 0,06-0,18 |
| Maleable (Composiciones de las fundiciones blancas que se emplean para obtener fundición maleable) | Europea (blanca) | 2,50-3,00 | 0,50-1,25 | 0,40-0,60 | 0,05-0,10 | 0,05-0,10 |
| | Americana (negra) | 2,00-2,75 | 0,50-1,20 | 0,40-0,60 | 0,05-0,10 | 0,05-0,10 |

TABLA II
Composición de las fundiciones de uso más corriente.

Se dice que una pieza es de fundición templada cuando en su zona central es de fundición gris y en la zona periférica es de fundición blanca. Se dice que un acero está templado cuando su estructura es martensítica.

4. Principales constituyentes microscópicos de las fundiciones.

Para avanzar en el estudio de las fundiciones es necesario conocer bien los constituyentes que aparecen en su microestructura. Los más importantes son la ferrita, la cementita, la perlita (formada por ferrita y cementita), el grafito y la steadita. Suele presentarse también la sorbita y en ocasiones, aunque menos frecuentes, también aparecen la troostita, la bainita y la martensita. También se pueden señalar como constituyentes microscópicos las inclusiones no metálicas de sulfuro de manganeso, y como menos importante todavía los silicatos complejos de hierro y manganeso. Como en el libro *Tratamientos térmicos de los aceros* se explican con detalle las características de la mayoría de esos constituyentes, a continuación sólo señalaremos con detalle las características del grafito y de la steadita que en aquel libro no se estudiaron. Luego indicaremos también algunas particularidades de la ferrita y perlita de las

| Modo de presentarse el carbono | Clase de fundición | Constituyentes | Figura |
|---|--|--|--------------------|
| Fundiciones sin grafito | | | |
| Todo el carbono se presenta combinado | Fundición blanca 1) Hipereutéctica | 1) Cementita primaria en forma de agujas o bandas y cementita secundaria y perlita | 1, 10-1 y 100 |
| | Fundición blanca 2) Hipoeutéctica | 2) Cementita secundaria y perlita | 6 y 10-2 99 y 102 |
| Fundiciones con grafito en forma de láminas | | | |
| Parte del carbono se presenta combinado y parte en forma de láminas de grafito | Fundición atruchada Muy difícil de mecanizar | Grafito, cementita y perlita | 8 y 10-3 |
| | Fundición perlítica Alta resistencia | Grafito y perlita | 37 y 10-4 |
| | Fundición gris ordinaria Muy fácil de mecanizar y baja resistencia | Grafito, perlita y ferrita | 3, 4, 5 y 10-5 |
| Todo el carbono se presenta en forma de grafito en laminillas | Fundición ferrítica Fácil de mecanizar y muy baja resistencia | Grafito y ferrita | 4 y 10-6 |
| Fundiciones con grafito en forma nodular o esferoidal | | | |
| El grafito se presenta en forma de grafito nodular | Fundición maleable de corazón negro Alta resistencia y buena tenacidad | Ferrita y grafito nodular. A veces también algo de cementita y perlita que no han llegado a transformarse en grafito | 9 y 10-7 104 y 117 |
| Teóricamente, el carbono debía de haber desaparecido por descarburation. En la práctica queda algo en forma perlítica y algo en forma nodular | Fundición maleable de corazón blanco Buena resistencia y buena tenacidad | Teóricamente, sólo ferrita. En la práctica suele quedar algo de grafito en nódulos y a veces algo de cementita y perlita sin transformar | 103 |
| El carbono se presenta en forma de grafito esferoidal y en forma de carbono combinado | Fundiciones especiales con grafito en forma esferoidal. (Fabricadas con cerio o magnesio.) Alta resistencia y muy buena tenacidad | Ferrita, grafito en forma esferoidal y perlita. A veces también martensita revenida | 7 y 10-8 122, etc. |

TABLA III
Clasificación general de las fundiciones de acuerdo con la forma de presentarse el carbono que contienen. No se han considerado ciertos casos muy especiales, como el de fundiciones martensíticas, aciculares, etc.

fundiciones que no poseen esos constituyentes cuando se presentan en los aceros.

Grafito.—El grafito es una forma elemental del carbono. Es blando, untuoso, de color gris oscuro, con peso específico 2,25, que es aproximadamente 1/3 del que tiene el acero. Se presenta en estado libre en algunas clases de fundiciones, ejerciendo una influencia muy importante en sus propiedades y características. Estas dependen fundamentalmente de la forma del grafito, de su tamaño, cantidad y de la forma en que se encuentre distribuido.

En las fundiciones grises (figs. 2, 3, 4 y 5), que son las de mayor aplicación industrial, se presenta en forma de láminas u hojuelas. En las fundiciones maleables, se presenta en forma de nódulos (fig. 9) y en otras especiales en forma esferoidal (fig. 7).

Refiriéndonos a las fundiciones grises se puede decir que la presencia de grafito en cantidad importante, baja la dureza, la resistencia y el módulo de elasticidad en comparación con los valores que corresponderían a las mismas microestructuras sin grafito, es decir, a la matriz que se puede considerar como un acero. El grafito, además, reduce casi a cero su ductilidad, su tenacidad y su plasticidad.

En cambio, el grafito mejora la resistencia al desgaste y a la corrosión. Disminuye el peligro de los agarrotamientos por roce de mecanismos y piezas de máquinas y motores, ya que en cierto modo actúa como un lubricante. También mejora la maquinabilidad y reduce las contracciones durante la solidificación.

Cuando se presenta en forma de nódulos (fundición maleable) o en forma esferoidal (fundición con cerio o magnesio), la disminución de la resistencia y de la tenacidad es menor. Por ello estas fundiciones tienen mayores resistencias y alargamientos que las fundiciones grises ordinarias.

Steadita.—La steadita es un compuesto de naturaleza eutéctica, duro y frágil y de bajo punto de fusión (960°) que aparece en las fundiciones de alto contenido en fósforo. (En general, se presenta cuando el $P > 0,15\%$). La steadita tiene un 10 % de fósforo y su peso específico es próximo al del hierro. Como casi todo el fósforo que contienen las fundiciones se halla formando parte de la steadita, tendremos que una fundición con 1 % de fósforo, por ejemplo, tiene aproximadamente en su microestructura 10 % de steadita.

En la fundición gris la steadita está compuesta de un eutéctico celular binario de ferrita y fosfuro de hierro (figs. 11 y 25). En las fundiciones atruchadas y blancas la steadita está constituida por un eutéctico ternario de ferrita, fosfuro de hierro y cementita. El fosfuro de hierro que forma parte de la steadita tiene una dureza muy elevada, 600 a 700

Vickers, y la steadita suele tener de 300 a 350 Vickers. En las fundiciones grises se observa que casi siempre en las proximidades de la steadita la dureza suele ser un poco más elevada que en las demás zonas.

Al señalar más adelante la influencia del fósforo en las fundiciones, se dan más detalles de este constituyente (página 33).

Ferrita.—Las principales características de este constituyente se señalaron al estudiar los aceros. Aquí sólo destacaremos que, en general, la ferrita de los aceros se diferencia de la de la fundición, en que ésta suele contener en disolución cantidades muy importantes de silicio que elevan su dureza y resistencia. Así, por ejemplo, desde valores de 28

Kg/mm² y 90 Brinell en los aceros, aumenta la resistencia y la dureza de la ferrita a 45 Kg/mm² y 120 Brinell en fundiciones de 2,5 % de silicio.

Perlita.—Aquí conviene señalar que, debido a la presencia de silicio, el contenido en carbono de la perlita de las fundiciones es inferior al de los aceros. Al variar en las fundiciones el silicio de 0,5 a 3 %, varía el porcentaje de carbono de la perlita de 0,8 a 0,5 %.

Ledeburita.—Es el constituyente eutéctico que se forma en el enfriamiento de las fundiciones a 1.145° aproximadamente, en el momento en que termina la solidificación. Está formada por 52 % de cementita y 48 % de austenita saturada. La ledeburita no existe a la temperatura ambiente en las fundiciones ordinarias, debido a que en el enfriamiento se transforma en cementita y perlita. Sin embargo, en las fundiciones se pueden conocer las zonas donde existió la ledeburita, por el aspecto eutéctico con que quedan esas agrupaciones de perlita y cementita.

5. Fundiciones blancas sin grafito.

Las fundiciones blancas (figs. 1, 6 y 99) son aleaciones hierro-carbono cuyos procesos de solidificación y de transformación se realizan de acuerdo con las leyes generales correspondientes al diagrama hierro-



FIGURA 11
× 100

Eutéctico steadita constituido por agrupamientos de fosfuro de hierro (negro) sobre un fondo de ferrita (blanco) en una fundición gris de alto contenido en fósforo. La steadita aparece entre los cristales negros de perlita. En la microestructura se observan también láminas de grafito.

carbono metaestable que se señala al estudiar los aceros, y están constituidas fundamentalmente por perlita y cementita. En la microestructura de las fundiciones blancas hipoeutécticas, se observa con pocos aumentos (100 a 200) (figs. 6 y 99) grupos de grandes cristales negros de perlita derivados de la austenita primaria. Esos núcleos negros están rodeados por agrupaciones pseudoeutécticas derivadas de la ledeburita, formadas por cementita y perlita. Las fundiciones blancas hipereutécticas que tienen muy poco interés industrial, están formadas por grandes masas de cementita primaria y agrupaciones de perlita y cementita derivadas de la ledeburita, constituidas por las últimas partes de la aleación que se solidificaron (fig. 1). Estas dos clases de fundiciones, junto con las fundiciones blancas eutécticas presentan, como indica su mismo nombre, fracturas blancas y brillantes, y en general son muy duras, frágiles y tienen poca tenacidad.

6. Fundiciones con carbono en forma de grafito.

Las fundiciones grises, atruchadas, maleables, perlíticas y algunas especiales, pertenecen en cambio a una familia muy diferente de la que acabamos de estudiar de fundiciones blancas. En su microestructura,

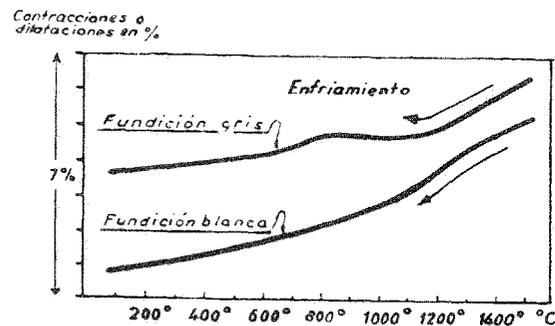


FIGURA 12

Contracciones que experimentan la fundición gris y la blanca en el enfriamiento desde el estado líquido.

además de la ferrita, cementita y perlita, aparece un nuevo constituyente, el grafito, cuya formación no se señaló al estudiar el diagrama hierro-carbono referido a los aceros (diagrama metaestable), porque no aparece en ellos. Más adelante estudiaremos el diagrama hierro-carbono estable, que es el que corresponde a estas fundiciones, y señalaremos las circunstancias que favorecen y regulan la formación del grafito que, además de ser el elemento característico de ese diagrama, es el que ejerce más influencia en las propiedades de las fundiciones grises.

Para facilitar este estudio, al principio nos referiremos exclusivamente a las fundiciones grises y atruchadas, en las que el grafito se presenta en forma de laminillas más o menos dispersas en la masa del metal. Más adelante estudiaremos otras fundiciones como las maleables en las que el grafito está en forma nodular y otras especiales como las bainíticas, ferríticas, etc. (algunas de ellas todavía relativamente poco conocidas), cuyas propiedades son muy diferentes de las de la fundición gris, que es la clásica y más conocida de la mayoría de los talleres.

En las fundiciones grises el carbono que se encuentra en forma de grafito ocupa un volumen mucho mayor que el carbono que se presenta en forma combinada en las fundiciones blancas. Por eso, el peso específico de las fundiciones grises (7,25) es menor que el de las blancas (7,7). El proceso de solidificación y enfriamiento en ambas fundiciones es diferente. En el proceso de enfriamiento de las fundiciones grises se produce en la zona de 1.000 a 800° una ligera dilatación debida a la formación de grafito que no se observa en las fundiciones blancas. En los procesos de solidificación desde el estado líquido hasta la temperatura ambiente, las fundiciones blancas se contraen aproximadamente un 4,4 % en volumen, mientras las fundiciones grises sólo se contraen, aproximadamente, un 2,1 % (fig. 12). El acero en cambio se contrae 5,2 %, aproximadamente (1).

Proporcionalmente en las fundiciones grises el carbono ocupa un volumen mayor que el que parece que debería ocupar por su peso. Esto se puede apreciar al observar las estructuras con el microscopio. En una fundición gris de 3,5 % de carbono (en peso), el volumen del carbono que se encuentra en forma de grafito es un 12 %, aproximadamente (figura 13). Esto es debido a que el peso específico del grafito es, como ya hemos dicho antes, aproximadamente, 1/3 del peso específico del acero.

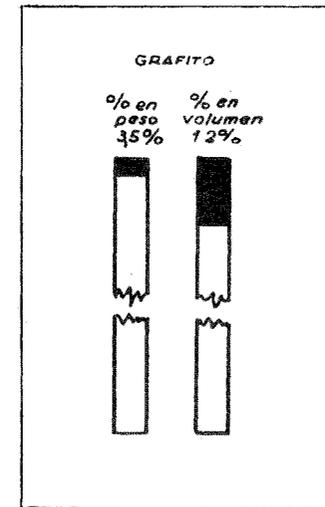


FIGURA 13

Volumen y peso del grafito en una fundición de 3,57 % carbono. Se observa que debido al peso específico del grafito (2,5), muy bajo, comparado con el del acero (7,8), hay una diferencia muy grande entre su peso y su volumen.

(1) Contracciones lineales aproximadas: fundición gris, 1 %; fundición blanca, 1,6 %; acero, 1,75 %.

7. Influencia del silicio en la formación de grafito.

Las leyes que rigen la formación de los constituyentes en las fundiciones grises, son algo diferentes de las que se estudian en el diagrama hierro-carbono correspondiente a los aceros. Las diferencias que existen entre éstas y aquéllas son debidas principalmente a la presencia de silicio en cantidades bastante elevadas, generalmente variables de 1 a 4 %. El silicio se presenta normalmente en las fundiciones en forma de siliciuro de hierro disuelto en la ferrita o hierro alfa, no pudiendo observarse por lo tanto directamente su presencia por medio del examen

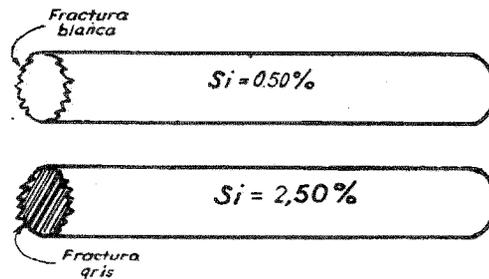


FIGURA 14

Influencia del silicio en la formación de la fundición blanca o gris, en redondos de 25 mm de diámetro de la siguiente composición base: C = 3 %; Mn = 0,45 %; P = 0,050 %; S = 0,07 %.

microscópico. Cuando se halla presente en pequeñas cantidades, variables de 0,1 a 0,6 %, no ejerce influencia importante. En cambio, cuando el silicio se halla presente en porcentajes variables de 0,6 a 3,5 %, ejerce indirectamente una acción muy destacada y contribuye a la formación de grafito, que modifica completamente el carácter y las propiedades de las aleaciones hierro-carbono. En el siguiente ejemplo que se refiere a dos piezas de fundición del mismo tamaño (25 mm de diámetro y 50 cm de longitud), se aprecia perfectamente su influencia. La composición de la primera pieza es la siguiente: C = 3 %; Si = 0,50 %; Mn = 0,45 %; P = 0,05 %; y S = 0,070 %; la segunda tiene la misma composición, excepto el contenido en silicio, que es de 2,5 % en lugar de 0,5 %. Esa diferencia en el porcentaje de silicio hace que las microestructuras y propiedades de las dos piezas sean completamente distintas (fig. 14). La primera es una fundición blanca, muy dura, frágil, tiene la fractura blanca, encontrándose en ella todo el carbono en forma de cementita (figs. 1 y 6); la segunda es una fundición gris relativamente blanda, tiene fractura grisácea y un gran porcentaje del carbono en forma de grafito (figs. 2, 3, 4 y 5).

En la figura 15 se puede ver el diagrama de Maurer, que fue uno de

los primeros que señalaron de una forma clara la relación que hay entre los porcentajes de carbono y silicio y la clase de fundición que se obtiene en cada caso. Este diagrama que es muy sencillo y claro ha sido perfeccionado y modificado por otros investigadores, siendo en la actualidad el de Norbury (fig. 16) uno de los más aceptados. Estos diagramas se refieren a un determinado espesor y una clase de molde y no se destaca en ellos la influencia de la velocidad de enfriamiento.

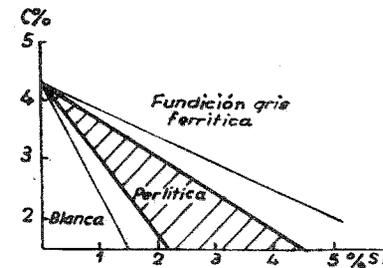


FIGURA 15

Antiguo diagrama de Maurer que señala los contenidos en carbono y silicio correspondientes a distintos tipos de fundiciones en piezas de 30 mm de espesor coladas en arena.

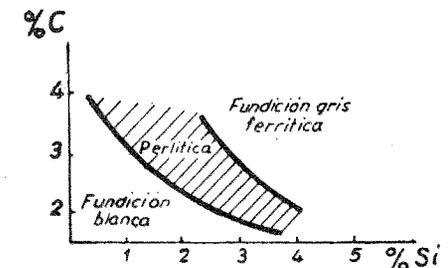


FIGURA 16

Diagrama de Norbury que señala los contenidos en carbono y silicio correspondientes a distintos tipos de fundiciones en piezas de 25 mm de espesor coladas en arena.

En las fundiciones, además del silicio y la velocidad de enfriamiento, también tiene gran influencia en la formación de grafito los contenidos de carbono, azufre y manganeso. El carbono, como explicaremos más adelante y como se desprende de las figuras 15 y 16, tiene una influencia tan importante como la del silicio. En efecto, muy pequeñas variaciones de carbono, hacen que en determinadas circunstancias la fundición pase de gris a blanca. Pero como en la fabricación normal de fundiciones en cubilote, por estar en todos los casos la fundición en contacto con el coque, esas variaciones de carbono son muy pequeñas (suelen oscilar entre 3 y 3,5 %) en la práctica normal a esa influencia debida a la acción del carbono se le suele dar mucha menos importancia que a la del silicio, aunque en realidad la tenga también muy importante. El carbono favorece la formación de grafito y cuanto mayor sea el porcentaje de carbono más fácil es la formación de grafito. La acción del azufre y del manganeso es, en general, contraria a la grafitización.

8. Influencia de la velocidad de enfriamiento en la formación de grafito.

La velocidad de enfriamiento, que depende del espesor de las piezas y de la clase de molde empleado, es otro factor que también ejerce una

influencia decisiva en la calidad y microestructura de las fundiciones. Los enfriamientos rápidos tienden a producir fundiciones blancas; los enfriamientos lentos favorecen la formación de grafito y, por lo tanto,

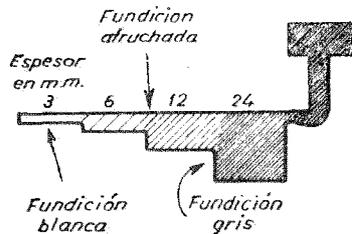
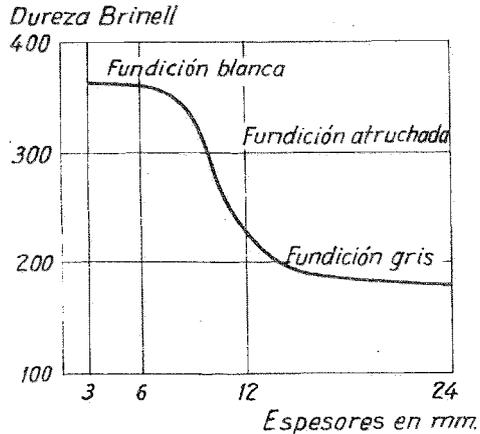


FIGURA 17

Influencia de la velocidad de enfriamiento en la dureza y en la microestructura que se obtiene con una fundición de la siguiente composición: C = 3,25 %; Si = 1,75 %; S = 0,045 %, y P = 0,050 %.

fundiciones, se puede observar en los resultados obtenidos con una pieza en la que hay zonas de muy diferente espesor (fig. 17). Sus escalones son de 3, 6, 12 y 24 mm. La composición es la siguiente: C = 3,25 % y Si = 1,75 %.

Utilizando molde de arena, se obtuvo en los escalones de 3 y 6 mm de espesor (fig. 17) fundición blanca con una dureza de 365 Brinell, y en los escalones de 12 y 24 mm de espesor se obtuvo fundición gris con durezas de 170 a 180 Brinell. En el escalón de 12 mm hay una zona

de fundiciones grises. Esta influencia es tan marcada que con una misma composición al variarse la velocidad de enfriamiento se obtienen diferentes calidades con distintas durezas y microestructuras. La velocidad de enfriamiento que suele variar principalmente con el espesor de las piezas, también se modifica con la naturaleza de los moldes.

Los pequeños espesores se enfrían mucho más rápidamente que los grandes. Un molde metálico, enfría más rápidamente que un molde de arena. En los moldes metálicos el enfriamiento de la fundición será más o menos rápido según sea el espesor del molde. En algunos casos, para alcanzar las mayores velocidades de enfriamiento, los moldes metálicos son refrigerados con agua. Un ejemplo de la influencia que la velocidad de enfriamiento ejerce en la microestructura de las

intermedia de transición de fundición atruchada con 240 a 350 Brinell de dureza.

9. Principales características y composiciones de las fundiciones grises.

Después de estudiados estos dos ejemplos, se ve que las diferencias entre las fundiciones blancas y grises son muy definidas. Las fundiciones blancas son duras, frágiles, de fractura blanca y cristalina y en ellas el carbono se presenta combinado en forma de cementita. Las fundiciones grises son más blandas, de fractura grisácea y una parte del carbono se encuentra en forma de grafito. Esos ejemplos señalan claramente cómo en las fundiciones la formación del grafito se favorece con la presencia de un elevado porcentaje de silicio y de carbono y con bajas velocidades de enfriamiento, circunstancia esta última que se consigue en las piezas de gran espesor y con preferencia en el interior de las piezas. Para obtener fundiciones grises, se deben vigilar los porcentajes de azufre y manganeso, que conviene que sean bastante bajos. Las fundiciones atruchadas

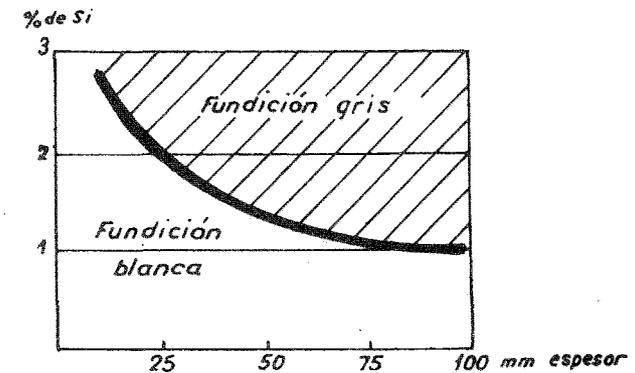


FIGURA 18

Contenidos en silicio que deben sobrepasarse, para obtener en cubilote piezas de fundición gris fácilmente mecanizables en diferentes espesores. Se consideran siempre contenidos en carbono superiores a 3,20 %, que es lo que normalmente se suele obtener en los cubilotes.

son de características y microestructura intermedia entre las fundiciones blancas y las fundiciones grises.

Las fundiciones grises son, en general, las más utilizadas en la construcción mecánica y puede decirse que el 95 % de las fundiciones que se fabrican en la actualidad son fundiciones grises. Cuando no se exigen unas características mecánicas muy elevadas, las condiciones más interesantes que, en general, conviene que cumplan las fundiciones son: 1.ª que

cuelen bien; 2.^a que se mecanicen con facilidad, y 3.^a que no tengan poros. Para que cuelen bien deben ser de baja temperatura de fusión y para ello conviene que tengan contenidos en carbono bastante elevados. En el cubilote, empleando un proceso de trabajo normal, se obtienen contenidos en carbono variables de 3,00 a 3,75 % y contenidos en silicio

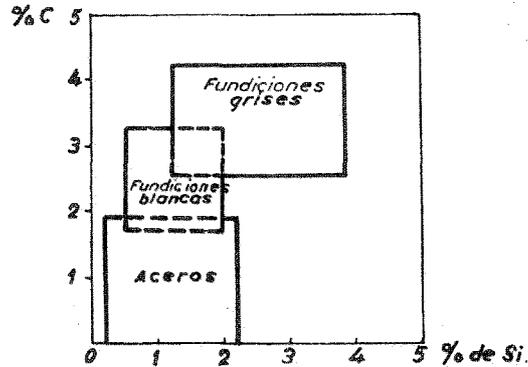


FIGURA 19

Contenidos en carbono y en silicio correspondientes a las fundiciones grises, a las fundiciones blancas y a los aceros.

de 1,25 a 2,50 %, que, en general, son valores aceptables y convenientes. En la práctica normal el contenido en carbono de las fundiciones grises suele variar de 2,75 a 3,50 %.

En piezas de espesor medio de fundición gris ordinaria puede considerarse normal la siguiente composición: C = 3,25 % y Si = 1,75 %. Así, estos valores pueden servir de referencia de la composición de las fundiciones grises. La resistencia a la tracción de las fundiciones grises ordinarias suele variar de 10 a 20 Kg/mm² y su dureza de 120 a 180 Brinell. La resistencia de las fundiciones grises de calidad suele variar de 20 a 35 Kg/mm² y su dureza de 180 a 250 Brinell.

Las fundiciones para ser fácilmente mecanizables deben contener en general altos porcentajes de silicio. Si el contenido en silicio es bajo, puede aparecer fundición blanca, muy difícil de mecanizar. En la figura 18 se señalan los contenidos en silicio que se deben rebasar para poder obtener fundición gris con diferentes espesores cuando se cuele la fundición en moldes de arena secados en estufa. Se observa que varían desde 1 % para piezas de 100 mm de espesor hasta 2 % para piezas de 25 mm de espesor y 2,5 % para piezas de 15 mm de espesor. En estas fundiciones fabricadas en cubilote, se considera que el carbono es superior a 3,20 %.

CAPÍTULO II

DIAGRAMA HIERRO-CARBONO ESTABLE

10. El diagrama hierro-carbono que se señala al estudiar los aceros y las fundiciones blancas, se denomina diagrama metaestable y corresponde a aleaciones hierro-carbono de bajo contenido en silicio.

Las transformaciones que se producen en los calentamientos y enfriamientos de las fundiciones grises deben de estudiarse con ayuda de un diagrama hierro-carbono un poco diferente del de los aceros, que se llama diagrama hierro-carbono estable (que señala los fenómenos y transformaciones estables correspondientes a las aleaciones hierro-carbono), y se refiere, en general, a aleaciones de alto contenido en silicio (1 a 4 % generalmente). Una característica de este diagrama estable es que sus constituyentes son grafito y hierro en lugar de cementita y hierro, que son los constituyentes del diagrama metaestable.

Otra circunstancia importante que debe de cumplirse para que las transformaciones se verifiquen de acuerdo con el diagrama estable, además de un alto contenido en silicio es que el enfriamiento de las aleaciones se verifique de una forma lenta.

En la figura 20, junto al clásico diagrama hierro-carbono metaestable, se señala con líneas de puntos un diagrama estable que nos servirá para estudiar las transformaciones que experimentan las fundiciones grises, atruchadas y algunas especiales en los procesos de calentamiento y enfriamiento, y para conocer también las microestructuras que en cada caso se podrán obtener.

Así como los aceros en los procesos de enfriamiento lento sufren transformaciones de acuerdo con el diagrama metaestable, en cambio las fundiciones no se transforman exclusivamente según el diagrama estable, sino que puede decirse que, por regla general, una parte de las transformaciones se realiza de acuerdo con el diagrama estable y otras según el metaestable.

En la figura 20 se ha señalado el diagrama estable correspondiente a 1,5 % de silicio, que es un contenido que se puede considerar como medio entre los utilizados en las fundiciones grises de uso corriente. Se observa que en el diagrama estable las líneas de transformación están desplazadas hacia arriba y hacia la izquierda.

Los contenidos en carbono de las aleaciones eutécticas y eutectoides del diagrama estable, varían con el contenido en silicio de las fundiciones y son inferiores a los que corresponden al diagrama metaestable. En las transformaciones del diagrama estable, para una temperatura determinada, la austenita es capaz de disolver menor cantidad de carbono que el que disuelve a la misma temperatura la austenita cuando las transformaciones se hacen de acuerdo con el diagrama metaestable.

En la figura 21 se señalan las variaciones que experimenta el contenido en carbono de las composiciones eutécticas y eutectoides al variar el contenido en silicio. Observando los gráficos de la figura 21, se ve que con cierta aproximación se puede conocer fácilmente el contenido en carbono de la aleación eutéctica y de la perlita de fundiciones de diverso contenido en silicio con ayuda de las siguientes fórmulas:

$$\text{Carbono eutéctico} = 4,3 - \frac{\% \text{Si}}{3} \quad \text{Carbono eutectoide} = 0,9 - \frac{\% \text{Si}}{9}$$

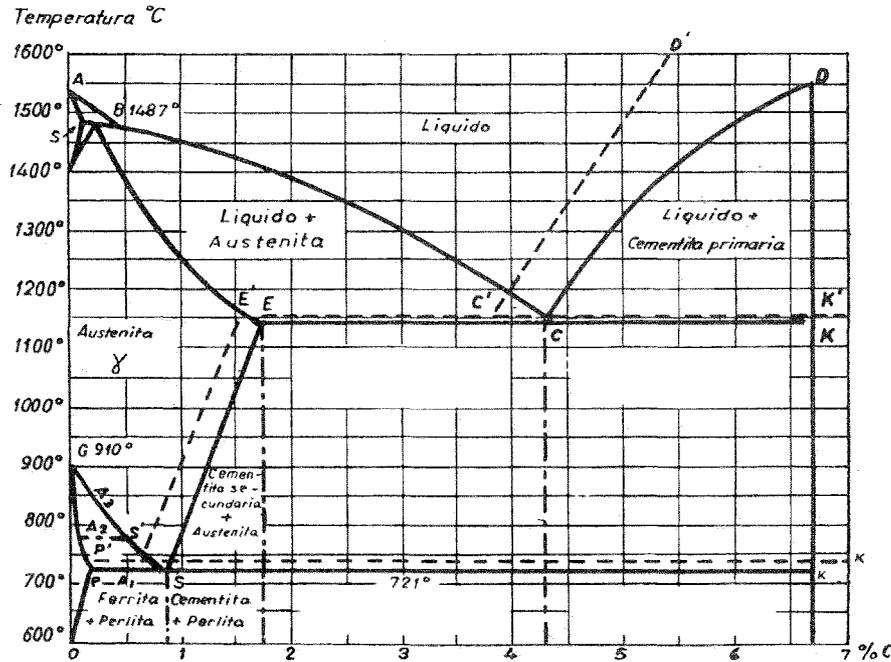


FIGURA 20

Diagrama hierro-carbono estable (línea de rayas alternadas) y diagrama hierro-carbono metaestable (líneas continuas).

11. Formación de grafito.

La aparición del grafito en vez de cementita en las aleaciones hierro-carbono, es debida a la inestabilidad del carburo de hierro en determinadas circunstancias y condiciones que hacen imposible su existencia y favorecen, en cambio, la formación del grafito.

Las principales circunstancias que favorecen la formación de grafito son, como ya hemos señalado antes, un elevado porcentaje de silicio y

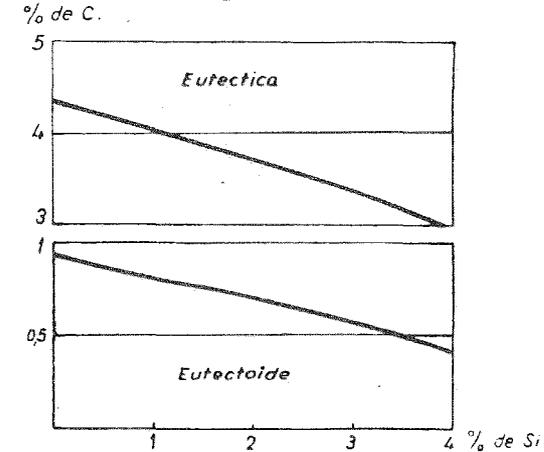
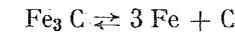


FIGURA 21

Influencia del contenido en silicio de las fundiciones en el porcentaje de carbono de las composiciones eutéctica y eutectoide.

un enfriamiento relativamente lento. Experimentalmente se ha comprobado también que la presencia de núcleos de cristalización en la fase líquida, ejerce gran influencia en la formación del grafito. El manganeso, azufre y cromo favorecen en cambio la formación de cementita. La máxima temperatura alcanzada por la aleación durante la fusión y la temperatura de colada, también influyen en la cantidad, tamaño y distribución de las láminas de grafito. En algunos casos el grafito se forma directamente, y en otros se forma al desdoblarse la cementita en grafito y hierro, según la siguiente reacción:



En la actualidad existen diversas teorías y, en cierto modo, hay incluso ciertas discrepancias sobre la interpretación de los fenómenos de

grafitización. Por ello, sin profundizar demasiado en el proceso de la formación del grafito, a continuación explicaremos las ideas más generales sobre el mismo, dando a la vez algunos ejemplos referidos a diferentes clases de fundiciones. La exposición es quizás, a veces, un poco convencional y, en ocasiones, se repite la descripción de algunas transformaciones, pero se ha hecho así por considerar que con ella se facilita su comprensión.

En los procesos de enfriamiento correspondiente al diagrama estable, la separación del grafito puede realizarse en zonas y a temperaturas parecidas, en general, a las de aparición de la cementita en el diagrama metaestable. En las aleaciones hipereutécticas se puede formar grafito durante la solidificación (fig. 20) según la línea $C'D'$ (grafito primario). Luego, se puede formar grafito a la temperatura eutéctica, 1.145° aproximadamente. A esa temperatura eutéctica, de acuerdo con el diagrama estable, se forma austenita saturada y grafito (en proporciones eutécticas), en vez de formarse austenita saturada y cementita (ledeburita), como ocurría en las aleaciones que se solidifican de acuerdo con el diagrama metaestable. Al continuar luego el enfriamiento, el grafito también se puede precipitar según la línea $E'S'$ y, finalmente, a la temperatura eutectoide la austenita, de composición eutectoide, puede transformarse en ferrita y grafito.

En la práctica casi nunca se transforma todo el carbono en grafito, y es muy frecuente que durante el enfriamiento se forme grafito al realizarse una parte de las transformaciones de acuerdo con el diagrama estable, y luego se forme cementita al realizarse otra parte de las transformaciones según el diagrama metaestable. La cantidad de grafito o cementita que se forme, en cada caso, depende de que sea grande, pequeña o intermedia la influencia que ejerzan los factores que favorecen la formación del grafito o que favorecen la formación de cementita.

Es interesante señalar que, en general, en las fundiciones grises en el proceso de enfriamiento que sigue a la solidificación, se suele obtener primero grafito en la zona de temperaturas elevadas y superiores a 900° , y luego se suele formar, en la mayoría de los casos, la cementita a baja temperatura, en una zona de transformaciones próxima a la que corresponde a la formación de perlita en el diagrama metaestable, aunque ligeramente más elevada.

En general, el grafito se forma más fácilmente a temperaturas elevadas que a bajas temperaturas, y en las fundiciones hipereutécticas se realiza más fácilmente la formación de grafito cuando parte de la aleación está todavía fundida, que cuando toda ella se encuentra en estado sólido.

Esto equivale a decir que en las aleaciones hipereutécticas, el carbono se deposita más fácilmente en forma de grafito proeutéctico que en forma de grafito eutéctico. También es más fácil la formación del grafito eutéctico que la formación del grafito proeutectoide y, finalmente, el grafito proeutectoide se forma más fácilmente que el eutectoide (Tabla IV).

Las leyes que regulan la aparición de los diversos constituyentes característicos en las fundiciones grises, son algo más complicadas que las que corresponden a las fundiciones blancas y, en especial, es algo complicado explicar la formación de los constituyentes que corresponden a las transformaciones eutectoides y proeutectoides.

En el enfriamiento de una fundición blanca, las transformaciones se realizan de acuerdo con el diagrama metaestable, y durante el enfriamiento la composición de la austenita sigue la línea ES y al llegar al punto S , la austenita se transforma en perlita. Si se trata, en cambio, de una fundición gris, parte de las transformaciones se suelen realizar, como ya hemos dicho antes, según el diagrama estable y otra parte de las transformaciones se realizan de acuerdo con el diagrama metaestable.

En general, en las fundiciones grises, las transformaciones que se ve-

| Influencia de diversos factores | Forma en que aparece el carbono | | | | Clase de la matriz | Clase de fundición obtenida | |
|--|------------------------------------|----------------------|---|-----------------------|--------------------|-----------------------------|---------------------|
| | En la zona superior a la eutéctica | En la zona eutéctica | En la zona un poco superior a la eutectoide | En la zona eutectoide | | | |
| | Carbono proeutéctico | Carbono eutéctico | Carbono proeutectoide | | | | |
| Influencia mínima de los factores que favorecen la formación del grafito | Cementita | Cementita | Cementita | Cementita | Perlítica | Fundición blanca | |
| | Cementita y grafito | Cementita | Cementita | Cementita | Perlítica | | |
| | Grafito | Cementita | Cementita | Cementita | Perlítica | | |
| Influencia intermedia de los factores que favorecen la formación del grafito | Grafito | Grafito y cementita | Cementita | Cementita | Perlítica | Fundición atruchada | |
| | Grafito | Grafito | Cementita | Cementita | Perlítica | | |
| | Grafito | Grafito | Grafito y cementita | Cementita | Perlítica | | |
| Influencia máxima de los factores que favorecen la formación del grafito | Grafito | Grafito | Grafito | Cementita | Perlítica | Fundición perlítica | |
| | Grafito | Grafito | Grafito | Grafito y cementita | Ferrita y perlita | | Fundición corriente |
| | Grafito | Grafito | Grafito | Grafito | Ferrita | | |

TABLA IV

Forma de presentarse el carbono en las fundiciones y esquema y avance de la formación de grafito y de los constituyentes que pueden aparecer en una fundición de 3,5 % de carbono y 3 % de silicio, en la que varía la influencia de los factores que favorecen la formación de grafito.

rifican a elevada temperatura (superiores a 900°), se suelen realizar de acuerdo con el diagrama estable (formación de grafito a elevadas temperaturas) y algunas de las transformaciones que se producen a baja tem-

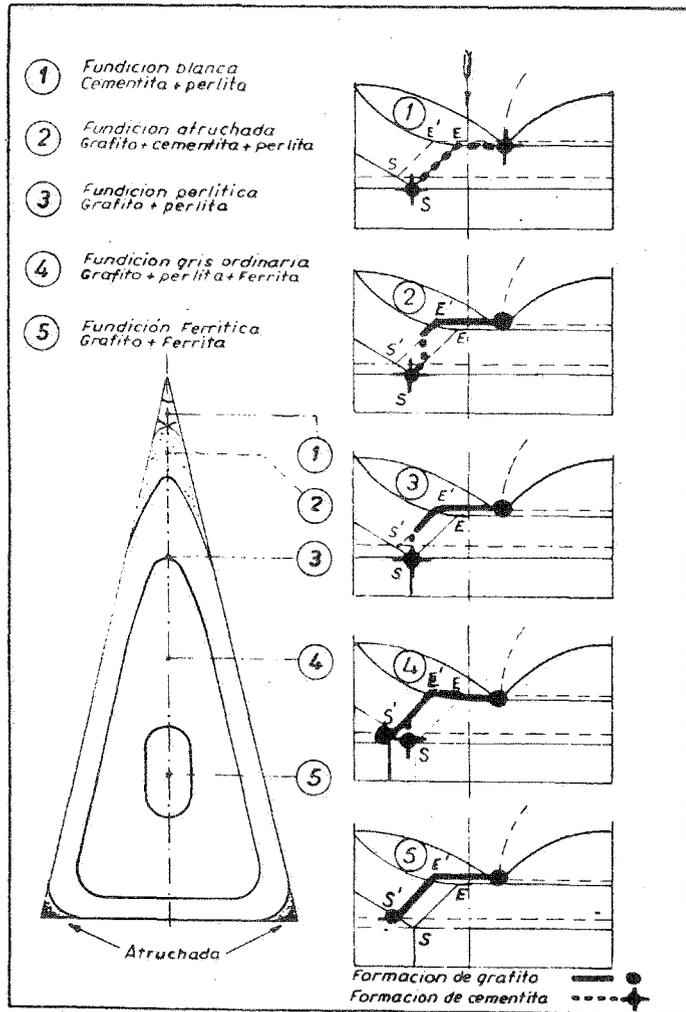


FIGURA 22

Influencia de la velocidad de enfriamiento en la formación de diversas clases de fundición. Se señala la formación de grafito y cementita al variar la velocidad de enfriamiento en una fundición de 3 % de carbono y 2 % de silicio. Las líneas gruesas, los puntos y las cruces señalan, aproximadamente, la transformación de la austenita. (J. PORTUGAELS.)

peratura, se suelen realizar de acuerdo con el diagrama metaestable (formación de cementita, generalmente eutectoide, a baja temperatura). En ocasiones, cuando se trata de piezas de formas complicadas con zonas delgadas y gruesas, se puede producir a la vez, en diferentes partes del material, la formación de grafito y de cementita.

En los enfriamientos de las fundiciones grises ferríticas, la composición de la austenita sigue la línea $E'S'$ (figs. 20 y 22-5) y en esas fundiciones no aparece carbono combinado (cementita), presentándose el carbono sólo en forma de grafito. Sin embargo, eso no es normal. En la mayoría de las fundiciones fabricadas en cubilote, suele aparecer de 0,3 a 0,7 de carbono combinado (formando cementita) (figs. 22-2, 3 y 4). En esos casos, puede considerarse que en el enfriamiento, a partir de la temperatura eutéctica, la composición de la austenita sigue al principio la línea $E'S'$, pero al llegar el material a temperaturas próximas a la eutectoide, las condiciones de transformación no son favorables para que todo el carbono que contiene la austenita se transforme en grafito, y entonces, a partir de una cierta temperatura o de un determinado momento, comienzan a realizarse una parte de las transformaciones de acuerdo con el diagrama metaestable, mientras a veces otra parte de las transformaciones pueden realizarse siguiendo el diagrama estable.

Se pueden presentar varios casos diferentes. Cuando en el enfriamiento la transformación eutectoide de toda la masa de austenita se produce de acuerdo con el diagrama metaestable, al final se obtiene la fundición perlítica (fig. 22-3). Cuando una parte grande de la austenita eutectoide se transforma según el diagrama metaestable y otra menor según el estable, se obtiene fundición con 0,5 a 0,7 % de carbono combinado aproximadamente (fig. 22-4). Cuando sólo una pequeña parte se transforma según el metaestable y una gran parte según el estable, se obtiene fundición con poca perlita y sólo de 0,20 a 0,40 % de carbono combinado aproximadamente (fig. 22-4).

Resumiendo, se puede decir que en la zona eutectoide cuando la influencia de los factores que favorecen la formación del grafito es muy importante y se emplea alto porcentaje de silicio, una velocidad muy lenta de enfriamiento y un mantenimiento muy prolongado a una temperatura ligeramente superior a la eutectoide, es posible conseguir que todo el carbono de la austenita se transforme en grafito depositándose grafito proeutectoide según la línea $E'S'$ y que luego, además, se transforme la austenita eutectoide en grafito-ferrita. Cuando en una fundición gris las condiciones de composición y enfriamiento son favorables para que en la zona eutectoide las transformaciones comiencen a realizarse de acuerdo con el diagrama metaestable precisamente, cuando la

austenita tiene aproximadamente el contenido en carbono correspondiente al punto S, la fundición será perlítica. Finalmente, cuando las condiciones del enfriamiento sean muy próximas a las de los que corresponden a las fundiciones ferríticas, se formará una matriz compuesta por gran cantidad de ferrita y un pequeño porcentaje de perlita, y cuando las condiciones sean próximas a las que corresponden a la formación de una matriz perlítica, aparecerá gran cantidad de perlita y un porcentaje muy pequeño de ferrita.

Las transformaciones correspondientes a la zona eutectoide de una fundición que contiene, por ejemplo, 0,3 % de carbono combinado, también se pueden explicar en la siguiente forma. Cuando en el enfriamiento la aleación llega a los 1.100° aproximadamente, se va precipitando grafito y el contenido en carbono de la austenita va descendiendo hasta llegar a la zona correspondiente a la temperatura eutectoide. Un poco antes de iniciarse esa transformación eutectoide tenemos la aleación formada por láminas de grafito y una cierta cantidad de austenita. A partir de ese momento, podemos considerar que una parte de esa austenita (el 37,5 % de la masa) se transforma según el diagrama metaestable, obteniéndose cristales de perlita, y otra parte (el 62,5 % de la masa) se transforma según el diagrama estable, formándose ferrita y láminas de grafito. Observada la aleación al microscopio, veremos que su aspecto es parecido al de un acero de 0,30 % de carbono, ya que sin tener en cuenta las láminas de grafito está formada por un 62,5 % de cristales de ferrita y un 37,5 % de perlita.

En la figura 22 se ve cómo en una pieza con zonas delgadas y con zonas de gran espesor se puede formar fundición blanca, atruchada, perlítica, gris ordinaria y ferrítica debido a la diferente velocidad de enfriamiento de las diferentes partes de la pieza.

El conocimiento del avance de la formación del grafito en varios casos distintos con diferentes velocidades de enfriamiento, se puede facilitar también bastante con ayuda de la Tabla IV.

12. Estudio de la formación de los constituyentes que aparecen en la solidificación y enfriamiento de una fundición de 3 por ciento de carbono y 2 por 100 de silicio al variar la velocidad de enfriamiento.

Como para llegar a conocer bien las fundiciones es siempre interesante estudiar el mayor número de casos diferentes en los que se presentan distintas circunstancias de transformación, a continuación estudiaremos en otro ejemplo las transformaciones que se producen en el

enfriamiento de las fundiciones, destacando la influencia que la velocidad de enfriamiento tiene en las microestructuras resultantes. Veremos cómo con una fundición de 3 % de carbono y 2 % de silicio con sólo variar la velocidad de enfriamiento se puede obtener fundición blanca,

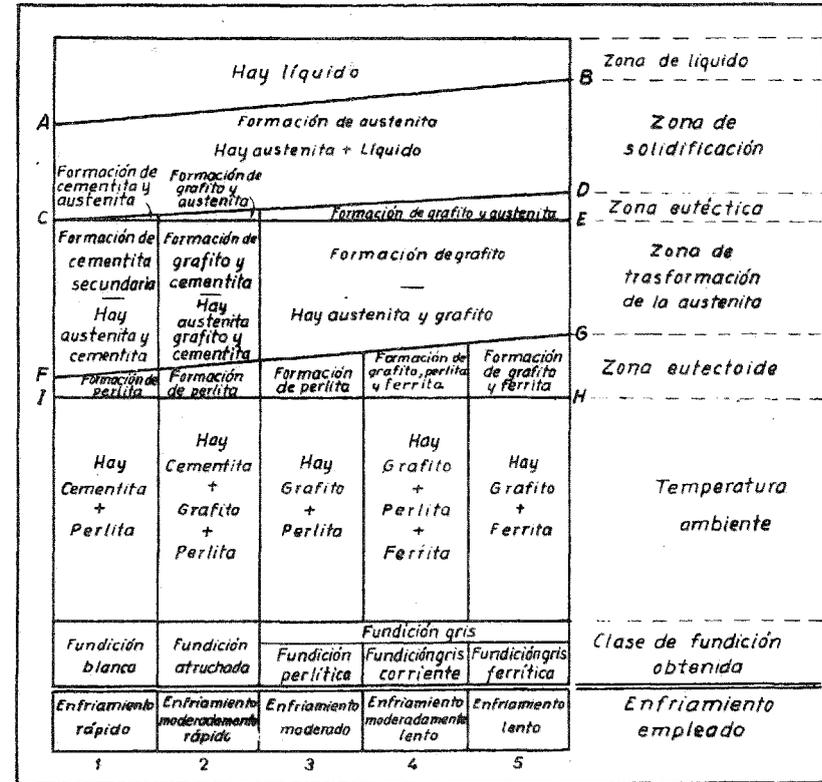


FIGURA 23

Influencia de la velocidad de enfriamiento en la microestructura de las fundiciones de 3 % de carbono y 2 % de silicio, y en las transformaciones que sufren en el proceso de solidificación hasta llegar a la temperatura ambiente. (Metals Handbook, 1949.)

atruchada o gris y cómo van apareciendo, en cada caso, a diferentes temperaturas, los diversos constituyentes característicos de cada tipo de fundición.

En la figura 23 se representa la forma de realizarse las diferentes transformaciones, correspondiendo en esa figura a las columnas de la izquierda las transformaciones más rápidas, a las de la derecha las más

lentas y en el centro se representan las de velocidad intermedia. En las zonas eutéctica y eutectoide (fig. 23) las líneas superiores corresponden al principio de la transformación y las inferiores al fin de la transformación. Para grandes velocidades de enfriamiento las líneas de comienzo de transformación se encuentran a temperaturas más bajas que para las bajas velocidades de enfriamiento.

En los ensayos representados en la figura 23 se observa que cuando en el enfriamiento comienza a solidificarse esta fundición, se precipita primero austenita.

La temperatura de comienzo de solidificación (formación de austenita) varía un poco de unos casos a otros, siendo también como en el caso de las zonas eutécticas y eutectoides ligeramente más baja cuando el enfriamiento es rápido (línea A-B, fig. 23).

La solidificación de la eutéctica se realiza en un cierto intervalo de temperaturas señaladas por el triángulo C-D-E (fig. 23). La estructura resultante de esta transformación y la forma de producirse varía también con la velocidad de enfriamiento. Si la velocidad de enfriamiento es muy lenta, en la solidificación la formación del eutéctico tiende a realizarse según el diagrama estable, apareciendo grafito y austenita; si la velocidad es grande, el eutéctico se forma según el diagrama metaestable. Entonces se forma ledeburita compuesta por cristales de austenita y cementita en proporción eutéctica que aparece entre los grandes cristales de austenita. Hay unas velocidades intermedias en que parte se solidifica según el diagrama estable, y parte según el metaestable, apareciendo austenita, cementita y grafito.

Cuando se encuentra ya toda la fundición en estado sólido al descender la temperatura por debajo de la eutéctica, comienza a precipitarse en la zona C-E-G-F grafito cuando el enfriamiento es lento y las transformaciones se realizan según el diagrama estable; cementita secundaria cuando el enfriamiento es rápido y las transformaciones corresponden al diagrama metaestable, y habrá formación de cementita y grafito a la vez cuando se realizan de acuerdo con los dos diagramas.

Finalmente, al llegar a la zona eutectoide, la austenita tendrá un contenido en carbono próximo al eutectoide y en la zona F-G-H-I se transforma en perlita si el enfriamiento es rápido y los fenómenos ocurren según el diagrama metaestable; grafito y ferrita si el enfriamiento es muy lento y las transformaciones ocurren según el diagrama estable, y perlita, grafito y ferrita, si parte de las transformaciones se realizan de acuerdo con el diagrama estable y parte de acuerdo con el metaestable.

Al variar la velocidad de enfriamiento desde una muy rápida hasta una muy lenta, podremos obtener: Fundición blanca con una microes-

tructura de cementita y perlita; fundición atruchada con cementita, perlita y grafito, y fundición gris. En la fundición gris se pueden distinguir

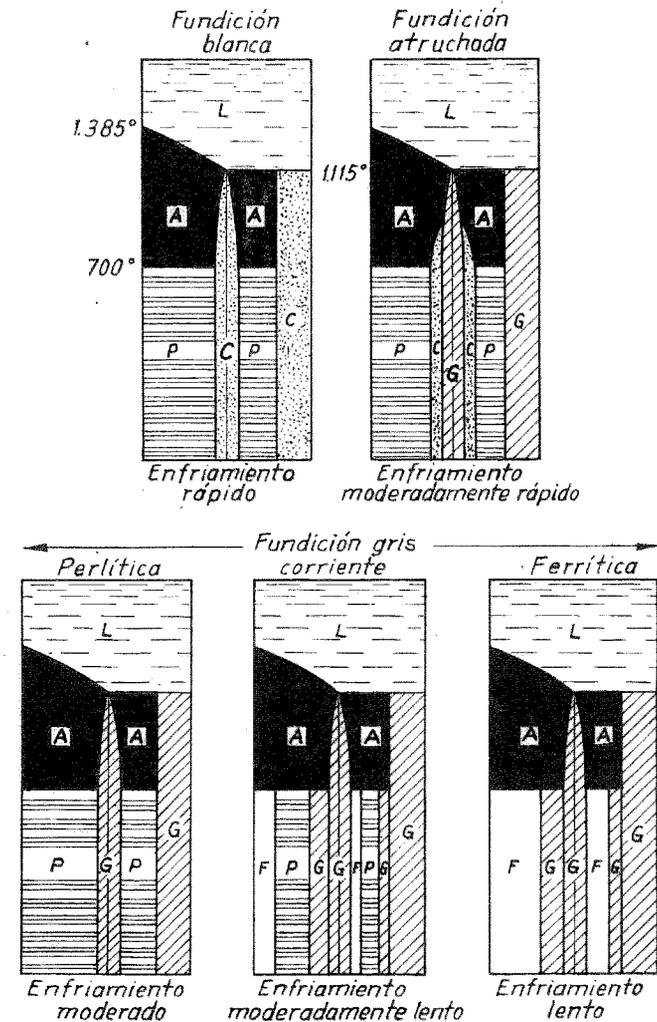


FIGURA 24

Influencia de la velocidad de enfriamiento en la aparición de los microconstituyentes y en la microestructura final de las fundiciones de C = 3 % y Si = 2 %. L = Líquido; A = Austenita; G = Grafito; P = Perlita; F = Ferrita y C = Cementita. En ordenadas se señalan temperaturas y en abscisas repartición de constituyentes.

tres casos diferentes: fundición perlítica con perlita y grafito; fundición gris ordinaria con perlita, grafito y ferrita, y fundición gris ferrítica con grafito y ferrita.

En la figura 24 se señala también empleando otro sistema de representación los procesos de formación de los diferentes constituyentes que corresponden a una fundición de 3 % de carbono y 2 % de silicio, al variar la velocidad de enfriamiento.

13. Influencia del azufre, fósforo, manganeso, oxígeno e hidrógeno en las fundiciones.

Antes de comenzar a estudiar las características mecánicas de las fundiciones, señalaremos la influencia del azufre, fósforo y manganeso en su microestructura, ampliando un poco lo señalado anteriormente.

Azufre.—El azufre se opone a la grafitización del carbono y favorece la formación de cementita. Su influencia en ausencia del manganeso es verdaderamente sensible. El azufre tiene una fuerte afinidad con el manganeso y al combinarse ambos elementos forman el sulfuro de manganeso, que no tiene en cambio ninguna influencia en la formación del grafito o de la cementita. Por lo tanto, inversamente a lo que antes hemos explicado, la primera adición de azufre, a una fundición de un contenido relativamente elevado de manganeso, tiende indirectamente a grafitizar la fundición. Esto es debido a que el azufre en cierto modo absorbe algo de manganeso, que es un elemento que favorece la formación de cementita. Lo mismo ocurre con las adiciones de manganeso a una fundición de elevado contenido en azufre, ya que al principio favorecen la grafitización en lugar de oponerse a ella.

En cambio, cuando el azufre existe en exceso en una fundición con poco manganeso, forma con el hierro el sulfuro de hierro que favorece la formación de cementita y tiende, por lo tanto, a blanquear la fundición.

En las fundiciones, los contenidos en azufre suelen variar de 0,010 a 0,20 %.

El azufre en ocasiones, cuando se encuentra en las fundiciones en cantidades importantes y forma S Fe, por no haber suficiente cantidad de manganeso, puede dar lugar al fenómeno de temple invertido. Suele ocurrir que el azufre aparece segregado en las zonas centrales próximas a las mazarotas o rechupes en forma de sulfuro de hierro que tiende a blanquear en esos puntos a la fundición. Entonces ocurre que la zona central es más dura que la periferia, y por eso este fenómeno suele conocerse con el nombre de temple invertido.

Fósforo.—El fósforo se suele añadir a veces intencionadamente a la fundición con objeto de favorecer su colabilidad y se emplea cuando se

quiere fabricar piezas de forma complicada o de carácter decorativo u ornamental.

El fósforo no ejerce influencia muy sensible sobre la grafitización del carbono en las fundiciones, aunque puede decirse que, en general, se opone ligeramente a ella. La presencia del fósforo da lugar a un aumento de la fragilidad y de la dureza.

La mejora de la colabilidad de las fundiciones por la presencia del fósforo es debida a la formación del eutéctico steadita de bajo punto de fusión que suele aparecer en los contornos de los granos.

En el hierro dulce la ferrita llega a contener en disolución hasta 1,7 % de fósforo, y cuando el porcentaje de fósforo es superior a 1,7 % se forma

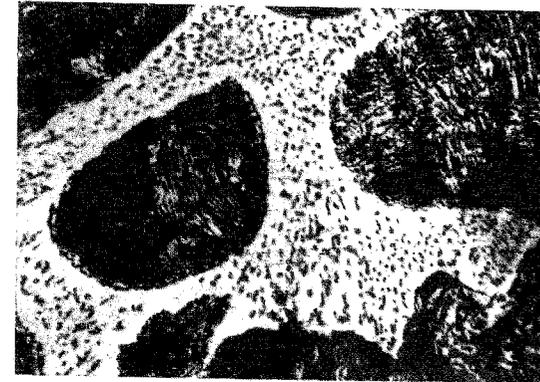


FIGURA 25
× 1.000

Eutéctico de steadita formado por agrupaciones de fósforo de hierro sobre un fondo blanco de ferrita. Se observan también grandes cristales negros de perlita (ROBERT H. HEVER.)

un eutéctico binario de hierro con fósforo en solución y fosfuro de hierro.

En las fundiciones blancas se forma un eutéctico ternario de ferrita con algo de fósforo en solución, fosfuro de hierro y cementita.

En las fundiciones grises se forma un eutéctico binario de 39 % de ferrita con algo de fósforo en solución y 61 % de fosfuro de hierro.

Un contenido normal en fósforo en las fundiciones es, por ejemplo, 0,150 % empleándose contenidos más bajos cuando se desea alta resistencia, y más elevados, de 0,50 a 1,50 %, cuando se desea alta colabilidad.

Con ayuda del microscopio es fácil descubrir la presencia del eutéctico steadita que aparece siempre en las uniones de los granos, ya que por su bajo punto de fusión este eutéctico es el último de los constituyentes que se solidifica. En las fundiciones grises la steadita, como ya se ha explicado, es un eutéctico binario y en las fundiciones blancas es ter-

nario. Los constituyentes de la steadita se pueden distinguir calentando las probetas pulidas de fundición y observándolas a continuación, ya que el carburo de hierro se colorea de rojo, el fosfuro de hierro de púrpura y la ferrita queda blanca.

Hay fundiciones a las que para mejorar su resistencia al desgaste se les añade de 0,50 a 1 % de fósforo, para conseguir que se forme steadita, que es de gran dureza, y mejora la aptitud al rozamiento del material (figura 40).

Manganeso.—El manganeso se opone lo mismo que el azufre, como ya hemos indicado antes, a la grafitización del carbono y favorece por tanto, la formación de cementita. Tiende a blanquear las fundiciones y a aumentar su dureza dificultando la mecanización. Normalmente las fundiciones suelen contener de 0,4 a 1,5 % de manganeso. El manganeso con el azufre forma inclusiones de sulfuro de manganeso, y como ya hemos señalado anteriormente, el principal papel del manganeso es neutralizar el azufre, evitando la formación del sulfuro de hierro (1).

Oxígeno.—El oxígeno es un antigrafitizante energético que se encuentra presente en mayor o menor cantidad en todas las fundiciones. Se presenta principalmente en forma de inclusiones no metálicas, muchas de ellas submicroscópicas, de óxido de hierro, de manganeso, de aluminio y de silicio.

El porcentaje de oxígeno que contienen las fundiciones suele variar de 0,002 a 0,020 %. Con altos porcentajes de oxígeno la colabilidad del metal disminuye mucho, se producen rechupes importantes y la estructura puede sufrir sensibles modificaciones.

Hidrógeno.—El hidrógeno se presenta también casi siempre como impureza gaseosa en las fundiciones y da lugar a porosidades en las piezas cuando el porcentaje es importante.

El hidrógeno suele provenir de la humedad de los moldes, del vapor de agua contenido en el aire soplado, de la humedad del coque.

La solubilidad del hidrógeno en la fundición aumenta con el porcentaje de silicio. Por ello las fundiciones altas en silicio suelen ser más porosas que las de bajo contenido en silicio. Una de las ventajas de las fundiciones inoculadas es que al fabricarse en el horno con bajo porcentaje de silicio, y añadirse luego el ferrosilicio al canal de colada o a la cuchara, se consigue limitar mucho la absorción de hidrógeno y como consecuencia se reduce notablemente los riesgos de que aparezcan luego porosidades en las piezas.

(1) En general se recomienda que el contenido en manganeso sea 1,7 veces el del azufre (que es la cantidad teóricamente necesaria para neutralizarlo) más un 0,20 %. Este pequeño exceso de 0,20 % de manganeso se suele emplear, por considerar preferible un ligero exceso de manganeso y no de azufre, que es perjudicial.

CAPÍTULO III

CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LAS FUNDICIONES

14. Influencia de la composición y de la microestructura en las características mecánicas de las fundiciones.

El estudio de las características mecánicas de las fundiciones es más difícil que el de los aceros. La composición química de una fundición ordinaria no da como en los aceros al carbono normalizados una idea de su resistencia, ya que otros factores como el método de enfriamiento, la temperatura de fusión y de colada, el espesor de las piezas, la acción de inoculantes, el subenfriamiento, etc., tienen también una influencia muy importante en sus propiedades.

Por ello, a continuación, nos vamos a referir primero a las características que corresponden a las fundiciones grises ordinarias fabricadas en cubilote sin precauciones ni técnicas especiales, y luego estudiaremos las fundiciones de más alta calidad.

Como ya hemos explicado anteriormente, las propiedades de las fundiciones varían mucho de unos casos a otros, según sean sus constituyentes microscópicos.

En la figura 26 se ha representado gráficamente la relación que hay entre las diferentes durezas y resistencias de las diferentes clases de fundiciones que se pueden obtener con una misma composición de 3 % de carbono y 2 % de silicio. Se observa que con la misma composición se obtienen resistencias y durezas muy diferentes al variar la microestructura que depende principalmente de la velocidad de enfriamiento. Con esa composición, como ya hemos explicado antes, se pueden obtener fundiciones grises, atruchadas y blancas, con sólo variar la velocidad de enfriamiento. Se observa que en todas esas fundiciones la dureza aumenta progresivamente desde la fundición ferrítica, que con 130 Brinell es la más blanda, hasta la fundición blanca, que con 300 a 550 Brinell, es la más dura, teniendo las fundiciones perlíticas, que se pueden considerar de una calidad intermedia, una dureza de 180 a 250 Brinell.

También se observa que a partir de la fundición gris ferrítica la resistencia va aumentando progresivamente hasta la fundición perlítica, que

es la de máxima resistencia. Se observa, en cambio, que las fundiciones blancas tienen ya menos resistencia y su gran dureza no va acompañada de una elevada resistencia como en los aceros. En las fundiciones, al aumentar mucho la dureza, hay una disminución de resistencia.

Al comparar, por lo tanto, las durezas correspondientes a las fundiciones blancas, atruchadas y grises de una misma composición, se observa que no hay proporcionalidad entre la dureza y la resistencia a la tracción, como ocurre en los aceros. Las fundiciones blancas de gran du-

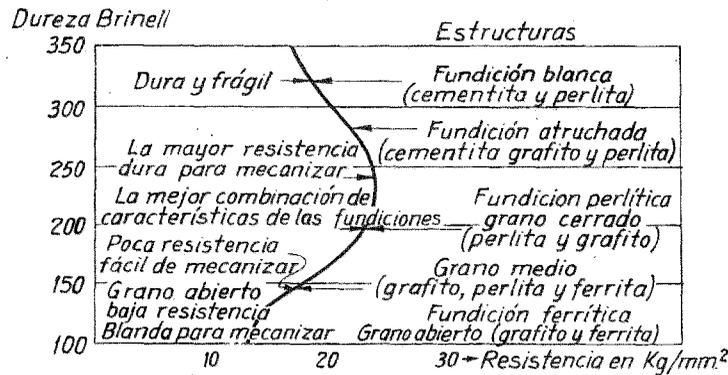


FIGURA 26

Relación entre la dureza y la resistencia a la tracción de las fundiciones y su microestructura (*Metals Handbook*, 1949).

reza, con 300 a 350 Brinell, tienen menor resistencia a la tracción que las grises de 180 a 220 Brinell. La mejor combinación de características para un gran número de aplicaciones, se obtiene con las fundiciones perlíticas que, con durezas de 180 a 250 Brinell, tienen resistencias de 20 a 30 Kg/mm² y gran tenacidad.

Las fundiciones de mayor dureza son las que tienen los microconstituyentes de máxima dureza. Cuanto más cementita contienen son más duras y cuanto más ferrita y grafito son más blandas. Por eso, las fundiciones blancas que tienen mucha cementita son muy duras, las ferríticas y grises que tienen mucho grafito y ferrita son las más blandas, y las perlíticas y atruchadas, que tienen cantidades variables de unos y otros constituyentes, tienen una dureza intermedia.

Estudiando, en cambio, sólo las fundiciones grises, si se encuentra una cierta correspondencia entre las durezas y las resistencias, como se puede observar en la figura 27. Para bajas resistencias la relación entre

la dureza y la resistencia es de 13, aproximadamente, y para altas resistencias de 7 ó a veces menos.

Las resistencias a la tracción y a la compresión de las fundiciones son diferentes en vez de ser iguales entre sí como en los aceros. Para bajas durezas la resistencia a la compresión llega a ser unas 5 veces mayor que la resistencia a la tracción y para altas resistencias esa relación baja a 2,5 (fig. 28).

Al considerar la resistencia de las fundiciones grises conviene señalar que en ellas interviene por una parte la resistencia de la matriz y por otra hay que tener en cuenta la influencia de las láminas de grafito.

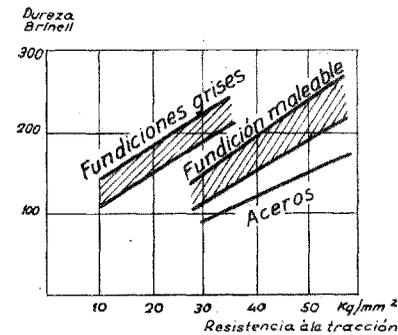


FIGURA 27

Equivalencias aproximadas entre las durezas y las resistencias a la tracción de los aceros, fundiciones grises y maleables. La equivalencia entre la resistencia y la dureza de las fundiciones se da sólo a título de orientación.

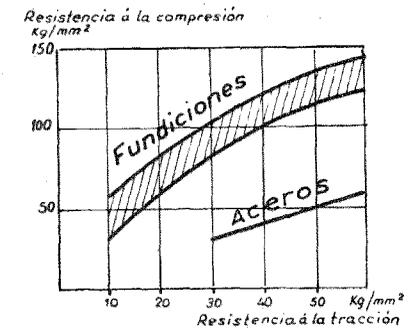


FIGURA 28

Relación entre la resistencia a la tracción y la resistencia a la compresión en las fundiciones y en los aceros.

Cuanto mayor sea la resistencia de la matriz, mayor será la resistencia de la fundición. Cuanto menor sea el número de láminas de grafito, y menor sea su tamaño, su forma sea más redondeada y su distribución más uniforme, mayor será también la resistencia de la fundición.

Por lo tanto, el problema de aumentar la resistencia de la fundición se debe estudiar teniendo en cuenta los dos factores: la matriz y las láminas de grafito.

La resistencia de la matriz suele variar de 50 a 98 Kg/mm², aproximadamente. El silicio eleva la resistencia de la ferrita y, por lo tanto, la de la matriz que suele estar constituida por ferrita y perlita. La ferrita de una fundición que contiene, por ejemplo, 2,5 % de silicio y 0,8 % de manganeso, puede considerarse que como valor medio tiene una resistencia aproximada de unos 50 Kg/mm². En los aceros la ferrita que contiene muy poco silicio sólo tiene una resistencia aproximada de 30 Kg/mm².

Cuando en las fundiciones grises, además de ferrita, hay perlita, la resistencia de la matriz es superior a 50 Kg/mm², y cuando la matriz es totalmente perlítica, su resistencia llega a unos 98 Kg/mm², aproximadamente. La resistencia de la matriz de las fundiciones grises puede conocerse, con cierta aproximación, empleando la fórmula: $(50 + 60 \times C)$, en la que el C es el tanto por ciento de carbono combinado que varía de 0 a 0,8 %, aproximadamente. Según esta fórmula, la máxima resistencia a la tracción de la matriz es 98 Kg/mm². Aquí conviene señalar que la presencia de grafito hace que la resistencia de las fundiciones sea muy inferior a la que tiene su matriz.

La influencia del grafito en la resistencia a la tracción de las fundiciones es bastante complicada. Una fórmula, derivada de la que antes hemos citado, muy útil para conocer la resistencia de las fundiciones grises, es la siguiente: $R = \alpha (50 + 60 C)$, en la que R es la resistencia a la tracción, α es un coeficiente que depende del grafito, que varía de 0,20 a 0,40 y sólo en ocasiones muy especiales llega a 0,80, y C es el % de carbono combinado. Cuando las láminas de grafito son grandes y numerosas: $\alpha = 0,2$. Si la fundición es ferrítica, se obtiene: $R = 0,20 \times 50 = 10$ Kg/mm². Cuando la fundición es perlítica y tiene grandes láminas de grafito: $R = 0,20 (50 + 48) = 19,6$ Kg/mm². En el caso de que las láminas sean pocas y pequeñas: $\alpha = 0,40$, con lo que se llega a resistencias de $R = 0,40 \times 50 = 20$ Kg/mm² para fundición ferrítica y a $R = 0,40 (50 + 48) = 39,2$ Kg/mm² para fundición perlítica.

Hace unos años se comenzó a estudiar la mejora de la resistencia de las fundiciones grises. Al principio, como ya explicaremos más adelante, se procuró mejorar la resistencia de la matriz, llegándose a obtener los mejores resultados con matrices perlíticas. En los últimos años, en cambio, se ha estudiado la mejora de la resistencia de las fundiciones modificando el tamaño y la distribución del grafito. Se observa que en la resistencia a la tracción tiene todavía más importancia el grafito que la matriz. Recientemente, con grafito esferoidal, se ha llegado, en casos especiales, a resistencias ligeramente superiores a 80 Kg/mm², con un valor de $\alpha = 0,80$.

Se ve que el coeficiente α que depende del grafito puede pasar de 0,20 a 0,80, es decir, multiplicarse por 4, mientras el valor de la resistencia de la matriz $(50 + 60 C)$ sólo pasa de 50 a 98, es decir, llega a multiplicarse por 2, aproximadamente; por lo tanto, parece que es más interesante actuar sobre el grafito que sobre la matriz.

Como resumen de lo explicado, que se refiere sólo a las fundiciones grises, se comprende que para alcanzar en estas fundiciones la máxima resistencia a la tracción, hay que procurar: 1.º Que la matriz sea de má-

xima resistencia, es decir, que la matriz sea perlítica. 2.º Obtener el menor porcentaje posible de carbono grafitico, ya que cada partícula de grafito es causa de una disminución de resistencia, y 3.º Conseguir que las láminas de grafito sean pequeñas, lo más redondeadas posible y estén bien distribuidas.

15. Características mecánicas de las fundiciones grises y clasificación de acuerdo con su resistencia a la tracción.

En la práctica industrial, cada día se tiene más en cuenta la resistencia a la tracción de las fundiciones grises, y es frecuente clasificar las fundiciones por la resistencia a la tracción que con ellas se obtienen en

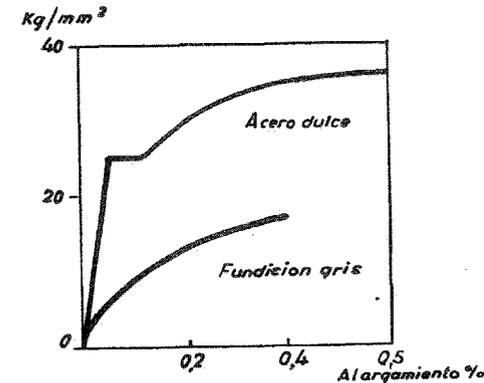


FIGURA 29
Gráficos representativos del ensayo de tracción de un acero dulce y de una fundición gris.

barras fundidas de 30 mm de diámetro. En los talleres se fabrican fundiciones con 15, 20, 25, etc., Kg/mm², que tienen resistencias a la tracción de 15 a 20 Kg/mm² las primeras, de 20 a 25 Kg/mm² las segundas, etc. Las fundiciones normales de baja calidad que se fabrican sin precauciones o especificaciones especiales, suelen tener de 10 a 15 Kg/mm² de resistencia a la tracción.

Al realizarse el ensayo de tracción de una fundición gris (fig. 29), se observa que el módulo de elasticidad no es constante como en los aceros, sino que disminuye a medida que aumenta la carga que actúa sobre el material. No hay, por lo tanto, como en los aceros una zona en la que haya rigurosa proporcionalidad entre las cargas y las deformaciones. Por ello, a cada carga que actúa sobre el material corresponde un módulo de

elasticidad, siendo frecuente que en la práctica se dé como valor del módulo de elasticidad de una fundición, el que corresponde a una carga de un 75 % de la máxima de rotura. Durante el ensayo, en un momento determinado del mismo, tendremos

$$\text{Módulo de elasticidad} = \frac{\text{Carga que está actuando}}{\text{Alargamiento que ha producido}}$$

En general, el módulo de elasticidad varía entre 7.000 y 13.000 Kg/mm². Al disminuir el tamaño y cantidad de las láminas de grafito, aumenta el módulo de elasticidad y también la resistencia a la tracción de las fundiciones.

En la figura 30 se puede ver que la línea representativa del ensayo de tracción es una curva en la que no se presenta como en el caso de los

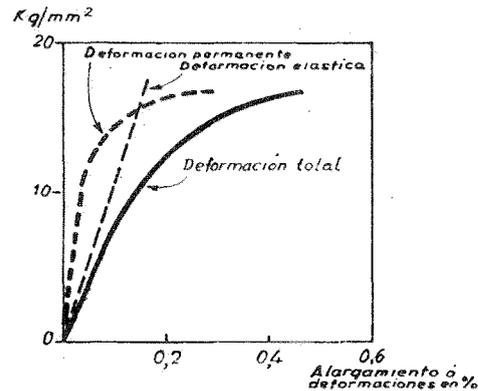


FIGURA 30

Deformaciones elásticas y permanentes y deformaciones totales que se producen en los ensayos de tracción de las fundiciones grises en los que:
Deformación total = Deformación elástica + Deformación permanente

aceros dulces un límite de elasticidad aparente. En general, el alargamiento plástico y permanente de las probetas en la mayoría de las fundiciones ordinarias es muy pequeño, puede decirse que casi nulo, ya que no suele llegar al 1 % (fig. 30), mientras en los aceros son normales los alargamientos que oscilan entre 10 y 20 %.

Una propiedad importante de las fundiciones, debida precisamente a la presencia de láminas de grafito, es su gran capacidad de amortiguación a las vibraciones, muy superior a la de los aceros. En la figura 31 se representan esquemáticamente las vibraciones que se producen ensa-

yando en las mismas condiciones varillas de fundición, de acero y de aleación de aluminio. Se observa que las vibraciones se amortiguan en la fundición mucho antes que en el acero y que en la aleación de aluminio, lo cual, en general, es muy ventajoso cuando se emplea este material para la fabricación de bancadas de máquinas, motores, etc.

La presencia de numerosas discontinuidades en la estructura, debido a las líneas de grafito, hace que las fundiciones grises sean mucho menos sensibles al efecto de entalla que los aceros, lo cual también es muy ventajoso. Por ello, no hay que temer tanto como en los aceros el peligro de rotura en las piezas por rayas de mecanizado, ángulos vivos, etc.

En las figuras 32, 33 y 34 se señalan las resistencias, durezas y módulos de elasticidad que se

obtienen en piezas de diferentes espesores con las fundiciones de 15, 20, 30, etc., Kg/mm² (es decir, fundiciones que en probeta de 30 mm. dan 15, 20, 30 Kg/mm² de resistencia.)

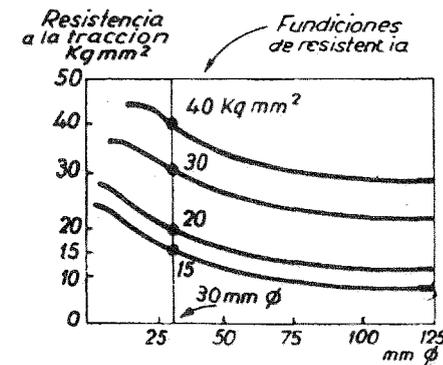


FIGURA 32

Influencia del espesor de las piezas en la variación de la resistencia a la tracción de fundiciones de diferentes resistencias (esta resistencia se refiere a redondos de 30 mm de espesor).

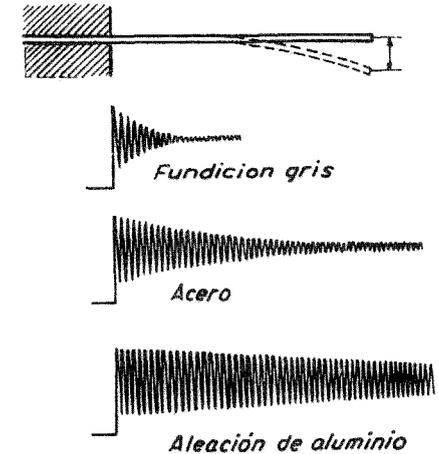


FIGURA 31

Representación gráfica de la forma de amortiguarse las vibraciones que se pueden producir en las piezas de fundición de acero y de aleaciones de aluminio.

Para completar la idea general que estamos dando sobre las diferentes clases de fundiciones de resistencias relativamente elevadas que en la actualidad se emplean en la industria, a continuación señalamos las características principales de los cinco grupos de fundiciones más importantes.

1.º Fundiciones de menos de 15 Kg/mm². Son, en general, fundiciones con menos de 0,5 % de carbono combinado.

2.º Fundiciones de 20 Kg/mm², aproximadamente (15 a 25 Kg/mm²).
Son, en general, perlíticas con grafito laminar.

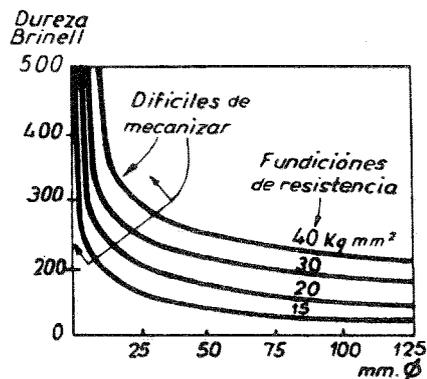


FIGURA 33

Influencia del espesor de las piezas en la variación de la dureza de las fundiciones de diferentes resistencias a la tracción.

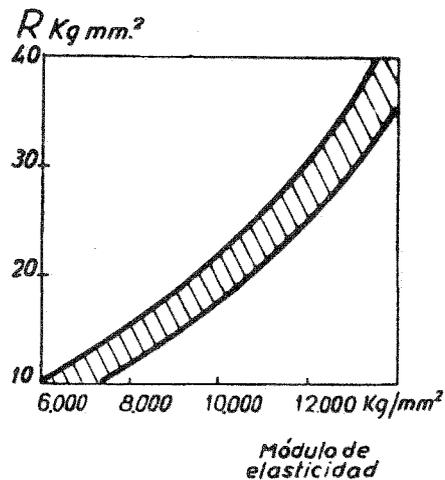


FIGURA 34

Relación aproximada entre la resistencia de las fundiciones y su módulo de elasticidad.

3.º Fundiciones de 30 Kg/mm², aproximadamente (25 a 35 Kg/mm²).
Son fundiciones perlíticas de propiedades muy parecidas a las anteriores, aunque con frecuencia suelen ser aleadas.

4.º Fundiciones de 40 Kg/mm², aproximadamente (35 a 50 Kg/mm²).

Son, en general, fundiciones aciculares con grafito laminar muy fino.

5.º Fundiciones de 60 Kg/mm², aproximadamente (50 a 70 Kg/mm²).
Son, en general, fundiciones con grafito esferoidal.

16. Ensayo de flexión transversal de las fundiciones grises.

Uno de los métodos más simples para conocer la calidad de las fundiciones es el ensayo transversal. Consiste en ensayar a flexión una probeta cilíndrica en bruto de fundición sin mecanizar. Se apoya en los extremos y se somete en su centro a la acción de cargas progresivas anotándose la carga que produce la rotura y la flecha correspondiente en aquel momento del ensayo. (1).

Se emplean probetas normalizadas cuyos diámetros son de 0,875, 1,2 ó 2 pulgadas, según sea el espesor de las piezas, debiendo ser en cada caso las distancias entre apoyos de 12, 18 ó 24 pulgadas.

Con este ensayo se determina el módulo de rotura con ayuda de la siguiente fórmula: $MR = 2,546 \frac{PL}{D^3}$ o de la Tabla V.

Expresando los coeficientes en la siguiente forma:

P = carga total que produce por flexión la rotura de la probeta en libras

L = separación de los apoyos en pulgadas

D = diámetro de la barra en pulgadas

MR = módulo de rotura

se obtiene el valor MR en libras por pulgada cuadrada.

Si en las fundiciones se cumpliera la ley de Hooke de proporcionalidad directa entre las cargas y las deformaciones, la cifra que da el módulo de rotura (de acuerdo con la fórmula $2,546 \frac{PL}{D^3}$) sería el valor de la máxima carga que estaría actuando en el momento de la rotura en la fibra situada en la zona periférica de la probeta. Sin embargo, aunque eso no es rigurosamente exacto, es interesante el uso de este módulo porque independiente del espesor de la probeta y de la distancia de los apoyos y sin tener que recordar otras circunstancias del ensayo, sirve para tener una idea directa de la calidad del material.

En la figura 35, se ve la relación aproximada que hay entre el módulo de rotura y la resistencia a la tracción que para las fundiciones de baja resistencia es de 2, aproximadamente, y para las altas es de 1,2 aproximadamente.

(1) Este ensayo es muy empleado por su sencillez, para el rápido control de los procesos de fabricación en los talleres. Al indicar el valor del módulo de rotura de una fundición hay que señalar las condiciones del ensayo, ya que este módulo no tiene un valor rigurosamente constante para cada material pues varía con el diámetro de la probeta, distancia entre apoyos, etc. (Ver en la página 166 los ensayos con probeta francesa.)

En la figura 36, se observa cómo para cada fundición de una composición química definida el módulo de rotura varía con el tipo o espesor de las probetas, disminuyendo a medida que aumenta el espesor de las mismas, conservándose constante la distancia entre apoyos.

| Resistencia a la tracción de las fundiciones. Por 1000 libras por pulgada cuadrada | Diámetro de las probetas en pulgadas | | | Con probeta de 1,2" | | |
|--|---|-----|------|--|--------------------|--------------------|
| | 0,875 | 1,2 | 2 | × 1.000. Módulo de rotura en libras por pulgada cuadrada | Flecha en pulgadas | Módulo Resistencia |
| | × 1.000. Cargas que producen la rotura en libras. | | | | | |
| 20 | 0,9 | 1,8 | 6,0 | 48 | 0,18 | 2,40 |
| 30 | 1,15 | 2,2 | 7,6 | 60 | 0,20 | 2,00 |
| 40 | 1,4 | 2,6 | 9,1 | 71 | 0,22 | 1,77 |
| 50 | 1,675 | 3,0 | 10,3 | 83 | 0,24 | 1,66 |
| 60 | 1,925 | 3,4 | 11,5 | 92 | 0,26 | 1,53 |

TABLA V

Cargas de rotura, módulos de rotura y flechas que corresponden al ensayo de flexión transversal con fundiciones de diferentes calidades según datos de la "American Gray Cast Iron Association". Conociendo la carga de rotura, que se determina en el ensayo, luego relacionando los valores de esta tabla, se puede conocer con cierta aproximación la resistencia a la tracción de las fundiciones.

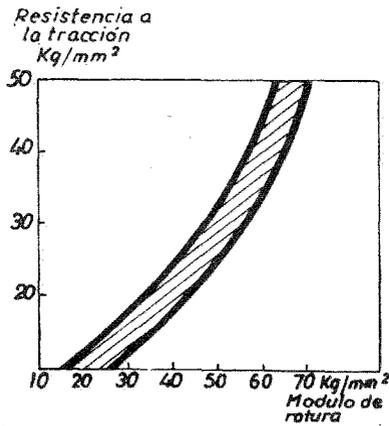


FIGURA 35

Relación entre la resistencia a la tracción y el módulo de rotura en las fundiciones.

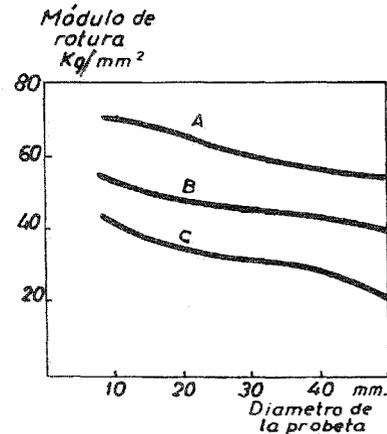


FIGURA 36

Influencia del diámetro de las probetas en el módulo de rotura de tres fundiciones de diferente calidad, cuando se mantiene constante en el ensayo la distancia entre apoyos.

17. Descripción de algunas otras características importantes de las fundiciones ordinarias.

Resistencia al desgaste.—Es muy difícil señalar de una forma muy concreta el comportamiento o resistencia al desgaste de un determinado

material, porque son muy complejos y numerosos los factores que para ello deben tenerse en cuenta. Los más importantes son: la presión con que actúan las cargas, la velocidad de desplazamiento relativo de las piezas, el tipo de lubricante empleado, el grado de oxidación y de corrosión superficial y la diferencia de dureza que hay entre los materiales que rozan.

Sin embargo, se puede decir a título informativo que, en general, las fundiciones grises y en especial las fundiciones grises perlíticas, dan excelentes resultados cuando se emplean para la fabricación de piezas de motores y máquinas que deben resistir al desgaste.

No se ha podido encontrar una ley que relacione directamente alguna característica mecánica de los materiales con su resistencia al desgaste, aunque T. L. Oberlé ha llegado a establecer un índice denominado factor

$$\text{Modell} = \frac{\text{Dureza Vickers}}{\text{Módulo de elasticidad}}$$
 que da una idea aproximada de la resistencia al desgaste relativo que se puede llegar a producir en diferentes clases de materiales (1).

Considerando que los valores de dureza Vickers son aproximadamente proporcionales a los límites de elasticidad, el factor Modell es en cierto modo también una indicación cuantitativa del valor de la máxima deformación elástica que experimentan los materiales en un ensayo.

Observando los valores de la tabla VI, se ve que el comportamiento de la fundición gris es excelente comparado con el de otros materiales.

Cuando se comparan fundiciones grises de la misma familia, se ha comprobado experimentalmente que sí se puede en cambio valorar aproxi-

| Clase de material | Dureza Vickers | Módulo de elasticidad Kg/mm ² | Módulo de elasticidad p.s.i. × 10 ⁶ | Factor Modell | Desgaste relativo |
|---|----------------|--|--|---------------|-------------------|
| Depósito de cromo brillante | 1.000 | 8.400 | 12 | 83 | 1 |
| Fundición gris dura (templada y revenida) | 590 | 12.000 | 18 | 33 | 2 |
| Acero duro | 600 | 20.000 | 30 | 20 | 3 |
| Fundición gris corriente | 140 | 10.500 | 14 | 10 | 4 |
| Fundición maleable perlítica | 205 | 18.000 | 26 | 8 | 5 |
| Acero semiduro | 180 | 20.000 | 30 | 6 | 6 |

TABLA VI

Valores del factor Modell y del desgaste relativo de diferentes clases de materiales

(1) En esa fórmula el valor del módulo de elasticidad se debe expresar en libras por pulgada cuadrada (p.s.i.).

madamente su resistencia al desgaste al observar la dureza de cada una de ellas.

En la figura 37 se ve cómo con durezas superiores a 250 Brinell, el

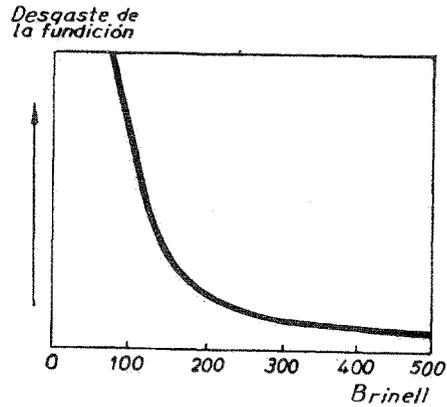


FIGURA 37
Variación de la resistencia al desgaste de un grupo de fundiciones de la misma familia (composición bastante similar) al variar su dureza.

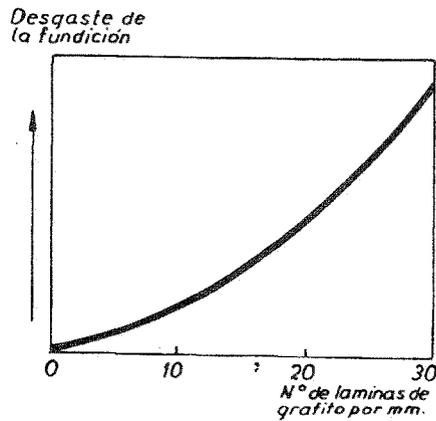


FIGURA 38
Influencia del tamaño de las láminas de grafito en el desgaste de las fundiciones.

desgaste es muy pequeño. En general, en piezas de máquinas y motores se obtienen los mejores resultados con durezas variables de 180 a 250 Brinell.

En los casos de rozamiento de metal con metal, la fundición gris da

muy buenos resultados aun con mala lubricación debido a la presencia de grafito que actúa en cierto modo como lubricante, y también su estructura heterogénea es muy favorable. Su comportamiento es bueno al trabajar fundición con fundición o con otras aleaciones tan duras o más duras que ella. Debido a esas circunstancias en gran parte, la fundición gris es muy utilizada para la fabricación de piezas de máquinas herramientas.

Para obtener los mejores resultados no conviene que el grafito sea muy fino. En la figura 38 se ve la influencia que tiene el tamaño de las láminas de grafito en la resistencia al desgaste de las fundiciones.

La forma del grafito también tiene mucha importancia. Los mejores resultados se obtienen con láminas distribuidas desordenadamente aisladas unas de otras (Tipo A, figura 54).

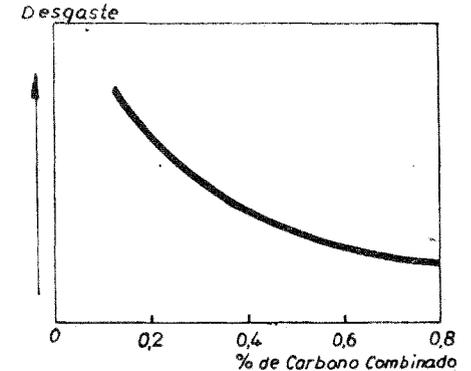


FIGURA 39
Relación entre el desgaste que experimentan las fundiciones y su porcentaje de carbono combinado.

Cuando las láminas de grafito forman agrupaciones interdendríticas (tipos D y E, figura 54) el desgaste es máximo y se obtienen los peores resultados. Con grafito hipereutéctico o con grafito agrupado en forma de rosetas, se tienen resultados intermedios.

De las fundiciones grises, como ya hemos dicho anteriormente, la que da mejores resultados es la fundición perlítica, que además de tener buena resistencia al desgaste tiene gran dureza y resistencia.

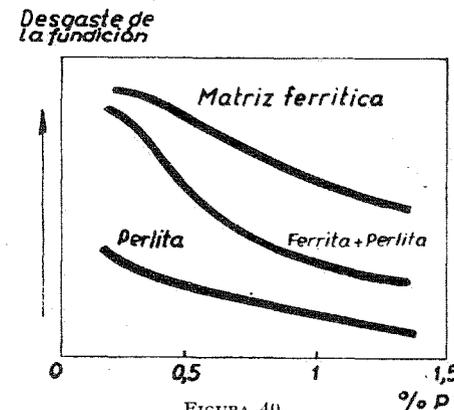


FIGURA 40
Influencia de la microestructura y del contenido en fósforo de las fundiciones en su resistencia al desgaste.

La presencia de ferrita es muy desfavorable y el desgaste aumenta con el porcentaje de ferrita y, por lo tanto, aumenta también al disminuir el porcentaje de carbono combinado (figura 39).

La presencia de steadita favorece la resistencia al desgaste. En la figura 40, se observa cómo al aumentar el porcentaje de fósforo y con ello la proporción de steadita disminuye el desgaste. No conviene que la steadita se presente en forma masiva obteniéndose los mejores resultados cuando tiene forma reticular. En esa misma figura se observa la influencia desfavorable de las estructuras ferríticas.

Por medio del tratamiento térmico y con el empleo de elementos de aleación se aumenta la dureza de las fundiciones y se mejora también su resistencia al desgaste.

Las fundiciones blancas de dureza elevadísima, tienen sobre las fundiciones grises el inconveniente de no ser mecanizables, pero en cambio resisten muy bien al desgaste y además tienen una excelente resistencia a la abrasión. La gran dificultad que oponen las fundiciones blancas al mecanizado, es una de las causas que más limita el campo de sus aplicaciones.

Resistencia a la corrosión.—Las fundiciones ordinarias tienen en general una resistencia a la corrosión al agua, a los ambientes de ciudades industriales y a otros medios ligeramente corrosivos bastante superior a la de los aceros ordinarios. Por eso, las fundiciones son muy empleadas para la fabricación de piezas de maquinaria o instalaciones que queden a la intemperie o en contacto con el agua como canalizaciones, bombas, radiadores, calderas, compresores, etc. Además, la superficie un poco rugosa de las fundiciones puede cubrirse muy bien con brea, alquitrán u otras pinturas protectoras, que mejoran aún su propia resistencia.

La marina de guerra francesa en ensayos realizados durante un año con agua de mar encontró que la pérdida de peso por decímetro cuadrado es en el acero ordinario de 27,3 miligramos por día y en la fundición corriente es sólo de 14,5 miligramos por día.

Crecimiento o aumento de volumen de las fundiciones por calentamiento a elevada temperatura.—Un fenómeno que es interesante conocer es el de crecimiento de las fundiciones cuando sufren calentamientos y enfriamientos intermitentes, desde la temperatura ambiente hasta los 800 u 850°. Debido a la presencia de las láminas de grafito, la fundición gris es un material, en general, poco compacto, que deja pasar a su través y hacia el interior a los gases que en los hornos rodean a las piezas.

Cuando esos gases son oxidantes, que es lo normal en la mayoría de los hornos industriales, producen la oxidación del hierro y al formarse óxido de hierro de mayor volumen que el hierro en el interior de las piezas, se produce un hinchamiento del material.

Por otra parte, esos calentamientos por encima de la zona crítica

eutectoide, suelen producir en las fundiciones una precipitación de grafito que también da lugar a un aumento de volumen de las piezas.

En la práctica suelen ser las dos causas, oxidación del hierro y formación del grafito, las que originan el hinchamiento de la fundición, que a veces, cuando está sometida a ciclos muy repetidos, suele llegar a aumentar su volumen hasta en un 30 %. Las fundiciones aleadas con altos porcentajes de níquel o de cromo, en cambio, resisten bien, sin sufrir ese hinchamiento, temperaturas muy elevadas, hasta 900 ó 950° (figura 67).

18. Relación entre la composición de las fundiciones y su microestructura y resistencia.

Para conocer la clase de fundición que se puede obtener en piezas de diferentes espesores, coladas en arena, al variar los contenidos de carbono y silicio, es muy interesante el estudio de los gráficos de la figura 41. En ellos se señalan los contenidos en silicio y en carbono recomendables para obtener fundiciones grises, atruchadas y blancas en piezas de diferente espesor. Fácilmente se comprende que estos diagramas, muy parecidos al diagrama de Norbury, son una modificación del clásico diagrama de Maurer (fig. 15). En la actualidad estos gráficos se consideran más exactos que el de Maurer y son más utilizados que aquél.

Con ayuda de estos gráficos se puede tener una idea bastante aproximada de las combinaciones de composición que conviene utilizar, según los casos, para obtener diferentes resultados.

En la práctica, sin embargo, como ya hemos explicado antes, para conocer el posible comportamiento de una fundición se tropieza con bastantes dificultades, y en ocasiones el problema de selección es bastante más difícil que cuando se trata de otros materiales.

Recientemente, a pesar de su gran interés, se ha abandonado algo el uso de los gráficos de la figura 41, porque con frecuencia se desea más conocer la resistencia que tienen las fundiciones, que saber si son blancas, grises o atruchadas.

Por ello, desde hace bastantes años, se han venido estudiando diversas combinaciones para que con una sola cifra se pueda tener en cada caso, una idea de la clase de fundición a que se hace referencia.

Animados con este propósito se comenzó primero a calificar las fundiciones por el valor de la suma del carbono más silicio (C + Si) y se vio que, con cierta aproximación, conociendo ese valor era posible conocer la resistencia que se puede obtener en redondos de diferentes diámetros.

Recientemente, numerosos autores, sobre todo los americanos, consideran que es más representativo del carácter de una fundición el valor del $C + \frac{Si}{3}$ o aún más el del $C + \frac{Si}{3} + \frac{P}{3}$ que recibe el nombre de «carbono equivalente».

Finalmente, en Alemania se tiende a valorar el carácter de las fun-

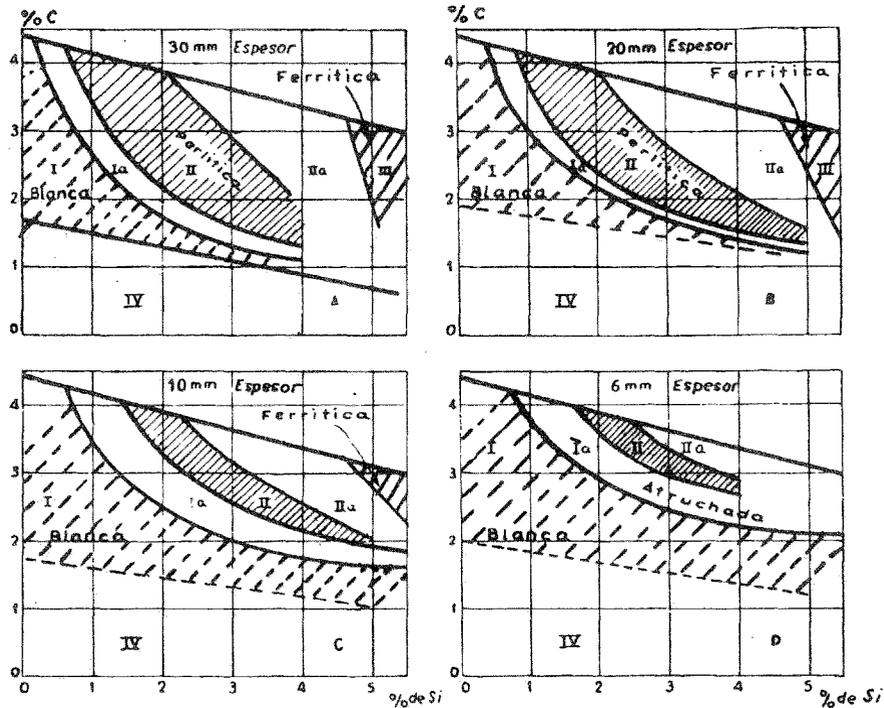


FIGURA 41

Influencia de los contenidos de carbono y silicio y del espesor de las piezas coladas en arena en la microestructura de las fundiciones. (Uhlitzch y Weichelt).

diciones de acuerdo con el «índice de saturación», que se determina por la fórmula:

$$Is = \frac{C}{4,3 - \left(\frac{Si}{3}\right)} \quad \text{o también} \quad Is = \frac{C}{4,3 - \left(\frac{Si}{3} + \frac{P}{3}\right)}$$

criterio que, en cierto modo, es parecido al del «carbono equivalente», pero expresado con diferente coeficiente.

Una fundición es hipoeutéctica si el carbono equivalente es inferior a 4,3, eutéctica si su valor es 4,3 y hipereutéctica si es superior a 4,3. Considerando los valores del índice de saturación, también se puede co-

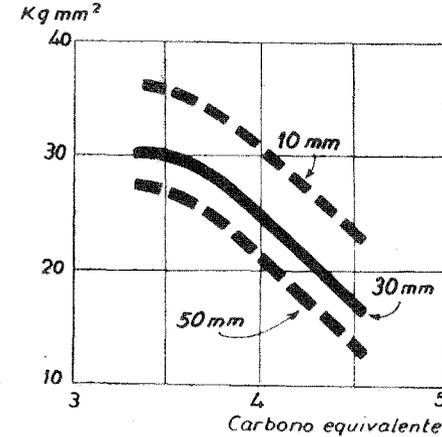


FIGURA 42

Influencia del carbono equivalente $\left(\% C + \frac{\% Si}{3} + \frac{\% P}{3}\right)$ en las resistencias que se obtienen en piezas de fundición de diferentes espesores.

nocer el carácter de las fundiciones. Serán hipoeutécticas cuando ese valor es inferior a 1, eutécticas con el índice de saturación igual a 1 y hipereutécticas cuando es superior a 1.

De acuerdo con estos métodos de calificación, se ha visto experimentalmente que conociendo para cada fundición el valor de algunos de esos índices, se puede determinar con bastante aproximación el posible comportamiento de las fundiciones en piezas de diferente espesor, obteniéndose valores bastante parecidos, aunque en algunos casos aparecen algunas diferencias entre ellos.

Con ayuda de las curvas de la figura 42 se puede conocer para diferentes espesores la resistencia a la tracción que se obtiene con fundiciones con diversos valores del carbono equivalente.

Finalmente, como complemento, se señalan en las figuras 43 y 44 la resistencia que, aproximadamente, se puede obtener con diferentes composiciones, empleando los ya conocidos diagramas de Maurer y de Norbury, sobre los que se han representado, en zonas o líneas, las fundiciones de igual resistencia.

Hasta aquí hemos señalado en repetidas ocasiones que hay fundiciones con resistencias de 20, 25, 30, 35, 40 y más Kg/mm². Conviene advertir que en la práctica normal es difícil conseguir con las fundiciones al carbono ordinarias resistencias superiores a 30 Kg/mm²,

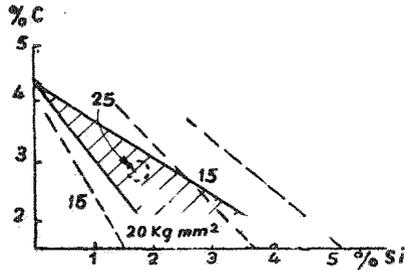


FIGURA 43

Situación de las fundiciones de 15, 20 y 25 Kg/mm² de resistencia a la tracción en el diagrama de Maurer.

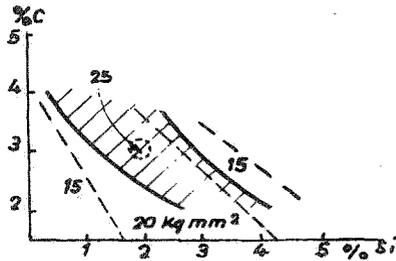


FIGURA 44

Situaciones de las fundiciones de 15, 20 y 25 Kg/mm² de resistencia a la tracción en el diagrama de Norbury correspondiente a piezas de 25 mm de espesor.

si no se emplean técnicas especiales que explicaremos más adelante. En general, las fundiciones con $R > 30 \text{ Kg/mm}^2$ deben considerarse como fundiciones en cierto modo especiales. Los principales métodos para obtener esas altas resistencias son el empleo de inoculantes o de elementos de aleación.

En la actualidad se sigue empleando con bastante frecuencia el valor $C + Si$ en las fundiciones, porque es un índice, que a veces es más fácil de recordar que los valores de los contenidos en carbono y en silicio.

| Clase de fundición | % (C + Si) | % C | % Si |
|--|------------|------|------|
| Fundiciones ordinarias | 5 | 3,25 | 1,75 |
| Perlítica francesa | 4,5 | 3 | 1,5 |
| » alemana | 3,5 | 2,75 | 0,75 |
| Mehanite. | 4 | 2,75 | 1,25 |
| Maleable europea | 4 | 3 | 1 |
| » americana. | 3,5 | 2,5 | 1 |
| Fundición esferoidal. | 6 | 3,5 | 2,5 |
| Centra-steel | 4 | 1,75 | 2,25 |
| Fundiciones Ford | 2,5 | 1,5 | 1 |
| Fundición nodular con azufre | 5 | 2,75 | 2,25 |
| Fundición con grafito difuso | 4 | 2,5 | 1,5 |

CAPÍTULO IV

19. Fundición perlítica.

Entre las diversas clases de fundiciones que se fabrican en la actualidad, la fundición perlítica, cuyas características hemos explicado anteriormente, es una de las de mayor interés industrial y una de las que cada día tiene mayores aplicaciones. La fundición perlítica es una fundición gris, que está constituida por una serie de laminillas de grafito embebidas en una masa de perlita laminar y puede considerarse como un acero eutectoide en el que se hallan incrustadas innumerables láminas de grafito (fig. 45). Para una gran mayoría de los empleos corrientes de la fundición gris, como la fabricación de piezas de motores, maquinaria y de instalaciones industriales, es de gran interés el empleo de la fundición perlítica, porque reúne un conjunto de características mecánicas excelentes. Su resistencia a la tracción varía normalmente, como ya hemos dicho antes, de 20 a 35 Kg/mm² (según sea el tamaño, cantidad y distribución de las láminas de grafito), tiene gran tenacidad y gran resistencia al desgaste. La perlita que aparece en estas fundiciones suele contener un porcentaje de carbono de 0,80 %, aproximadamente, o sea que tiene un contenido en carbono ligeramente inferior a la perlita de los aceros, que es de 0,90 %, aproximadamente.



FIGURA 45

Microestructura de una fundición perlítica. Se observan láminas de grafito sobre un fondo de perlita laminar.

En la figura 46 se señalan para diferentes piezas de fundición de distintos espesores con diversos contenidos en carbono total, el conte-

nido aproximado en silicio que deben de tener para conseguir una estructura perlítica, colando las piezas en arena.

Conviene destacar que aunque en las fundiciones el contenido en carbono de la perlita varía, como ya hemos explicado anteriormente, en fun-

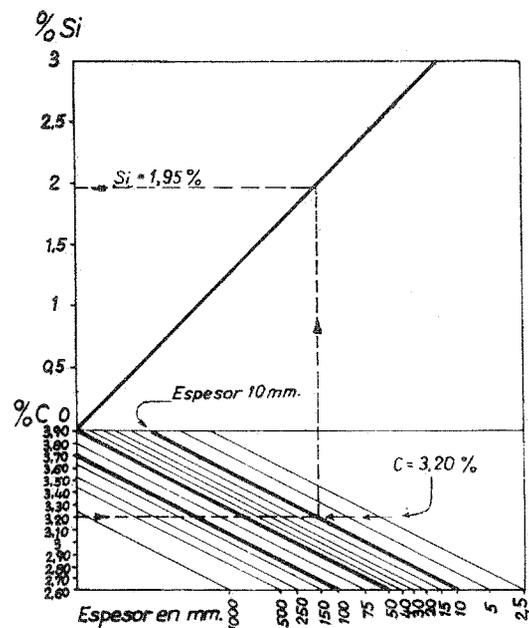


FIGURA 46

Contenidos aproximados en carbono y silicio que son necesarios para obtener fundición perlítica, en piezas de diversos espesores colados en arena seca.

ción del contenido en silicio, en general al señalar el contenido en carbono de la perlita, para simplificar, se señalará siempre la cifra 0,80 %. A continuación vamos a explicar los conceptos de carbono total y carbono combinado que se citan con frecuencia al estudiar esta clase de fundiciones.

Un acero eutectoide tiene aproximadamente 0,90 % de carbono total y también 0,90 % de carbono combinado, ya que no contiene carbono grafítico. En las fundiciones, en cambio, el carbono total es la suma del carbono que se encuentra en forma de grafito y del carbono que se encuentra combinado, es decir, del que se encuentra en forma de cementita. Una fundición será perlítica cuando el carbono combinado sea, aproximadamente, igual a 0,80 %. Al observar su microestructura

en el microscopio, vemos que exceptuando el grafito que contiene, toda ella está constituida por 100 % de perlita. En cambio, observando al microscopio una fundición en la que el carbono combinado es igual a 0,4 %, se puede ver que, exceptuando el grafito, sus constituyentes son, aproximadamente, un 44 % de perlita y un 56 % de ferrita libre, que son los constituyentes que corresponden, aproximadamente, a los aceros de 0,40 % de carbono (1). Una fundición con 1,20 % de carbono combinado, si no se tiene en cuenta el grafito que contiene, tendrá aproximadamente 95 % de perlita y 5 % de cementita libre, que son los consti-

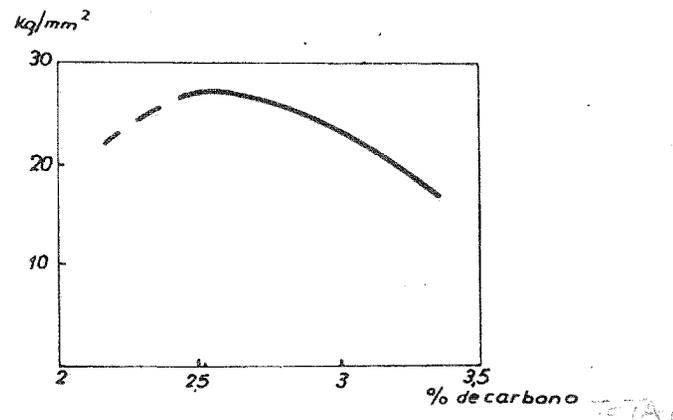


FIGURA 47

Relación entre el carbono total y la resistencia en las fundiciones perlíticas.

Se procura reducir el contenido en carbono total de las fundiciones hasta 2,8 a 2,5 % (acerar la fundición) para aumentar la resistencia a la tracción de las fundiciones. Esto se consigue porque las fundiciones perlíticas de menor porcentaje de carbono son las que tienen menor cantidad de láminas de grafito.

tuyentes de un acero de 1,20 % de carbono. Por lo tanto, si consideramos que la mejor fundición es la perlítica, en general, las fundiciones serán tanto mejores cuanto más se aproxime su porcentaje de carbono combinado a 0,80 %.

En las fundiciones grises perlíticas se ha observado que cuanto menor sea el porcentaje de carbono que contienen, mayor es su resistencia (fig. 47). Esto es natural que ocurra, ya que si consideramos diversas fundiciones grises de estructura perlítica, en las que el porcentaje de

(1) Se dan estas cifras considerando que la composición eutectoide tiene 0,90 % de carbono. Para una composición eutectoide de 0,8 %, tendríamos para 0,40 % de carbono, 50 % de perlita y 50 % de ferrita.

carbono combinado es constante, 0,80 % aproximadamente, tendremos que debe cumplirse, como en todas las fundiciones:

$$\text{Carbono total} = \text{Carbono grafitico} + \text{Carbono combinado}$$

y, por lo tanto, como al disminuir el carbono total disminuye la cantidad de láminas de grafito, vemos que en las fundiciones de matriz perlítica al disminuir el porcentaje de carbono total disminuye el número de láminas de grafito y aumenta la resistencia a la tracción.

También se ve en las fundiciones que con el mismo porcentaje de carbono total y la misma distribución de láminas de grafito, tienen mayor

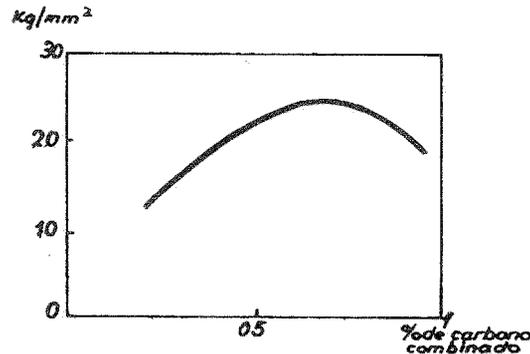


FIGURA 48

Relación aproximada entre el carbono combinado y la resistencia a la tracción en las fundiciones del mismo porcentaje de carbono total.
Se procura obtener fundición perlítica por ser la de máxima resistencia. En las fundiciones aumenta la resistencia a la tracción al aumentar la resistencia de la matriz.

resistencia las que tienen matriz perlítica. Esto quiere decir que aumenta su resistencia al aproximarse el porcentaje de carbono combinado a 0,80 % (fig. 48).

Resumiendo, se puede decir que para obtener una fundición perlítica de máxima resistencia hay que obtener: 1.º una matriz perlítica; 2.º que las láminas de grafito sean poco numerosas, y 3.º que estén bien distribuidas y sean muy pequeñas. Para conseguir todo ello, conviene que el contenido en carbono, dentro de ciertos límites, sea lo más bajo posible.

Sin embargo, conseguir en el cubilote fundiciones perlíticas de bajo porcentaje de carbono, es, en general, difícil. Esto es debido, por una parte a la alta temperatura de fusión de esas fundiciones y a que la colada de las fundiciones de bajo contenido en carbono se hace con dificultad. Además, en la fabricación de esa clase de fundiciones es fácil la

formación de fundiciones blancas en lugar de fundición gris perlítica en algunas zonas delgadas de las piezas, lo cual crea dificultades en la mecanización. Por eso es necesario estudiar con detalle todas las circunstancias que contribuyen y favorecen la formación de fundiciones perlíticas, ya que es muy difícil obtener esa estructura si no se toman muchas precauciones o se emplean técnicas especiales o elementos de aleación, como se explicará más adelante.

20. Principales empleos de la fundición gris y de la fundición perlítica de acuerdo con su dureza y resistencia.

A continuación explicaremos las principales propiedades de las diferentes clases de fundiciones y sus aplicaciones más frecuentes.

La fundición gris ferrítica, con 0,3 a 0,5 % de carbono combinado, que es la que se fabricaba antiguamente en casi todos los talleres de fundición, y es la que se obtiene en la actualidad en la mayoría de los cubilotes cuando se trabaja en ellos sin una técnica especial, es una fundición de baja calidad que se emplea para piezas que interesa sean muy fáciles de mecanizar.

Esas fundiciones suelen tener en su microestructura bastante ferrita (del 20 al 50 %, por ejemplo) y una resistencia a la tracción bastante baja que suele variar de 10 a 14 Kg/mm². En esos casos, se emplean altos contenidos en silicio, de acuerdo con lo señalado en la figura 18. En estas fundiciones, lo más importante es su fácil colabilidad, baja temperatura de fusión, buena maquinabilidad y que no aparezcan poros en las piezas, no importando mucho que su dureza y su resistencia sean bajas.

Las fundiciones de calidad intermedia entre la fundición ferrítica y la perlítica, se fabrican cuando preocupa más la calidad de la fundición o se intenta mejorarla y se busca un compromiso o equilibrio más favorable entre la maquinabilidad y la resistencia que en el caso anterior y se desea conseguir para ambas características valores más aceptables. Entonces, es recomendable fabricar fundiciones con algo menos de silicio que las anteriores y se obtendrá una matriz parecida a la de un acero semiduro con un contenido en carbono combinado variable de 0,4 a 0,6 %.

Las fundiciones perlíticas que son algo más difíciles de obtener que las anteriores y que, en general, son las mejores, se emplean cuando interesa que las piezas tengan una elevada resistencia y que luego en el trabajo resistan muy bien al desgaste. En general, se recomiendan durezas comprendidas entre 180 a 250 Brinell. En el caso de que la dureza sea inferior a 180, aparece ferrita libre en la microestructura; cuando la dureza es superior a 250 Brinell, suele aparecer cementita

proeutectoide. En el caso de que las piezas lleven muchas operaciones de mecanizado, conviene utilizar la zona inferior de durezas, 180 a 220 Brinell. La fabricación de estas fundiciones, exige, en general, el empleo de precauciones especiales.

En la actualidad se dedica una gran atención a las fundiciones grises de alta resistencia (generalmente $R > 20 \text{ Kg/mm}^2$), que estudiaremos más adelante. Muchas de ellas son perlíticas y otras aciculares, martensíticas con grafito esferoidal, etc. Algunas de ellas son fundiciones ordinarias al carbono y otras son fundiciones aleadas con cromo, níquel, molibdeno, etc.

Cuando no preocupa mucho la dificultad de mecanización y, en cambio, es muy interesante la resistencia al desgaste, se suelen utilizar fundiciones perlíticas con durezas más elevadas, comprendidas entre 230 y 270 Brinell.

Finalmente, en ciertas ocasiones especiales en que interesa conseguir con las fundiciones ordinarias de bajo precio una gran resistencia a la abrasión, se ha visto que se obtienen muy buenos resultados con fundiciones blancas, con durezas de 300 a 500 Brinell.

21. Composición de las fundiciones grises ordinarias de uso más frecuente.

Aunque en las fundiciones es difícil dar reglas para elegir en cada caso la composición más conveniente para un empleo definido, en la Tabla VII adjunta se señalan a título de orientación algunas de las composiciones de empleo más frecuente.

En la mayoría de los casos en las composiciones se da una sola cifra en lugar de dos cifras límites, que sería más exacto, aunque con ello se pierde algo de precisión sobre todo cuando los límites pueden ser muy amplios. De esa forma creemos que es más fácil recordar de memoria algunas composiciones que pueden considerarse como fundamentales.

Se comienza señalando tres composiciones para piezas de maquinaria. La que corresponde a piezas de tamaño medio la consideramos como una composición normal o de referencia para muchas aplicaciones en piezas de tamaño medio y de usos muy variados con 25 a 50 mm de espesor.

Su composición es la siguiente:

$C = 3,25 \%$, $Si = 1,75 \%$ y $C + Si = 5 \%$, $Mn = 0,50 \%$.

El contenido en azufre no suele pasar de $0,10 \%$ y el fósforo puede ser $0,25 \%$, aproximadamente.

| Clase de pieza | Composición en % | | | | | |
|-------------------------------------|------------------|------|------|------|------|------|
| | C | Si | Mn | P | S | |
| Piezas de maquinaria | Espesor pequeño | 3,25 | 2,25 | 0,50 | 0,25 | 0,10 |
| | Espesor medio | 3,25 | 1,75 | 0,50 | 0,25 | 0,10 |
| | Espesor grande | 3,25 | 1,25 | 0,50 | 0,25 | 0,10 |
| Piezas de ornamentación | 3,50 | 2,50 | 0,50 | 1,00 | 0,10 | |
| Tubos | Grandes | 3,40 | 1,75 | 0,50 | 0,80 | 0,08 |
| | Medianos | 3,60 | 2,00 | 0,50 | 0,80 | 0,08 |
| Segmentos | 3,50 | 3,00 | 0,65 | 0,50 | 0,06 | |
| Camisas de cilindros | 3,25 | 2,25 | 0,65 | 0,75 | 0,08 | |
| Pistones de motor explosión | 3,35 | 2,25 | 0,65 | 0,15 | 0,10 | |
| Zapatas de freno | 3,10 | 1,70 | 0,50 | 0,15 | 0,10 | |
| Piezas delgadas de alta resistencia | 2,75 | 2,25 | 0,80 | 0,10 | 0,09 | |
| Lingoteras | 3,50 | 1,00 | 0,90 | 0,20 | 0,07 | |
| Piezas blandas de máquinas | 3,40 | 2,60 | 0,65 | 0,30 | 0,10 | |
| Ruedas | 3,35 | 0,65 | 0,60 | 0,35 | 0,12 | |
| Resistente al calor | 3,50 | 1,15 | 0,80 | 0,10 | 0,07 | |

TABLA VII

Composición de algunas piezas de fundición de uso corriente.

Para piezas de gran espesor, conviene emplear, con el mismo carbono, menos silicio; suele ser frecuente recomendar $Si = 1,25 \%$ aproximadamente. En las piezas más delgadas en cambio, es necesario subir el silicio hasta $2,25 \%$, aproximadamente. En ambos casos los contenidos en Mn, S y P, son los mismos que los que corresponden a las piezas de tamaño medio.

Cuando se desea fabricar fundiciones para piezas de ornamentación artística de formas complicadas, radiadores, etc., para aumentar la fluidez del metal y mejorar la colabilidad, se emplean más altos contenidos en carbono y en silicio que los que hemos señalado antes como referencia. En esos casos también suele ser necesario emplear altos contenidos en fósforo que mejoran la colabilidad. Se puede emplear la siguiente composición: $C = 3,50 \%$; $Si = 2,50 \%$ y $P = 1,00 \%$.

En la fabricación de tubos de gran tamaño colados en arena se suele aumentar el fósforo hasta $0,80 \%$ para facilitar la colabilidad y también se eleva el carbono hasta $3,40 \%$. El silicio se mantiene en $1,75 \%$. En los tubos de tamaño mediano se emplea el mismo porcentaje de fósforo, pero más carbono. $C = 3,60 \%$ y más silicio, $Si = 2 \%$.

Los segmentos para pistones de motor de explosión se suelen fabricar con elevados contenidos en carbono y en silicio, ya que por ser piezas muy delgadas es necesario un elevado porcentaje de estos elementos para que no blanquee la fundición, $C = 3,50 \%$ y $Si = 3 \%$. También se em-

plean altos contenidos en fósforo: $P = 0,50 \%$ para facilitar la colabilidad y mejorar su elasticidad y la resistencia al desgaste. Por ser piezas de gran responsabilidad se recomiendan bajos contenidos en azufre $S < 0,07 \%$.

Las camisas de cilindros de motores de explosión, como son también piezas de poco espesor, conviene fabricarlas con un contenido en silicio bastante elevado, por ejemplo, $Si = 2,25 \%$. El carbono suele ser normal, $C = 3,25 \%$, y se emplea alto porcentaje de fósforo, $P = 0,75 \%$, para que tengan buena resistencia al desgaste. El azufre conviene que sea bajo generalmente inferior a $0,10 \%$.

En la fabricación de zapatas de freno se procura obtener fundición perlítica que tiene gran resistencia al desgaste. Para ello es necesario emplear contenidos en carbono y silicio algo inferiores a lo normal. Se suele emplear $C = 3,10 \%$ y $Si = 1,70 \%$. Los contenidos en manganeso, fósforo y azufre suelen ser normales.

Cuando se quieren conseguir elevadas características mecánicas conviene también obtener fundición perlítica con láminas de grafito pequeñas, y para ello es necesario bajar el contenido en carbono hasta $2,75 \%$, por ejemplo, y fijar el silicio en la cifra conveniente, según el espesor, de $1,75$ a $2,25 \%$, aproximadamente. En ocasiones se consiguen también altas resistencias con fundiciones sin elementos aleados por medio de la inoculación, o también sobrecalentando las fundiciones.

Es interesante recordar que, en definitiva, lo que más debe interesar es conseguir la más conveniente distribución de las láminas de grafito y la microestructura que mejor se comporte en las condiciones de trabajo a que va a estar sometida la pieza.

22. Sensibilidad al espesor.

Uno de los problemas que más preocupa en ocasiones a los fundidores es conseguir piezas de fundición gris de alta resistencia a la tracción sin que aparezcan zonas blancas (de dureza muy elevada) que dificultan mucho la mecanización de las piezas, y aun a veces llegan a impedir que las herramientas puedan tornearse o taladrar algunas zonas del material. Se tiende siempre a evitar que en los ángulos vivos o secciones delgadas de las piezas llegue a blanquear la fundición.

Se observa que a veces hay diferencias sensibles entre unas y otras clases de fundiciones. Algunas fundiciones se comportan mucho mejor que otras y no presentan dificultades en el mecanizado. En cambio, con ciertas fundiciones aparecen con frecuencia, como hemos dicho antes, zonas duras de fundición blanca. Entonces se dice que estas últimas fundiciones son muy sensibles al espesor y las primeras, que siempre son preferidas, tienen en cambio poca sensibilidad al espesor.

En la figura 49 se señalan las durezas que se obtienen con probetas de diferentes espesores (variables de $1/8''$ a $1''$), fabricadas con fundiciones de diferente composición.

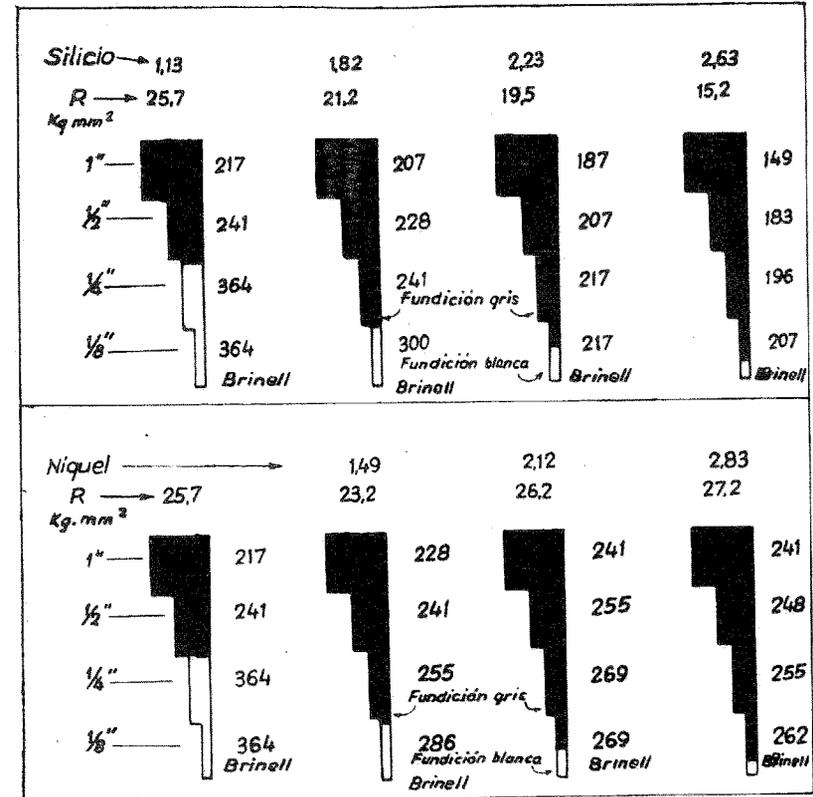


FIGURA 49

Durezas que se obtienen en probetas de diferentes espesores con fundiciones de diferentes composiciones. Se observa que con la adición de níquel es posible obtener gran uniformidad de durezas en la zona 220 a 260 Brinell.

Al observar la figura 49, se ve que las fundiciones al carbono fundidas sin precauciones especiales dan, en general, gran irregularidad de dureza cuando se fabrican piezas con zonas de espesor muy diferentes.

En cambio, se ve en las fundiciones aleadas, cómo la acción del níquel mejora el comportamiento de las fundiciones al igualar las durezas

que se obtienen en las zonas de diferente espesor, y con ello aumentan sus posibilidades de aplicación.

Entre todos los elementos de aleación, es el níquel el que reduce más la «sensibilidad al espesor» de las fundiciones.

En la figura 50 se ve cómo con una fundición ordinaria al carbono se obtienen diferencias de dureza muy importantes desde 180 a 350 Brinell,

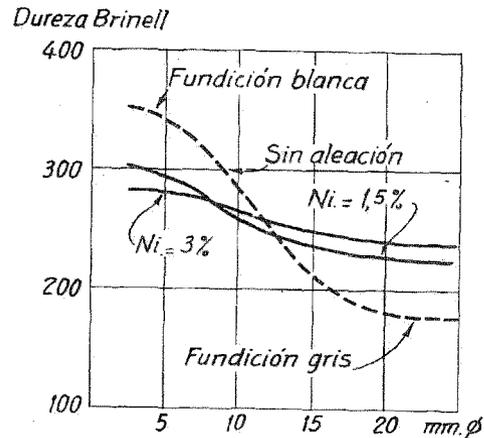


FIGURA 50
Influencia del níquel en las durezas que se obtienen en piezas de fundición con espesores variables de 5 a 25 mm.

al variar el espesor de las piezas de 5 a 25 mm. En cambio, añadiendo 1,5 a 3 % de níquel se ve que se igualan mucho las durezas en las zonas de diferente espesor.

La influencia beneficiosa del níquel y del cromo también se observa en la figura 51 que destaca la ampliación del campo perlítico, que ocurre precisamente cuando las fundiciones son poco sensibles al espesor. Esto quiere decir que en las fundiciones al níquel no es necesaria para la obtención de fundiciones perlíticas, que son precisamente unas de las de mayor interés industrial, una exactitud tan grande en la combinación de los porcentajes del carbono y silicio como en las fundiciones al carbono. También se puede decir que fabricando piezas con zonas de muy diferente espesor con la intervención de elementos aleados, se obtiene más fácilmente fundición perlítica, que cuando se utiliza fundición gris ordinaria sin aleación.

Finalmente, estudiando la figura 62, se puede observar cómo los ele-

mentos aleados reducen la influencia del espesor, en las durezas que se obtienen en piezas de tamaños muy diferentes.

23. Fundiciones de alta resistencia.

Las crecientes exigencias de la industria mecánica obligaron a mejorar los clásicos métodos de fabricación de las fundiciones, con objeto de obtener mejores características mecánicas que las que normalmente

se conseguían con las fundiciones obtenidas en los cubilotes al trabajar y fundir sin precauciones especiales. Una gran parte de las mejoras conseguidas en ese sentido se obtuvieron reduciendo el porcentaje de carbono por debajo del 3 %, debiendo señalarse que las fundiciones ordinarias de cubilote que se fabricaban antes de la primera guerra europea solían tener de 3,25 a 3,75 % de carbono y de 10 a 15 Kg/mm² de resistencia a la tracción. En la actualidad es normal considerar fundiciones de alta resistencia aquellas que tienen más de 20 Kg/mm² de resistencia a la tracción.

Puede decirse que durante los años 1914 a 1918, fue cuando se dio el primer gran avance en este sentido. En esa época los franceses fabricaban grandes cantidades de proyectiles con fundición acerada. Denominaban de esta forma a la fundición de estructura perlítica obtenida en cubilotes, en los que a las cargas de fundición adicionaban una cantidad muy importante de chatarra de acero o de hierro dulce, y con ella conseguían bajar el carbono de la fundición hasta 3 %, aproximadamente.

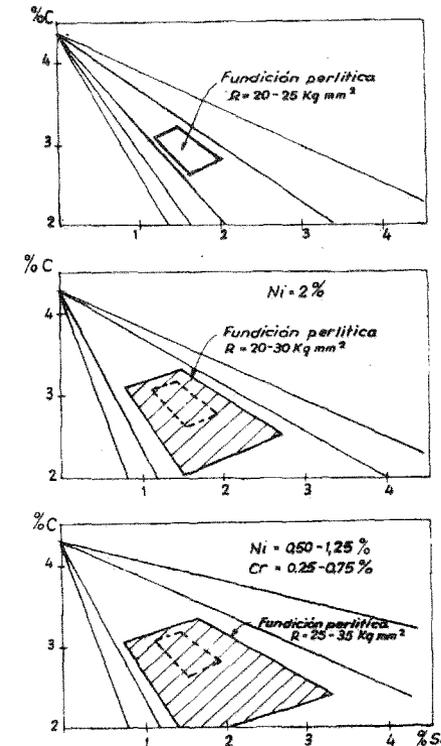


FIGURA 51
Influencia del níquel y del cromo en el ensanchamiento del campo perlítico de las fundiciones

De esa forma se mantenía aproximadamente el $C + Si = 4,5 \%$, $C + \frac{Si}{3} = 3,6 \%$. En general, el silicio lo mantenían de 1,5 a 2 %. Así obtenían resistencias de 20 a 25 Kg/mm² en vez de unos 12 Kg/mm² que tienen de resistencia las fundiciones grises ordinarias fabricadas sin ninguna atención especial.

Los alemanes fabricaron también en aquella época grandes cantidades de fundición perlítica para proyectiles de características mecánicas en cierto modo parecidas a las de la fundición que se fabricaba en Francia. Colaban fundiciones muy bajas en silicio, 0,7 % aproximadamente, y relativamente bajas en carbono, en moldes calentados de 100° a 500°, y con este método de trabajo, que es diferente del anterior, obtenían un producto de características mecánicas muy parecidas a la fundición acerada que fabricaban los franceses.

Empleaban muy bajo porcentaje de silicio de 0,4 a 1 % y el carbono próximo al 3 %, es decir, $C + Si = 3,5 \%$ o $C + \frac{Si}{3} = 3,25$, aproxima-

madamente. Con esta composición, al colar luego en moldes calientes obtenían fundición gris perlítica, de unos 25 Kg/mm² de resistencia. Si se hubiera utilizado un procedimiento de fundición normal, con moldes de arena corrientes, con esa composición se hubiera obtenido fundición blanca.

En los dos casos que hemos explicado, se alcanzaba alta resistencia porque con ambos métodos y empleando diferentes artificios, se conseguía una matriz de tipo perlítico.

Para poder colar las fundiciones aceradas de tipo perlítico fabricadas en la forma que acabamos de explicar, se vio que era necesario alcanzar temperaturas muy elevadas en el cubilote, ya que al disminuir el contenido en carbono de las fundiciones aumenta su temperatura de fusión. Esto forzó a realizar numerosos ensayos para conseguir en los cubilotes las máximas temperaturas posibles. También se realizaron numerosos ensayos de calentamiento de la fundición a temperatura elevada en hornos eléctricos de arco o de inducción. Al hacer estos ensayos se vio que, en general, cuanto más elevada fuese la temperatura que se emplease, siempre dentro de los límites de 1.450°, 1.500° ó 1.550°, las fundiciones quedaban, en general, con más altas resistencias. Calentando las fundiciones aceradas hasta esas temperaturas se aumentaba su resistencia, obteniéndose como resultado fundiciones perlíticas de 25 ó 35 Kg/mm². De vez en cuando, sin embargo, se observaba que si se elevaba mucho la temperatura se obtenían resultados irregulares y fundiciones de baja resistencia. Esto era debido a que por efecto de esas altas tempera-

turas en ocasiones se forma un grafito interdendrítico (fig. 54, tipos D y E y fig. 56), cuya forma y distribución era distinta de la que hasta entonces se había observado en las fundiciones fabricadas en condiciones normales en los cubilotes. Ese grafito interdendrítico se presentaba en las fundiciones de bajo contenido en carbono por efecto de un fenómeno de subenfriamiento que explicaremos más adelante.

Al mismo tiempo, en la fabricación de la fundición perlítica, se tropezaba a veces, como ya hemos explicado antes, con dificultades porque en ocasiones aparecía fundición blanca en las secciones delgadas o ángulos vivos.

24. Inoculación.

Los dos problemas de baja resistencia y de blanqueo de algunas zonas de las piezas, que como acabamos de explicar, se presenta en ocasiones cuando se desea fabricar fundiciones de alta resistencia, se solucionaron

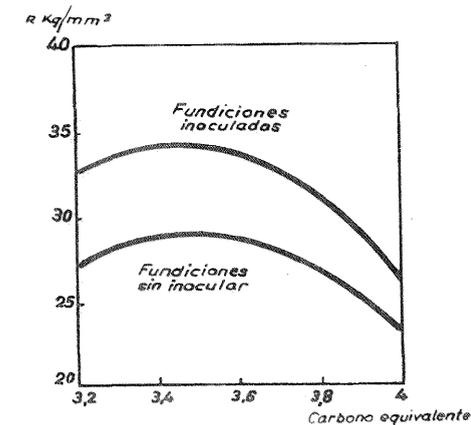


FIGURA 52
Influencia de la inoculación en la resistencia a la tracción de diversas fundiciones (50 mm de espesor). Se observa que la inoculación es interesante, principalmente para bajos contenidos de carbono.

al descubrirse, la influencia de los inoculantes en los procesos de fusión, y también con el empleo de elementos de aleación. Empleando cualquiera de esos métodos se facilita mucho la obtención, con regularidad, de fundiciones perlíticas de alta resistencia. La inoculación es muy eficaz con bajos contenidos en carbono y muy poco interesante para porcentajes elevados.

La inoculación consiste en añadir al metal fundido en el momento de colar, bien en el canal de colada o cuando cae ya en la cuchara, ciertas aleaciones grafitizantes y desoxidantes como ferrosilicio, siliciuro cálcico, etc. En la práctica industrial se emplean diversas clases de inoculantes, pero el método operatorio en casi todos los casos es muy parecido.

Los mejores resultados se suelen obtener con aumentos de silicio variables de 0,15 a 0,30 %, siendo conveniente calentar la fundición a muy elevada temperatura y alcanzar por lo menos de 1.450° a 1.550°.

Entre los métodos de inoculación, uno de los más conocidos, el «Meehanite», consiste en fundir con bajo carbono, 2,8 % aproximadamente, y bajo silicio, 1,2 %, aproximadamente. Los límites suelen ser:

$$C = 2,6 \text{ a } 3 \% \text{ y } Si = 1 \text{ a } 1,4 \% , C + Si = 4 \% \text{ y } C + \frac{Si}{3} = 3,2 \% ,$$

añadiendo luego como inoculante siliciuro cálcico a la cuchara.

Combinando la acción de los inoculantes con el empleo de altas temperaturas y eligiendo cuidadosamente las composiciones, se llega a alcanzar en fundiciones perlíticas resistencias variables de 25 a 35 Kg/mm², sin que aparezcan además zonas muy duras de fundición blanca.

| | % de silicio | | | | |
|--|--------------|------|------|------|------|
| | 2,19 | 2,03 | 1,90 | 1,87 | 1,60 |
| En las cargas | 2,19 | 2,03 | 1,90 | 1,87 | 1,60 |
| En la cuchara | | 0,15 | 0,25 | 0,30 | 0,53 |
| Total | 2,19 | 2,18 | 2,15 | 2,17 | 2,13 |
| Resistencia Kg/mm ² | 26 | 29 | 33 | 34 | 30 |

TABLA VIII

Influencia de la forma de introducir el silicio (inoculación) en la resistencia a la tracción de una fundición de la siguiente composición: C = 2,95 %; Si = 2,15 %; Mn = 0,70 %.

En la Tabla VIII se dan los resultados obtenidos con cinco fundiciones que contienen aproximadamente 2,15 % de silicio. Se observa que en los casos en que la adición de silicio se ha hecho en la cuchara, se obtiene mayor resistencia que cuando el silicio se ha añadido en el cubilote.

En la figura 52 también se puede observar cómo en fundiciones con el mismo carbono equivalente se puede obtener más resistencia cuando se emplea la inoculación. Para valores altos de «carbonos equivalentes» 3,8 a 4, la diferencia es de unos 4 Kg/mm², y para los valores bajos, 3,4 a 3,6, la diferencia es mayor en unos 6 Kg/mm².

Otro método de gran interés que estudiaremos más adelante para obtener fundiciones de altas características mecánicas y que, además, no

presenten dificultades de mecanización, es como ya hemos señalado antes, el empleo de elementos de aleación. Este procedimiento tiene la ventaja de que con él se consiguen gran regularidad y uniformidad de resultados, pero tiene el inconveniente de que la utilización del cromo, níquel, cobre y molibdeno, que son los elementos más empleados, eleva el precio de coste de las fundiciones.

25. Tamaño y distribución de las láminas de grafito.

Al estudiar las fundiciones de alta resistencia conviene señalar que, además del grafito de aspecto clásico que aparece en las fundiciones ordinarias, y que en adelante llamaremos de tipo A, a veces aparecen

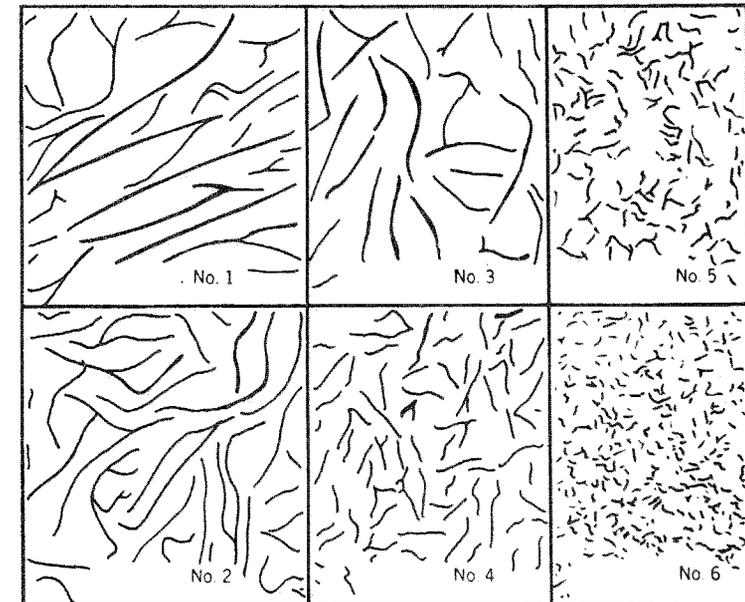


FIGURA 53
× 90

Tamaño de las láminas de grafito normalizados por la A.S.T.M.

también láminas de grafito con aspectos muy diversos, algunos muy diferentes del que habíamos señalado al iniciar el estudio de las fundiciones.

En la figura 53 se señalan los diferentes tamaños de las láminas de grafito, clasificados por tamaños del 1 al 6.

En la figura 54 se ven las diferentes clases de grafito que aparecen en las fundiciones, denominados tipos A, B, C, D y E, de acuerdo con las normas A.S.T.M.

De todas esas clases de grafito, el tipo A es, en general, el que más interesa obtener, porque con él se suelen conseguir las mejores características mecánicas. En cambio, no conviene la presencia de grafito de tipo D y E.

El grafito tipo A, que suele ser el más corriente, aparece en el centro de las piezas de cierto espesor, fabricadas con fundiciones grises ordi-

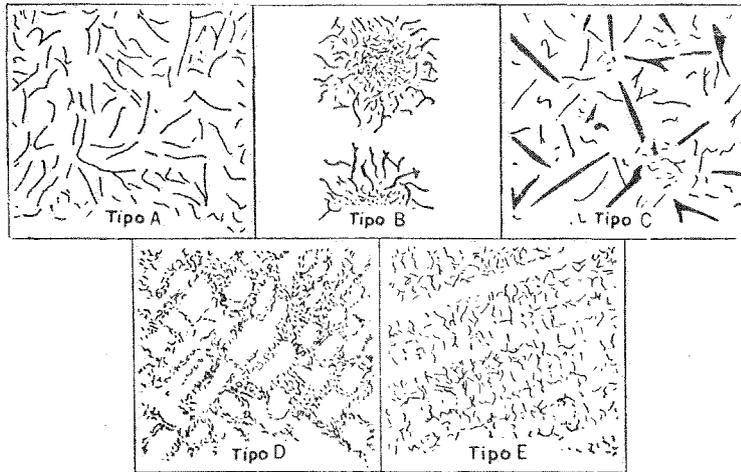


FIGURA 54
Diferentes clases de grafito que suelen aparecer en las fundiciones.
(AFA y ASTM.)

narias, de composición próxima a la eutéctica. Ese tipo de grafito es el que conviene para la fabricación de piezas para maquinaria y es el que se obtiene y se venía obteniendo desde muy antiguo en los cubilotes, trabajando sin precauciones especiales.

El grafito en forma de rosetas (tipo B) aparece con porcentajes de silicio y, sobre todo, de carbono elevados, en piezas enfriadas rápidamente. Se suele presentar en piezas delgadas de unos 10 mm de espesor coladas en arena.

El grafito tipo C, en láminas gruesas de gran espesor y longitud, corresponde a fundiciones grises hipereutécticas de muy alto contenido en carbono, en piezas de mediano y gran tamaño. Esas láminas suelen ser de orientación desordenada y se presentan con otras de tamaño normal.

Las estructuras D y E no conviene que aparezcan y se suelen pre-

sentar en fundiciones de bajo contenido en carbono y muy alta temperatura de colada, como consecuencia de los fenómenos de subenfriamiento que vamos a explicar a continuación.

26. Fenómenos de subenfriamiento que se presentan en el proceso de solidificación de las fundiciones.

Cuando para la fabricación de fundiciones de alta resistencia se emplean temperaturas de calentamiento muy elevadas, se observa que se obtienen en ocasiones fundiciones con resistencias a la tracción inferiores a lo que parece que se debía obtener. Esto ocurre sobre todo en fundiciones de bajo contenido en carbono, en las que se observa luego una microestructura en la que el grafito se halla repartido en forma interdendrítica. En la figura 55 se puede observar cómo en las fundiciones aumenta, en general, la resistencia a la tracción al aumentar la temperatura de calentamiento. También se ve cómo, al disminuir el contenido en carbono por debajo de un cierto límite, disminuye la resistencia a la tracción al elevarse las temperaturas de calentamiento.

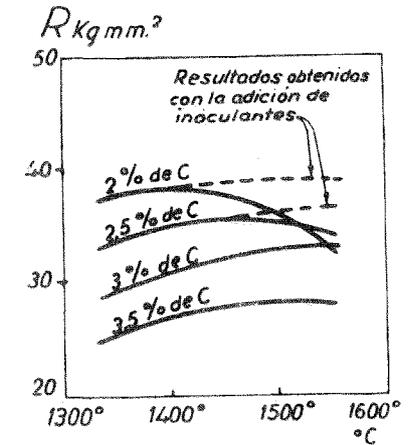


FIGURA 55
Influencia de la temperatura de calentamiento en la resistencia a la tracción de diversas clases de fundiciones. Se observa la eficacia de la inoculación en los resultados que se obtienen con fundiciones de bajo contenido en carbono calentadas a muy alta temperatura.
(J. NAVARRO ALCACER.)

Esa disminución de resistencia es debida a un fenómeno de subenfriamiento, característico de las fundiciones bajas en carbono sobrecalentadas o enfriadas a velocidades ligeramente inferiores a las que dan origen a la aparición de fundición blanca, que se traduce en la aparición de grafito interdendrítico del tipo D, que resta homogeneidad a la estructura (figs. 54 y 56).

El fenómeno de subenfriamiento puede explicarse en las fundiciones hipoeutécticas de la siguiente manera:

En el enfriamiento, al disminuir la temperatura de la fundición, a partir de cierto momento, comienzan a segregarse de la masa líquida cristales de austenita, cuya composición viene fijada por la línea AE, figura 20, al tiempo que el líquido restante se enriquece en carbono hasta llegar a la composición eutéctica.

En una solidificación normal, cuando se alcanza la temperatura eutéctica, solidifica toda la fundición todavía en estado líquido. Cuando la solidificación se produce con subenfriamiento, por el contrario, prosigue la solidificación de la austenita a temperaturas inferiores a la eutéctica, creciendo, por tanto, las dendritas de solidificación primaria, hasta que se produce la solidificación del líquido aun restante.

La parte de fundición aún en estado líquido, solidifica por tanto, en el espacio que dejan las dendritas de austenita primaria, que es tanto

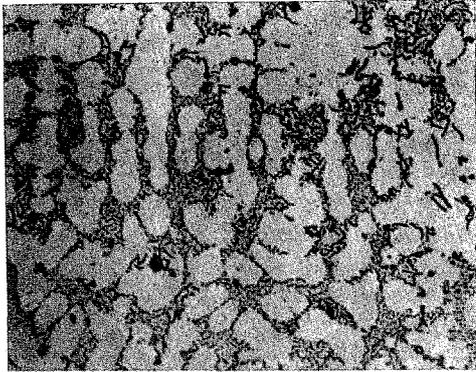


FIGURA 56

Laminillas muy finas de grafito interdentritico sobre una matriz de ferrita, en una fundición ordinaria calentada a muy alta temperatura. C = 3,10 %; Si = 1,75 %; Mn = 0,75 %; P = 0,21 %; S = 0,09 %.

más reducido cuanto mayor sea el grado de subenfriamiento y más hipoeutéctica sea la aleación. Por otra parte la gran cantidad de pequeñísimas láminas de grafito en forma de agrupaciones interdentriticas, que se han formado al solidificarse bruscamente el líquido subenfriado, favorecen luego la precipitación del carbono proeutectoide y eutectoide en forma de grafito. A esto se debe que en ocasiones la matriz de estas fundiciones sea completamente ferrítica, a pesar del alto contenido en C, de la alta temperatura alcanzada o de la relativamente elevada velocidad de enfriamiento.

Este fenómeno de subenfriamiento se evita, como ya hemos explicado antes, con la adición de elementos inoculantes en la cuchara. Combinando una elevada temperatura de calentamiento con la inoculación se pueden alcanzar resistencias muy elevadas.

CAPÍTULO V

FUNDICIONES ALEADAS

27. Las fundiciones aleadas son aquellas que contienen Ni, Cr, Mo, Cu, etc., en porcentajes suficientes para mejorar las propiedades mecánicas de las fundiciones ordinarias o para comunicarles alguna otra propiedad especial, como alta resistencia al desgaste, alta resistencia a la corrosión, al calor, etc.

28. Efectos de los elementos de aleación en las fundiciones.

El estudio de la influencia de los elementos de aleación en las fundiciones es bastante más complicado que en los aceros. Puede decirse que los elementos de aleación modifican la microestructura de las fundiciones y con ello su dureza y resistencia, estando en ocasiones estos cambios influenciados, además, por una variación de la templabilidad. Los elementos de aleación modifican también como en los aceros, la situación de los puntos críticos y además ejercen una acción muy importante y compleja sobre la grafitización.

En la Tabla IX se señala la influencia que los diversos elementos aleados ejercen sobre la formación del grafito y de los carburos y sobre las características de la matriz, y en la Tabla X se señala la influencia que tienen sobre los puntos críticos.

Ciertos elementos como el silicio, aluminio, níquel y cobre, que se disuelven en la ferrita, la endurecen y hacen aumentar su resistencia. Son elementos que favorecen la grafitización.

Otros elementos como el chromo, manganeso y molibdeno son formadores de carburos, son elementos que tienden a formar fundición blanca en vez de gris y dificultan la grafitización.

También es interesante señalar la acción que esos elementos ejercen sobre la estabilidad del hierro gamma o de la austenita y sobre el hierro alfa o ferrita. El níquel, el manganeso y el cobre aumentan la estabilidad de la austenita y favorecen la formación de una matriz austenítica, como se explicó para los aceros. El silicio y el aluminio, y también el molibdeno (éste en muy pequeña proporción) aumentan la estabilidad de la ferrita y favorecen la formación de fundiciones de matriz ferrítica.

| Elemento | Grafitización y coeficientes de grafitización | Efecto sobre los carburos a alta temperatura | Efecto en la estructura del grafito | Efecto en el carbono combinado de la perlita | Efecto que produce en la matriz |
|-----------|---|--|-------------------------------------|--|--|
| Carbono | Favorece | Decrece estabilidad | Engruesa | Decrece fuertemente | Ablanda y favorece la formación de ferrita |
| Silicio | Favorece +1 | Decrece estabilidad | Engruesa | Decrece fuertemente | Ablanda y favorece la formación de ferrita |
| Aluminio | Favorece +0,5 | Decrece estabilidad | Engruesa | Decrece fuertemente | Ablanda y favorece la formación de ferrita |
| Titanio | Favorece +0,4 | Decrece estabilidad | Afina fuertemente | Decrece | Ablanda y favorece la formación de ferrita |
| Níquel | Favorece +0,35 | Decrece ligeramente estabilidad | Afina ligeramente | Decrece y estabiliza la perlita | Afina la perlita y da dureza |
| Cobre | Favorece +0,20 | Indiferente | Indiferente | Decrece ligeramente | Da dureza |
| Manganeso | Se opone -0,25 | Estabiliza | Afina ligeramente | Aumenta | Afina la perlita y da dureza |
| Molibdeno | Se opone -0,30 | Indiferente | Afina fuertemente | Aumenta ligeramente | Afina la perlita y da resistencia |
| Cromo | Se opone -1 | Estabiliza fuertemente | Afina ligeramente | Aumenta | Afina la perlita y da dureza |
| Vanadio | Se opone -2,5 | Estabiliza fuertemente | Afina | Aumenta | Afina la perlita y da dureza |

TABLA IX

Influencia de los elementos de aleación en los constituyentes microscópicos de las fundiciones.

En la segunda columna de la Tabla IX, se dan a título de orientación unos coeficientes relativos del poder grafitizante de diversos elementos, que señalan el valor de su influencia comparada con la del silicio. Esa información conviene completarla con las siguientes aclaraciones:

Aluminio.—El valor que se señala sirve hasta 2 % de aluminio. Al aumentar el aluminio de 2 a 4 %, la acción grafitizante decrece hasta 0.

Titanio.—Con 0,1 a 0,2 %, el titanio tiene una acción grafitizante más intensa que el silicio, mientras que para mayores porcentajes su acción es inferior como se señala en el cuadro.

Cobre.—La acción grafitizante baja hasta 0,05, cuando los contenidos en carbono son mayores de 3 %.

| Modificación que se produce | Si | Mn | Ni | Cr | Al | Mo |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------|
| Desplazamiento del punto eutéctico | Hacia la izquierda | Hacia la derecha | Hacia la izquierda | Hacia la izquierda | | |
| Desplazamiento de la temperatura eutécticoide | Hacia arriba | Hacia abajo | Hacia abajo | Hacia abajo | Hacia arriba | |
| Templabilidad | | Aumenta | | Aumenta | Reduce | Aumenta |
| Desplazamiento del punto eutécticoide | Hacia la izquierda | |

TABLA X

Influencia de los elementos de aleación en la situación de los puntos críticos del diagrama hierro-carbono

Manganeso.—El coeficiente de $-0,25$, corresponde a porcentajes de 0,8 a 1,5 % de Mn. Por debajo de 0,8 %, la acción del Mn es menos intensa. En cambio puede llegar a favorecer la formación de grafito por debajo de 0,6 % si se combina con el azufre.

Molibdeno.—El coeficiente de $-0,30$ corresponde a 0,8 a 1,5 % de Mo. Porcentajes de molibdeno inferiores a 0,8 %, tienen una acción más débil y contenidos más elevados tienen una acción más intensa.

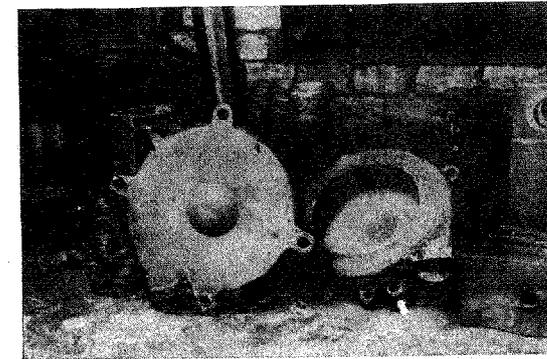


FIGURA 57

Carcasas de bombas para líquidos con sustancias abrasivas en suspensión, fabricadas en fundición martensítica de la siguiente composición: Ni = 1,5 %, Cu = 3 %, Cr = 1,8 %.

A continuación se señala la influencia individual de cada uno de los elementos de aleación.

Níquel.—Como hemos dicho antes, el níquel facilita la grafitización, se disuelve en el hierro y disminuye la estabilidad del carburo. Su acción es menos activa que la del silicio, ya que tres partes de níquel hacen el

mismo efecto, aproximadamente, que una de silicio. Aumenta la dureza y resistencia de la matriz y reduce el tamaño de las láminas de grafito y el tamaño de grano. Además, y esto es quizás lo más importante, evita la formación de fundición blanca en las esquinas y secciones delgadas de las piezas y mejora su maquinabilidad. Para la fabricación de fundiciones de alta resistencia de 35 a 50 Kg/mm², se suele emplear de 0,5 a 3 % de níquel. De 3,5 a 5 % de níquel, se emplea para obtener fundiciones martensíticas de elevada dureza, y más de 15 % de níquel para fabricar las fundiciones austeníticas muy resistentes a la corrosión y al calor.

Cromo.—El cromo estabiliza la cementita y evita la grafitización. Reduce ligeramente el tamaño de las láminas de grafito y afina y aumenta la dureza de la matriz. Se fabrican fundiciones con 12 a 30 % de cromo para resistir a la corrosión y a altas temperaturas. Forma carburos de cromo que son muy estables a alta temperatura.

Molibdeno.—El molibdeno favorece muy ligeramente la estabilidad del carburo de hierro y reduce el tamaño de las láminas de grafito y también aumenta la resistencia de la matriz. Se emplea en muchos tipos de fundiciones, pero su uso tiene un interés muy especial en las fundiciones aciculares, que tienen una tenacidad muy elevada.

Cobre.—El cobre favorece ligeramente la grafitización y endurece y aumenta la resistencia de la matriz. Mejora la resistencia al desgaste y al choque de las fundiciones, proporcionándoles cualidades antifricción muy interesantes. También mejora la resistencia a la corrosión atmosférica y a la acción de agentes corrosivos relativamente débiles. Por su bajo precio es muy empleado para sustituir al níquel. Se suele utilizar para fabricar fundiciones perlíticas de alta resistencia a la tracción.

29. Clasificación de las fundiciones aleadas.

De una forma general, se pueden clasificar las fundiciones aleadas en dos grupos:

1.º Fundiciones de baja y media aleación, que se caracterizan por tener pequeñas cantidades de Ni, Cr, Mo y Cu, generalmente en porcentajes inferiores a 5 %. En general, son fundiciones de alta resistencia a la tracción, de 25 a 50 Kg/mm², muy superior a la de las fundiciones ordinarias. Suelen ser de estructura perlítica, sorbítica, bainítica y martensítica. También pertenecen a este grupo de fundiciones de baja aleación las fundiciones con 1 a 2 % de cromo resistentes al calor y las fundiciones martensíticas muy resistentes al desgaste, y

2.º Fundiciones de alta aleación que agrupan todas las demás clases, diferentes a las que hemos citado anteriormente. En esta familia, se

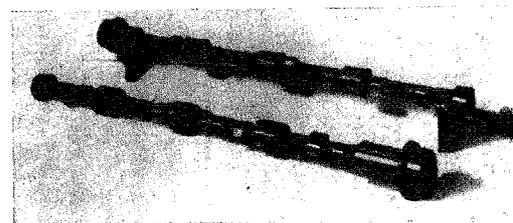


FIGURA 58
Árboles de levas fabricados con fundición de la siguiente composición: C = 2,80 %; Si = 2,10 %; Ni = 1,25 %; Mo = 0,60 %.

suelen agrupar las fundiciones muy resistentes al desgaste, al calor y a la corrosión y cuya microestructura suele ser austenítica o ferrítica.

CUADRO GENERAL DE LAS FUNDICIONES ALEADAS

FUNDICIONES DE BAJA Y MEDIA ALEACIÓN.—(Menos de 5 % de elemento aleado.)

- 1.º Fundiciones de alta resistencia con Cr, Ni, Mo, Cu, etc.
- 2.º Fundiciones martensíticas al Ni y al Mn.
- 3.º Fundiciones resistentes al calor con 1 % de cromo, aproximadamente.
- 4.º Fundiciones blancas de gran dureza con 1 a 3 % de cromo.

FUNDICIONES DE ALTA ALEACIÓN.—(Más de 5 % de elemento aleado.)

• *Fundiciones de níquel.*

- 1.º Fundiciones de 15 a 35 % de níquel; austeníticas, resistentes al calor y a la corrosión, y 2.º Fundiciones de Ni = 10 %, Mn = 5 %, austeníticas.

• *Fundiciones al cromo resistentes al calor y a la corrosión.*

- 1.º De 6 % de cromo de gran dureza; 2.º De 16 % de cromo de buena resistencia al calor y 3.º De 20 a 35 % de cromo de alta resistencia al calor y a la corrosión.

• *Fundiciones al silicio.*

- 1.º Fundiciones de 5 % de silicio resistentes al calor; 2.º Fundiciones de 15 % de silicio resistentes a la corrosión.

• *Fundiciones al aluminio.*

- 1.º Fundiciones de 8 a 10 % de aluminio resistentes al calor.

30. Fundiciones de baja y media aleación.

Estas fundiciones, como hemos señalado antes, suelen contener cantidades variables de níquel, cromo, molibdeno y cobre en porcentajes generalmente inferiores al 5 %. En estas fundiciones de gran resistencia, es frecuente que los elementos aleados estén en la proporción de una parte de cromo y dos o tres partes de níquel. El cobre y el molibdeno, en general, suelen encontrarse en cantidades relativamente pequeñas, empleándose estos elementos unas veces solos y otras con níquel o cromo, o con ambos a la vez. En ocasiones mucho menos frecuentes, estas fundiciones contienen también pequeñas cantidades de titanio o vanadio, que son añadidos principalmente para conseguir disminuir el tamaño de las láminas de grafito o para afinar la matriz, y para mejorar también la resistencia al desgaste.

31. Fundiciones de alta resistencia a la tracción.

En este grupo se incluyen, como hemos dicho antes, una variedad muy grande de fundiciones de composiciones muy diversas y resistencias

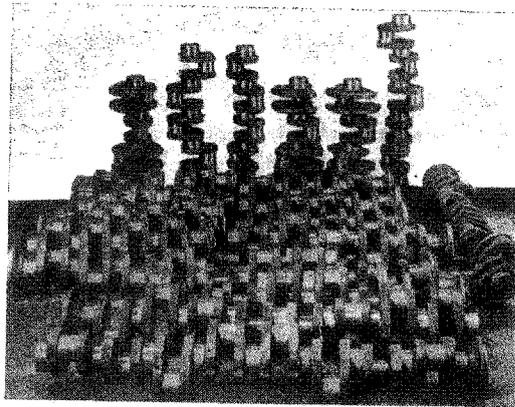


FIGURA 59
Cigüeñales para motores Diesel fabricados con fundición de la siguiente composición:
C = 2,75 %; Si = 1,90 %; Ni = 1,25 %; Mo = 0,75 %.

a la tracción, variables de 25 a 50 Kg/mm². A este grupo pertenecen ciertas fundiciones al níquel, fundiciones al cromo, al cromo-níquel, al cobre, etc.

En estas fundiciones, una de las ventajas más importantes del empleo de los elementos de aleación, es que con ellos se evita la formación de grandes laminas de grafito y se aumenta la resistencia de la matriz.

También es importante señalar que la presencia de esos elementos reduce la «susceptibilidad de las fundiciones a las variaciones de sección». Es decir, se consiguen que las propiedades sean más constantes en piezas de diferentes espesores. Además, la matriz de las fundiciones aleadas tiene más resistencia y dureza que la matriz de las fundiciones ordinarias.

Como es tan grande el número de fundiciones que pertenecen a este grupo y tan numerosas y particulares sus aplicaciones, es difícil señalar las características propias de cada composición. En algunos aspectos puede decirse que en ellas la influencia de los elementos de aleación es la misma que en los aceros. Sin embargo, conviene señalar que en las fundiciones en general, no es de interés fundamental la acción que esos elementos ejercen sobre la templabilidad, siendo en cambio la templabilidad una de las características que más importancia tiene en los aceros.

En la Tabla XI se dan algunas composiciones de fundiciones, aleadas de uso más frecuente y se observa que rara vez se usa un solo elemento de aleación, y que, en cambio, en la mayoría de los casos, son varios

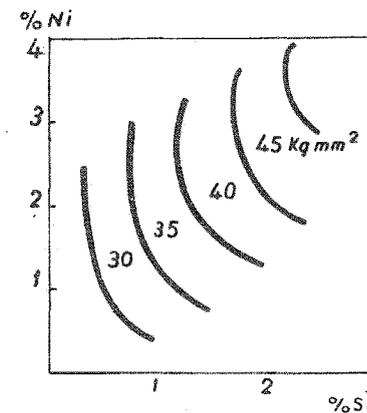


FIGURA 60
Influencia del níquel y del silicio en la resistencia a la tracción que se obtiene en las piezas de fundición de C = 2,75 %.

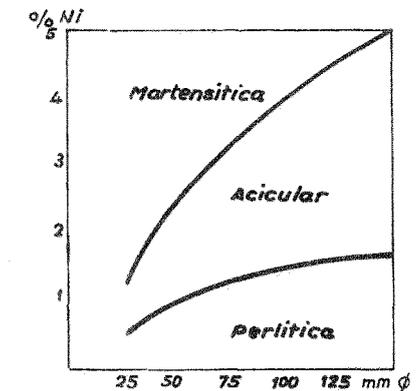


FIGURA 61
Influencia del níquel y del espesor de las piezas en la microestructura que se obtiene con fundiciones de la siguiente composición base: C = 2,5 %; Si = 2,5 %; Mn = 0,5 %; Mo = 1 %.

los elementos empleados. Las fundiciones aleadas con níquel de este grupo suelen conocerse frecuentemente en América con la designación Ni-Tensil.

Existiendo una variedad tan grande de fundiciones aleadas se han hecho numerosos estudios sobre la normalización de composiciones para

| Fundiciones aleadas de alta resistencia | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|------|
| | % C | % Si | % Mn | % Cr | % Cu | % Mo | % Ni |
| Camisas de cilindros de motores de automóviles | 3,35 | 2,20 | 0,75 | 0,35 | — | — | 0,75 |
| | 3,25 | 2,25 | 0,60 | 0,30 | — | — | 0,25 |
| | 3,25 | 2,00 | 0,70 | — | 0,60 | — | — |
| | 3,20 | 2,15 | 0,70 | 0,50 | — | 0,50 | 0,50 |
| | 3,25 | 2,20 | 0,60 | 0,50 | 1,00 | 1,00 | 0,20 |
| Tambores de freno | 3,35 | 2,00 | 0,70 | 0,35 | — | — | 1,75 |
| | 3,30 | 2,25 | 0,65 | 0,30 | — | — | 0,25 |
| | 3,25 | 2,00 | 0,60 | — | 1,00 | 0,50 | — |
| | 3,40 | 2,40 | 0,70 | — | — | 0,75 | 1,00 |
| Cigüeñales | 3,20 | 1,90 | 0,70 | 0,50 | — | — | 1,50 |
| | 2,50 | 2,50 | 1,00 | — | — | 1,00 | 1,00 |
| | 2,80 | 2,10 | 0,70 | — | — | 0,60 | 1,75 |
| | 3,00 | 2,00 | 0,80 | — | — | 0,75 | 1,50 |
| Troqueles para estampación de chapa | 1,50 | 0,95 | 0,70 | 0,45 | 1,75 | — | — |
| | 3,25 | 1,50 | 1,25 | — | — | 0,70 | — |
| | 3,50 | 1,50 | 0,50 | — | 0,20 | — | 1,75 |
| | 3,00 | 2,20 | 0,75 | 0,35 | — | 0,60 | 2,00 |
| Bancadas de máquinas | 3,00 | 1,45 | 0,90 | 0,90 | — | — | 3,00 |
| | 3,30 | 1,60 | 0,60 | 0,25 | — | 0,20 | 1,00 |
| | 3,00 | 1,00 | 0,75 | 0,35 | — | — | 1,25 |
| Cilindros de laminación en caliente | 2,90 | 1,90 | 0,90 | — | — | — | 1,50 |
| | 3,00 | 0,60 | 0,25 | — | — | 0,35 | — |
| | 3,00 | 0,55 | 0,20 | 0,25 | — | 0,25 | 0,25 |
| | 3,10 | 0,60 | 0,20 | 0,40 | — | 0,40 | 3,50 |
| Fundiciones aleadas martensíticas | 3,50 | 0,90 | 1,30 | 2,00 | — | — | 4,50 |
| | 3,40 | 0,60 | 0,25 | 1,30 | — | 0,40 | 4,50 |
| | 2,60 | 1,50 | 0,6 | 20 | 1,5 | 1,5 | 2,00 |
| Alta aleación de molibdeno | 2,70 | 1,50 | 0,8 | 3,00 | 0,5 | 6 | 2,00 |
| Fundiciones aleadas resistentes al calor (400° a 750°) | | | | | | | |
| Al cromo (baja aleación) | 3,50 | 2,25 | 0,60 | 1,25 | — | — | — |
| | 3,10 | 2,10 | 0,60 | 1,00 | — | — | — |
| | 3,00 | 2,00 | 0,60 | 0,75 | — | — | — |
| | 3,40 | 2,00 | 0,60 | 0,60 | — | — | 1,50 |

TABLA XI

Composiciones de algunas fundiciones de baja y media aleación de uso más corriente.

distintos niveles de resistencia. Entre otros es muy interesante el señalado en la Tabla XII preparado por la Climax Molibdenum Company,

| % Cr | % Ni | % Mo | Resistencia Kg/mm ² |
|------|------|------|--------------------------------|
| 0,30 | 0,75 | — | 20 |
| 0,40 | 1,50 | — | 25 |
| 0,20 | 1,75 | 0,25 | 30 |
| 0,20 | 2 | 0,35 | 35 |
| 0,20 | 2,25 | 0,45 | 40 |
| 0,20 | 2,75 | 0,55 | 45 |
| 0,20 | 3,25 | 0,65 | 50 |

TABLA XII

Grupo de 7 fundiciones aleadas con C = 3 % y Si = 2,25 % con resistencias a la tracción variables de 20 a 50 Kg/mm².

que con 7 composiciones cubre todo el campo de fundiciones con resistencias variables de 20 a 50 Kg/mm² de resistencia.

En la figura 60 se puede ver la influencia que tienen el níquel y silicio en las resistencias que se alcanzan con fundiciones de 2,75 % de carbono.

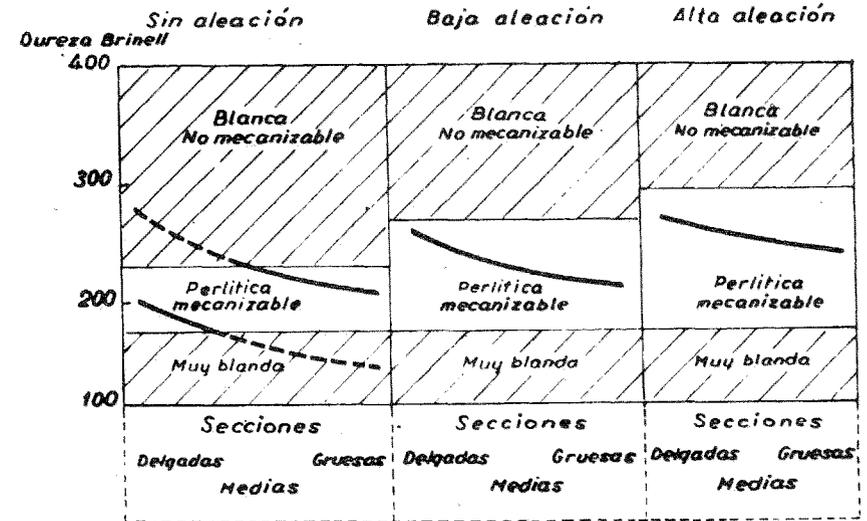


FIGURA 62

Influencia de los elementos de aleación en la amplitud del campo perlitico y en la zona de durezas en que las fundiciones pueden ser mecanizadas. Las líneas gruesas corresponden a composiciones perliticas. Se observa que con una fundición aleada es posible obtener estructura perlitica con espesores muy diferentes. En cambio, con una fundición ordinaria no se consigue obtener esta estructura perlitica en piezas de espesores muy diferentes. Es necesario emplear diferente composición para las piezas delgadas que para las gruesas.

Las microestructuras que se obtienen con fundiciones de: C = 2,5 %; Si = 2,5 %; Mn = 0,5 % y Mo = 1 % y espesores de 25 a 150 mm al variar el níquel de 0,5 a 5 %, se indican en la figura 61.

Finalmente, la ampliación del campo perlítico con el empleo de los elementos de aleación y la buena aptitud de mecanización de las fundiciones aleadas, se señala en la figura 62.

Dentro de este grupo de fundiciones de alta resistencia, formada principalmente por fundiciones perlíticas y sorbíticas, la familia de fundiciones aciculares es muy característica y se estudiará con detalle más adelante.

32. Fundiciones martensíticas resistentes al desgaste.

Para la fabricación de piezas que deban tener gran resistencia al desgaste, o que exijan muy altas durezas o deban sufrir grandes presiones, se emplean fundiciones martensíticas al níquel y al manganeso. Las fundiciones martensíticas más utilizadas son las blancas. Sin embargo, también se fabrican fundiciones martensíticas grises que son de uso más restringido.

Fundiciones martensíticas blancas al níquel.

Estas fundiciones suelen contener 4,5 % de níquel y 2 % de cromo, y bajo silicio, 0,50 %, aproximadamente, alcanzándose con ellas durezas variables de 500 a 700 Brinell. En América estas fundiciones martensíticas al níquel que son fundiciones blancas son conocidas con la denominación Ni-hard.

Son muy utilizadas para la fabricación de mordazas, martillos y otros accesorios para el quebranto, clasificación y transporte de materias abrasivas, minería, etc.

Estas fundiciones se diferencian de las fundiciones blancas ordinarias que a veces se emplean para trabajos similares, porque dan mejores rendimientos en el trabajo que aquéllas. Esto es debido a que su microestructura es más adecuada para ese fin. La fundición blanca ordinaria está constituida por perlita o sorbita y cementita. La dureza de la perlita o sorbita suele ser de 200 a 400 Brinell, la de la cementita 1.200 Vickers y la dureza de las fundiciones blancas ordinarias de 500 Brinell, aproximadamente (fig. 63).

Las fundiciones martensíticas blancas están constituidas por martensita y cementita y a veces carburos complejos. La martensita tiene una dureza de 650 Vickers, que es mayor que la de la perlita o sorbita. Los

carburos complejos tienen una dureza de 1.500 Vickers, aproximadamente, mayor que la de la cementita, y se comprende por lo tanto, por qué las fundiciones martensíticas tienen durezas de 700 a 900 Vickers, más elevadas que las de las blancas. Conviene recordar que no sólo se obtienen durezas más elevadas, sino que además el comportamiento de los microconstituyentes también es mejor que el de los que corresponden a las fundiciones blancas.

En la Tabla XI, se señalan los dos tipos más clásicos. Los dos con-

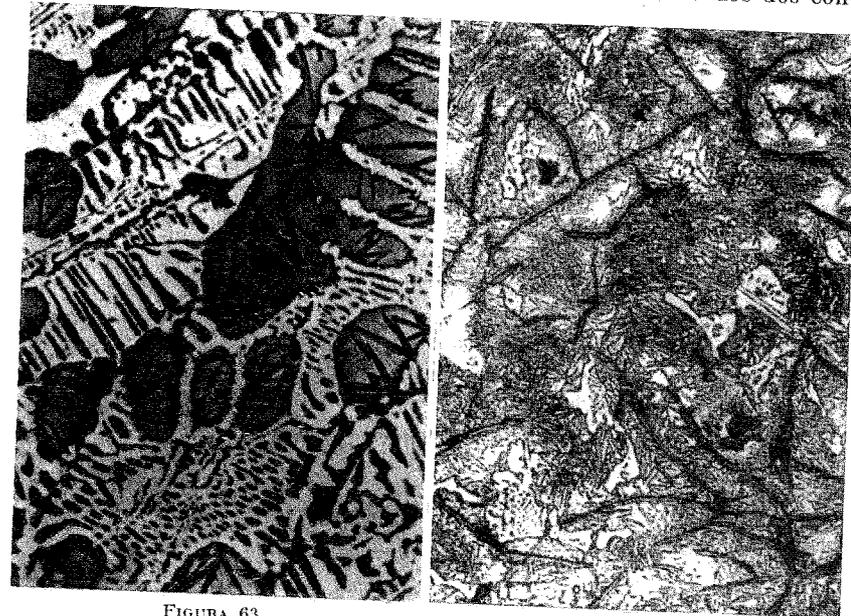


FIGURA 63
× 100

Microestructura de una fundición martensítica blanca. El fondo blanco es de cementita y las partes negras de martensita. Su composición: Ni = 4,12 %; Cr = 1,88 %.

FIGURA 64
× 100

Microestructura de una fundición gris martensítica. Se ven láminas de grafito sobre un fondo oscuro con agujas de martensita. Entre la martensita quedan algunos núcleos blancos de cementita. Su composición: Ni = 4,40 %; Cr = 1,30 %.

tienen aproximadamente Ni = 4,5 % y Cr = 2 %. Sólo se diferencian en el carbono. Se emplea 3,25 % de carbono cuando se desea la máxima dureza y 2,75 % de carbono cuando interesa la máxima tenacidad. En ocasiones, también se emplean fundiciones martensíticas de menor precio con 3 % de níquel y 1 % de cromo para un nivel de durezas más bajo, pero con mayor tenacidad. En todos los casos se modifican las composiciones según el espesor de las piezas y la dureza y tenacidad deseada.

Otras clases de fundiciones blancas martensíticas.

En ocasiones se fabrican también fundiciones martensíticas blancas al manganeso con la siguiente composición: C = 2 %; Si = 2,90 % y Mn = 3 %, que tienen características mecánicas parecidas a las del grupo Ni-hard. Aunque son más baratas que las fundiciones con níquel son menos utilizadas porque son más frágiles que aquéllas. En bruto de colada tienen 325 Brinell, pero calentadas a 850° y enfriadas al aire se llega a 550 Brinell.

A veces ciertas piezas que deben tener gran resistencia al desgaste se fabrican con fundiciones martensíticas blancas de alta aleación, con cromo o con molibdeno, según las composiciones que se indican en la Tabla XI.

Fundiciones martensíticas grises.

Estas fundiciones tienen en bruto de colada estructura martensítica por simple enfriamiento en arena. Suelen conocerse a veces con la denominación de fundiciones autotemplantes por la elevada dureza 400 a 450 Brinell que adquieren directamente de la colada sin ningún tratamiento. No pueden ser mecanizadas con herramientas ordinarias.

Sus microconstituyentes son martensita y láminas de grafito, apareciendo en ocasiones algunos carburos.

Su composición aproximada suele ser:

C = 3,10 %, Si = 1,75 %, Cr = 0,80 % y Ni = 4,10 %.

Se emplean para piezas de formas complicadas que deban de resistir al desgaste.

33. Fundiciones resistentes al calor con 1 por 100 de cromo.

Una de las dificultades del empleo de las fundiciones ordinarias para ciertos usos es el hinchamiento que experimentan cuando sufren calentamientos a temperaturas superiores a 450°. Para muy elevadas temperaturas de servicio y en ocasiones en que no importa mucho el precio, se emplean fundiciones austeníticas con 15 ó 20 % de níquel. Pero cuando el calentamiento del material no pasa de los 700° ó 750° y no se pueden emplear materiales caros, se pueden usar las fundiciones aleadas con pequeños porcentajes de cromo y bajo contenido en silicio, con las que se obtienen muy buenos resultados.

Se suele usar de 0,6 a 1,25 % de cromo que actúa como elemento estabilizador de carburos y contenidos bajos en silicio de 1,5 a 2 % para limitar la grafitización, que es una de las causas del hinchamiento.

En realidad, las composiciones de algunas de estas fundiciones, que se señalan en la Tabla XI, se pueden prácticamente incluir dentro del grupo de fundiciones de alta resistencia, pero como se trata de una utilización muy específica y clásica de las fundiciones de bajo contenido del cromo, hemos considerado interesante señalarlas en un grupo aparte, dentro de la familia de fundiciones de baja aleación.

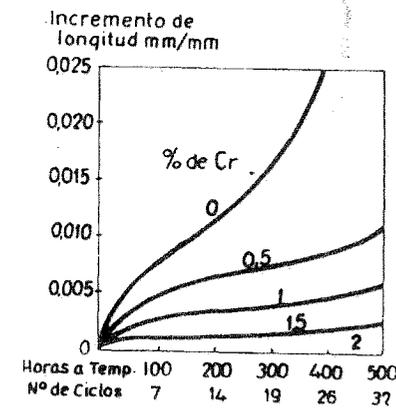


FIGURA 65

Influencia de bajos contenidos de cromo en el hinchamiento de la fundición al ser calentada durante diferentes periodos de tiempo a una temperatura de 800°. El índice de hinchamiento se conoce por el aumento de longitud que experimentan unas probetas de 30 mm de diámetro y 150 mm de longitud.

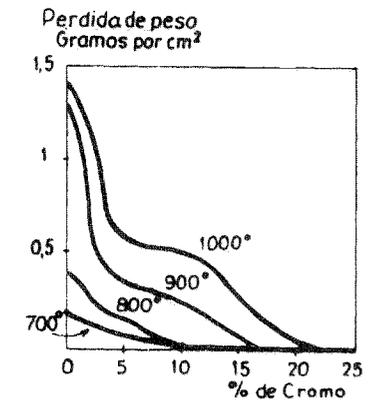


FIGURA 66

Influencia que ejerce el cromo en la resistencia de las fundiciones a la oxidación al ser calentadas a diversas temperaturas.

En la figura 65 se ve la benéfica influencia de pequeños porcentajes de cromo, cuando la fundición es calentada a temperaturas hasta de 800°.

34. Fundiciones de alta dureza con 1 a 3 por 100 de cromo.

Empleando contenidos de cromo variables de 1 a 2 % se obtienen fundiciones blancas de dureza muy elevada. Estas fundiciones se emplean bastante poco, casi exclusivamente en casos en que interesa gran resistencia al desgaste y a la abrasión, y no importa mucho la tenacidad del material. Para la fabricación de placas de blindaje, piezas de rozamiento, zapatas de freno, caminos de rodadura, son muy empleadas fundiciones blancas de 2 a 3 % de cromo, con durezas variables de 400 a 450 Brinell.

35. Fundiciones austeníticas de alto contenido en níquel.

Hay un grupo de fundiciones aleadas con 15 a 35 % de níquel y cantidades variables de Cu y Cr, que forman una familia muy característica. Son de estructura austenítica y sus composiciones se ven en la Tabla XIII. Suelen conocerse con el nombre de Ni-resist, por su alto contenido de níquel y su buena resistencia a los agentes corrosivos y a la acción del calor.

| | Composición % | | | | | | Coeficiente de dilatación | Resistencia al choque térmico |
|-----|---------------|------|------|------|--|-------|---|-------------------------------|
| | C | Si | Mn | Ni | Cu | Cr | | |
| I | <3 | 1,75 | 1,25 | 15,5 | 6,5 | 2 | Muy elevado y similar al de los aceros austeníticos inoxidables | Baja |
| Ia | <2,80 | 2,1 | 1,25 | 15,5 | 6,5 | 2 | | |
| II | <3 | 1,75 | 1,15 | 20 | 0,5 | 2 | | |
| IIa | <2,80 | 2,1 | 1,15 | 20 | <0,5 | 2 | | |
| IIb | <3 | 1,75 | 1,15 | 20 | <0,5 | 4,5 | | |
| III | <2,75 | 1,5 | 0,60 | 30 | <0,5 | 3 | Similar al del acero al carbono | Buena |
| IV | <2,60 | 5,5 | 0,60 | 30,5 | <0,5 | 5 | | |
| V | <2,40 | 1,5 | 0,60 | 35 | <0,5 | <0,10 | Muy bajo | |
| VI | 2,9 | 2 | 4,5 | 10 | Fundición austenítica níquel manganeso | | | |
| VII | 1,9 | 6 | 0,75 | 18 | | 2 | Nicrosilal | |

TABLA XIII

Composiciones de algunas fundiciones austeníticas de uso muy frecuente.

Todas ellas se caracterizan por resistir muy bien a los ácidos, álcalis, etc., y por resistir también los calentamientos a elevadas temperaturas, sin oxidarse y sin sufrir hinchamientos como las fundiciones ordinarias (fig. 67). Su resistencia a la tracción suele oscilar de 15 a 30 Kg/mm², su alargamiento de 1 a 2 % y la dureza de 120 a 180 Brinell.

Debido a sus altos coeficientes de dilatación estas fundiciones no suelen resistir bien los cambios bruscos de temperatura, es decir, resisten mal los choques térmicos. Por ello, como se explica más adelante, para sufrir fuertes choques térmicos se emplean fundiciones austeníticas especiales fabricadas con ese fin.

Las fundiciones austeníticas conservan buena resistencia a la tracción en caliente conservando a 450° un 50 % de su resistencia a la temperatura ambiente y a 800° un 25 %.

Su tenacidad es también bastante buena y de todas las fundiciones grises son éstas las de más tenacidad.

Como resumen se puede decir que su principal característica es su buena resistencia a la corrosión, aunque la resistencia al calor de alguna de estas aleaciones es también verdaderamente notable.

Sus principales aplicaciones son recipientes y accesorios para la industria química, de jabón, petróleo, etc.

En ese grupo, las fundiciones más clásicas son las de 15,5 % de níquel y 2 % de cromo y las de 20 % de níquel y 2 % de cromo, que tienen muy buena resistencia a la corrosión y resisten en general, temperaturas hasta de 750°. En presencia de gases sulfurosos el límite de utilización es sólo de 550°.

La fundición de 15,5 % de níquel contiene, además, 6,5 % de cobre y se caracteriza por su extraordinaria resistencia a los ácidos y en especial al ácido sulfúrico. La de 20 % de níquel, que es más cara y no contiene cobre, resiste muy bien al ácido sulfúrico, a los álcalis, sustancias cáusticas y soluciones amoniacales. Resiste mejor que el acero 18-8.

Estas fundiciones con 15,5 y 20 % de níquel, se fabrican generalmente con 3 % de carbono. En los casos en que se quiere obtener más dureza y más resistencia, se fabrica con 2,8 % de carbono.

Las fundiciones de 20 % de níquel que no contienen cobre tienen sobre las de 15 % de níquel y 6,5 % de cobre la ventaja de que con ellas no hay peligro de que se contaminen, ciertas sustancias que pueden estar en contacto con la fundición, como sustancias alimenticias, materias plásticas, etc.

Se puede mejorar la resistencia al calor de las fundiciones de 20 % de níquel aumentando el porcentaje de cromo hasta 4,5 % generalmente. Esta fundición resiste en servicio temperaturas hasta de 800-820°, no siendo recomendable pasar de 6 % de cromo porque aumenta mucho la fragilidad.

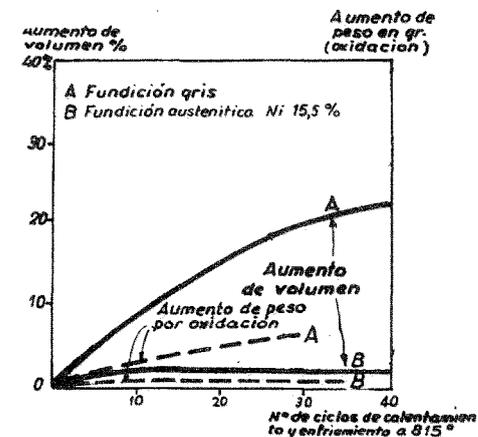


FIGURA 67

Influencia del número de ciclos de calentamiento a 815° en el aumento del volumen y aumento de peso que experimentan las fundiciones ordinarias y las fundiciones aleadas.

| Clase de fundición | Matriz | % de Ni | Principales características |
|---------------------|--------------|---------|------------------------------------|
| Fundiciones grises | Perlítica | 1 a 2 | Buena resistencia a tracción |
| | Sorbítica | 2 a 4 | Dureza elevada después del temple |
| | Martensítica | 4 a 5 | Dureza elevada |
| | Austenítica | 14 a 22 | Resisten a la corrosión y el calor |
| Fundiciones blancas | Perlítica | 1 a 2 | Gran dureza |
| | Martensítica | 2 a 5 | Máxima dureza |

TABLA XIV

Limites de composición y principales propiedades de las fundiciones aleadas con níquel.

Todas estas fundiciones de 15,5 y 20 % de níquel resisten mal, como hemos dicho antes, los choques térmicos por su alto coeficiente de dilatación que es del orden de 19×10^{-6} , que es un valor muy elevado comparado con el del acero, que es del orden de $12,5 \times 10^{-6}$ (fig. 68).

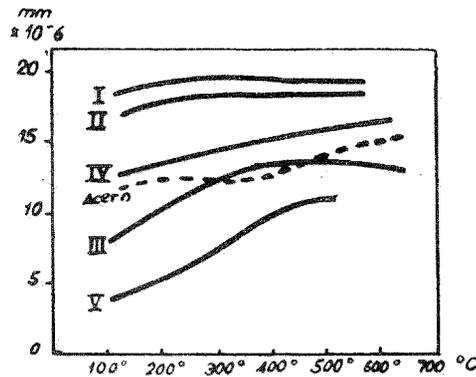


FIGURA 68

Coefficiente de dilatación lineal de las fundiciones austeníticas de la Tabla XIII en la zona de temperaturas de 0 a 700°.

Este problema se puede resolver empleando fundiciones con 30 % de níquel, que tienen en el intervalo 20°-700° un coeficiente medio de dilatación muy próximo a 12×10^{-6} .

Cuando interesa una gran resistencia a los choques térmicos o cambios bruscos de temperatura, se suelen emplear fundiciones con 30 % de níquel y 3 % de cromo, que tienen, además, muy buena resistencia a los

ácidos y a los álcalis. Esta fundición también presenta la ventaja de tener un coeficiente de dilatación muy próximo al del acero.

Cuando se desea que las piezas fundidas de gran resistencia al calor tengan la superficie muy pulida con superficies bien lisas y brillantes y con un aspecto muy agradable, se utilizan fundiciones con 30 % de níquel y 5 % de cromo. Resisten bien los agentes atmosféricos y a los productos corrosivos. Sirven para la fabricación de maquinaria para plásticos, fábricas de papeles, etc. Resisten a atmósferas sulfurosas hasta 875°. Su coeficiente de dilatación es también próximo al del acero.

Para los casos en que interesa la fabricación de piezas que tengan gran estabilidad dimensional y dilataciones muy pequeñas con los cambios de temperatura, se emplea una fundición con 35 % de níquel. Su coeficiente de dilatación es aproximadamente la mitad del acero.

Esta aleación, que recibe el nombre de Invar, debido a las propiedades que acabamos de citar y además a su buena resistencia a la oxidación, a la aptitud para recibir un alto pulido y a sus buenas propiedades de frotamiento, es muy empleada para la fabricación de aparatos de control y de medida de alta precisión.

Una fundición denominada Nicrosilal con 18 % de níquel y 6 % de silicio es muy utilizada para la construcción de piezas y accesorios para la industria química. Resiste muy bien la acción de los ácidos sulfúricos y nítrico. Su resistencia a la tracción, que a la temperatura ambiente es de 35 Kg/mm², a 550° es todavía de 12 Kg/mm². Se caracteriza también por resistir bien el calor y no experimenta ni oxidaciones ni hinchamientos sensibles al ser calentada hasta 825°.

Modificación de la microestructura de las fundiciones al variar el porcentaje de níquel.

El níquel modifica muy sensiblemente las propiedades y características de las fundiciones. Al añadir a las fundiciones ordinarias cantidades crecientes de níquel, desde 0 hasta 35 %, que es el máximo porcentaje que se suele emplear, se obtienen una gran variedad de microestructuras. Aunque en la mayoría de los casos además del níquel, se emplean otros elementos de aleación, a continuación nos vamos a referir primero sólo a la influencia que ejerce el níquel en las fundiciones, porque con ello se facilita mucho este estudio y luego se puede ampliar al de aleaciones más complejas.

En la figura 69, se señalan las modificaciones de estructura y de dureza que experimentan dos fundiciones, una gris y otra blanca, cuando se les adiciona cantidades crecientes de níquel.

En esa figura se observa que si a una fundición gris ordinaria con una dureza de 200 Brinell, aproximadamente, se le adicionan cantidades crecientes de níquel, experimenta cambios muy importantes de mi-

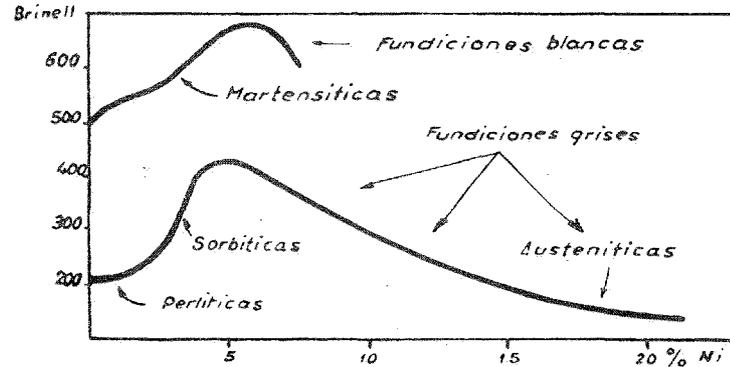
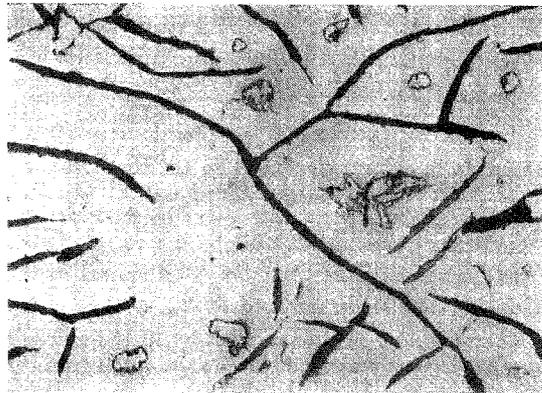


FIGURA 69

Durezas y microestructuras correspondientes a las fundiciones aleadas con níquel. Las fundiciones de la línea superior corresponden a las fundiciones derivadas de una fundición blanca con una dureza de 500 Brinell. Las fundiciones de la línea inferior corresponden a fundiciones derivadas de una fundición gris con una dureza de 200 Brinell.

FIGURA 70
× 100

Microestructura de una fundición austenítica Ni-resist de 20 % de níquel. Sobre un fondo blanco de austenita se observan láminas de grafito y algunos carburos aislados.

croestructura. Con 0 a 2 % de níquel aproximadamente, la estructura es perlítica, con 2 a 4 % es sorbitica y con 4 a 8 %, aproximadamente, es

martensítica. Finalmente, cuando el níquel es superior a un 20 %, se obtiene ya una estructura austenítica (fig. 70).

Si se ensaya una fundición blanca ordinaria, se puede observar que también sufre cambios de microestructura. Su dureza inicial es de 500 Brinell y está constituida por cementita y perlita. Con porcentajes de níquel variable de 2 a 6 %, en lugar de perlita aparece martensita, y si además se emplea cromo, aparecen carburos de cromo. Con todo ello aumenta la dureza a 700 Brinell y mejora mucho su resistencia al desgaste.

Conviene indicar que cuando, además de níquel, las fundiciones contienen cromo y molibdeno, las microestructuras que aparecen son algo diferentes de las que se han reseñado.

En la Tabla XIV se señalan los contenidos en níquel, aproximados, que suelen tener las diferentes fundiciones al níquel de acuerdo con su microestructura.

Fundición austenítica níquel-manganeso.

Es un tipo de fundición aleada con 10 % de níquel y 5 % de manganeso, de estructura austenítica y que, por ello, es amagnética. Entre las fundiciones aleadas austeníticas y, por lo tanto, amagnéticas, es la de precio más bajo y por eso la más utilizada para la fabricación de piezas que deben ser amagnéticas. Únicamente la desplazan para esos usos las fundiciones de alto contenido en níquel cuando se exigen además otras especificaciones especiales. Por ser su resistencia eléctrica muy elevada, se emplea también para la fabricación de diversos tipos de resistencias eléctricas.

36. Fundiciones aleadas al cromo.

Las fundiciones con alto porcentaje de cromo se pueden clasificar en dos familias:

1.º Fundiciones con 6 a 25 % de cromo, que son fundiciones blancas de muy elevada dureza: 400 a 550 Brinell, y

2.º Fundiciones de 33 % de cromo, que son de estructura ferrítica.

Las primeras son de gran resistencia al desgaste y buena resistencia al calor, y las segundas tienen muy buena resistencia a la oxidación a temperaturas muy elevadas (fig. 71).

La influencia que ejercen diversos contenidos de cromo, así como las microestructuras y características que se obtienen en cada caso, se estudiarán a continuación.

El cromo en porcentajes de 0,10 a 0,20 % afina la perlita y el grafito de las fundiciones ordinarias.

Con 1 % de cromo se provoca ya la aparición de carburos de gran dureza, que, además, son muy estables a altas temperaturas.

Con 2 % de cromo desaparece el grafito. La fundición gris se convierte en blanca y la proporción de carburos de cromo aumenta.

Con 6 % la matriz es perlítica y la cantidad de carburos que aparecen en la microestructura es ya muy importante.

A partir de 12 % de cromo, los carburos se afinan y se disponen en red apareciendo austenita en la microestructura.

| Composiciones en % | | | Dureza Brinell |
|-------------------------------|------|------|----------------|
| C | Si | Cr | |
| Fundiciones al cromo | | | |
| 3,25 | 1,75 | 0,50 | 275 |
| 3,6 | 2 | 1 | 300 |
| 3,6 | 2 | 1,75 | 350 |
| 3,25 | 2,70 | 2,50 | 390 |
| 1,75 | 1,75 | 6 | 390 |
| 1,80 | 1,75 | 16 | 450 |
| 1,80 | 1,75 | 25 | 450 |
| 1 | 1,75 | 30 | 265 |
| Fundiciones al silicio | | | |
| 2,40 | 6,5 | | 290 |
| 0,70 | 15 | | 500 |

TABLA XV
Composiciones de algunas fundiciones al cromo y al silicio de uso frecuente.

Cuando se llega a 30 % de cromo, se observa que la matriz es ya ferrítica y que en ella hay pequeñas cantidades del eutéctico ferrita-carburo de cromo. Estas fundiciones no tienen ya puntos de transformación en el calentamiento y en su estructura aparecen carburos de cromo fino incrustados en la matriz. En la figura 72 se señalan para diversos porcentajes de cromo, los mínimos contenidos de carbono necesarios para conseguir una estructura ferrítica. Se observa que para 30 % de cromo, el carbono no debe pasar de 1,4 %, si se quiere obtener una estructura completamente ferrítica.

Las fundiciones de muy alto porcentaje de cromo pueden resistir bien a la oxidación y a la corrosión. Se consigue buena resistencia a la oxidación cuando el contenido en cromo es por lo menos igual a 10 veces el del carbono. Además resistirán también a la corrosión cuando el cromo es más de 15 veces el carbono.

Los principales grupos de fundiciones al cromo son:

1.º *Fundiciones de 6 % de cromo.*—Fundiciones blancas con buena resistencia al calor hasta 750°. Su matriz es perlítica con redes de carburos de cromo distribuidos en toda la masa. No suelen ser muy utilizadas aunque poseen propiedades interesantes. Tienen una dureza de 400 Brinell y se utilizan en piezas sometidas al frotamiento en caliente como cilindros de laminar en pequeñas dimensiones, cilindros para estirar tubos sin soldaduras, hileras, etc.

2.º *Fundiciones de 16 % de cromo.*—Son fundiciones blancas que resisten bien hasta temperaturas de 850°-900°. Su microestructura está formada por una eutéctica de carburo-austenita con dendritas primarias de austenita en las fundiciones hipoeutectoides y dendritas de carburos en las hipereutectoides.

Tienen más o menos resistencia a la abrasión y oxidación según la composición. Son difíciles de mecanizar. Se usan para parrillas sometidas a erosión, piezas de hornos, etc. En bruto su dureza es de 500 Brinell. Por recocido a 900°, su dureza baja a 300 Brinell.

3.º *Fundiciones de 25 % de cromo.*—Estas fundiciones resisten mejor a los gases de combustión que las de 16 % de cromo, ya que la proporción entre el porcentaje de cromo y el de carbono es aproximadamente de 15. Además, pueden contener un poco más de carbono que las de 16 % de cromo, por lo que pueden fundir y colarse con más facilidad que aquéllas. Por eso, con esta composición, se obtiene en general piezas más sanas que con la de 16 % de Cr. Calentando a 950° y enfriando al aire quedan con 600 Brinell. Por recocido a 900° con enfriamiento lento, quedan con 350 Brinell. Su microestructura es muy parecida a la de las fundiciones de 16 % de cromo.

4.º *Fundiciones con 33 % de cromo.*—Están constituidas exclusivamente por ferrita y alguna pequeña proporción de eutéctico ferrita-carburos (fig. 73). Son las únicas fundiciones ferríticas de la Tabla XV.

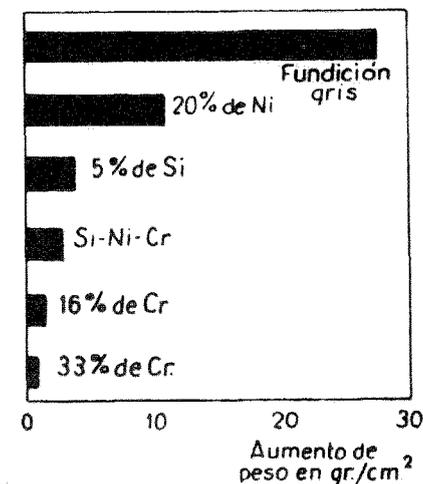


FIGURA 71
Aumento de peso que por oxidación a 900° al aire experimentan diversas clases de fundiciones.

No tienen puntos de transformación hasta 950° y se comportan muy bien a temperaturas elevadas. Son perfectamente inoxidables y resisten bien a la corrosión.

Para que la estructura sea ferrítica, es necesario combinar bien los porcentajes de carbono y cromo, como se ve en la figura 72.

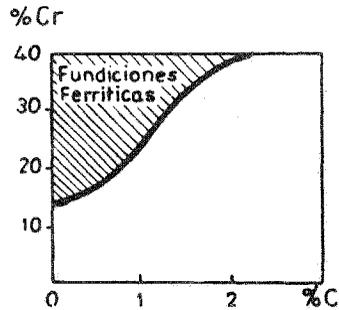


FIGURA 72

Contenidos límites en carbono y en cromo necesarios para obtener fundiciones ferríticas.

Estas fundiciones no son sensibles a los tratamientos térmicos.

Se emplean a temperaturas hasta de 1.100°, funden a 1.300° aproximadamente y su límite de empleo normal es del orden de 900° a 1.000°.

En las figuras 66 y 71 se ve la beneficiosa influencia del cromo en las fundiciones que deben de resistir altas temperaturas.

Tienen la ventaja de no aumentar de volumen, aunque se las someta a sucesivos calentamientos y enfriamientos, y además tienen gran resistencia a la oxidación a alta temperatura en presencia de gases corrosivos.

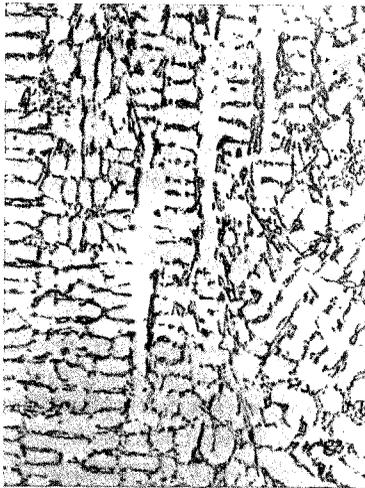


FIGURA 73

× 100

Microestructura de una fundición de alto contenido en cromo. Sobre un fondo ferrítico se observa el eutéctico ferrita-carburo de cromo.

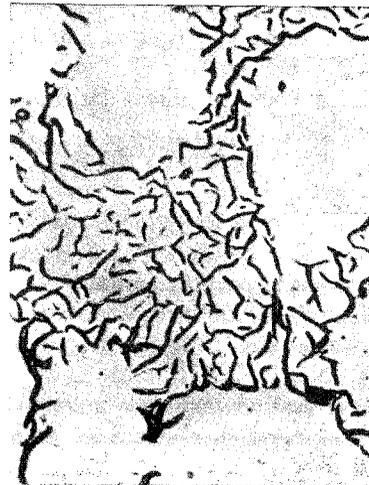


FIGURA 74

× 500

Microestructura de una fundición de 6 % de silicio y 2,4 % de carbono. Sobre un fondo de ferrita se observan laminillas de grafito interdentritico. Esta fundición resiste muy bien, sin hinchamientos, calentamientos hasta temperaturas de 700°.

Tienen gran resistencia a la corrosión, al ácido nítrico y al ácido acético a diferentes temperaturas y concentraciones, excepto en el caso de ácidos concentrados e hirviendo. Resisten también a los ácidos fosfóricos, láctico diluido, soluciones salinas y sosa cáustica. Su resistencia a la acción destructora del plomo y aluminio fundido también es buena.

Cuando tienen más de 2 % de carbono son mucho más duras y difíciles de mecanizar que cuando el porcentaje de carbono es algo más bajo.

Se pueden endurecer por enfriamiento al aire desde 1.000°. En bruto de colada alcanzan 500 Brinell y con temple al aire quedan con 650 Brinell.

37. Fundiciones de alto contenido en silicio resistentes al calor y a la corrosión.

En la industria son muy empleados dos tipos de fundiciones de alto contenido en silicio. Una de 6,5 % de silicio, aproximadamente, que es muy resistente al calor hasta temperaturas de unos 750° y otra de 15 % de silicio, aproximadamente, que es muy resistente a los ácidos y otras sustancias corrosivas.

Con porcentajes de silicio superiores a 6 %, las fundiciones no presentan por debajo de 1.000° puntos de transformación y su microestructura está constituida por ferrita y grafito (fig. 74). Al aumentar el contenido en silicio hasta 20 %, aumenta la dureza de las fundiciones y se hacen más frágiles. Por ser de grano muy cerrado y de naturaleza ferrítica, y no sufrir transformaciones microscópicas en los calentamientos, su resistencia a la corrosión es muy grande y también es muy notable su resistencia a la oxidación a temperaturas elevadas.

Las fundiciones con 5 a 8 % de silicio y contenidos en carbono inferiores a 2,5 %, forman un grupo muy característico, caracterizándose por no aumentar de tamaño a pesar de sufrir sucesivos calentamientos a elevada temperatura. Tienen una resistencia de unos 16 Kg/mm² y son bastante frágiles. En trabajos continuos se emplean para temperaturas hasta de 750°, mientras las fundiciones ordinarias no se pueden emplear para temperaturas superiores a 450°. Estas fundiciones de 6 % de silicio suelen conocerse con el nombre de Silal.

Las fundiciones con 12 a 16 % de silicio y 0,7 % de carbono, tienen alta resistencia a la acción del ácido sulfúrico y a gran cantidad de ácidos, lo mismo en caliente que en frío con excepción del ácido clorhídrico y del fluorhídrico calientes y concentrados. Con adiciones hasta de 3 % de molibdeno se consigue muy buena resistencia al clorhídrico, pero no hay en cambio mejora de las características mecánicas.

En la figura 75 se ve el excelente comportamiento de las fundiciones

del 14,5 % de silicio (que suelen designarse con el nombre de Duriron) con el ácido sulfúrico a 20° y a 80° y en la figura 76 se puede ver el de las fundiciones de 14,5 % de silicio y 3 % de molibdeno que se conocen con el nombre de Durichlor con el ácido clorhídrico a 80°.

Todas estas aleaciones se caracterizan por ser de fácil colabilidad, aunque presentan mucho rechupe y su fusión tiene bastantes dificultades.

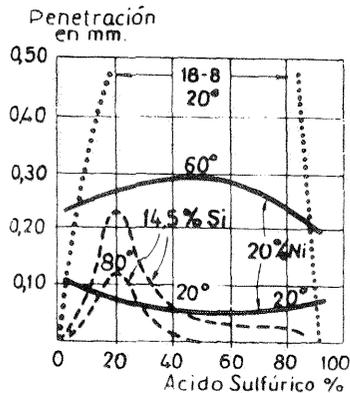


FIGURA 75

Penetración de la corrosión por el ácido sulfúrico en el acero 18-8, y diversas clases de fundiciones a diferentes temperaturas.

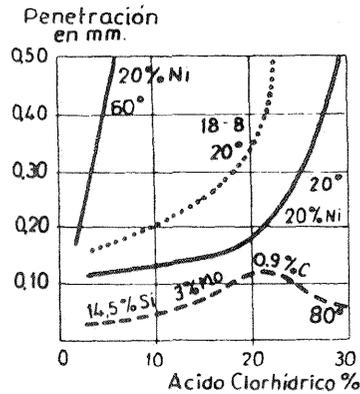


FIGURA 76

Penetración de la corrosión por el ácido clorhídrico en el acero 18-8, y diversas fundiciones a diferentes temperaturas.

Las piezas fabricadas con estas fundiciones son duras y frágiles como el vidrio, y únicamente pueden mecanizarse por rectificadío o con herramientas de carburo debiendo evitarse siempre los choques y los cambios rápidos de temperatura. Su resistencia es de unos 10 Kg/mm².

38. Fundiciones aleadas con aluminio.

Recientemente se han comenzado a fabricar y emplear ciertas fundiciones con aluminio. Sin embargo, en la actualidad todavía su empleo es muy limitado, porque su fabricación es muy difícil. La adición de cantidades de aluminio superiores al 6,5 % hace desaparecer el grafito en las fundiciones y hace que aparezca la matriz formada por ferrita y carburos complejos. Esta estructura ferrítica como la de las fundiciones al silicio es muy inoxidable y refractaria al calor.

Las dos clases más importantes son:

1.º Las fundiciones con 7 % de aluminio que tienen buena resistencia al fuego y pueden utilizarse hasta 950°. Se mecanizan bastante bien.

Su resistencia a la tracción es de unos 18 Kg/mm² y su dureza de 300 Brinell, aproximadamente.

2.º Las fundiciones con más de 8 % de aluminio que tienen muy buena resistencia a la oxidación y pueden ser utilizadas a más altas temperaturas, hasta unos 1.000° aproximadamente. Son difíciles de mecanizar salvo a la muela. Su resistencia a la tracción es de unos 13 Kg/mm² y su dureza suele variar de 250 a 500 Brinell.

Fundiciones resistentes al calor.

Uno de los empleos más interesantes de las diversas fundiciones que acabamos de describir en este capítulo, es el de la fabricación de piezas que deban resistir a la acción de elevadas temperaturas. Como en la práctica con frecuencia esas piezas suelen estar además sometidas a la acción de agentes corrosivos, gases oxidantes o sulfurosos, elementos abrasivos, etc., es bastante complicado el estudio de las características que deben de poseer.

Las principales causas de los fallos que se suelen presentar en la utilización de las piezas sometidas a elevadas temperaturas suelen ser alguna de las siguientes:

- 1.ª Dilataciones desiguales que sufren las diferentes partes, sobre todo en piezas irregulares sometidas a sucesivos calentamientos y enfriamientos, que llegan a producir grietas y roturas.
- 2.ª Transformaciones de constituyentes que pueden ablandar y debilitar el material.
- 3.ª Transformación del carburo de hierro en grafito.
- 4.ª Oxidación del material.
- 5.ª Hinchamiento de las piezas debido principalmente a la grafitización y oxidación.
- 6.ª Fusión de la steadita o eutéctico fosforoso, y
- 7.ª Corrosión superficial o interna de las piezas.

Las fundiciones ordinarias resisten bien bajas temperaturas, pudiendo utilizarse siempre que no lleguen a sobrepasarse los 400°.

Para temperaturas algo más elevadas del orden de 400° a 600°, conviene ya utilizar fundiciones perlíticas, obteniéndose también buenos resultados con fundiciones maleables ferríticas.

En ocasiones en que se alcanzan de 600° a 750°, conviene emplear fundiciones con 1 a 2 % de cromo, o de 5 a 7 % de silicio, que son muy usadas para la fabricación de cajas de recocido, ceniceros, parrillas, caminos de rodadura, etc. Las fundiciones de 6 % de silicio a veces se emplean hasta 850°.

Cuando las piezas deben de trabajar de 750° a 900°, conviene emplear

fundiciones de 12 a 28% de cromo. También se emplean fundiciones cromo-níqueles austeníticas de 20 % de níquel, que tienen más tenacidad que las fundiciones al cromo y al silicio.

Finalmente, para temperaturas más elevadas de 900 a 1.000°, se emplean fundiciones ferríticas de 33 % de cromo y también fundiciones con aluminio.

39. Principales grupos de fundiciones especiales clasificadas por su microestructura.

Aunque anteriormente ya han sido citadas prácticamente todos los principales tipos de fundiciones, a continuación señalamos una nueva

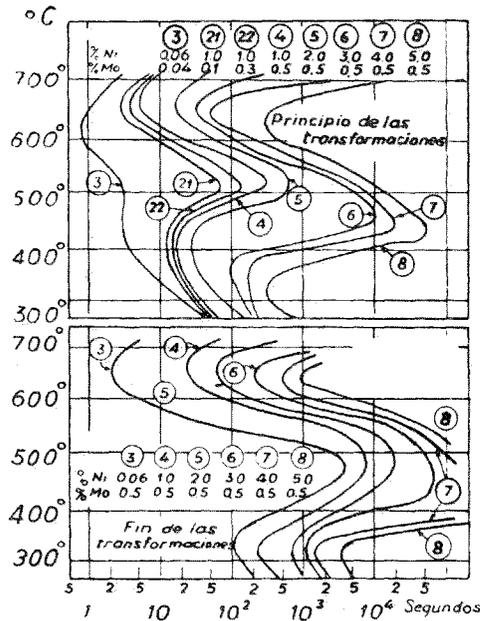


FIGURA 77

Efecto del níquel y del molibdeno en las curvas de la «S» de diversos tipos de fundiciones. Las curvas de la figura superior señalan el comienzo de las transformaciones isotérmicas de la austenita. Las curvas de la figura inferior señalan el fin de las transformaciones. Todas las fundiciones tenían la siguiente composición base: C = 2,5 %, Si = 2,5 %, Mn = 0,65 %, P = 0,10 % y S = 0,10 %.
(Metals Handbook, 1948.)

clasificación en seis grupos, de acuerdo con la microestructura, que normalmente se obtiene en bruto de fundición, por creer que también es

interesante y en cierto modo necesario este estudio que servirá para aclarar ciertos detalles en las características y comportamientos de las fundiciones.

1.º *Fundiciones grises perlíticas y sorbíticas de alta resistencia.*—Son fundiciones de 25 a 45 Kg/mm² de resistencia, en las que los elementos aleados en cantidades variables de 0,25 a 3 % se añaden para obtener la matriz perlítica, afinar su estructura y aumentar su dureza y resistencia, sin reducir seriamente su maquinabilidad. Las fundiciones perlíticas aleadas se obtienen con mucha mayor facilidad que las fundiciones perlíticas ordinarias, ya que la presencia de elementos de aleación disminuyen la sensibilidad al espesor y se consigue la estructura totalmente per-

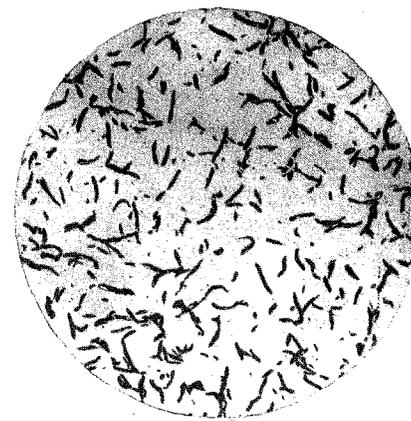


FIGURA 78

× 100

Microestructura de una fundición acicular. La probeta estaba pulida y sin atacar. Se observan láminas de grafito.

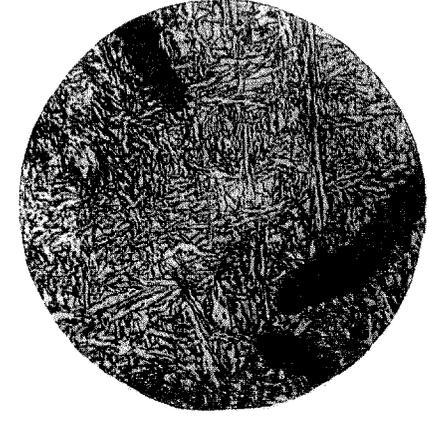


FIGURA 79

× 500

Microestructura de la misma fundición acicular de la figura 78, después de atacada y con más aumentos. Se observan láminas de grafito y una matriz acicular.

lítica, aunque en las piezas haya diferentes espesores. En la figura 62 se puede ver cómo los elementos aleados favorecen la obtención de estructura perlítica.

2.º *Fundiciones grises aciculares.*—Estas fundiciones tienen resistencias variables de 40 a 60 Kg/mm², bastante más elevadas que las de otras clases de fundiciones grises. Están constituidas por láminas de grafito y una matriz acicular de tipo bainítico. Lo mismo que en los aceros, para obtener esas estructuras bainíticas, es necesario que al iniciarse el enfriamiento no se forme perlita y suele convenir que la nariz de las curvas de la «S» de las fundiciones, que en cierto modo son análogas a las de los aceros, esté algo retrasada hacia la derecha y que luego la zona bainítica esté todavía

más retrasada (fig. 77), para que la transformación se verifique precisamente en esa zona y se forme una estructura acicular (figs. 78 y 79).

Las fundiciones níquel-molibdeno, suelen ser las más utilizadas. Se emplean fundiciones con 2,9 a 3,2 % de carbono, de 1,5 a 2 % de níquel y de 0,3 a 0,6 % de molibdeno (fig. 61). El cobre puede reemplazar al níquel hasta en 1 %. Estas fundiciones que tienen alta resistencia y gran tenacidad, se usan para cigüeñales, engranajes y elementos de motores de máquinas.

Para obtener matrices aciculares, es necesario emplear cantidades de níquel y molibdeno muy precisas en función del espesor de las piezas. En la práctica, empleando composiciones muy precisas y gracias precisamente a la influencia del molibdeno, se consigue que en el proceso del enfriamiento las transformaciones correspondientes a la zona bainítica, se desplacen hacia la derecha. La fundición acicular posee una tenacidad y una resistencia al choque muy elevada comparada con la fundición



FIGURA 80
X 250

Microestructura de una fundición blanca martensítica.

perlítica de grafito laminar análoga. También son más fáciles de mecanizar que las fundiciones ordinarias con la misma dureza. Su resistencia al desgaste es también muy elevada. Para obtener la máxima tenacidad en la fundición acicular, hace falta una ausencia total de perlita en la estructura. Por sus excelentes características mecánicas, estas fundiciones son muy empleadas en la fabricación de numerosas piezas para motores, maquinaria, etc., que antes se fabricaban en acero o en fundición maleable. En la figura 81 se puede ver la curva representativa del ensayo de tracción de una fundición acicular, junto con las de otras clases de fundiciones. Se observa que la resistencia de las diversas fundiciones varía mucho de unos casos a otros.

3.º *Fundiciones martensíticas.*—Como indica su nombre, son fundi-

ciones que tienen la matriz martensítica. Hay fundiciones blancas martensíticas y fundiciones martensíticas grises con algo de grafito, siendo las primeras las más empleadas. Se utilizan en ocasiones en que interesa fabricar piezas con gran dureza y resistencia al desgaste, como matrices, bloques, cilindros, engranajes, etc. Son siempre fundiciones aleadas con cromo, níquel, manganeso, molibdeno, etc.

4.º *Fundiciones grises austeníticas.*—Se emplean para ciertos usos específicos en que las piezas deban tener gran resistencia al calor o a la corrosión. También se emplean para piezas no magnéticas. Estas fundiciones, en general, son más blandas que las ferríticas y no tan frágiles. Hay fundiciones austeníticas al níquel con 15 a 36 % de Ni, y fundiciones níquel-manganeso con 10 % de níquel y 5 % de manganeso.

5.º *Fundiciones ferríticas.*—Suelen fabricarse dos familias de fundiciones ferríticas. Unas altas en silicio de las que hay dos grupos: unas

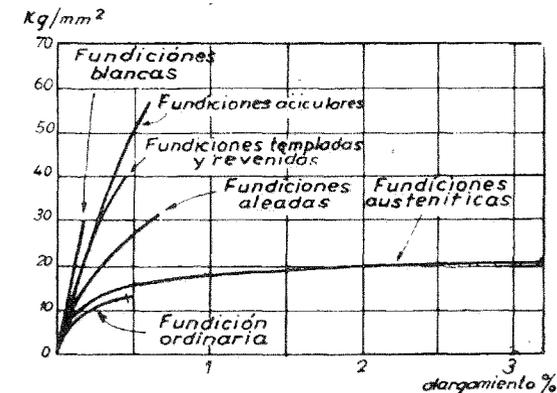


FIGURA 81
Curvas representativas de ensayos de tracción de diversas clases de fundiciones.

con 5 a 8 % de silicio y otras con 12 a 16 %, que se han estudiado antes, y otro grupo lo constituyen las fundiciones con 30 % de cromo. En general, todas ellas tienen buena resistencia al calor y a los ácidos, pero son muy frágiles.

6.º *Fundiciones blancas aleadas de gran resistencia al desgaste.*—Son fundiciones blancas aleadas con 6 a 25 % de cromo y a veces pequeñas cantidades de otros elementos, que contienen gran cantidad de carburos de cromo, que aumentan algo su dureza y, sobre todo, mejoran la resistencia al desgaste de piezas. Además tienen también buena resistencia a la corrosión y al calor.

CAPÍTULO VI

TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LAS FUNDICIONES

Las propiedades y microestructura de las fundiciones pueden ser modificadas y mejoradas por medio de ciertos tratamientos térmicos. El recocido, el temple y el revenido son los tratamientos más empleados.

41. Recocido.

Tres tipos de recocidos suelen ser aplicados a las fundiciones:

- 1.º De eliminación de tensiones,
- 2.º De ablandamiento, y
- 3.º De maleabilización.

A continuación se estudiarán con detalle cada uno de ellos (fig. 82).

1.º Los recocidos para eliminación de tensiones se realizan a temperaturas relativamente bajas, unos 550º aproximadamente, y se dan para eliminar las tensiones que a veces tienen las piezas como consecuencia de los rápidos enfriamientos, que experimentan cuando desciende su temperatura, desde la correspondiente a la de solidificación hasta la del medio ambiente.

2.º Los recocidos de ablandamiento de las fundiciones grises se dan a unos 740º, y sirven para mejorar la maquinabilidad y ablandar el material. Fundiciones grises muy duras y las fundiciones atruchadas que contienen cementita hipereutectoide, se recuecen a 850º.

3.º Los recocidos de maleabilización se dan a la fundición blanca para transformarla en maleable, comunicándole gran tenacidad.

Recocido para eliminación de tensiones.

Los recocidos a bajas temperaturas se realizan, como acabamos de señalar, a unos 550º durante un período de tiempo que varía de 30 minutos a varias horas, según sea el espesor de las piezas. Este proceso no tiene un efecto muy apreciable en las propiedades mecánicas, pero elimina las tensiones que siempre suelen tener las piezas de fundición des-

pués de la solidificación y enfriamiento. Conviene dar esta clase de recocido a piezas de formas complicadas, o que deban tener tolerancias dimensionales muy precisas, como cilindros de motores de explosión, bancadas de máquinas herramientas, etc. Si no se eliminaran estas tensiones, las piezas pueden sufrir luego deformaciones durante la mecanización o durante el funcionamiento que en ocasiones crean importantes problemas y dificultades. Deben emplearse velocidades lentas de calentamiento y en especial de enfriamiento, para evitar nuevas tensiones o roturas, sobre todo cuando las piezas son de formas complicadas.

Recocidos de ablandamiento de las fundiciones grises y atruchadas.

Para ablandar las fundiciones se suelen emplear los siguientes tipos de recocidos: 1.º, Recocidos a 740º con enfriamiento al aire, para las fundiciones grises, y 2.º, Recocidos a temperaturas algo más elevadas, 800-900º con enfriamiento lento, para fundiciones de dureza muy elevada.

Recocido a 740º.—Para disminuir la dureza de las fundiciones grises se les somete a recocidos a 740º aproximadamente con enfriamiento al aire.

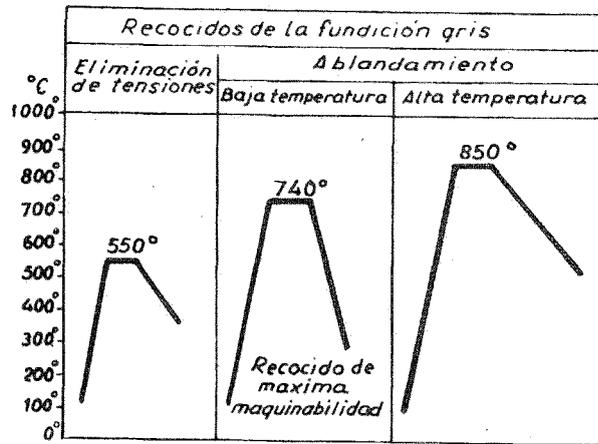


FIGURA 82
Ciclos más empleados para el recocido de las fundiciones.

Este recocido es interesante porque en ocasiones las fundiciones grises en bruto de colada quedan relativamente duras y su mecanización es difícil. En muchos casos las microestructuras de estas fundiciones en bruto están constituidas por grafito y ferrita y cantidades variables de perlita y sorbita. Estos constituyentes, perlita y sorbita, son los que dan alta

dureza y cuando interesa mucho facilitar la mecanización conviene transformarlos por recocido en ferrita y grafito. Para conseguir después del recocido una microestructura de ferrita y grafito, que es la mejor para el mecanizado (fig. 83) debe alcanzarse en el recocido una temperatura de unos 740º aproximadamente. De esta forma, si después de sobrepasar la temperatura crítica y llegar a los 740º, se mantiene esta temperatura durante un cierto tiempo, se consigue que la perlita y la sorbita se transformen en austenita. En esas condiciones, temperatura ligeramente superior a la eutectoide y mantenimiento prolongado, la austenita va cediendo carbono que se deposita en forma de grafito, obteniéndose al final ferrita y grafito. Si se emplean temperaturas más altas, del orden de 800-900º, y el enfriamiento se hace como hemos señalado al aire, se deposita muy poco grafito y es muy difícil obtener baja dureza. Con este recocido a 740º se baja la dureza de las fundiciones hasta 120-130 Brinell.

Recocido a 800-900º.—Al recocer una fundición a 800-900º en lugar de 740º como hemos dicho antes, hay que tomar ya una nueva precaución,

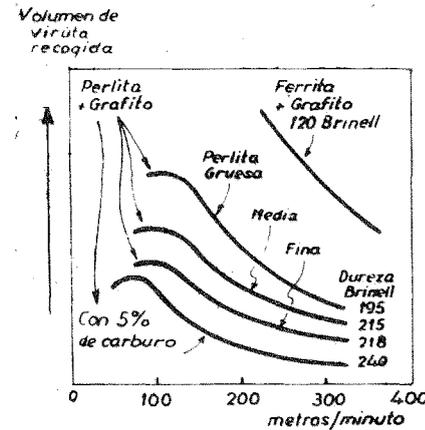


FIGURA 83
Influencia de la microestructura en la cantidad de viruta que se puede obtener en el torneado de las fundiciones utilizando diferentes velocidades de trabajo.

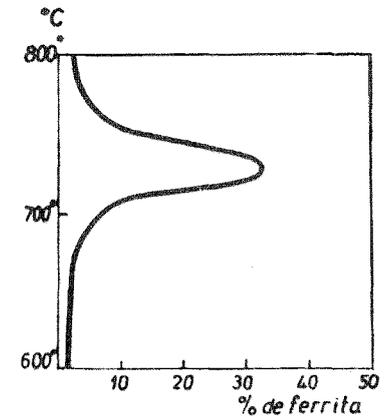


FIGURA 84
Cantidad de ferrita que se forma cuando las fundiciones de C = 3% y Si = 2,20% después de ser calentadas a 875º son enfriadas en baño de plomo durante 5 minutos a las temperaturas que se indican en la figura y luego son sumergidas en agua.

es necesario enfriar lentamente y en general se obtienen durezas no muy bajas, que corresponden a la perlita que se forma en ese proceso. Al calentar de 800-900º, no hay formación de grafito, o esta formación tiene

poca importancia, ya que la temperatura de mantenimiento no es apropiada para el depósito de gran cantidad de grafito y luego, si el enfriamiento se hace en forma parecida a como se hacía en los aceros, con una velocidad aproximada de 25° hora se obtiene perlita y no se obtendrán durezas tan bajas como con el tratamiento anterior a 740°. Calentando a 850°, por ejemplo, se formará a esa temperatura austenita. Durante la permanencia a esta temperatura habrá formación de una pequeña cantidad de grafito y luego, en un enfriamiento sin precauciones muy especiales, al pasar la zona eutectoide se formará perlita.

Si se calienta a 850° se puede obtener la microestructura de grafito y ferrita, con enfriamiento muy lento o con una permanencia muy prolongada en la zona de 700-740°. Pero esta parada complica y prolonga el recocido y por ello es preferible el tratamiento que hemos señalado antes

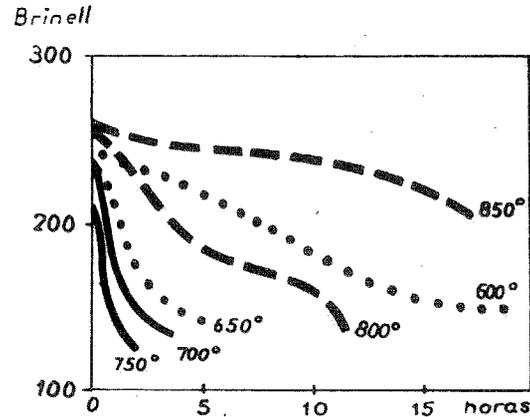


FIGURA 85

Influencia de las temperaturas de recocido y de la duración del mismo en las durezas con que quedan las fundiciones después de ese tratamiento. (Enfriamiento al aire).

de calentamiento y permanencia a 740° que se realiza a más baja temperatura que el de 850° y no exige además un enfriamiento muy lento y complicado.

Sin embargo, el tratamiento a 800-900° es recomendable para las fundiciones grises de gran dureza y para las fundiciones atruchadas que contienen cementita hipereutectoide. En esos casos, la dureza inicial que será francamente alta, 250 a 300 Brinell, por ejemplo, se podrá disminuir con este recocido. Se calentará a unos 850° aproximadamente y luego se

cuidará que la velocidad de enfriamiento sea muy lenta, sobre todo en la zona crítica de 700-720° donde convendrá parar el enfriamiento para facilitar el depósito del grafito eutectoide y luego se puede enfriar al aire.

En la figura 84 se ve cómo en la zona de 700-740° es en la que hay mayor formación de ferrita y de grafito y es por lo tanto la más crítica en esta clase de recocido.

Recocidos de maleabilización.

Esta clase de recocidos se da a ciertas fundiciones blancas para transformarlas en fundiciones maleables que tienen buena resistencia y tena-

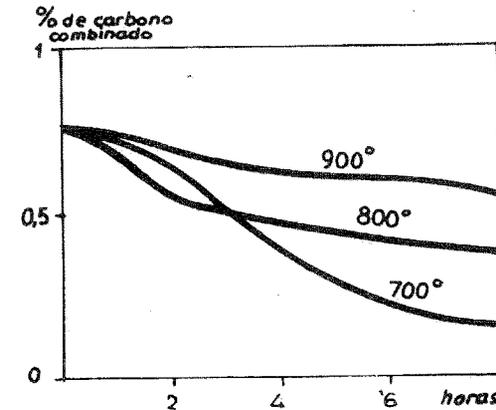


FIGURA 86

Influencia de las temperaturas de recocido y de la duración del mismo en el porcentaje de carbono combinado con que quedan las fundiciones después de ese tratamiento.

cidad y también son de fácil maquinabilidad. Hay dos tipos de recocido, uno descarburante y otro de grafitización. Más adelante se describen con detalle las particularidades de cada uno de esos procesos.

42. Temple y revenido.

En ocasiones se puede endurecer y aumentar la resistencia a la tracción de las fundiciones grises por tratamiento térmico. De esta forma se consigue un gran aumento de dureza y también un aumento, aunque mucho menos sensible, de la resistencia a la tracción y de la resistencia al

desgaste. En general se somete a las fundiciones primero a un temple y luego a un revenido. Los resultados que se obtienen dependen siempre, como es natural, de la clase de tratamiento, de la microestructura y de la composición química de la fundición. Las fundiciones con gran cantidad de ferrita y grafito, no son las más recomendables para ser endurecidas por tratamiento térmico. En cambio, con las fundiciones de matriz perlítica se pueden conseguir mejoras muy importantes de dureza y de resistencia al desgaste por temple y revenido.

Con el temple aumenta la dureza y luego con el revenido disminuye la dureza y esta disminución es tanto más sensible cuanto más elevada sea la temperatura (fig. 87). En cambio, el efecto del temple sobre la resistencia a la tracción es diferente. En la misma figura 87 se observa cómo con el temple disminuye la resistencia y luego, en cambio, con el revenido aumenta. En cierto modo, el efecto es inverso al caso de los aceros. Se

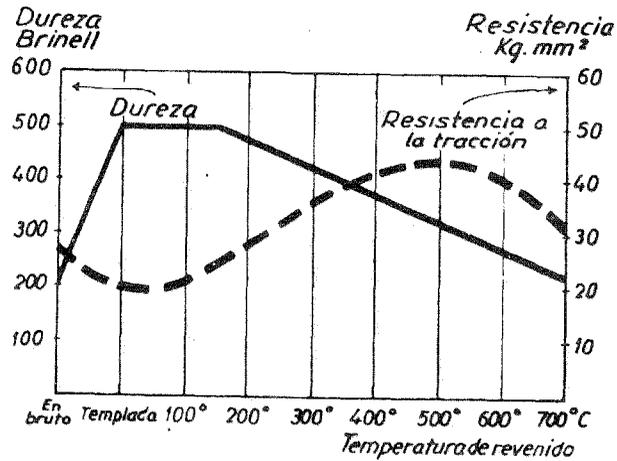


FIGURA 87

Influencia del temple y revenido en la resistencia a la tracción y en la dureza de las fundiciones grises.

observa que con revenidos a temperaturas inferiores a 500°, aumenta la resistencia a medida que aumenta la temperatura de revenido. En cambio, a partir de ese punto, las fundiciones se comportan igual que los aceros y la resistencia disminuye al aumentar la temperatura de revenido.

Teoría del temple en las fundiciones.

La posibilidad de mejorar por temple ciertas propiedades en las fundiciones es debido como en los aceros, a que estas aleaciones, al ser calentadas a elevadas temperaturas, 750 a 900°, se transforman, en parte, en austenita, que es un constituyente que al ser enfriado luego más o menos rápidamente, se convierte en martensita o en otros constituyentes intermedios. La martensita, o los otros constituyentes intermedios, obtenidos después del temple y los constituyentes que se obtienen después de su

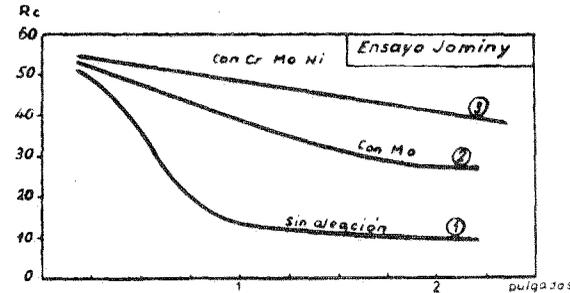


FIGURA 88

Curvas Jominy de tres fundiciones en las que se observa la influencia que tienen en la templabilidad los elementos de aleación.

revenido, tienen propiedades de gran interés y para numerosas aplicaciones, sus propiedades son mucho mejores que las que corresponden a las estructuras en bruto de colada.

En general, las leyes que rigen el temple y revenido de las fundiciones, son muy parecidas a las de los aceros.

Primero es necesario conseguir en el calentamiento una cierta cantidad de austenita y después enfriar el material con una velocidad que sea superior a la crítica de temple, para obtener el mayor porcentaje posible de martensita. Sin embargo, conviene advertir que en ocasiones se consiguen también buenas características aunque no se alcance esa velocidad crítica de temple.

En los resultados influye mucho la templabilidad de cada fundición, que depende en gran parte de los elementos de aleación, debiendo considerarse también el espesor de las piezas y el medio de enfriamiento.

En general es más fácil que se produzcan grietas o roturas en el temple de las piezas de fundición que en las de acero, porque las fundiciones están constituidas por una materia más débil que la de los aceros, debido principalmente a la existencia de láminas de grafito. Las grietas se pro-

ducen como consecuencia de las tensiones que se derivan del rápido y desigual enfriamiento que experimentan las distintas partes de las piezas al ser introducidas en el líquido de temple.

Suele ser más conveniente enfriar en aceite que en agua, porque en este último caso la velocidad de enfriamiento es muy grande y son muy importantes las diferencias de temperatura entre diversas zonas de la pieza durante el enfriamiento y ello da lugar a fuertes tensiones que

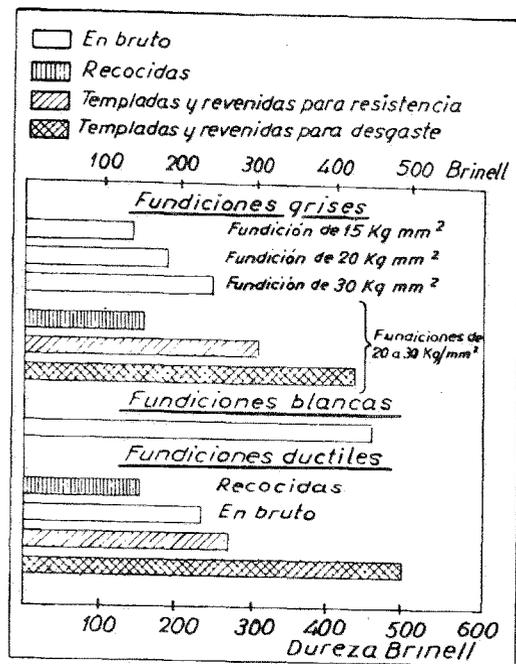


FIGURA 89
Durezas que suelen tener diversas clases de fundiciones, de uso frecuente, en bruto, recocidas, templadas y revenidas. Se señalan dos niveles de durezas para las fundiciones tratadas según interese alta resistencia a la tracción, o alta resistencia al desgaste.
(WALTON.)

puede ocasionar deformaciones y roturas. Pero al templar las fundiciones ordinarias en aceite, se observa que no se alcanzan altas durezas y el temple es imperfecto y por ello es necesario emplear en ocasiones elementos de aleación que mejoren la templabilidad.

Los elementos más empleados con ese fin son el cromo, cobre, níquel y molibdeno.

En la figura 88 se señalan las curvas Jominy de tres fundiciones, observándose la gran influencia de los elementos de aleación en la tem-

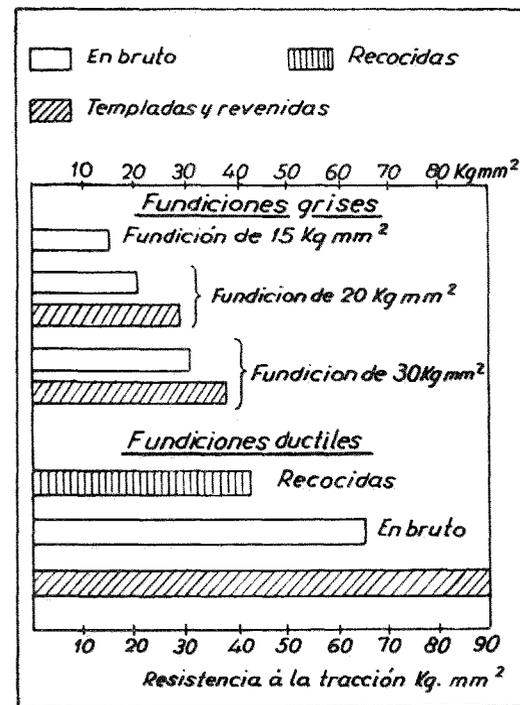


FIGURA 90
Resistencia a la tracción que suelen tener diversas fundiciones en distintos estados de suministro.
(WALTON.)

plabilidad. En el capítulo VIII de la obra *Tratamientos Térmicos de los Aceros* se explican con detalle las características del ensayo Jominy.

Los revenidos se suelen dar a temperaturas relativamente altas de 450° a 650° cuando interesa obtener gran resistencia a la tracción, unos 25 a 40 Kg/mm², con relativa buena tenacidad. En cambio, cuando lo que interesa principalmente es mejorar la resistencia al desgaste o al rozamiento (450 a 500 Brinell) se emplean temperaturas más bajas, de 200° a 450°. En todos los casos el temple se suele hacer a 800-900° enfriándose en la mayoría de ellos en aceite y sólo en casos más limitados en agua o al aire.

En las figuras 89 y 90 se señalan las durezas y resistencias que suelen tener las fundiciones de uso más frecuente en las condiciones normales de utilización (1).

43 Endurecimiento superficial de las fundiciones por flameado.

En muchos casos se puede mejorar la resistencia al desgaste de las fundiciones grises endureciendo únicamente su zona periférica. El método más empleado para ello es el flameado o calentamiento superficial con llama. En ocasiones también, pero con menos frecuencia se emplea el calentamiento por inducción.

En este proceso la capa exterior de la pieza es calentada a temperaturas superiores a la crítica de transformación por medio de una llama



FIGURA 91
× 500

Láminas de grafito en una matriz martensítica, obtenida por temple de una fundición gris.
(WALTON.)

oxi-acetilénica o de gas y oxígeno, y luego se enfría rápidamente el material casi siempre con agua para conseguir la formación de martensita.

Las piezas de fundición después de este tratamiento están constituidas por una capa exterior periférica dura y resistente al desgaste con un corazón blando de fundición gris. Hay además una capa intermedia situada inmediatamente debajo de la capa dura, la cual experimenta un cierto

(1) En ocasiones se da a las piezas de fundición gris un recocido y luego un temple. Primero por recocido se aumenta el porcentaje de ferrita de la fundición para facilitar la maquinabilidad, después en el temple, al calentar a 850° se restablece otra vez el contenido de carbono de la austenita al nivel conveniente para el tratamiento y luego por enfriamiento más o menos rápido se consigue la dureza y la resistencia al desgaste deseadas.

calentamiento pero no llega a alcanzar la temperatura de temple. Puede considerarse que esa zona sufre un recocido de ablandamiento.

El flameado es un tratamiento muy interesante para las fundiciones. Empleándolo se puede obtener fácilmente una superficie dura, muy resistente al desgaste. Este tratamiento en ocasiones tiene grandes ventajas debido a que las tensiones producidas por el flameado son menores que las producidas por el temple total, ya que en este tratamiento hay que calentar toda la pieza, y por lo tanto, las tensiones producidas en el enfriamiento serán mayores.

Para este tratamiento se recomienda emplear fundiciones perlíticas con 0,6 a 0,8 % de carbono combinado. Se recomiendan bajos contenidos en silicio inferiores a 2 % y porcentajes de manganeso variables de 0,8 a 1 %, ya que este elemento favorece el endurecimiento.

44. Nitruración de las fundiciones.

Es posible endurecer superficialmente las piezas de fundición por nitruración, calentándolas a 510° durante periodos de 90 horas en presencia de amoníaco disociado. Para este tratamiento se emplean fundiciones aleadas con cromo y aluminio de bajo contenido en carbono. Una composición muy utilizada es la siguiente:

C = 2,63 % Si = 2,5 % Mn = 0,6 % Cr = 1,6 % Al = 1,4 %

Como esta fundición es de alta templabilidad tiene tendencia a endurecerse al aire y las piezas obtenidas por fundición centrifugada, que es una forma muy frecuente de fabricar piezas que deben ser nitruradas, deben ser recocidas antes de mecanizar. En ocasiones, después de recocer y mecanizar las piezas, suele ser frecuente seguir el siguiente ciclo de trabajos: templar a 825° en aceite y luego revenir a 625°, nitrurando a continuación a 510°. Después de la nitruración las piezas suelen sufrir un ligerísimo rectificado. Las piezas de fundición nitruradas, suelen quedar con durezas variables de 800 a 1.100 Vickers.

45. FUNDICIONES TEMPLADAS (Fundiciones coladas en coquilla metálica).

Como hemos dicho anteriormente, con bastante frecuencia, se denominan impropriamente fundiciones templadas a ciertas fundiciones fundidas en coquilla metálica. De esta forma se obtienen piezas constituidas por una capa periférica de fundición blanca muy dura, de 400 a 500 Brinell, y un corazón blando de fundición gris, siendo necesario para

obtener buenos resultados tener un control muy cuidadoso de la composición y de la velocidad de enfriamiento.

Para esas fabricaciones se emplean fundiciones con bajos contenidos en silicio, generalmente variables de 0,5 a 1 % y porcentajes de carbono que oscilan entre 2,5 y 4 %. El espesor de la capa exterior templada suele variar de 5 a 50 mm, según los casos.

Se fabrican piezas de esta clase, insertando en los moldes, en las partes correspondientes a las zonas que deben quedar con gran dureza, placas metálicas generalmente de fundición que aceleran el enfriamiento y

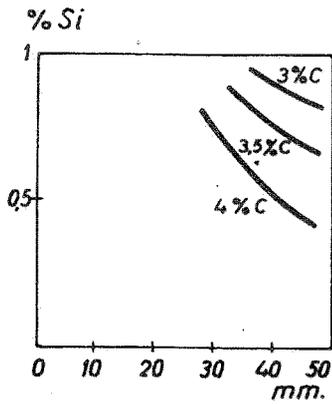


FIGURA 92

Influencia del silicio y del carbono en el espesor de la capa de fundición blanca que se obtiene en las piezas de fundiciones coladas en coquilla metálica.

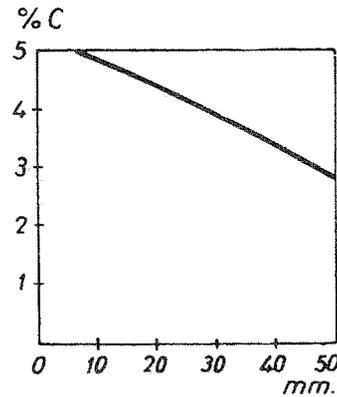


FIGURA 93

Influencia del porcentaje de carbono en el espesor de la capa de fundición blanca que se obtiene en las piezas de fundiciones de 0,85 % de silicio coladas en coquilla metálica.

favorecen la formación de fundición blanca en la zona exterior. Las demás partes de los moldes, correspondientes a zonas de las piezas en las que no interesa que la dureza sea elevada, pueden ser de arena.

En estas fabricaciones, la composición debe variarse de acuerdo con el espesor y la forma de las piezas.

En las figuras 92 y 93, se señala el espesor que se obtiene de capa dura de fundición blanca, al fabricar con fundiciones de diverso contenido en carbono y en silicio piezas fundidas en moldes metálicos.

La máxima dureza que se puede conseguir con las fundiciones blancas depende del contenido en carbono (fig. 94). Como los constituyentes microscópicos de la capa periférica de fundición blanca son perlita y cementita, se comprende que cuanto más elevado sea el contenido en carbono, mayor será el porcentaje de cementita y mayor la dureza. Ésta suele

variar desde 350 Brinell, que corresponde a las fundiciones de más bajo contenido en carbono hasta 500 Brinell, para la de más alto contenido. La resistencia a la tracción que suele ser de unos 17 Kg/mm² para los niveles más bajos de durezas, disminuye a unos 10 Kg/mm² para las durezas más altas de 450 a 500 Brinell.

La fabricación de cilindros de laminar perfiles en caliente, ha sido una de las aplicaciones más típicas y conocidas de esta clase de fundiciones. Tienen una capa exterior dura de 15 a 25 mm de espesor (fig. 95).

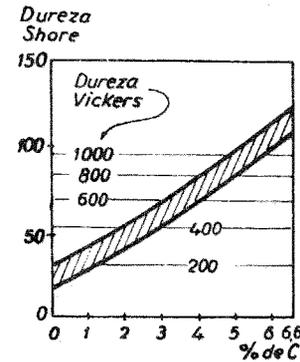


FIGURA 94

Influencia del contenido en carbono en la dureza de las fundiciones blancas.

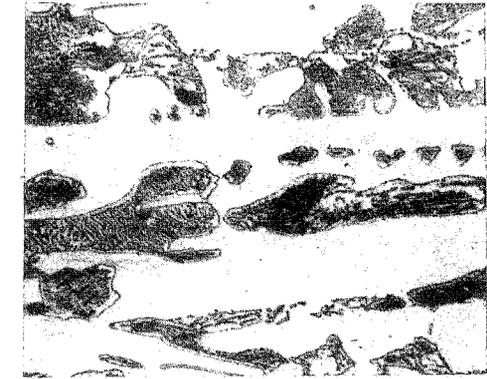


FIGURA 95
× 100

Microestructura de la zona periférica de fundición blanca, de un cilindro de laminar de fundición templada (colada en coquilla metálica).

Su dureza suele ser de 450 Brinell aproximadamente y se emplean para laminar chapas o perfiles de muy pequeño diámetro. En la figura 96, se puede ver la microestructura de la capa exterior dura de uno de estos cilindros.

Otro de los empleos más típicos de las fundiciones templadas es el de fabricación de ruedas de fundición para vagones de ferrocarril, vagonetas, etc. En la figura 97, se ve la sección transversal de una de ellas en las que la zona de rodadura es de fundición blanca y de elevada dureza y el resto es de fundición gris.

46. Otras fundiciones empleadas para fabricar cilindros de laminación.

En los años de la primera Guerra Mundial y aún bastante después, para la laminación en caliente de perfiles y barras de hierro y acero, además de la fundición templada, se empleaba también la fundición gris. Su du-

reza suele variar de 220 a 250 Brinell y su estructura suele ser muy próxima a la perlítica.

Recientemente, además de estos dos tipos clásicos, se han comenzado a emplear otras calidades. Entre otros, los más clásicos son los cilindros de temple indefinido, los de grafito esferoidal y los Adamit.

Los cilindros de temple indefinido se caracterizan por tener durezas elevadas, unos 450 a 550 Brinell aproximadamente. Son fabricados con fundiciones aleadas y en la zona exterior la microestructura está constituida por martensita (o en ocasiones de sorbita o perlita, según la calidad), carburos y un poco de grafito. Las zonas interiores son de menor dureza y la disminución de la dureza del exterior al interior es progresiva y no brusca como en los cilindros templados. La estructura que es martensítica en la zona periférica, luego hacia el interior varía a troostita, sorbita, etc., disminuyendo algo el porcentaje de carburos y aumentando la cantidad del grafito. En estos cilindros no queda tan claramente definido como en los templados la separación entre la zona exterior templada y la zona interior. Estos cilindros tienen la ventaja

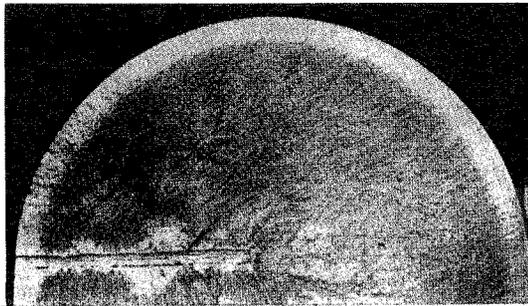


FIGURA 96

Sección transversal de un cilindro de laminar de fundición templada (fundición colada en molde metálico). Se distingue perfectamente la profundidad o espesor de la capa exterior de fundición blanca.

de poder ser empleados para perfiles de mucha mayor altura o espesor que los templados, por ser mucho mayor la capa de gran dureza. Debido a la presencia de pequeñas láminas de grafito interdendrítico en la zona periférica, no aparece la cristalización orientada perpendicularmente a la superficie exterior de enfriamiento, como ocurre en los cilindros de fundición ordinaria templada y por ello tienen gran resistencia a los bruscos calentamientos o enfriamientos y se evitan desconchamientos, agrietamientos, etc.

Los cilindros de grafito esferoidal suelen fabricarse con adiciones de magnesio y a veces además con algo de cerio, utilizándose también casi siempre cantidades variables de elementos de aleación.

Estos cilindros, que son de gran dureza, tienen también mejor tenacidad que los cilindros de fundición ordinaria, que se empleaban antiguamente. En la figura 98 se ven las durezas que corresponden a cilindros

de poder ser empleados para perfiles de mucha mayor altura o espesor que los templados, por ser mucho mayor la capa de gran dureza. Debido a la presencia de pequeñas láminas de grafito interdendrítico en la zona periférica, no aparece la cristalización orientada perpendicularmente a la superficie exterior de enfriamiento, como ocurre en los cilindros de fundición ordinaria templada y por ello tienen gran resistencia a los bruscos calentamientos o enfriamientos y se evitan desconchamientos, agrietamientos, etc.

de laminar en caliente fabricados con diferentes clases de fundiciones. Recientemente se han comenzado a emplear también, aunque para

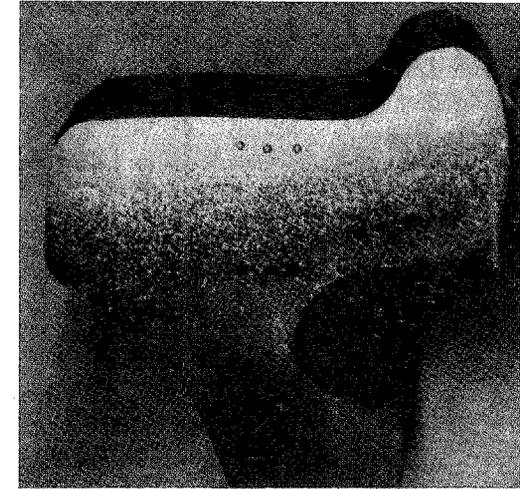


FIGURA 97

Sección transversal de una rueda de vagón de ferrocarril, en la que se observa que la parte superior corresponde a la zona de rodadura que es de fundición blanca muy dura. El resto de la pieza es de fundición de menor dureza. Se observan las huellas correspondientes a los ensayos de dureza. (Gray Iron Castings Handbook.)

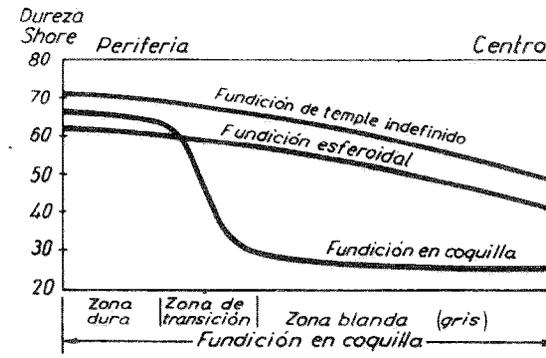


FIGURA 98

Dureza que tienen en su sección transversal los cilindros de laminación en caliente de diferentes calidades.

usos bastante limitados, otra clase de aleación denominada Adamit. En realidad, es un material intermedio entre los aceros y las fundiciones,

tiene de 1,5 a 2,2 % de carbono, obteniéndose una microestructura de perlita y cementita, por lo que tienen mayor dureza y resistencia al desgaste que los antiguos cilindros de fundición gris.

47. Microestructuras de la fundición blanca.

Habiendo dedicado en los primeros capítulos poca atención a las microestructuras de las fundiciones blancas, aquí, ya que nos hemos referido a esta clase de fundiciones, se señalarán sus microestructuras más características.

En las figuras 99, 100 y 101, se ven los tres tipos clásicos de microestructura que suelen aparecer en las fundiciones blancas ordinarias.

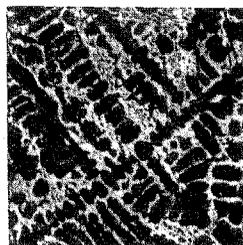


FIGURA 99
×75

Fundición blanca hipoeutéctica. Las zonas negras son de perlita, derivada de la austenita, que primero se solidificó. En las zonas interdendríticas no ocupadas por la perlita se encuentran las agrupaciones pseudoeutécticas derivadas de la ledeburita.

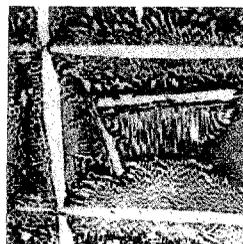


FIGURA 100
×30

Fundición blanca hipereutéctica. Se observan agujas blancas de cementita rodeadas por agrupaciones pseudoeutécticas de perlita y cementita.

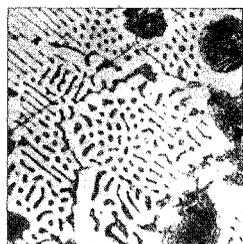


FIGURA 101
×750

Fundición blanca eutéctica constituida por agrupaciones pseudoeutécticas de perlita (negra) y cementita (blanca) derivadas de la ledeburita.

La más frecuente es la microestructura de la figura 99, que corresponde a una fundición blanca hipoeutéctica. Se observan los cristales dendríticos negros de la perlita que corresponde a la austenita que primero se solidificó y entre ellos se hallan los agrupamientos pseudoeutécticos de perlita y cementita derivados de la ledeburita, que por ser la microfotografía de pocos aumentos son difíciles de distinguir.

La figura 100 corresponde a una fundición blanca hipereutéctica, en la que se ven placas o agujas de cementita blanca, que corresponde a la primera parte de la aleación que se solidificó, y entre ellas se encuentran las mismas agrupaciones pseudoeutécticas de cementita y perlita que aparecen en las otras clases de fundiciones.

Finalmente, en la figura 101 se ve la microestructura de una fundición blanca eutéctica formada por agrupaciones de perlita y cementita.

CAPÍTULO VII

FUNDICIONES MALEABLES

48. Desde muy antiguo se han venido haciendo numerosos ensayos y tentativas para ablandar la fundición y convertirla en un material tenaz. A principios del siglo XVIII se fabricaba el hierro forjado, el acero y la fundición. El hierro forjado es muy tenaz y resistente, pero con él es muy difícil fabricar piezas de poco tamaño y de forma complicada. El acero es muy duro y muy resistente, pero no sirve tampoco para fabricar piezas de formas irregulares y de pequeñas dimensiones a bajo precio. Finalmente, con la fundición, se pueden, en cambio, obtener piezas de formas muy diversas, con instalaciones muy sencillas y baratas, pero es un material frágil que no resiste al choque.

Por lo tanto, se comprende que interesaba mucho disponer de un material que sirviera para fabricar piezas pequeñas de formas muy variadas y que fueran tenaces a la vez, ya que esta clase de piezas tienen muchas aplicaciones y son de gran interés para numerosas máquinas e instalaciones.

Parece que en diferentes épocas y lugares y por procedimientos muy diferentes, generalmente por recocidos más o menos prolongados, se consiguió convertir la fundición en un material tenaz. Pero estos trabajos no se realizaban con continuidad, bien porque no llegó a dominarse ni a conocerse bien esa nueva técnica o por otras circunstancias y se puede decir que el arte de fabricar la fundición maleable no fue verdaderamente bien conocido hasta mediados del siglo XVIII.

Reaumur, que puede considerarse como el iniciador de este procedimiento, escribió en el año 1722: *L'art d'adoucir le fer*, libro en el que se daba por primera vez toda clase de detalles sobre la fabricación de la maleable. Desde entonces, el sistema apenas sufrió modificaciones, y hoy se trabaja todavía en Europa en muchos talleres de forma muy parecida a la que se empleaba en aquella época.

En la actualidad existen dos procedimientos para fabricar la fundición maleable: uno denominado europeo, con el que se fabrica la maleable de corazón blanco (fig. 103), y otro americano, con el que se fabrica la maleable de corazón negro (fig. 104).

En ambos procesos hay dos fases principales:

- 1.º Fabricación de las piezas de fundición blanca y
- 2.º Recocido de las mismas.

49. Maleable europea (blanca).

En este procedimiento, que es el mismo que el empleado por Reamur, se comienza fabricando primero piezas de fundición blanca. Luego son envueltas las piezas de fundición con un material oxidante como mineral de hierro, óxidos o batiduras de forja o laminación, etc., y dentro de cajas cerradas son sometidas a un recocido a alta temperatura (900°

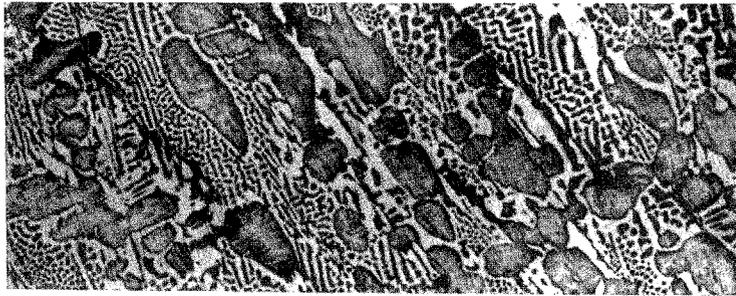


FIGURA 102
× 100

Microestructura de una fundición blanca utilizada para la fabricación de maleable.

a 1.100°) durante 3 a 6 días. Es frecuente emplear, aproximadamente, un día en calentar, dos en enfriar y tres días en mantener el material a temperatura (fig. 105).

En este recocido, la fundición blanca (fig. 102) se descarburada al realizarse una difusión de carbono del interior al exterior bajo la acción oxidante del mineral, cascarilla o batiduras de hierro, que rodean las piezas quedando convertida la fundición blanca, que es muy frágil, en un nuevo material muy tenaz y parecido en cierto modo al hierro dulce. Con piezas muy delgadas se obtienen muy buenos resultados, pero al aumentar el espesor de las piezas, se realiza con dificultad la difusión del carbono y, por lo tanto, la descarburación. En ocasiones no llega a salir todo el carbono que contiene la fundición, obteniéndose en piezas gruesas, fundiciones maleables de características intermedias, es decir, más duras y menos tenaces que lo conveniente. El procedimiento descrito es el que se emplea en casi todos los países de Europa. Las características mecánicas que se obtienen en piezas delgadas con esta clase de fundiciones son aproximadamente: $R = 35 \text{ Kg/rhm}^2$ y $A = 1 \text{ a } 12 \%$. Se suelen con-

siderar de primera calidad las fundiciones con $A > 10 \%$ y de segunda calidad las de $A > 5 \%$. La composición de las piezas de fundición antes del recocido, suele variar dentro de los siguientes límites: $C = 2,5 \text{ a } 3,3 \%$;

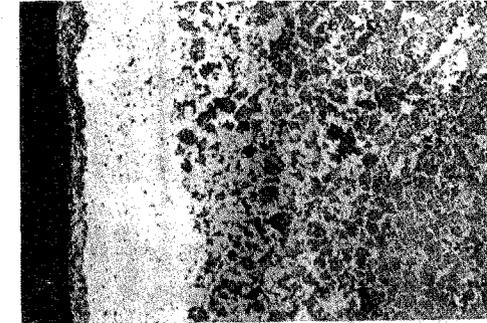


FIGURA 103
× 50

Microestructura de la zona periférica de una pieza de fundición maleable europea de corazón blanco. Se observa una zona exterior completamente descarburada de carácter ferrítico y una zona interior incompletamente descarburada constituida por ferrita y perlita.

$Si = 0,5 \text{ a } 1,25 \%$; $Mn = 0,50 \%$; $P = 0,10 \%$ y $S = 0,10 \%$, o. sea, $C + Si = 4 \%$, aproximadamente, y $C + \frac{Si}{3} = 3 \%$, aproximadamente.

50. Maleable americana (negra).

En América se ha desarrollado otro sistema que fue descubierto por Boyden hacia el año 1830 en Newark, estado de Nueva Jersey. Por este

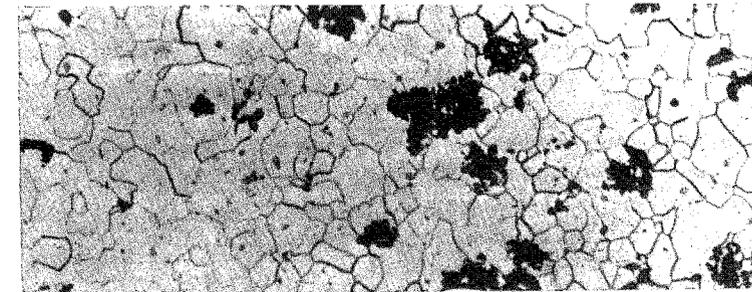


FIGURA 104
× 100

Microestructura de una maleable americana de corazón negro. Se observan cristales blancos de ferrita y nódulos negros de grafito.

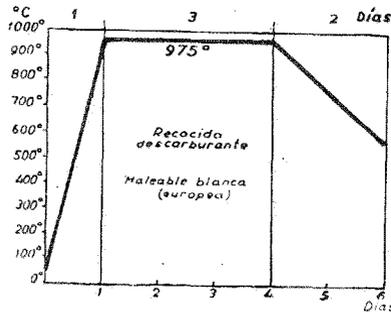


FIGURA 105

Ciclo de recocido con descarburación de la fundición blanca para obtener fundición maleable europea o de corazón blanco.

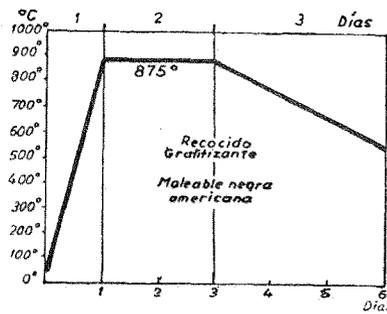


FIGURA 106

Ciclo de recocido de maleabilización de la fundición blanca para obtener fundición maleable americana de corazón negro.

método se obtiene un producto de características mecánicas muy parecidas a las que se consiguen por el procedimiento europeo, diferenciándose ambos procesos en la forma de hacerse el recocido. En el procedimiento americano, las piezas se envuelven dentro de cajas cerradas rodeadas con materias neutras como la arena, en vez de ser recubiertas con materiales oxidantes, como se hace en el europeo.

En el método primitivo o clásico, se calentaban las piezas de fundición blanca a 875° y luego se enfriaban lentamente. En la operación se tardaba unos seis días y era frecuente emplear, aproximadamente, un día en el calentamiento, dos días manteniendo a temperatura y tres días en enfriar (fig. 106).

En la actualidad se emplean además otros procesos de recocido más cortos, que explicaremos más adelante, debiendo atenderse siempre con gran cuidado el proceso de enfriamiento.

En el sistema americano, la fundición blanca no se descarburaba y el carbono no emigra de la fundición, sino que durante el recocido se precipita bajo forma de nódulos de grafito, resultando entonces un material muy tenaz, también parecido en cierto modo al hierro dulce, pero con una serie de gránulos o nódulos de grafito que se han precipitado durante el recocido y que quedan embebidos y aislados en una matriz de cristales de ferrita. Las características mecánicas aproximadas de esta clase de fundición son: $R = 38 \text{ Kg/mm}^2$ y $A = 10 \text{ a } 20 \%$.

Se suelen considerar las siguientes categorías:

- 1.ª categoría $R > 38 \text{ Kg/mm}^2$ $A > 18 \%$
- 2.ª categoría $R > 38 \text{ Kg/mm}^2$ $A > 15 \%$
- 3.ª categoría $R > 35 \text{ Kg/mm}^2$ $A > 10 \%$
- 4.ª categoría $R > 32 \text{ Kg/mm}^2$ $A > 10 \%$

Su composición, antes del recocido suele variar dentro de los siguientes límites: $C = 2 \text{ a } 2,75 \%$; $Si = 1 \text{ a } 1,20 \%$; $Mn = 0,5 \%$; $P = 0,10 \%$ y $S = 0,20 \%$. Es decir, $C + Si = 3,5 \%$, aproximadamente, y $C + \frac{Si}{3} = 2,75 \%$.

Se observa que la maleable americana exige contenidos en carbono un poco más bajos y contenidos en silicio ligeramente más altos que la maleable europea.

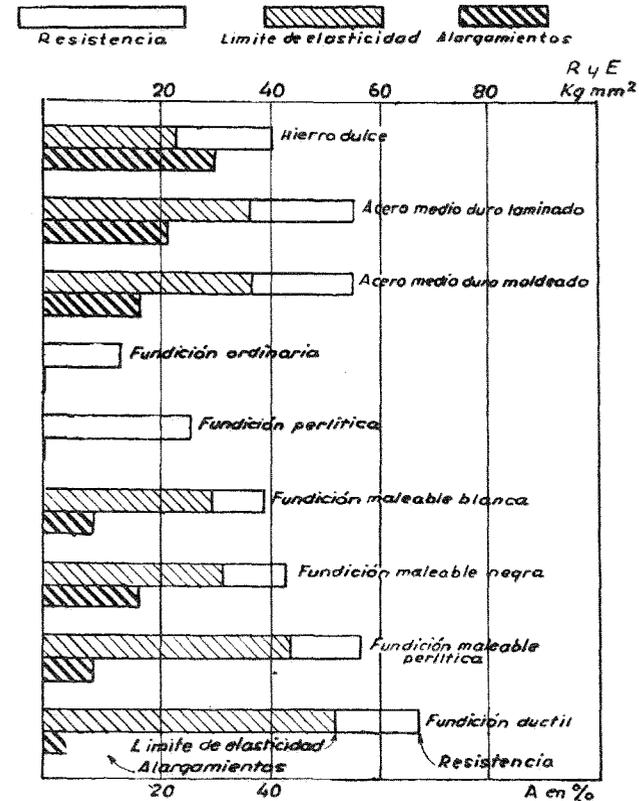


FIGURA 107

Gráfico comparativo de las características, resistencia a la tracción, límite de elasticidad y alargamiento de las fundiciones maleables comparadas con el de otros materiales de uso corriente.

Al comparar las dos clases de fundiciones maleables, se puede decir de una forma general, que la maleable negra americana, exige una técnica más precisa en cuanto a la composición y al proceso de recocido

que la maleable blanca europea. Por otra parte, con la maleable americana se consiguen resistencias y, sobre todo, alargamientos algo más elevados que con la europea.

Otra ventaja de la maleable de corazón negro es que con ella se consiguen resultados bastante satisfactorios aún con espesores de 20 y 30 mm, y a veces con mayores espesores, y en cambio, en la maleable europea no suele ser conveniente pasar de 8 a 10 mm de espesor.

En la figura 107 se pueden observar las resistencias y alargamientos de las diferentes clases de fundiciones maleables, comparadas con las que corresponden a otros materiales de empleo muy corriente.

51. Teoría de la fabricación de la fundición maleable.

Como en el pasado siglo XIX eran muy escasos los conocimientos que se tenían sobre la microestructura y sobre las transformaciones que podían sufrir las fundiciones, es natural que se tardara algún tiempo en conocer bien la técnica del proceso y la clase de fundición más conveniente para ser transformada por medio de un recocido en maleable. Por eso se comenzó intentando ablandar toda clase de fundiciones. Pero pronto se vio por los resultados obtenidos, que las fundiciones grises y atruchadas no servían para obtener luego por recocido fundiciones maleables. Esto es debido a que las fundiciones grises y atruchadas contienen láminas de grafito que crean discontinuidades en la masa metálica. Los cristales están separados por las láminas de grafito y cualquiera que sean las transformaciones que sufra la fundición, por descarburación o por grafitización, no se podrá obtener luego un material tenaz, por estar sus cristales separados unos de otros por las láminas de grafito. En cambio, con la fundición blanca que no contiene grafito laminar, no se presentan esos problemas.

En las fundiciones grises los alargamientos son prácticamente nulos debido a la presencia de las láminas de grafito. En cambio, en las fundiciones maleables de corazón negro el grafito en forma nodular, no crea discontinuidades importantes, y no reduce tan sensiblemente la ductilidad del material. Por eso las fundiciones maleables de corazón negro o americanas, suelen tener alargamientos variables de 10 a 20 %. Las fundiciones maleables blancas o europeas, tienen alargamientos variables de 1 a 12 %, que son también superiores a los de la fundición gris, que son prácticamente nulos.

Para conseguir esos resultados se realiza el proceso, como hemos dicho antes, en dos etapas. En la primera, se funden las piezas de fundición blanca con la composición más adecuada, y en la segunda, por recocido, se transforma la fundición blanca en fundición maleable.

52. Fabricación de la fundición blanca para obtención posterior de fundición maleable de corazón blanco y de corazón negro.

Para conseguir piezas de fundición blanca los contenidos en carbono y silicio deben ser bajos y se pueden elegir los contenidos más convenientes con ayuda de los resultados experimentales, o con ayuda de los datos y gráficos que se dieron anteriormente al estudiar las fundiciones grises, atruchadas y blancas. Sin embargo, los límites teóricos del carbono y del silicio deben considerarse a su vez de acuerdo con otros problemas que se presentan en la fabricación de la maleable. Dentro de lo posible conviene que el contenido en carbono sea lo más bajo posible, porque así será menor la cantidad de carbono que hay que eliminar o transformar. Pero, por otra parte, el contenido en carbono a veces no es tan bajo como sería de desear. En el cubilote la fundición al estar en contacto con el coque a alta temperatura, tiende a absorber carbono y es difícil obtener fundiciones con contenidos en carbono inferiores a 2,8 %. Además con las fundiciones bajas en carbono es necesario emplear temperaturas de fusión muy elevadas, que a veces son difíciles de alcanzar. En los cubilotes se suelen fabricar piezas con 3 % de carbono y en los hornos de reverbero o eléctricos, en cambio, al no existir contacto con el coque, es ya posible conseguir 2,7 a 2,3 % de carbono.

En ocasiones, sin embargo, hay tendencia a elevar el contenido en carbono, ya que de esa forma se mejora la colabilidad de la fundición y esto facilita la fabricación de piezas delgadas y complicadas.

Maleable europea.—En la maleable europea los contenidos en silicio recomendables (fig. 108) suelen ser los siguientes:

| | |
|--------------------------------------|-------------|
| Para piezas de 5 mm de espesor . . . | Si = 1,1 % |
| » » 10 mm » . . . | Si = 0,8 % |
| » » 15 mm » . . . | Si = 0,65 % |
| » » 20 mm » . . . | Si = 0,60 % |

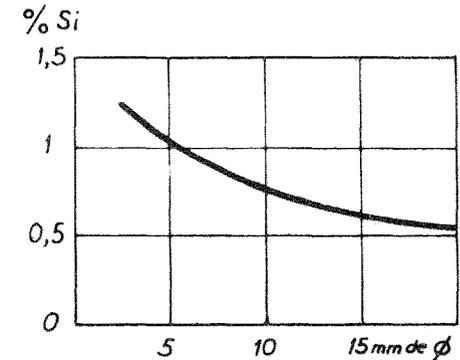


FIGURA 108

Contenidos en silicio más recomendables para la fabricación de piezas de fundición blanca de diferentes espesores, que luego por recocido descarburante serán transformadas en piezas de fundición maleable blanca (maleable europea).

Se ve que las piezas delgadas pueden contener más silicio, ya que por ser muy rápido su enfriamiento no hay peligro de que se forme grafito.

Para la maleable europea todas las fundiciones blancas son teóricamente aceptables, aunque como hemos dicho antes, siempre es ventajoso que el porcentaje de carbono sea lo más bajo posible.

Maleable americana.—En la maleable americana deben utilizarse contenidos en silicio de 1 a 1,2 %, es decir, algo más elevados para un mismo espesor que en la europea, pues en la americana hacen falta esos porcentajes de silicio para facilitar luego en el recocido la precipitación del grafito y acortar la duración del recocido. Por ello, es necesario que el porcentaje de silicio, aunque bajo, sea lo más elevado posible siempre que se obtenga fundición blanca.

En la figura 109, se ve la influencia que el contenido en silicio y la temperatura de recocido tienen en la grafitización y se observa cómo se

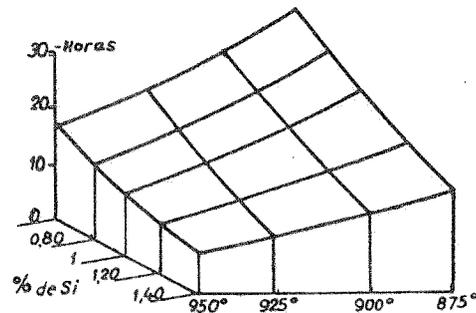


FIGURA 109
Influencia del contenido en silicio y de la temperatura de recocido en el tiempo necesario para la grafitización de las fundiciones blancas. Fabricación de maleable americana de corazón negro.

puede acortar la duración del proceso empleando altos contenidos en silicio, 1 a 1,4 % por ejemplo, y altas temperaturas de recocido.

Se comprende, pues, que el problema de la composición de la fundición blanca en la maleable europea, es relativamente más fácil que el de la fundición blanca en la maleable americana. El problema del recocido es también más fácil y sencillo en la maleable europea.

Para la fundición maleable americana, no sirven, por lo tanto, todas las fundiciones blancas y, además, los contenidos de manganeso y azufre también deben ser bajos y proporcionados el uno con el otro, porque estos dos elementos pueden dificultar y retrasar la maleabilización de la fundición. Se recomienda que los contenidos de azufre y man-

ganeso guarden entre sí una cierta relación para que el manganeso contrarreste la acción perjudicial del azufre. Se suele recomendar que el $\% \text{ Mn} = \% \text{ S} \times 1,7 + 0,20 \%$.

Con las fundiciones de 3 % de carbono después del recocido, se suelen conseguir 35 Kg/mm² y 7 % de alargamiento. Para mejorar la resistencia, hay que fabricar la fundición con menos de 3 % de carbono. Esto se suele conseguir en proceso duplex, fundiendo primero en cubilote con 2,8 % a 3 % de carbono y pasando luego a horno de reverbero u horno eléctrico donde se eleva la temperatura y se rebaja el carbono a 2,3 a 2,5 %. De esta forma se obtiene 40 Kg/mm² de resistencia y 12 % de alargamiento. A pesar de que se ha indicado antes (figura 109) que cuanto más elevada sea la temperatura de recocido podrá ser éste de menor duración, no es recomendable utilizar temperaturas superiores a 925° durante largo tiempo, porque aunque la alta temperatura favorece la precipitación del carbono, se observa que empleando esas temperaturas no se deposita el grafito en la forma nodular característica. En ese caso, el grafito aparece en las uniones de los granos y este fenómeno origina una reducción importante del alargamiento.

53. Recocido de la maleable europea o blanca.

Ya hemos dicho antes que en el método europeo se calientan las piezas de fundición blanca de unos 900° a 1.100°, rodeándolas con materias oxidantes. Se mantienen a la temperatura de recocido unos 3 días y luego se pueden enfriar casi sin precauciones especiales. Sin embargo, generalmente se dejan las cajas con las piezas dentro del horno hasta que lleguen a unos 600°. Esto se hace para evitar que en los casos, en que en las piezas queda algo de carbono sin eliminar, aparezca luego ese carbono formando estructuras laminares de alta dureza, que pueden dificultar luego la mecanización de las piezas. Además, también es conveniente sacar las piezas a 600° porque si se sacan a temperaturas más bajas y en especial a temperaturas comprendidas entre 200° y 400°, quedan algo frágiles, como se comentará más adelante al estudiar las temperaturas de fin de recocido (fig. 119).

En las piezas de maleable europea, la zona periférica no contiene prácticamente carbono, pero en las piezas gruesas el interior suele contener de 1 a 2 % de carbono.

Para señalar el grado de descarburación de las piezas, se suele indicar en cada caso el contenido medio en carbono que tienen las mismas, teniendo en cuenta los contenidos desde la periferia al centro. En la figura 110 se dan los valores que normalmente se obtienen en el recocido con

mineral de hierro. Se ve que con 10 mm de espesor, las piezas suelen contener 1 % de carbono como valor medio, que es un porcentaje ya bastante elevado que limita mucho la tenacidad de las piezas y con ello sus posibilidades de aplicación.

Al final del proceso, la microestructura en el interior de las piezas delgadas de 3 a 6 mm de espesor, está constituida por cristales de ferrita más o menos pura. Cuando el recocido es algo imperfecto, aparece algo de perlita o de sorbita.

En cambio, cuando las piezas son de espesores superiores a 8 ó 10 mm, no se obtienen buenos resultados. Esto es debido a que en las piezas

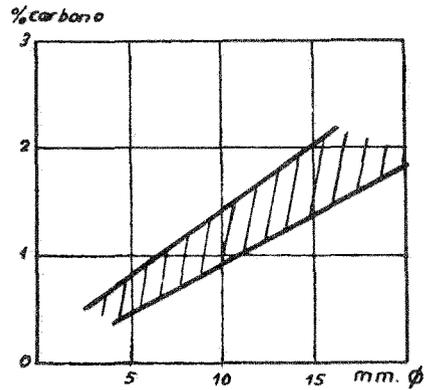
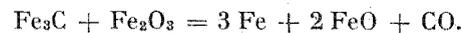


FIGURA 110

Influencia del espesor, en el contenido medio en carbono con que quedan las piezas de fundición maleable europea de corazón blanco después de recocidas en las condiciones que normalmente emplea la industria.

En ocasiones, en el núcleo central se forma también algo de grafito nodular (fig. 113). Esto es debido a que al ser calentada la fundición blanca a 900°-1.100° y permanecer un cierto tiempo a temperatura sin que haya una fuerte descarburación, llega a realizarse la grafitización, de acuerdo con ciertos fenómenos que estudiaremos más adelante. Por eso, en las piezas gruesas, la microestructura suele estar formada por ferrita y perlita o sorbita, y con frecuencia también hay algunos nódulos de grafito.

De una forma general se puede decir que la descarburación con mineral se produce al ser oxidado el carbono o el carburo de hierro Fe_3C , de la fundición por la acción del mineral, de acuerdo con las siguientes reacciones:

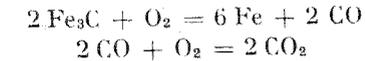


gruesas la descarburación no llega a penetrar hasta el interior. En las piezas gruesas la periferia siempre está formada por cristales de ferrita; en cambio, en el interior, como acabamos de señalar, la descarburación sólo suele ser parcial y por eso en la zona central la microestructura de la maleable blanca o europea, suele estar constituida por ferrita y perlita (fig. 103) Esto quiere decir que, al final de la fase de descarburación a elevada temperatura, la austenita contenía todavía ciertas cantidades de carbono, a pesar de que hubiera sido conveniente que no contuviera nada de carbono.

En realidad, y nablendo con más propiedad señalaremos que la descarburación se verifica por la acción de gases que rodean las piezas, principalmente por la acción del CO_2 sobre el carbono o sobre el carburo de hierro de la fundición (Fe_3C) que actúa en la siguiente forma:



La aparición del CO_2 en el interior de las cajas de recocido es debida en parte, a la oxidación del carbono de la fundición por el oxígeno del aire, de acuerdo con las siguientes reacciones:



Por otra parte, el CO_2 aparece también en el interior de las cajas, porque al estar el Fe_2O_3 en presencia del CO (que se ha formado de acuer-

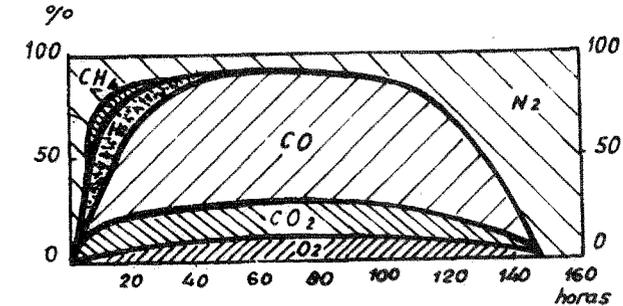
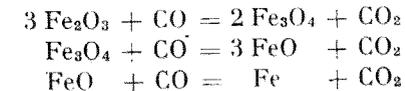


FIGURA 111

Composición de los gases (en %) durante el proceso de fabricación de la maleable blanca en el interior de las cajas de recocido.

do con las transformaciones que acabamos de señalar), se pueden producir también las reacciones de reducción de los óxidos de hierro que se señalan a continuación en las que hay formación de CO_2 .



Conviene también indicar además, que la descarburación puede producirse no sólo por la acción del CO_2 , sino también por la del H_2 y la del H_2O , de acuerdo con las siguientes reacciones:



Se comprende que en definitiva, se explique o realice de una forma o de otra la descarburación, siempre se produce en el proceso una pérdida de carbono que escapa en forma gaseosa fuera de las piezas.

En la figura 111 se señala la composición que suelen tener los gases en el interior de las cajas durante el recocido con mineral de hierro.

Observando la composición de la atmósfera que hay en el interior de las cajas de recocido durante el proceso, se ve que al principio de la operación el nitrógeno es el constituyente que hay en mayor proporción. Luego, a medida que avanza el proceso, se forma una cierta cantidad de CO_2 que sirve para descarburar la fundición. Se observa también que hay gran cantidad de CO , que durante la operación es el gas que se produce en mayor cantidad en el interior de las cajas. Durante casi todo el tiempo el contenido en CO_2 es un 20 % aproximadamente del contenido en CO .

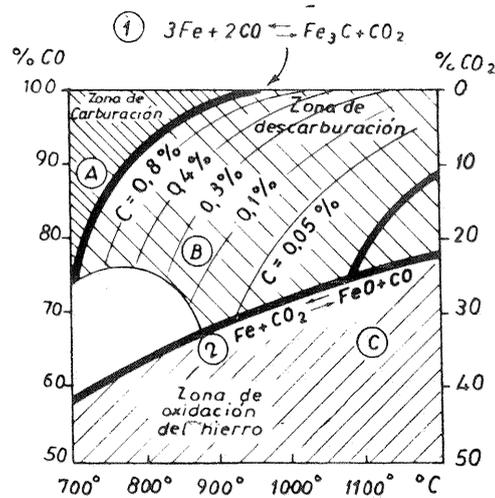


FIGURA 112

Curvas de equilibrio de los fenómenos de carburación-descarburación en las aleaciones hierro-carbono (curva 1) y de oxidación del hierro (curva 2). Sirven para conocer los porcentajes de CO y CO_2 recomendables para la descarburación de la fundición blanca en el proceso de fabricación de la maleable blanca o europea.

En el primer tercio de la operación se observa un contenido de hidrógeno relativamente importante debido a la descomposición del agua y de la humedad a alta temperatura. También se observa en la primera parte, la presencia de pequeñas cantidades de CH_4 , que provienen de la reacción del hidrógeno con el carbono.

En este proceso de recocido de la maleable blanca cuanto más elevada sea la temperatura, más rápida será la descarburación y más corto el ciclo, cuya duración está limitada principalmente por la potencia calorífica de los hornos, dificultades de transmisión de calor y limitación de la vida y del funcionamiento regular de los hornos al ser calentados a muy altas temperaturas.

Conviene señalar que las leyes que rigen la descarburación de las fundiciones blancas en atmósferas de CO-CO_2 , vienen reguladas por las curvas de la figura 112.

Para que haya descarburación en las fundiciones durante el proceso de recocido a una temperatura determinada, la concentración de CO debe ser inferior a la que corresponde a la curva 1 para esa temperatura o la concentración de CO_2 debe ser superior a la que señala también esa curva para la misma temperatura.

Por otra parte, en este proceso es muy interesante considerar la curva 2, que regula las condiciones de oxidación del hierro por el CO_2 . En el proceso de recocido el contenido en CO debe ser superior al que señala esta curva, porque si no, habría oxidación del hierro. Por eso conviene que los porcentajes de CO y por lo tanto también los de CO_2 se hallen comprendidos entre los señalados por las dos curvas de equilibrio 1 y 2, y sean muy próximos a los de la curva 2 porque así no habrá oxidación y si fuerte descarburación, que es lo que interesa en la operación.

Observando los contenidos en CO y CO_2 , que se forman durante el proceso en las cajas de recocido y estudiando los contenidos que teóricamente conviene que tenga la atmósfera que rodea las piezas para que se realice bien la operación, se comprende que en este caso se da la circunstancia que las proporciones en que aparecen esos gases son muy favorables.

En el caso en que los gases contengan H_2 y H_2O , además de CO y CO_2 , se complican los fenómenos. Conviene señalar que el hidrógeno húmedo es un descarburante muy enérgico y que por lo tanto, la presencia de esos

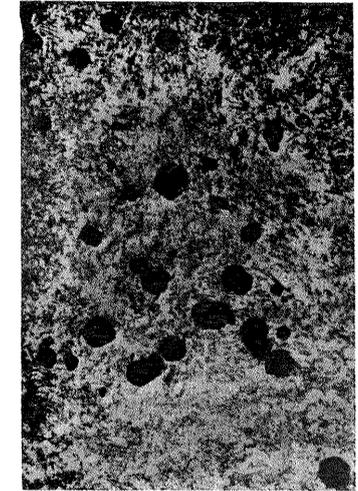


FIGURA 113
x 50

Microestructura de la zona central de una fundición maleable europea de corazón blanco en la que por una fabricación defectuosa se han depositado nódulos de grafito.

elementos en las atmósferas gaseosas favorece en determinadas circunstancias la descarburación de la fundición blanca.

El control de la descarburación por efecto del hidrógeno y del vapor de agua se hace por la medida de las concentraciones de H_2 , H_2O y CH_4 .

Para el hidrógeno y el agua hay unas curvas de equilibrio en cierto modo parecidas a las de la figura 112, que señalan para cada temperatura las concentraciones de vapor de agua que no deben rebasarse para que no se produzca la oxidación de las piezas.

Cuando en la descarburación se considere suficiente, el conseguir un determinado porcentaje de carbono en las piezas, como por ejemplo, 0,1 % ó 0,4 %, los porcentajes límites de los gases CO y CO_2 , para que se produzca esa descarburación están señaladas por las curvas correspondientes a esos porcentajes de carbono que se señalan en la figura 112.

Recientemente, en la fabricación de la maleable europea se ha comenzado a realizar la descarburación empleando atmósferas especiales

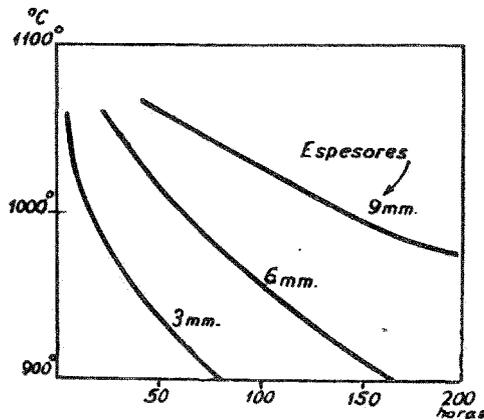


FIGURA 114

Tiempo aproximado necesario para conseguir a diferentes temperaturas un contenido medio en carbono de 0,5 % por descarburación de piezas de espesor variable de 3 a 9 mm. dentro de cajas descarburando con mineral.

en lugar de mineral de hierro. Con ello se evita el embalaje de las piezas, pero en cambio hay que controlar bien la composición de la atmósfera. Se emplea gas de gasógeno o de alumbrado quemados o parcialmente quemados. Una composición de gas recomendable que se obtiene por combustión incompleta de gas del alumbrado es la siguiente:

$$H_2 = 11 \% ; CO = 9 \% ; CO_2 = 6,5 \% ; H_2O = 2,5 \% \text{ y } N = \text{resto.}$$

Los componentes de este gas, al llegar a un horno que está a temperaturas de 950° a 1.100°, sufren una ligera variación de composición, al reaccionar unos con otros, quedando al final con la siguiente composición aproximada:

$$H_2 = 8 \% ; CO = 12 \% ; CO_2 = 3 \% ; H_2O = 25,5 \% \text{ y } N = \text{resto}$$

que es muy adecuada para la descarburación sin oxidación de la fundición.

Recientemente se ha comenzado a recocer la maleable blanca inyectando vapor de agua en el interior de los hornos de forma que el porcentaje de agua que haya en la atmósfera del horno sea el adecuado para que se realice la descarburación y no llegue a producirse la oxidación de las piezas. Esta regulación se hace controlando el punto de rocío de la atmósfera y limitando el contenido de agua dentro de los límites convenientes.

Para aclarar algunos detalles referentes a estos fenómenos, es interesante estudiar en el libro *Tratamientos Térmicos de los Aceros* el capítulo XVIII: «Descarburación superficial de los aceros».

La influencia de la temperatura en la duración del recocido en piezas con espesores variables de 3, 6 y 9 mm, se señala en la figura 114. Los datos que se dan se refieren a un contenido medio de 0,50 % de carbono, que en general suele considerarse aceptable. Se observa cómo puede disminuirse el tiempo de recocido al aumentar la temperatura y como la duración depende como es natural del espesor de las piezas.

54. Recocido de la maleable americana o negra.

El avance de las modificaciones que en el proceso de recocido experimentan las fundiciones blancas, se puede conocer estudiando las transformaciones de los constituyentes microscópicos en las fases de calentamiento, mantenimiento a temperatura y enfriamiento (figs. 106 y 116), que son las etapas que componen el ciclo clásico empleado en el recocido de la maleable americana de corazón negro.

Como en este proceso el fenómeno más importante que se produce es la formación de grafito nodular, señalaremos a continuación las particularidades más importantes de su formación.

55. Grafitización en nódulos en el recocido de la fundición blanca.

Anteriormente se ha estudiado la formación de grafito en las fundiciones grises. Allí se explicaba cómo en el proceso de enfriamiento lento que seguía a la solidificación aparecían láminas de grafito. Conviene des-

tacar que ahora, en el recocido de la fundición blanca, el proceso de formación del grafito nodular es muy diferente. En la fundición maleable negra el grafito se forma al calentar y mantener a temperatura variable de 850° a 950° una fundición blanca. Aquí se forma grafito nodular durante la permanencia a temperatura y no grafito en forma de laminillas, formándose luego también grafito nodular en el enfriamiento lento hasta la temperatura eutécticoide y en el mantenimiento en esa zona de temperaturas.

Al mantener la fundición blanca durante cierto tiempo a la temperatura de recocido 850° a 900°, la cementita libre se va descomponiendo en grafito y austenita. El grafito se va precipitando alrededor de ciertos núcleos de grafitización que aparecen o existen en las fundiciones en condiciones determinadas. Al precipitarse el grafito, las zonas de su alrededor quedan con menor concentración de carbono. Estas zonas son centros de atracción para el carbono todavía disuelto en la austenita, que se va precipitando en forma de nódulos.

Núcleos de grafitización.

En el recocido de la maleable americana la velocidad de grafitización depende en cada caso del número de núcleos de grafitización que hay en la fundición y también de la temperatura del recocido.

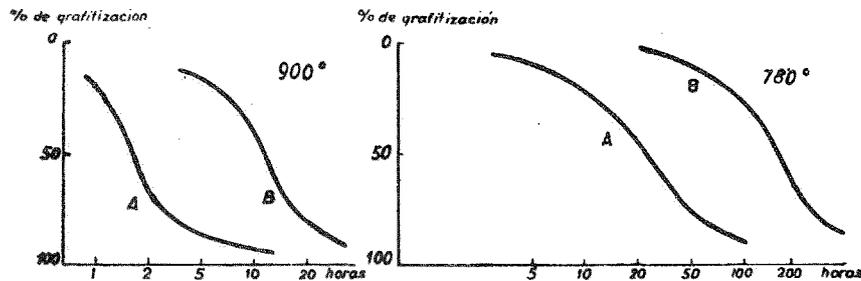


FIGURA 115

Tiempo necesario para la grafitización de dos fundiciones blancas por recocido a 780° y 900° en ensayos relacionados con la fabricación de fundición maleable negra. Se observa que la grafitización a 900° es mucho más rápida que a 780°. También se ve que la fundición A se grafitiza en menos tiempo que la fundición B.

Para una temperatura fija y refiriéndonos a una fundición determinada, la velocidad de grafitización es sensiblemente proporcional a la raíz cuadrada del número de núcleos que hay por mm².

Se comprende por lo tanto que hay gran interés en conseguir en cada

caso el mayor número posible de núcleos para reducir la duración del recocido.

A continuación citamos una serie de factores que favorecen la formación de núcleos de grafitización.

1.º *Factores de fusión.* Entre ellos señalaremos los siguientes:

a) *Sobrecalentamiento.* Se aumenta el número de núcleos sobrecalentando la fundición. Esto es sobre todo sensible cuando se sobrepasan los 1.500°.

b) *La adición de ciertos elementos* especiales como el aluminio favorecen la formación de núcleos.

c) *Composición.* El silicio y otros elementos grafitizantes favorecen la formación de núcleos.

d) *Aparato de fusión.* Los hornos rotativos y los hornos eléctricos producen más núcleos que los cubilotes debido a la alta temperatura que en ellos se puede alcanzar y a la menor oxidación que producen.

2.º *Factores de solidificación.* En piezas pequeñas se obtienen más núcleos que en grandes.

3.º *Tratamientos térmicos.* a) El temple anterior al recocido de maleabilización favorece mucho la aparición de núcleos de grafitización. b) El revenido a unos 500° después del temple aumenta extraordinariamente el número de núcleos de grafitización.

4.º *Factores de recocido.* a) Se obtienen más núcleos de recocido cuando se rodean las piezas con mineral que cuando se rodean con cementantes inertes como arena, carbonato bórico, con algo de coque, etc. b) La velocidad de calentamiento en el proceso de recocido aumenta el número de núcleos, y c) la duración del recocido también aumenta el número de núcleos.

En la figura 115 se señalan las curvas de grafitización de dos fundiciones que difieren bastante una de otra. En ellas se ve que al principio, en las primeras horas del recocido la precipitación del carbono es lenta, y que luego, al cabo de varias horas de recocido, es más rápida y se incrementa la precipitación. La grafitización es más rápida a 900° que a 780° y la fundición A se grafitiza en menos tiempo que la B.

Calentamiento y permanencia a temperatura.

Si estudiamos sobre el diagrama hierro-carbono el calentamiento de una fundición blanca, desde la temperatura ambiente hasta los 950°, se puede ver que cuando se rebasan los 721° toda la perlita de la fundición blanca se transforma en austenita. Luego, a medida que se eleva la tem-

peratura por encima de los 721°, parte de la cementita proeutectoide se va disolviendo en la austenita y con ello aumenta el contenido en carbono de la austenita, según la línea SE (fig. 116-1). Después de alcanzada

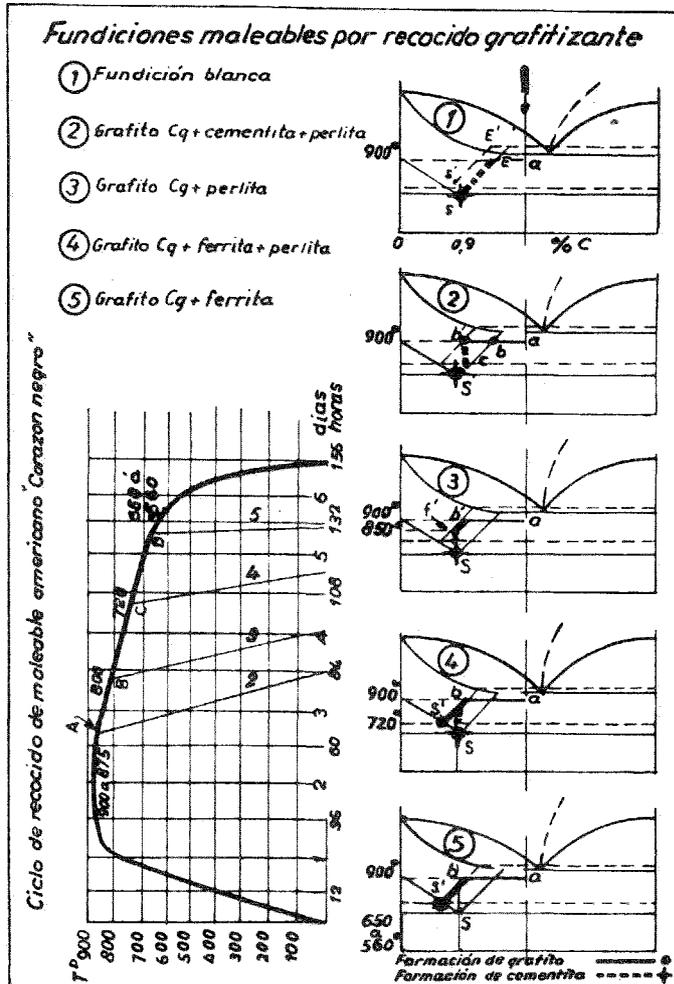


FIGURA 116 Transformaciones que se pueden producir en el recocido de la fundición maleable negra y microconstituyentes que aparecen en cada caso.

la temperatura máxima de recocido (punto b, fig. 116-2), al mantenerse esta temperatura un cierto tiempo, la cementita libre se va transfor-

mando en grafito debido a que en ese momento (mantenimiento a temperatura) las condiciones de equilibrio y transformación que corresponden a la aleación, son reguladas por circunstancias que tienden a que los fenómenos se produzcan de acuerdo con el diagrama hierro-carbono estable.

Además, la circunstancia de que a esa temperatura el contenido en carbono de la austenita en los primeros momentos (diagrama metaestable

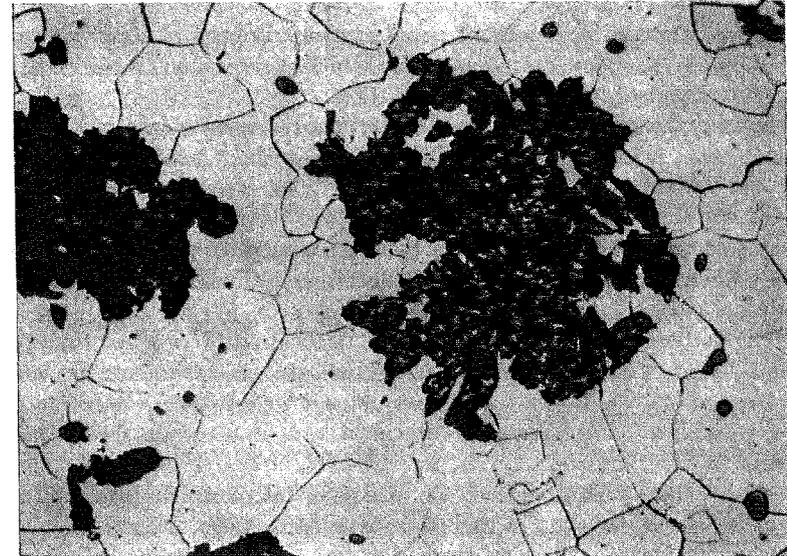


FIGURA 117
× 1.000
Nódulos de grafito en una fundición maleable americana de corazón negro. (MORROGH.)

punto b, figura 116-2) es mayor que el porcentaje de carbono que corresponde al diagrama estable favorece que durante el mantenimiento a temperatura se produzca una precipitación del carbono en exceso que continúa hasta que se alcanza el equilibrio.

Ciclo de enfriamiento.

Para poder controlar el proceso de recocido es muy interesante conocer las transformaciones que se producen en esta fase de la operación. En la figura 116 (parte izquierda) se puede ver en línea gruesa el ciclo clásico utilizado desde muy antiguo y que es muy similar al de la figura 106. En la práctica, sin embargo, en ocasiones debido a diversas

causas (generalmente por falta de un buen control) no se sigue ese ciclo, se emplean mayores velocidades de enfriamiento, y así es frecuente emplear ciclos que en su primera parte siguen la línea gruesa y luego, a partir de ciertos puntos A, B, C y D, por ejemplo, se enfrían más rápidamente según las líneas 2, 3, 4 y 5. Las transformaciones que se producen en cada caso se señalan en los diagramas 2, 3, 4 y 5 de la parte derecha de la misma figura 116 y en la parte superior izquierda se indican los constituyentes que se obtienen en cada caso.

Si después de terminado el mantenimiento a temperatura se emplea una rápida velocidad de enfriamiento, no habrá formación de grafito y se forma en cambio cementita (fig. 116-2).

Esto quiere decir que si, después de mantener las piezas de fundición a la temperatura de recocido, el tiempo conveniente, se emplea una velocidad de enfriamiento demasiado rápida, las transformaciones que se producen al descender la temperatura de las piezas se verifican según el diagrama metaestable (fig. 116-2). Se forma cementita proeutectoide y perlita y nada de grafito, y la microestructura estará constituida por grafito nodular, cementita y perlita.

En la práctica normal el depósito de cementita proeutectoide que hemos citado en el proceso 116-2, es relativamente pequeño, en general no tiene casi importancia y se puede considerar este caso casi como teórico y explicar el fenómeno de acuerdo con el diagrama 116-3 que se estudia a continuación.

En los casos en que después de mantener las piezas de fundición a la temperatura de recocido el tiempo conveniente, luego el enfriamiento es al principio lento y luego en cambio rápido, al estudiar las transformaciones se observa que hay un corto período (b', f') en que se forma grafito (diagrama estable) y luego se forma perlita. Esto ocurre así porque las transformaciones en la última parte del enfriamiento son reguladas por el diagrama metaestable. La microestructura resultante será grafito nodular y perlita (fig. 116-3).

Finalmente, cuando después del mantenimiento a temperatura en el recocido se efectúa el enfriamiento con suficiente lentitud en la zona intermedia y luego se hace muy lentamente en la zona eutectoide, hay formación de grafito en la zona superior y luego se forma grafito y ferrita en la zona eutectoide (fig. 116-5). En vez de enfriar lentamente en la zona eutectoide, se puede también mantener un cierto tiempo en esa zona 740°-780° y enfriar luego al aire, ya que de las dos formas se obtienen resultados semejantes. Si en la zona eutectoide la velocidad de enfriamiento es suficientemente lenta o se mantiene un cierto tiempo la temperatura, aparece en la microestructura solo grafito nodular y ferrita.

En este caso se obtendrá una fundición maleable de corazón negro de buena calidad. (fig. 116-5). Si en esa zona, en cambio, el enfriamiento no es del todo lento, además del grafito y de la ferrita, aparece también una pequeña cantidad de perlita (fig. 116-4).

Después de estudiar la formación de los diferentes constituyentes en el recocido, conviene señalar que en general las fases más importantes del mismo son: 1.º La fase de mantenimiento a alta temperatura o de grafitización primaria y 2.º la fase de transformación de la zona eutectoide o de grafitización secundaria. El enfriamiento desde la temperatura de recocido hasta la temperatura eutectoide se hacía antiguamente despacio para evitar la formación de cementita. Sin embargo en la actualidad, en los modernos procesos de recocido, se hace más rápidamente ese enfriamiento empleándose generalmente dos hornos. Uno de ellos se calienta a alta temperatura unos 950°, y el otro a baja temperatura 740° a 780°, pasándose en el momento oportuno rápidamente las piezas de un horno a otro para acortar el ciclo.

56. Recocido rápido de las fundiciones maleables.

La reducción de la duración del recocido de maleabilización es un problema que siempre ha preocupado a los fabricantes de maleable.

La prolongada duración del recocido es debida en gran parte a la gran masa que es necesario calentar constituida no sólo por las piezas de fundición, sino además también por las cajas, soportes, materiales de relleno, materiales descarbonantes, etc. En la práctica, en general, se tarda mucho tiempo en que penetre el calor al interior y en alcanzar allí la temperatura deseada, y esto prolonga muchas horas y aún días

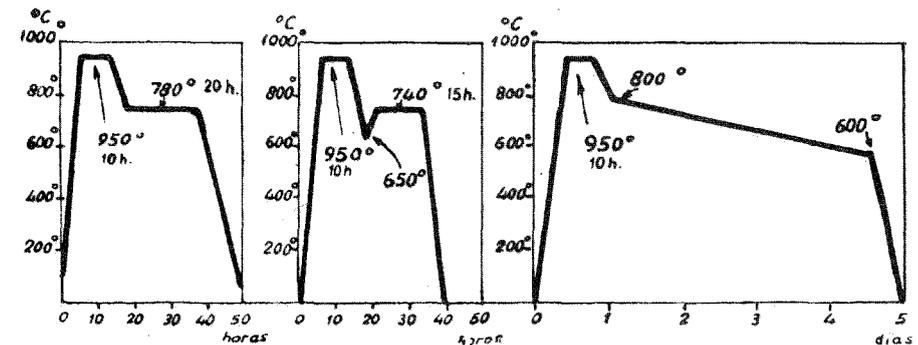


FIGURA 118

Tres ciclos de recocido rápido para maleabilización de la fundición blanca. Los dos primeros ciclos se pueden realizar solo en modernas instalaciones, que no emplean cajas de recocido.

el recocido. Por eso, para acortar el ciclo se han buscado muchas soluciones, como recocer las piezas sin recubrir ni empaquetar y sin cajas protectoras, emplear atmósferas especiales, hornos eléctricos o de tubos radiantes de gran capacidad de calentamiento, etc.

Fundiciones maleables blancas. Se puede acortar la duración del recocido de las maleables blancas utilizando hornos de gran potencia de calentamiento y atmósferas descarburantes en lugar de mineral y cajas de recocido. De esta forma se consigue reducir mucho la duración de la operación como se puede apreciar en la Tabla XVI.

| | | | | |
|---|----|-----|-----|-----|
| Espesor de las piezas en mm. | 5 | 10 | 15 | 20 |
| Duración en horas del recocido, dentro de cajas y rodeado de mineral | 55 | 170 | 225 | 275 |
| Duración en horas del recocido, sin cajas con atmósfera descarburante | 45 | 65 | 72 | 80 |

TABLA XVI

Duración aproximada del recocido a 1.000° de la fundición maleable blanca empleando mineral de hierro o atmósferas descarburantes.

Fundiciones maleables negras. Para estas fundiciones se emplean varios tipos diferentes de tratamientos.

En la fundición de la maleable negra se ha visto que un ciclo reducido que da muy buenos resultados es el de la figura 118 izquierda, que a veces no se puede cumplir por la gran inercia de los hornos y por la dificultad de que las cargas sigan ciclos previamente establecidos. Consiste en calentar a 950°, mantener unas 10 horas, enfriar rápidamente a 780°, mantener unas 20 horas y enfriar rápidamente a partir de esa temperatura. De esta forma se consigue hacer el recocido en unas 50 horas aproximadamente.

Una variante de este método consiste en calentar la fundición a 950° y enfriarla luego rápidamente a 650°. A continuación se eleva la temperatura a 740° y se mantiene a esa temperatura (o se hace oscilar la temperatura entre 720° y 760°) y finalmente se enfría al aire. El enfriamiento de 950° a 650° se hace rápido para conseguir la formación de perlita muy fina, que luego, al ser calentada a 740°, es fácilmente transformable en grafito. De esta forma se consigue acelerar el ciclo porque la grafitización partiendo de la perlita fina es muy rápida (fig. 118 centro).

Otro proceso que es bastante utilizado es el de la figura 118 derecha. El calentamiento se hace a unos 950° y se mantiene unas 10 horas, luego se hace un enfriamiento bastante rápido hasta 800° y luego se enfría lentamente hasta unos 600° y se deja enfriar al aire. De esta

forma todo el ciclo hasta 600° dura cuatro días, en vez de seis que era la duración aproximada en el ciclo clásico.

En general, los ciclos de recocido muy rápido se hacen en instalaciones modernas, sin envolver las piezas en cajas y el ciclo clásico se utiliza en algunas instalaciones antiguas.

Para efectuar estos recocidos rápidos de la maleable americana se suelen emplear dos hornos, uno que trabaja a alta temperatura (925° a 975°) y otro que trabaja a más baja temperatura. Este último suele estar a temperaturas comprendidas entre 650° y 750°, siendo las temperaturas más bajas inferiores al equilibrio metaestable y, las más altas, superiores a la del equilibrio estable. Con estos hornos, pasando las cargas de uno a otro se pueden seguir los ciclos señalados en la figura 118. En ocasiones en el horno a baja temperatura se dan recocidos oscilantes entre las temperaturas que antes hemos señalado.

Para estos recocidos se suelen emplear atmósferas controladas. En este caso las exigencias de control de gases suelen ser menores que para la maleable europea. Debe evitarse que la atmósfera sea oxidante. Por otra parte tampoco conviene que sea muy descarburante, porque las piezas con una superficie muy ferrítica son difíciles de mecanizar. Para ello es necesario regular el potencial de carbono de la atmósfera en la forma adecuada.

Se suele emplear gas del alumbrado o de gasógeno parcialmente quemado con la siguiente composición aproximada.

CO = 13 %; CO₂ = 4 %; H₂ = 12 %; CH₄ = 1,5 %; H₂O = 2 %

57. Terminación del recocido.

Habiéndose observado que se obtienen resultados irregulares al sacar las piezas del horno de recocido a diferentes temperaturas o en distintos momentos del proceso, se ha estudiado la influencia que la temperatura de terminación del recocido tiene en las propiedades de la fundición maleable.

Estudiando los resultados experimentales se ha visto que lo más conveniente es enfriar al aire desde 550°-650°, o enfriar en el horno hasta la temperatura ambiente. Esto último tiene el inconveniente, comparado con la primera solución de sacar el material a 550°-650°, de que el aprovechamiento del horno es muy malo porque se prolonga mucho la duración del recocido.

En la figura 119 se ven las resiliencias que se obtienen al variar la temperatura de terminación del recocido. Se observa que, cuando se sacan las piezas del horno a temperaturas variables de 200° a 400°, se obtienen las más bajas resiliencias.

Hay diferencias de opinión sobre la causa de esta disminución de resiliencia, aunque se cree que puede tener relación con los fenómenos de fragilidad de revenido que se presentan en los aceros y que puede

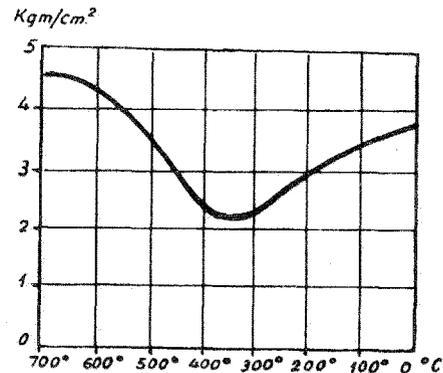


FIGURA 119
Influencia de la temperatura de terminación del recocido en la resiliencia con que quedan las fundiciones maleables.

ser debido a la precipitación de partículas submicroscópicas. También se atribuye ese fenómeno a variaciones de solubilidad de ciertos elementos residuales en la ferrita en la zona de temperaturas de 100° a 500°.

Finalmente hay también quien considera que el fósforo cuando está presente en cantidades superiores a 0,20 % es el causante de esta fragilidad intergranular que acabamos de señalar.

58. Fundición maleable perlítica.

En los últimos 15 años se ha desarrollado bastante la fabricación de un nuevo tipo de fundición maleable denominada fundición maleable perlítica. Esta fundición en lugar de tener la matriz ferrítica la tiene perlítica, que es más dura y resistente que la ferrítica. Con esta clase de fundiciones se obtienen resistencias de unos 60 Kg/mm² y 5 a 10 % de alargamiento. Para su fabricación se suele emplear alguno de los tres métodos que describimos a continuación.

1.º Es el más largo, costoso y menos empleado de todos. Consiste en transformar una fundición maleable de corazón negro de estructura ferrítica (ya previamente maleabilizada por recocido) en maleable perlítica por medio de un calentamiento por encima del punto Ac₁, seguido de enfriamiento al aire (fig. 120-1).

2.º En este otro método se sigue un proceso muy similar al clásico de recocido que se emplea para la obtención de la maleable americana. Consiste en calentar una fundición blanca por encima del punto Ac, durante un tiempo suficientemente largo para que se descomponga la cementita en grafito nodular. La diferencia con el que corresponde al de la maleable americana, estriba en que luego el enfriamiento se hace algo rápido en lugar de lentamente, como se hace en el recocido de la maleable de corazón negro (fig. 120-2).

3.º En el tercer método, se fabrica la fundición blanca con un porcentaje de manganeso algo superior a lo normal. Luego el recocido de

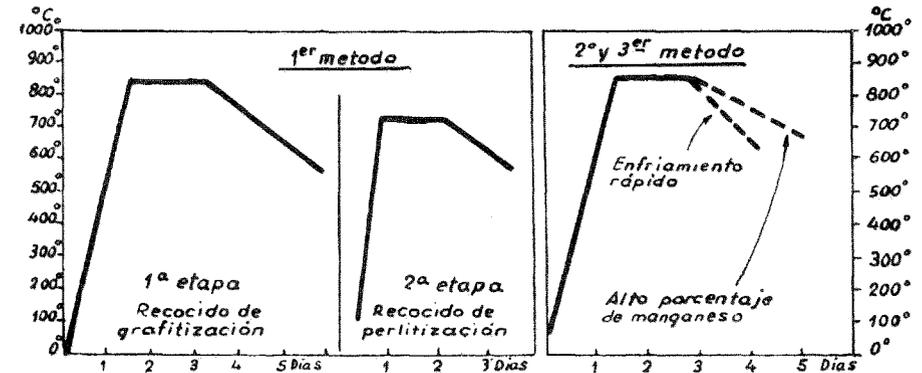


FIGURA 120
Ciclos de recocidos empleados para la fabricación de la fundición maleable perlítica.

grafitización se hace en la misma forma en como hemos explicado anteriormente, pero en este caso la presencia de un alto porcentaje de manganeso favorece la formación de perlita en el enfriamiento y se dificulta la precipitación del grafito (fig. 120-3).

Se observa que los procesos de maleabilización en los dos últimos casos son similares a los de la maleable americana clásica y sólo se diferencian en la velocidad de enfriamiento o en el contenido en manganeso.

En los procesos 2.º y 3.º, que son los más utilizados, la velocidad de enfriamiento tiene mucha influencia en las características mecánicas, como se puede ver en los resultados obtenidos en unos ensayos experimentales que se citan a continuación.

Con una velocidad de enfriamiento de 5°/minuto, por ejemplo, en una fundición perlítica normal, se obtuvo 160 Brinell y R = 55 Kg/mm² aproximadamente. Con una velocidad de 10°/minuto, se obtuvo 165 Brinell y R = 60 Kg/mm² y con 20°/minuto se obtuvo 170 Brinell y R = 65 Kg/mm² de resistencia.

CAPÍTULO VIII

FUNDICIONES DE GRAFITO ESFEROIDAL Y OTRAS FUNDICIONES ESPECIALES DE MUY ALTA CALIDAD

58. Fundiciones con grafito esferoidal (fundiciones dúctiles)

En el año 1948, Morrogh y Williams dieron a conocer sus trabajos sobre la obtención de fundición con grafito esferoidal que fabricaban directamente en bruto de fusión sin necesidad de tratamiento térmico posterior. La principal característica del proceso consistía en añadir ciertas cantidades de cerio a la fundición cuando se encontraba en estado líquido. Si después del cerio se añade, además, al baño de fundición una aleación grafitizante como el ferro-silicio o el silico-calcio, la proporción de carbono que aparece en forma esferoidal aumenta y se llega incluso a evitar totalmente la aparición de grafito laminar. De esta forma se obtienen resistencias de 50 a 55 Kg/mm² en barras de 30 mm de diámetro.

Las investigaciones de Gagnerin, Millis y Pilliny en 1949, condujeron a la fabricación de fundición con grafito esferoidal por medio de una adición de magnesio, siendo este proceso patentado por la «International Nickel Company» en Estados Unidos y por la «Mond Nickel Company» en Europa. En esas patentes se señala que debe quedar por lo menos 0,04 % de magnesio en la fundición para conseguir que todo el grafito sea esferoidal, y para obtener a la vez la mejor combinación de características mecánicas, llegándose así a alcanzar directamente en bruto de colada unos 70 Kg/mm² de resistencia a la tracción y 3 % de alargamiento (figs. 121, 122 y 123).

Esas características se pueden mejorar por tratamientos térmicos. El alargamiento aumenta por recocido y la resistencia y la combinación de características (resistencia, límite de elasticidad y alargamiento) mejoran por temple y revenido.

El proceso de fabricación preconizado por Morrogh y Williams se ha ido abandonando casi por completo, porque exigía ciertas condiciones de composición química muy precisas, que eran difíciles de cumplir. Para obtener con adición de cerio buenos resultados es necesario:

- 1.º Que la fundición solidifique gris sin adicionarle cerio
- 2.º Deben emplearse fundiciones hipereutécticas.
- 3.º Conviene utilizar contenidos en silicio superiores a 2,37 %.
- 4.º El porcentaje de azufre debe ser muy bajo y después del tratamiento debe quedar inferior a 0,020 %.
- 5.º El contenido de fósforo no debe de exceder de 0,6 %, siendo preferible que permanezca inferior a 0,100 %.

Como la fabricación de la fundición esferoidal con magnesio no exige una composición química tan exacta y no es necesario que la fundición sea hipereutéctica, ni las limitaciones de silicio ni de fósforo son tan precisas, se comprende que en la actualidad sea mucho más empleado el magnesio que el cerio para producir fundiciones con grafito esferoidal.



FIGURA 121
× 250

Microestructura de una fundición gris ordinaria en bruto de colada. La probeta está pulida y sin atacar. El grafito aparece en forma laminar.

59. Fabricación de fundiciones con grafito esferoidal con adiciones de magnesio.

Aunque con este método de fabricación se pueden emplear, como hemos dicho antes, fundiciones de composición bastante diversa, los mejores resultados se obtienen con porcentajes de carbono y de silicio algo superiores a los que generalmente se suelen emplear para las fundiciones ordinarias dedicadas a la fabricación de piezas para usos diversos. Se suele emplear por ejemplo $C = 3,5 \%$ y $Si = 2,5 \%$. $C + Si = 6\%$ con carbonos equivalentes de 4,4 a 4,7 %, recomendándose los valores más altos para piezas delgadas y los valores bajos para las piezas gruesas.

La adición a la fundición líquida del magnesio o de otros elementos alcalinos o alcalinotérreos, que por sus propiedades actúan como enérgicos desoxidantes, desulfurantes y estabilizadores de carburos, alteran el normal mecanismo de solidificación de la fundición, provocando la separación del grafito en forma nodular.

La microestructura de estas fundiciones en bruto suele estar constituida por esferoides de grafito rodeados por aureolas de ferrita sobre un fondo o matriz de perlita (fig. 123).

Al estudiar con detalle el proceso se vio que el magnesio, al ser adicionado al baño metálico, se combina rápidamente con el azufre si éste

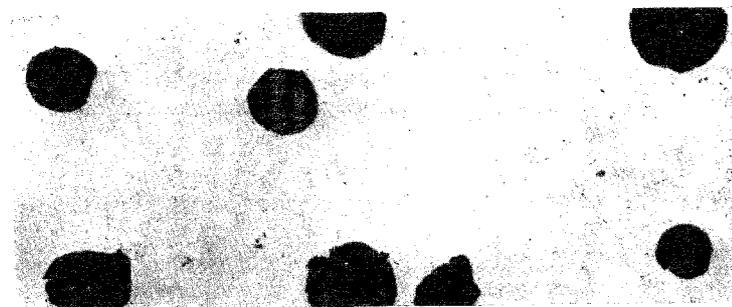


FIGURA 122
× 250

La misma fundición de la figura 118 en bruto de colada, después de habersele añadido 0,023 % de magnesio. La probeta está pulida sin atacar. Se observa que aquí el grafito está en forma esferoidal.

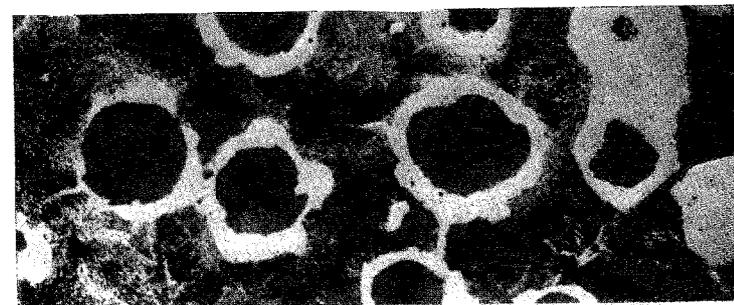


FIGURA 123
× 250

Microestructura de una fundición con grafito esferoidal en bruto de colada. Se observan nódulos de grafito esferoidal rodeados de aureolas de ferrita sobre un fondo de perlita.

se halla en cantidades importantes en la fundición. Por ello conviene desulfurar bien la fundición para que el contenido en azufre de la fundición, en el momento de adicionar el magnesio sea inferior a 0,02 %. Así la acción del magnesio será verdaderamente eficaz y no se empleará en cambio una gran parte del magnesio para desulfurar la fundición.

En la práctica normal para obtener el grafito esferoidal, es necesario, además, de añadir magnesio en la forma y cantidad conveniente,

adicionar también un elemento inoculante a la fundición. El magnesio, que en este proceso se considera como el agente que promueve la esferoidización, en realidad si fuera el único elemento que se adicionara al baño daría lugar a la formación de una fundición blanca. Siendo el magnesio un elemento que blanquea la fundición, se comprende que su acción combinada con la de un inoculante es la que verdaderamente produce la esferoidización.

No conviene añadir el magnesio en forma metálica, al baño de fundición, porque da lugar a una reacción violenta con desprendimiento

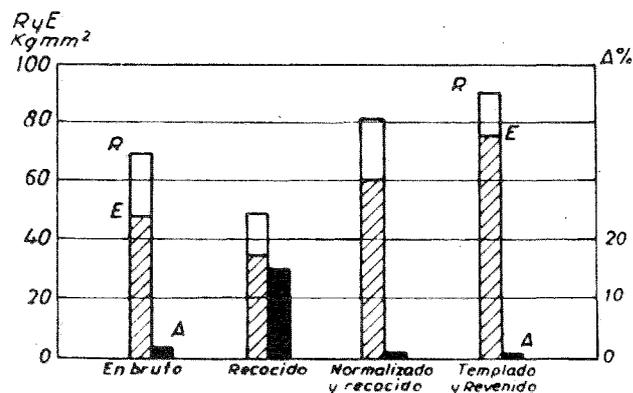


FIGURA 124
Características mecánicas de las fundiciones con grafito esferoidal en diferentes estados de tratamiento.

de humos, proyecciones de metal y pérdida importante de magnesio. Normalmente el magnesio se añade en forma de aleaciones níquel-magnesio con 15 % de magnesio aproximadamente, y a veces cobre-magnesio con 15 a 25 % de magnesio. En ocasiones, también se emplean aleaciones cuaternarias hierro-silicio-cobre-magnesio, o hierro-silicio-níquel-magnesio. Empleando estas dos últimas aleaciones no suele ser necesaria la adición posterior de ferrosilicio u otro inoculante.

Una práctica muy utilizada para la fabricación de fundiciones con grafito esferoidal, consiste en emplear dos cucharas para la adición de la aleación del magnesio y del ferrosilicio inoculante. Así, por ejemplo, es frecuente añadir en la primera cuchara la aleación de magnesio, luego se pasa la fundición en estado líquido a la segunda cuchara donde se adiciona el inoculante y finalmente se pasa el metal a los moldes. En ocasiones, también se emplea sólo una cuchara. Se introduce en ella la aleación de magnesio, luego se cuela la fundición y al cabo de un rato,

cuando la fundición está lista para colar en los moldes se añade el inoculante. En algunos talleres, como hemos dicho antes, se fabrica la fundición esferoidal realizando sólo las adiciones de una vez.

Hasta hace muy poco tiempo no se consideraba posible industrialmente el empleo del magnesio metálico directamente, ya que por ser fácilmente oxidable produce, como hemos dicho antes, proyecciones de metal y desbordamientos del baño. Recientemente, sin embargo, con el uso de cucharas cerradas en las que se producen las reacciones bajo presión de 10 ó 15 atmósferas, se ha conseguido suprimir el hervor del magnesio. En la actualidad este método, de cucharas a presión y magnesio metálico, que es eficiente y barato, no se ha desarrollado tanto como en un principio se pensó por el peligro de proyecciones y explosiones.

60. Propiedades de las fundiciones dúctiles.

En la figura 124 se señalan las características más importantes de la fundición con grafito esferoidal en los cuatro estados de utilización más frecuente.

Se observa que estas fundiciones tienen resistencias comprendidas entre 45 y 90 Kg/mm², por lo que es posible compararlas en cierto modo con un acero semiduro. Los valores del límite de elasticidad en bruto o en estado recocido son, aproximadamente, de un 65 % de la carga de rotura y después del temple y revenido el límite de elasticidad es un 85 %, aproximadamente, de la carga de rotura. El módulo de elasticidad es 17,500 Kg/mm² un poco inferior a los aceros. Los valores de la resistencia y alargamiento son superiores a los de las fundiciones ordinarias, pero inferiores a los de los aceros.

En bruto de colada con 70 Kg/mm² de resistencia a la tracción y 3 % de alargamiento, tiene grandes aplicaciones para numerosos usos industriales. Cuando se desea la máxima ductilidad conviene emplearlas en estado recocido. En ese caso se da al material un recocido de ferritización en la forma que explicaremos más adelante y queda el material con R = 50 Kg/mm² y A = 15 % (figs. 126 y 127).

Cuando interesa alta resistencia con relativamente buena ductilidad, convendrá emplearlas después del normalizado y revenido o después de un temple y revenido. Con el normalizado y revenido se puede obtener R = 80 Kg/mm² y A = 2 %. Con el temple y revenido se obtiene R = 90 Kg/mm² y A = 1,5 %.

Al ser sometida una fundición esferoidal a un ensayo de tracción se observa que en la primera parte del ensayo las cargas que actúan son proporcionales a las deformaciones que se producen. La fundición gris,

en cambio, prácticamente en ningún momento del ensayo de tracción sigue la ley de la proporcionalidad, porque las láminas de grafito que interrumpen la matriz lo impiden (fig. 125).

Conviene destacar la influencia del espesor de las piezas en los resultados que se pueden obtener. Cuando se fabrican piezas delgadas es necesario emplear contenidos en silicio más elevados que cuando se fabrican piezas gruesas para evitar que blanquee la fundición. En ocasiones incluso, como explicaremos más adelante, para compensar el espesor de las piezas es necesario emplear elementos de aleación.

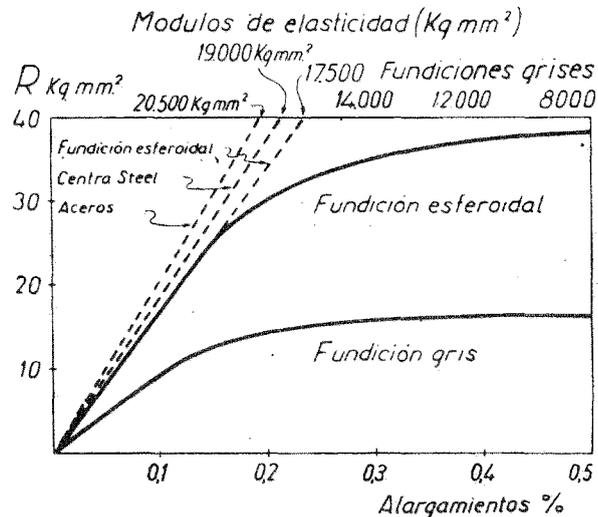


FIGURA 125

Curvas representativas del ensayo de tracción de una fundición esteroidal y de una fundición gris ordinaria. Se observa que el módulo de elasticidad de esta última es muy inferior al de la fundición esteroidal 17.500 Kg/mm^2 que es próximo al del acero.

La fundición dúctil tiene un punto de fusión prácticamente más bajo que cualquier otra aleación hierro-carbono, por ser una composición siempre muy próxima a la eutéctica. Por ello tiene también, mejor colabilidad y mayor fluidez que las demás aleaciones hierro-carbono, pudiéndose fabricar con regularidad piezas complicadas y difíciles. Por otra parte, como el contenido en carbono es elevado, se puede fundir en el cubilote sin dificultad. Otra de sus propiedades notables, es su alta resistencia al desgaste que es de gran importancia para la fabricación de elementos de máquinas y motores. La presencia del grafito contribuye

directamente a la lubricación de las superficies y actúa en cierto modo, como un recipiente donde se acumula el líquido o pasta lubricante. La presencia de grafito sirve también para mejorar la maquinabilidad que puede considerarse similar a la de la fundición gris y es también mucho mejor que la del acero para el mismo nivel de durezas.

61. Tratamientos térmicos.

Con las fundiciones de grafito esférico que también se conocen con el nombre de «fundiciones dúctiles», debido a su alta ductilidad, se puede obtener una variedad muy grande de propiedades y características debido a su excelente aptitud a los tratamientos térmicos. Puede decirse que estas aleaciones responden al temple y al revenido en forma parecida a como lo hacen los aceros. El porcentaje de car-

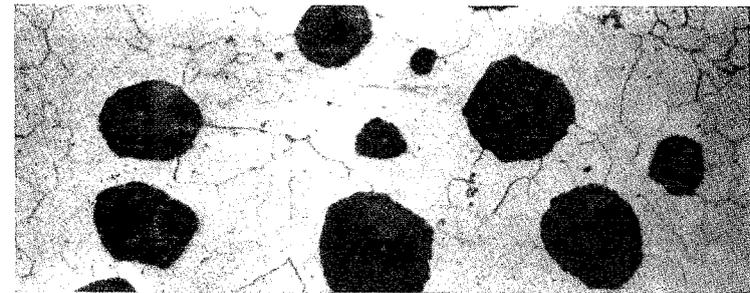


FIGURA 126

× 250

Microestructura de una fundición con grafito esférico recocida. Se observan nódulos de grafito esférico sobre un fondo de cristales de ferrita.

bono que se encuentra en la matriz en forma combinada, que podríamos llamar carbón activo para el tratamiento, puede variar desde 0 a 1 %, según sea la composición, el proceso de fusión o tratamiento o el espesor de las piezas. Además es muy interesante saber que el carbono que se encuentra en la fundición en forma de grafito disperso puede actuar como carbono suplementario o de reserva, para la carburación o des-carburación de la matriz. Por eso la microestructura de estas fundiciones puede estar constituida según sean los tratamientos, por ferrita, por ferrita y perlita, por perlita, por martensita y por martensita revenida o bainita. Para conseguir esas microestructuras y con ellas diversos niveles de dureza, resistencia, tenacidad y ductilidad, se dan a estas fundiciones los más diversos tratamientos empleándose según los casos recocidos, normalizados, recocidos de eliminación de tensiones, temple y reve-

nidos, austempering o endurecimientos superficiales por inducción, flameado, etc.

El empleo de elementos de aleación tiene mucha importancia para la fabricación de piezas de bastante espesor, ya que en algunos de esos tratamientos tiene una influencia notable la templabilidad del material que depende precisamente en gran parte de la presencia de elementos de aleación.

A continuación se señalan las principales particularidades de todos estos tratamientos.

Recocido para eliminación de tensiones.—Como en ocasiones las piezas en bruto de fusión suelen quedar con tensiones residuales suele ser con-

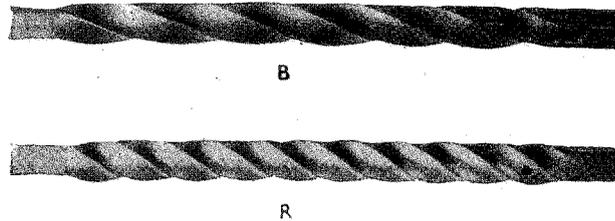


FIGURA 127

Ensayo de torsión de dos barras de sección cuadrada de fundición de grafito esferoidal. Sorprende la torsión que admiten. Una fundición ordinaria se rompe al hacerse este ensayo. Se observa que la barra recocida R ($A = 15\%$) admite mayor torsión que la barra en bruto ($A = 3\%$).

veniente darles un recocido subcrítico de eliminación de tensiones. Estos recocidos se suelen hacer a temperaturas variables de 525 a 675° empleándose las bajas temperaturas cuando debe evitarse el ablandamiento de las piezas y en cambio las temperaturas más altas cuando no importa que disminuya la dureza o la resistencia y, en cambio, interesa mucho la eliminación de las tensiones residuales.

Recocido.—Cuando interesa obtener en las piezas de fundición nodular la máxima ductilidad o la máxima maquinabilidad, es necesario darles un recocido de grafitización que sirva para obtener una microestructura de ferrita y grafito esferoidal. El recocido debe hacerse en dos fases:

1.^a Se calienta la fundición por encima de la zona crítica para que se disuelvan todos los carburos en la austenita.

2.^a Se enfría lentamente para que la austenita se transforme en ferrita, y el carbono se precipite en forma de grafito alrededor de las partículas de grafito esferoidal ya existentes. La temperatura crítica que se debe alcanzar depende de la composición del metal pero varía muy

poco de unos casos a otros, pudiendo variar ligeramente la temperatura con los elementos de aleación.

En la práctica se suelen seguir tres ciclos de recocido diferentes que citamos a continuación:

a) Calentamiento a 900°, con permanencia a temperatura de una a tres horas y enfriar sin precauciones especiales hasta 690°, manteniendo esa temperatura durante cinco a ocho horas. La permanencia a temperatura variará con el espesor de las piezas.

b) Calentamiento a 900° como en el caso anterior y enfriamiento dentro del horno hasta 650°, de forma que el enfriamiento entre 790 y 650° se haga a una velocidad inferior a 15° hora.

c) Calentamiento a 925°, con enfriamiento rápido al aire hasta 600°, seguido de un ligero calentamiento para realizar un recocido isotérmico a 720° durante seis horas con enfriamiento final al aire.

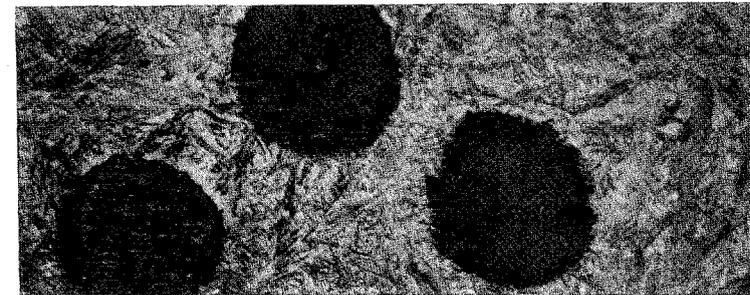


FIGURA 128

× 500

Microestructura de una fundición dúctil templada. Los esferoides de grafito aparecen sobre un fondo de agujas de martensita.

En la figura 123 se ve la microestructura de una fundición dúctil en bruto de colada, que está constituida por grafito esferoidal rodeado por ferrita en forma de aureolas y masas de perlita.

En la figura 126 se puede observar que la misma fundición después del recocido, está constituida sólo por grafito esferoidal y ferrita.

Normalizado y revenido.—El normalizado consiste en calentar las piezas hasta austenizar y enfriarlas luego al aire. De esta forma se consiguen muy buenas características mecánicas. Las temperaturas del normalizado suelen variar de 875 a 925°. La microestructura que se obtiene por normalizado depende de la composición de las piezas y de la velocidad de enfriamiento que a su vez es función de la temperatura y del espesor de las piezas. Con el normalizado se obtiene en general una estruc-

tura homogénea de perlita fina. Los elementos de aleación desempeñan un papel muy importante en las piezas de fundición dúctil que deben ser normalizadas. La templabilidad de estas fundiciones se modifica notablemente por la adición de elementos de aleación. De esta forma es posible obtener perlita fina en piezas de hasta 150 mm de espesor. El níquel es muy utilizado porque aumenta sensiblemente la resistencia de

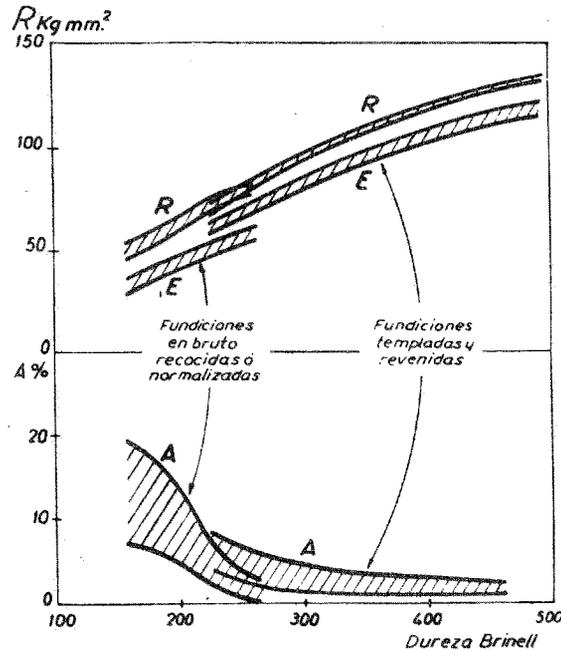


FIGURA 129

Relación entre las durezas y las resistencias y alargamientos de las fundiciones con grafito esferoidal en diferentes estados de tratamiento.

las piezas gruesas y no forma carburos. El molibdeno combinado con el níquel es muy útil para mejorar la resistencia y la dureza de esta clase de fundiciones.

Después del normalizado se suele dar a las piezas un calentamiento subcrítico que suele recibir el nombre de revenido porque con él se disminuye la dureza y se reducen las tensiones internas que pueden aparecer en el normalizado de piezas de gran espesor. El efecto del revenido en la dureza y resistencia depende de la composición y del nivel de dureza que se obtiene en el normalizado.

Temple y revenido.—El temple de la fundición dúctil es parecido al temple de los aceros, teniendo gran influencia la temperatura de austenización y el contenido en silicio. Generalmente se emplean temperaturas variables de 850 a 925°. El enfriamiento se hace generalmente en aceite para reducir al mínimo las tensiones que pueden aparecer. Sin embargo en ocasiones también es utilizado el temple en agua.

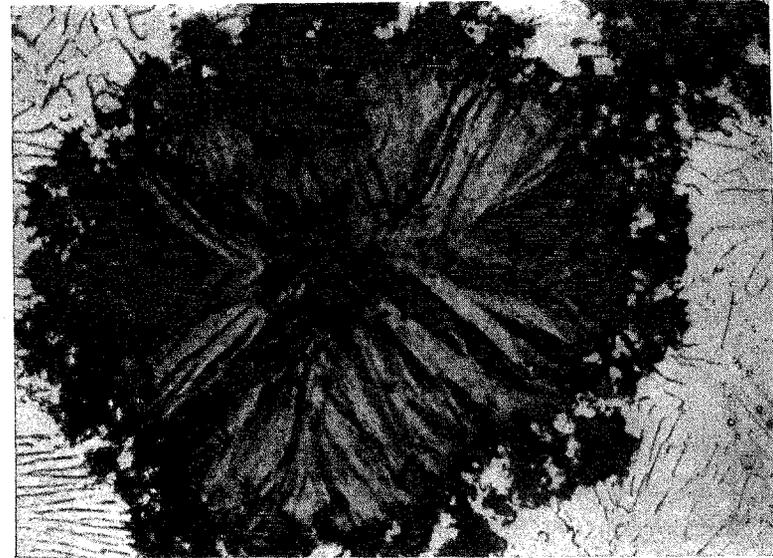


FIGURA 130
× 1.500
Un nódulo de grafito esferoidal.
(MORROGH.)

La templabilidad de la fundición dúctil depende mucho de su composición. Dentro de las composiciones normales el carbono y el silicio tienen poca influencia en la templabilidad. El molibdeno, el cromo y el manganeso, tienen, en cambio, una influencia muy sensible.

Después del temple se obtiene una estructura de grafito esferoidal y martensita (fig. 128). Con el revenido, se disminuye la dureza y la resistencia como se ve en la figura 129 pero se aumenta el alargamiento.

62. Fundiciones aleadas con grafito esferoidal.

El empleo de elementos de aleación en las «fundiciones dúctiles» es muy interesante cuando se desea fabricar piezas de gran espesor que deban ser templadas o normalizadas para conseguir altos niveles de

dureza o resistencia. En esos casos los elementos aleados sirven principalmente para mejorar la templabilidad, mejorándose también la tenacidad. Una de las aplicaciones más interesantes de estas fundiciones es la fabricación de grandes cilindros de laminación.

Las composiciones que se suelen emplear suelen variar dentro de los siguientes límites:

C = 2,9 a 3,6 %, Si = 1,5 a 2,5 %, Mn = 0,3 a 0,8 %, Ni = 1,5 a 2 %, Cr = 0,2 a 1 %, Mo = 0,10 a 0,50 %, P < 0,2 %, y S < 0,025 %

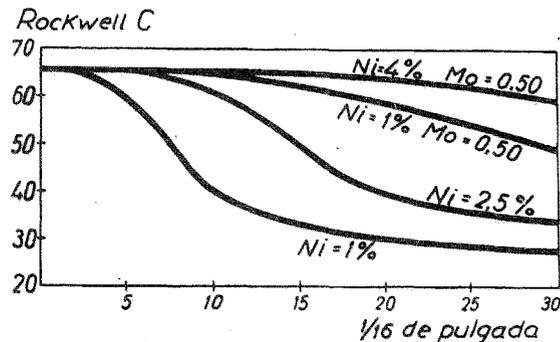


FIGURA 131

Curvas Jominy de varias fundiciones dúctiles de la siguiente composición base: C = 3,3 %, Si = 2,35 % y Mn = 0,3 %. Se observa la gran influencia que sobre la templabilidad tienen los elementos de aleación.

En la figura 131, se pueden observar las curvas Jominy de algunas de estas fundiciones, destacando la gran influencia que los elementos de aleación tienen en su templabilidad.

63. Algunos nuevos tipos de fundiciones con grafito nodular o esferoidal de alta resistencia.

La fabricación de la maleable perlítica, puede considerarse como el primer avance que se dio hace algunos años en el desarrollo de nuevas fundiciones con grafito no laminar, de elevada resistencia, con aceptable ductilidad y tenacidad.

En la actualidad, además de los trabajos relacionados con la fabricación de la fundición dúctil con grafito esferoidal que se han estudiado antes, se siguen realizando en todos los países numerosos estudios dirigidos a obtener nuevas mejoras en las fundiciones.

A continuación se señalan las principales características y propiedades de algunas fundiciones de muy bajo contenido en carbono desarrollado por la Ford, de fundiciones con azufre y selenio, del centra-steel y de la fundición con grafito difuso, que se han comenzado a emplear recientemente para usos muy diversos.

Muchos de los nuevos procesos se basan en la fabricación de aleaciones con porcentajes de carbono todavía inferiores a los más bajos (2,25 y 2,50 %) que se emplean para la fabricación de fundiciones blancas con destino a la maleable negra americana. Estas nuevas fundiciones de muy bajo contenido en carbono, o mejor dicho aleaciones hierro-carbono con menos de 2 % de carbono, son luego sometidas a recocidos de grafitización.

Para facilitar su estudio quizá hubiera sido interesante ordenarlas y clasificarlas de manera diferente a como se presentan en este libro, pero habiéndose comenzado la fabricación de todas ellas todavía muy recientemente y estando todavía algunos de esos procesos en periodo de desarrollo, falta en algunos casos experiencia y resultados prácticos para hacer una clasificación más definida.

64. Fundiciones para cigüeñales y otras piezas de automóviles fabricadas por la Casa Ford.

En la actualidad se fabrican ahora ya para distintas aplicaciones, aleaciones que están encajadas en lo que antiguamente se llamaba zona neutra entre aceros y fundiciones, con 1,4 a 2 % de carbono.

La aplicación industrial de estas aleaciones en escala importante fue llevada a cabo por primera vez por las fábricas de automóviles Ford hacia el año 1932, cuando comenzaron a fabricar fundidas ciertas piezas de responsabilidad como cigüeñales, tambores de freno, árboles de levas, etcétera.

En la Tabla XVII, se dan algunas de las composiciones más utilizadas señalándose luego en el texto las características mecánicas corres-

| Denominación | | % C | % Si | % Mn | % Cr | % Cu |
|--------------|-------------------|------|------|------|------|------|
| 1 | Cigüeñales | 1,5 | 1 | 0,7 | 0,5 | 1,75 |
| 2 | Pistones | 1,5 | 1,1 | 0,7 | 0,12 | 2,75 |
| 3 | Tambores de freno | 1,60 | 1 | 0,8 | | 2,10 |

TABLA XVII

Composiciones de tres fundiciones utilizadas por la casa Ford para la fabricación de piezas de automóvil.

pondientes. Se puede observar que el valor del $C + Si = 2,5 \%$ es muy bajo.

En realidad, el buen comportamiento de estas aleaciones que durante muchos años no se sospechaba que se pudieran emplear para estos usos, se debe más que a sus propiedades mecánicas a su baja sensibilidad a la entalla y a su buena capacidad de amortiguamiento a las vibraciones, que son muy superiores a las que les corresponden a los aceros. Por otra parte, su buena resistencia al desgaste y su bajo coste, son también factores muy interesantes para su empleo.

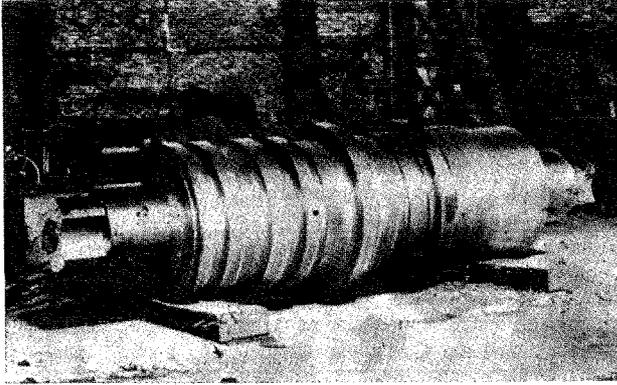


FIGURA 132

Cilindro para un gran tren de laminación en caliente de perfiles de hierro, fabricado con fundición de grafito esferoidal.

Las fundiciones a que nos estamos refiriendo, son en bruto de colada fundiciones blancas, que luego es necesario recocer, para conseguir la precipitación del grafito. Después de un recocido adecuado su microestructura suele estar constituida por nódulos de grafito en una matriz de sorbita, o de perlita muy fina. En cierto modo estas fundiciones son parecidas a las fundiciones maleables perlíticas. El tratamiento que se suele emplear en la fabricación de cigüeñales suele ser el siguiente: Calentar a 900° para austenización, mantener 30 minutos a temperatura y enfriar rápidamente a 760° . Desde 760 hasta 650° , se enfría lentamente, a una velocidad inferior a 10° hora, y desde 650° continúa el enfriamiento hasta 530° , empleándose en este último enfriamiento una hora, aproximadamente. Las características mecánicas que se consiguen con este tratamiento con la aleación 1 de la Tabla XVII, son las siguientes:

$$R = 70 \text{ Kg/mm}^2 \quad E = 60 \text{ Kg/mm}^2 \quad A = 2 \% \quad \text{Brinell} = 260$$

Para la fabricación de tambores de freno ha sido muy utilizada la aleación 3 de la misma Tabla XVII, que con un tratamiento bastante similar al que se ha señalado para los cigüeñales, da las siguientes características:

$$R = 60 \text{ Kg/mm}^2 \quad E = 48 \text{ Kg/mm}^2 \quad A = 4 \% \quad \text{Brinell} = 220$$

Algunas fábricas europeas de automóviles están fabricando también cigüeñales con características mecánicas parecidas a las aleaciones de la casa Ford, con la siguiente composición:

$$\begin{array}{llll} C = 1,30 \% & Si = 1 \% & Mn = 0,60 \% & S = 0,08 \% \\ P = 0,07 \% & Cr = 0,40 \% & Cu = 1,7 \% & Ni = 0,20 \% \end{array}$$

Las piezas son sometidas al siguiente tratamiento: Austenización a 950° durante dos horas y media, enfriamiento rápido a temperatura

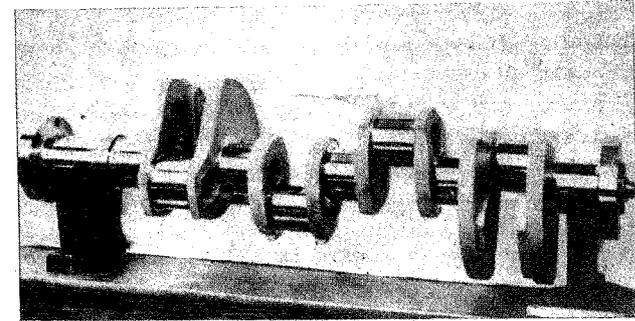


FIGURA 133

Cigüeñal de fundición esferoidal para motor de explosión.

subcrítica de unos 500° manteniendo las piezas a esa temperatura durante 20 minutos, calentando luego posteriormente a 775° durante dos horas. De esta forma se obtienen los siguientes resultados:

$$R = 70 \text{ Kg/mm}^2 \quad E = 56 \text{ Kg/mm}^2 \quad A = 2,5 \%$$

65. Fundiciones de grafito nodular con azufre y selenio.

Un procedimiento relativamente simple para obtener fundiciones de grafito nodular con alta resistencia, que no exige ningún elemento de aleación ni materias primas diferentes a las que normalmente se emplean en las fundiciones, se cita a continuación y se refiere a fundiciones con grafito nodular de alto contenido en azufre.

Para estas fundiciones suele convenir el siguiente análisis final:

| | |
|------------------------------|---------------|
| Carbono. | 2,5 a 3 % |
| Silicio. | 1,2 a 3 % |
| Manganeso. | 0,25 a 0,50 % |
| Azufre | 0,10 a 0,20 % |
| Fósforo inferior a | 0,15 % |
| | C + Si = 5 % |

Con ellas se obtienen las siguientes características:

| | |
|-------------------------------------|----------------------------|
| Resistencia a la tracción | 35 a 45 Kg/mm ² |
| Dureza Brinell | 220 a 280 |

La colabilidad de estas fundiciones es buena y no es necesario tomar precauciones especiales para la fusión y colada.

Para obtener las mejores características debe ajustarse cuidadosamente el contenido en silicio en función del espesor de las piezas siendo conveniente hacer durante el proceso controles de grafitización o blanqueo por medio del ensayo de la cuña.

En este proceso debe vigilarse el porcentaje de fósforo, ya que este elemento es perjudicial para la obtención de altas características mecánicas y aunque no tiene influencia importante sobre el fenómeno de grafitización, forma, en cambio, eutécticos fosforosos que hacen la fundición dura y frágil. La fabricación de estas fundiciones al azufre con grafito esferoidal no exige precauciones muy especiales. El proceso en cierto modo parecido al de la maleable americana, consiste en fabricar fundición blanca y luego por recocido obtener grafito nodular. Se diferencia de aquella porque el proceso es mucho más rápido por hacerse el recocido en horno de sales.

Después de terminada la fusión se añade al metal líquido en la cuchara de colada el azufre, aunque también se puede emplear selenio o teluro, que dan resultados bastante similares y son también elementos que favorecen el blanqueo de la fundición.

Las piezas de fundición blanca pueden ser recocidas en horno de mufla sin ser embaladas en cajas como en el caso de las fundiciones maleables. La atmósfera del horno debe ser controlada para evitar la oxidación del material que perjudica mucho el aspecto de las piezas. Estos hornos pueden ser calentados con fuel-oil, carbón pulverizado o eléctricamente.

Sin embargo, en general, el recocido de grafitización se hace en horno de sales siendo esta clase de recocido una de las características más interesantes de la fabricación de fundición esferoidal con azufre. Debido a la gran conductibilidad térmica de las sales el calentamiento es rapi-

dísimo y ello favorece extraordinariamente la formación del grafito. Para este tratamiento se suelen usar hornos de sales iguales a los que se emplean para la cementación de los aceros. Con una fundición de C = 2,69, Si = 1,57 y S = 0,20 %, calentada durante una hora a unos 1.000° con sales compuestas de 20 % de cianuro sódico, 30 % de cloruro bórico, 25 % de cloruro sódico y 25 % de carbonato sódico y luego enfriada al aire en calma se obtiene grafito nodular con una matriz perlítica y las siguientes características mecánicas:

$$R = 65 \text{ Kg/mm}^2 \quad E = 49 \text{ Kg/mm}^2 \quad A = 2 \%$$

Cuando se desea obtener la máxima tenacidad, es necesario dar posteriormente al recocido de grafitización otro recocido de ferritización a unos 740°.

Con la fundición que antes se ha señalado, realizando la grafitización en horno de sales a 1.050° y luego el recocido de ferritización en horno eléctrico a 720-760°, durante ocho a diez horas, se obtienen los siguientes resultados:

$$R = 50 \text{ Kg/mm}^2 \quad \text{y} \quad A = 6 \%$$

Con fundiciones de 0,10 a 0,30 % de azufre se ha conseguido también fabricar fundiciones nodulares directamente en bruto de fusión sin necesidad de recocido posterior. Para ello se emplean composiciones parecidas a las que acabamos de señalar, pero deben hacerse adiciones de inoculantes a la cuchara. Estas fundiciones con azufre son muy poco empleadas porque su fabricación es difícil.

66. Aleaciones «centra-steel» fabricadas por la General Motors.

La «General Motors», ha puesto a punto en marzo del año 1959 un nuevo tipo de fundición o acero llamado «centra-steel», de altas características mecánicas que en bruto de fundición presenta nódulos de grafito muy similares al grafito de recocido de la fundición maleable (fig. 134). Las propiedades mecánicas que se obtienen son algo superiores a las de la fundición maleable perlítica, siendo la propiedad más importante de esta fundición, su alto nódulo de elasticidad, que es muy próximo al del acero.

Las principales ventajas de esta aleación son el no exigir tratamientos térmicos complicados ni agentes de adición costosos ni de difícil o peligrosa manipulación,

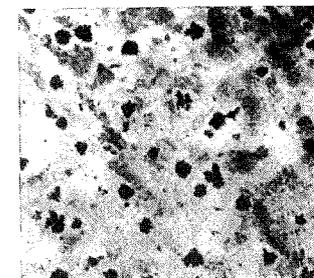


FIGURA 134
Microestructura del centra-steel en
bruto de colada.

ni tampoco aparatos de inyección especiales, ni bajos contenidos en fósforo.

Composición e inoculantes.—Una de las composiciones más utilizadas es la siguientes:

| | |
|------------------------------|--------|
| Carbono | 1,75 % |
| Silicio | 2,25 % |
| Manganeso | 0,40 % |
| Azufre. | 0,10 % |
| Fósforo | 0,05 % |
| Boro. | 0,01 % |
| C + Si | 4 % |
| Carbono equivalente. | 2,5 % |

En la figura 135 se señalan los contenidos en carbono y en silicio recomendables para diversas aleaciones, observándose que el alto contenido en silicio y bajo porcentaje de carbono de la aleación centra-steel, son inversos a los recomendados normalmente para la fundición.

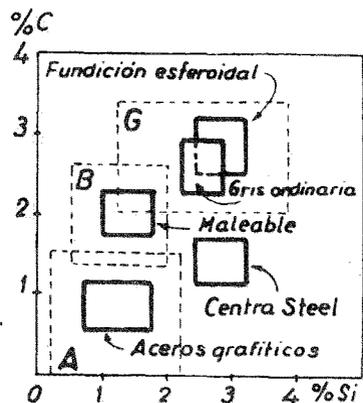


FIGURA 135
Contenidos de carbono y de silicio correspondientes a diferentes calidades de fundiciones.

El proceso de fabricación consiste en fundir primero la aleación e inocular luego al baño fundido un compuesto de boro y algunas veces de teluro o bismuto que sirven para producir una estructura con grafito nodular de altas propiedades mecánicas. Todo el carbono libre se presenta formando grafito nodular, pudiendo decirse con más propiedad que su estructura es intermedia entre la nodular y la esferoidal. La matriz es esencialmente de perlita fina, a veces con algo de ferrita.

Las buenas características de esta fundición son debidas en gran parte a la ausencia de masas de carburo y de láminas de grafito en su microestructura. Para obtener buenos resultados con el centra-steel, el contenido en boro después de la inoculación conviene que sea próximo a 0,010 %. La inoculación del boro se puede hacer empleando diferentes compuestos de este metaloide. Entre otros, los más utilizados son el ferroboro, el carburo de boro, el boruro cálcico y el bórax. Las adiciones de teluro dan los mejores resultados cuando queda en el metal 0,005 %

de teluro aproximadamente. El teluro se puede añadir como metal puro o bien en forma de ferroteluro, o de cobre-teluro.

Las adiciones se pueden hacer en la cuchara o mientras se cuele el metal del horno a la cuchara. En ocasiones se suelen colocar también las adiciones en el fondo de la cuchara.

A veces se añade bismuto al centra-steel para evitar la formación de láminas de grafito. El teluro actúa en este aspecto en forma parecida al bismuto y por eso en ocasiones se prefiere el teluro al boro.

Propiedades mecánicas y tratamientos térmicos.—Estudiando las propiedades mecánicas en bruto de fundición y después de diversos trata-

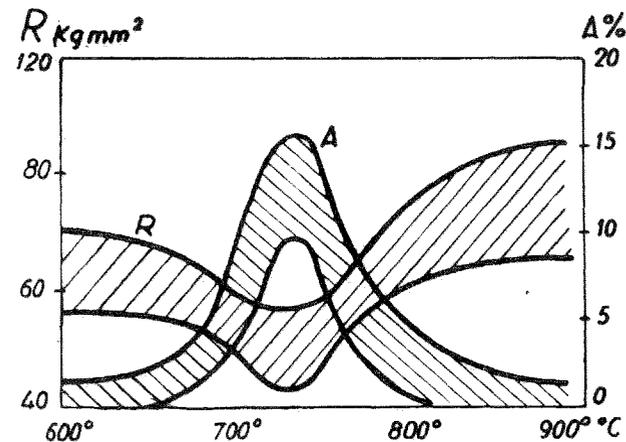


FIGURA 136
Resistencias a la tracción y alargamientos que se pueden obtener con centra-steel, cuando el material en bruto es calentado a las temperaturas que se señalan durante tres horas y luego es enfriado al aire.

mientos del centra-steel, se comprueba el amplio campo de aplicaciones de este material debido principalmente al alto módulo de elasticidad y a su aptitud para los tratamientos térmicos. La ausencia de masas de carburos hipereutectoides y de láminas de grafito, hace que sus propiedades sean muy interesantes para numerosas aplicaciones. En bruto de fundición sus características son:

$$R = 56 \text{ Kg/mm}^2 \quad E = 42 \text{ Kg/mm}^2 \quad \text{y} \quad A = 1 \%$$

Aunque el alargamiento no es tan elevado como el que se obtiene algunas veces en otras fundiciones nodulares, su resistencia es parecida a la de la fundición nodular y a la de la fundición maleable perlítica. El módulo de elasticidad que es de 19.000 Kg/mm² no se modifica por

los tratamientos térmicos y es superior al de todas las fundiciones en bruto y se aproxima mucho al del acero (fig. 125).

El recocido a baja temperatura para eliminar tensiones se hace a 500-650° durante tres a seis horas y no reduce ni la dureza ni la resistencia, pero, en cambio, aumenta un poco el alargamiento hasta un 2 %.

La máxima de ductilidad se consigue por calentamiento a 730°, con lo que se aumenta mucho el alargamiento que llega a 10 ó 15 %, pero,

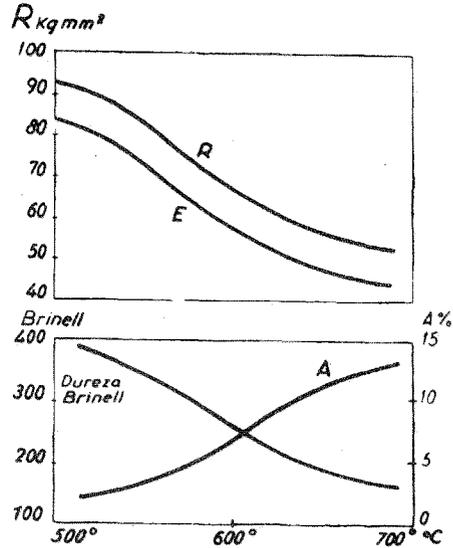


FIGURA 137

Influencia de la temperatura de revenido en las características mecánicas del «centra-steel». Las probetas fueron primero templadas y luego revenidas a las temperaturas que se señalan en la figura.

en cambio, hace descender la resistencia que baja hasta 45 Kg/mm² aproximadamente. En este tratamiento de recocido la perlita se descompone en grafito y ferrita. El grafito se deposita alrededor de los nódulos de grafito ya existentes y queda una matriz completamente ferrítica.

Un aumento notable de resistencia se obtiene por normalizado calentando a 875° y enfriando al aire. Con este tratamiento se consigue una perlita muy fina, obteniéndose una resistencia de 66 Kg/mm². Si aparecen en la microestructura pequeñas cantidades de ferrita aumenta la ductilidad y disminuye la resistencia.

Cuando se desean obtener resistencias todavía más elevadas, se so-

mete a estas fundiciones a un temple a 850° y a un revenido a 550 a 650°, obteniéndose así las siguientes características:

$$R = 84 \text{ Kg/mm}^2 \quad E = 63 \text{ Kg/mm}^2 \quad \text{y} \quad A = 1 \%$$

En la figura 133, se señalan las resistencias y alargamientos con que queda este material después de ser calentado durante tres horas a las temperaturas que se indican y luego se enfría al aire. En la figura 137 se señala las características que se obtienen después del temple y revenido.

67. Fundiciones de grafito difuso.

En los años 1957 a 1959 se han desarrollado en Francia una serie de estudios muy interesantes relacionados con la fabricación de fundiciones de altas características mecánicas. Las investigaciones de Pomey



FIGURA 138

× 160

Nódulos de grafito de una fundición maleable americana (negra).

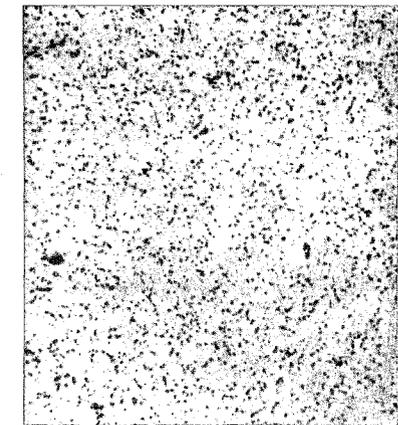


FIGURA 139

× 160

Nódulos de grafito de una fundición de grafito difuso.

en las fábricas «Renault» de París, y los trabajos de Laurent y Ferri, han permitido llegar a establecer las bases científicas e industriales necesarias para la fabricación de fundiciones con grafito nodular o esférico en partículas finísimas que han recibido el nombre de fundiciones de grafito difuso.

Estas fundiciones se caracterizan por tener después del tratamiento térmico resistencias de 70 a 80 Kg/mm² con alargamientos superiores

al 2 %, presentando además una buena resistencia a la fatiga. En la microestructura de estas fundiciones aparece una gran cantidad de pequeños nódulos de grafito más o menos uniformemente repartidos en toda la masa del metal. El tamaño de esos nódulos de grafito es muy inferior al de cualquier otra clase de grafito que aparece en las fundiciones (figs. 138 y 139).

Para tener una idea de la finura del grafito en estas fundiciones, a continuación indicamos el número aproximado de nódulos por milímetro cuadrado que hay en estas fundiciones y también los que corresponden a las fundiciones maleables y a las esferoidales:

| | N° de nódulos mm ² |
|--------------------------------------|----------------------------------|
| Fundición esferoidal | 60 |
| Fundición maleable negra | 100 |
| Fundición de grafito difuso. | 12.000 |

El proceso de fabricación de esta clase de fundiciones se basa en someter a la fundición blanca a un temple y luego a un revenido a unos 500° aproximadamente. A continuación es sometido el material a un recocido a 780° en el que se produce la grafitización. Como consecuencia del temple se obtiene una estructura martensítica, produciéndose luego durante el revenido a 500° la nucleación de los gérmenes que luego en el recocido a 780° darán lugar al nacimiento y desarrollo de las partículas de grafito difuso.

Se suelen emplear fundiciones con la siguiente composición aproximada:

C = 2,6 %, Si = 1,40 %, Mn = 0,80 %, Cr = 1,30 %, S = 0,040 %,
P = 0,060 %,

o sea, C + Si = 4 % y carbono equivalente = 3,1 %.

En piezas de tamaño medio se suelen obtener las siguientes características:

R = 82 Kg/mm² E = 78 Kg/mm² y A = 4,5 %

68. Propiedades mecánicas de las fundiciones con grafito difuso.

Las extraordinarias propiedades de las fundiciones con grafito difuso son debidas, a que por encontrarse el grafito en forma de partículas muy finas y regularmente repartidas en la masa su efecto perjudicial sobre

las propiedades de la matriz es muy pequeño. Las fundiciones de grafito difuso contienen siempre bastante manganeso, para conseguir una estructura blanca en bruto de colada y para facilitar luego el temple martensítico de las piezas.

Por temple y revenido apropiado de la matriz, que se realizan después de haberse hecho el recocido de grafitización, se pueden dejar las piezas de fundición dúctil con cualquiera de las durezas que es posible conseguir con los aceros eutectoides tratados.

Después del temple con un revenido a 150° se obtiene la máxima dureza, 60 Rockwell-C, aproximadamente, que es la dureza que en general conviene en los tratamientos de endurecimiento superficial y con el revenido a unos 650° se obtiene la máxima tenacidad con una maquinabilidad excelente. Si se desea una dureza más baja todavía, se puede conseguir con una grafitización eutectoide parcial por calentamiento a unos 700° y así aparece una aureola de ferrita alrededor de cada grano de grafito o bien, con una grafitización eutectoide completa a temperatura un poco más elevada con enfriamiento lento, después de la grafitización obteniéndose así una matriz enteramente ferrítica.

El módulo de elasticidad de estas fundiciones varía de 17.000 a 19.000, lo que quiere decir que es superior a los de las fundiciones ordinarias y próximo al del acero.

Comparando las fundiciones de grafito difuso con los aceros eutectoides en bruto de fusión, se ha comprobado que son materiales muy parecidos, con la única diferencia de la presencia de grafito. Las características mecánicas para una misma dureza son comparables aunque la fundición tiene un poco menos alargamiento y resiliencia y, en cambio, los límites de fatiga y flexión rotativa son tan buenos en un caso como en otro. Las características que antes hemos señalado, correspondientes a una resistencia de 82 Kg/mm² se han obtenido templando a 825° en aceite y con revenido posterior a 700°. Como es natural el temple y revenido se dieron después del recocido de grafitización.

APÉNDICE

*Essays de flexión estática según las normas francesas del BNF
(Bureau de Normalisation des Industries de la Fonderie)*

Si se desea realizar el ensayo de flexión estática utilizando unidades del sistema métrico es muy recomendable utilizar las normas francesas BNF.

Según sea el espesor de las piezas y de acuerdo con la Tabla XVIII se emplearán probetas en bruto de 22, 32 ó 50 mm de diámetro.

| Espesor medio de la pieza | Dimensiones de las probetas | |
|---------------------------|-----------------------------|--------------|
| | D = diámetro | L = longitud |
| $E < 12,5$ | 22 | 400 |
| $12,5 < E < 25$ | 32 | 500 |
| $25 < E < 50$ | 50 | 700 |

Tabla XVIII
Dimensiones de las probetas recomendables para ensayar piezas de fundición de diferentes espesores

Con estas probetas se hará el ensayo de flexión estática y de acuerdo con la carga P que ha producido la rotura y con ayuda de la fórmula $MR = \frac{8 PL}{\pi D^3}$ o de la Tabla XIX se hallará el módulo de rotura. La calidad de las fundiciones (resistencia a la tracción en Kg/mm² que corresponde a probeta de 20 mm de diámetro sacada de barra de 32 mm de diámetro) se puede conocer con relativa aproximación relacionando los valores de la Tabla XIX. La carga P se expresa en kilogramos.

| Resistencia a la tracción de las fundiciones en probeta de 20 mm de diámetro Kg/mm ² | Diámetro de las probetas y distancias entre apoyos | | | | | |
|--|--|-----|-------------------------|-------|-------------------------|-------|
| | D = 22 mm L = 300 mm | | D = 32 mm L = 400 mm | | D = 50 mm L = 600 mm | |
| | MR | P | MR | P | MR | P |
| 14 | 24 | 330 | 25 | 800 | 25 | 2.050 |
| 18 | 31 | 430 | 32 | 1.040 | 32 | 2.620 |
| 22 | 37 | 520 | 40 | 1.290 | 40 | 3.270 |
| 26 | 44 | 610 | 47 | 1.510 | 47 | 3.850 |
| 30 | 51 | 710 | 54 | 1.740 | 54 | 4.420 |

Tabla XIX
Especificaciones BNF relativas al ensayo de flexión de fundiciones de diversas calidades.

Composiciones típicas de las fundiciones grises según su resistencia y la sección de la barra

| Tipo de fundición Resistencia en Kg/mm ² | Tamaño de la pieza | Diámetro de la probeta mm. | COMPOSICION % | | | | | Carbono equivalente | Dureza Brinell | R Kg/mm ² |
|--|--------------------|----------------------------|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------------|----------------|----------------------|
| | | | C | Mn | P | S | Si | | | |
| 12 a 18 | pequeña | 22 | 3.50-3.80 | 0.50-0.70 | 0.20-0.80 | 0.08-0.13 | 2.40-2.60 | 4.56 | 160-200 | 15.4-18.2 |
| | media | 30 | 3.40-3.60 | 0.50-0.70 | 0.20-0.60 | 0.00-0.13 | 2.30-2.50 | 4.34 | 160-180 | 12.6-16.8 |
| | grande | 51 | 3.10-3.30 | 0.50-0.80 | 0.20-0.40 | 0.08-0.13 | 2.20-2.40 | 3.98 | 130-180 | 12.6-15.4 |
| 18 a 21 | pequeña | 22 | 3.30-3.50 | 0.50-0.80 | 0.20-0.50 | 0.08-0.13 | 2.20-2.40 | 4.20 | 180-210 | 18.2-20.3 |
| | media | 30 | 3.20-3.40 | 0.50-0.80 | 0.15-0.40 | 0.08-0.12 | 2.20-2.40 | 4.08 | 172-207 | 18.2-20.3 |
| | grande | 51 | 3.00-3.30 | 0.50-0.80 | 0.15-0.25 | 0.08-0.12 | 1.90-2.20 | 3.82 | 160-207 | 18.2-20.0 |
| 21 a 24 | pequeña | 22 | 3.20-3.40 | 0.50-0.80 | 0.15-0.30 | 0.08-0.12 | 2.10-2.30 | 4.03 | 209-228 | 21.0-24.3 |
| | media | 30 | 3.10-3.30 | 0.50-0.80 | 0.15-0.25 | 0.08-0.12 | 2.10-2.30 | 3.92 | 200-228 | 21.0-24.3 |
| | grande | 51 | 2.90-3.20 | 0.45-0.70 | 0.15-0.25 | 0.08-0.12 | 1.70-2.10 | 3.68 | 200-228 | 21.0-24.3 |
| 24 a 29 | pequeña | 22 | 3.10-3.30 | 0.45-0.70 | 0.15-0.30 | 0.08-0.12 | 2.00-2.20 | 3.90 | 209-228 | 25.3-28.1 |
| | media | 30 | 3.00-3.25 | 0.45-0.70 | 0.15-0.25 | 0.07-0.12 | 1.80-2.10 | 3.77 | 207-228 | 24.6-27.4 |
| | grande | 51 | 2.80-3.10 | 0.45-0.70 | 0.10-0.20 | 0.06-0.12 | 1.60-2.00 | 3.54 | 183-217 | 24.6-26.7 |
| 29 a 34 | pequeña | 22 | 3.00-3.20 | 0.45-0.65 | 0.10-0.25 | 0.07-0.12 | 1.90-2.20 | 3.77 | 212-241 | 29.5-32.3 |
| | media | 30 | 2.95-3.15 | 0.45-0.70 | 0.10-0.20 | 0.06-0.11 | 1.70-2.00 | 3.65 | 207-241 | 28.1-32.0 |
| | grande | 51 | 2.75-3.00 | 0.50-0.70 | 0.07-0.15 | 0.05-0.12 | 1.50-1.90 | 3.42 | 180-217 | 28.8-31.6 |
| 34 a 40 | pequeña | 22 | 2.90-3.10 | 0.50-0.70 | 0.10-0.20 | 0.06-0.12 | 1.70-2.10 | 3.62 | 228-269 | 35.8-38.6 |
| | media | 30 | 2.70-3.00 | 0.60-0.80 | 0.10-0.20 | 0.06-0.11 | 1.70-2.00 | 3.45 | 228-260 | 35.1-38.0 |
| | grande | 51 | 2.55-2.85 | 0.60-0.80 | 0.07-0.15 | 0.06-0.11 | 1.40-1.70 | 3.20 | 207-241 | 35.1-37.9 |
| 40 a 45 | pequeña | 22 | 2.70-3.00 | 0.50-0.70 | 0.10-0.20 | 0.06-0.12 | 1.90-2.20 | 3.51 | 228-272 | 42.1-45.7 |
| | media | 30 | 2.50-2.85 | 0.50-0.80 | 0.07-0.15 | 0.05-0.10 | 1.90-2.10 | 3.37 | 228-260 | 42.1-45.7 |
| | grande | 51 | 2.50-2.80 | 0.50-0.80 | 0.05-0.15 | 0.05-0.10 | 1.20-1.50 | 3.09 | 212-248 | 42.1-45.0 |

(Del artículo «Fundiciones de calidad» por José María Palacios.)