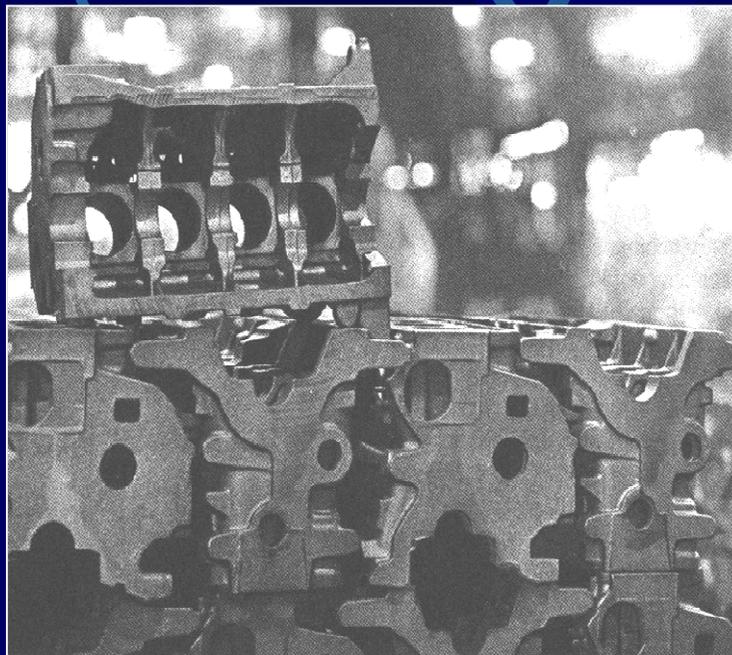
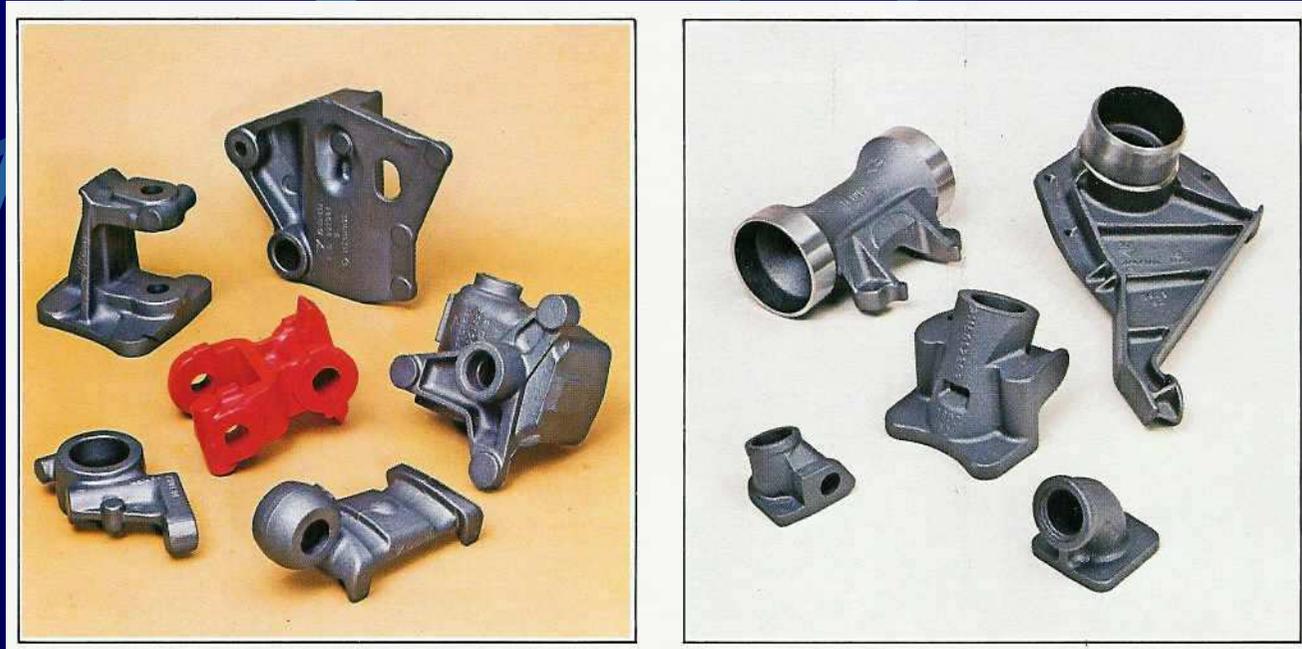


FERROS FUNDIDOS





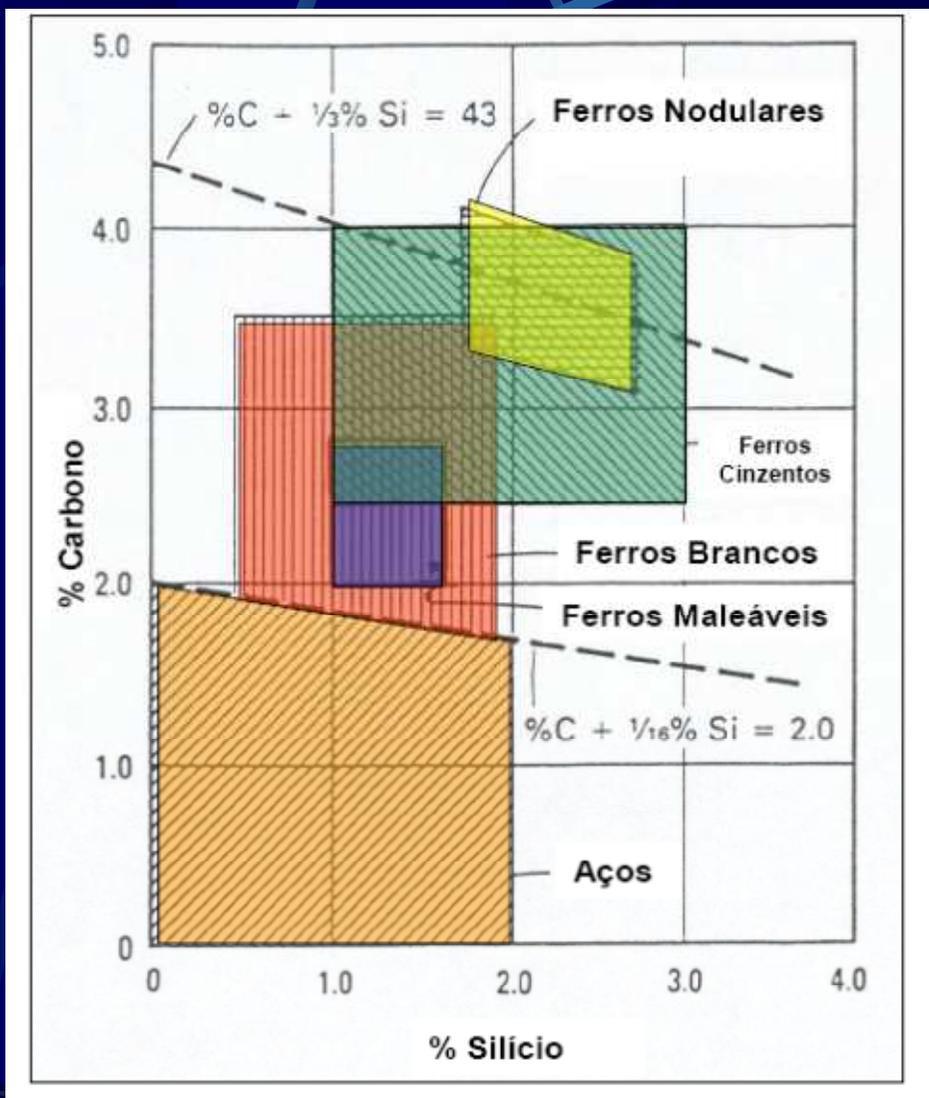
FERROS FUNDIDOS



- Peças de geometria complexa.
- Peças onde a deformação plástica é inadmissível.



FERROS FUNDIDOS



FF CINZENTO
(Gray iron)

FF DÚCTIL ou Nodular
(Spheroidal iron)

FF BRANCO
(White iron)

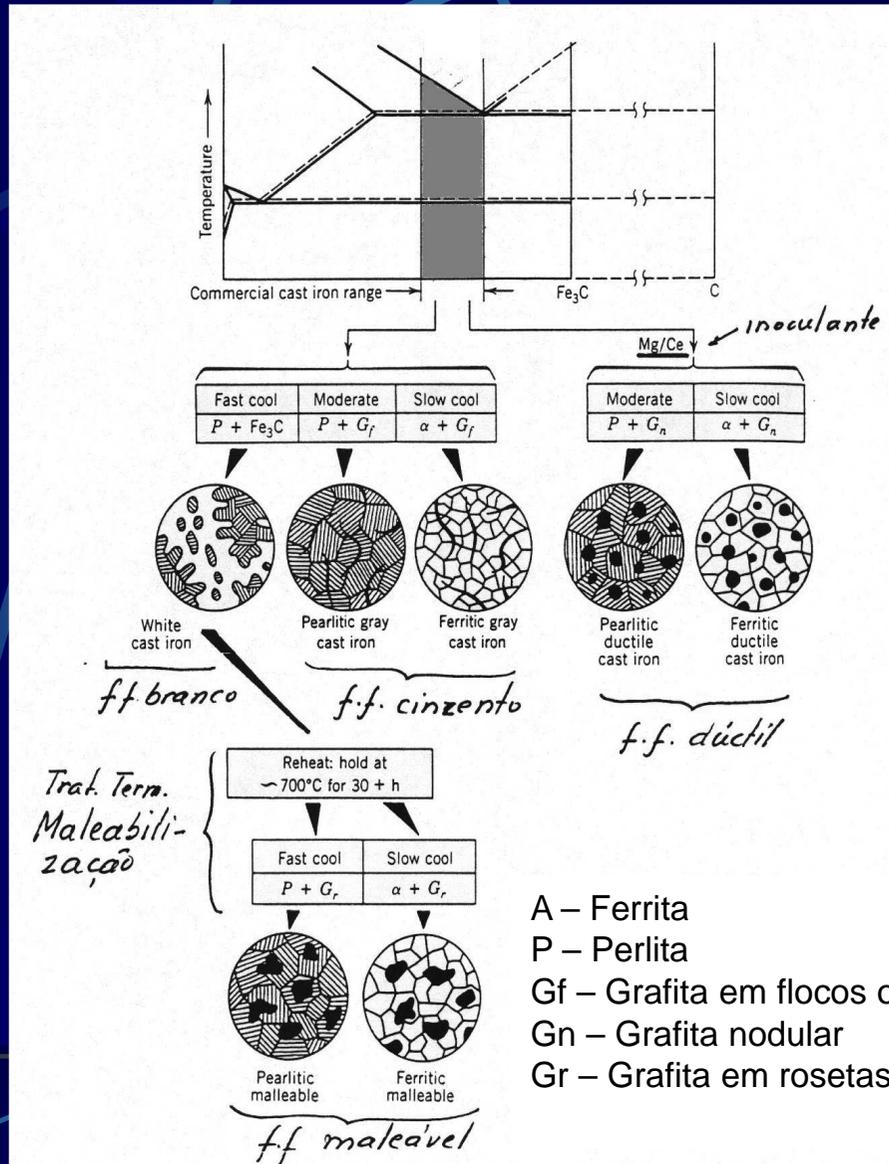
FF MALEÁVEL
(Malleable iron)

FF VERMICULAR
(Vermicular iron)

Existe sobreposição de composição química, pelo que só se distinguem através do processamento!

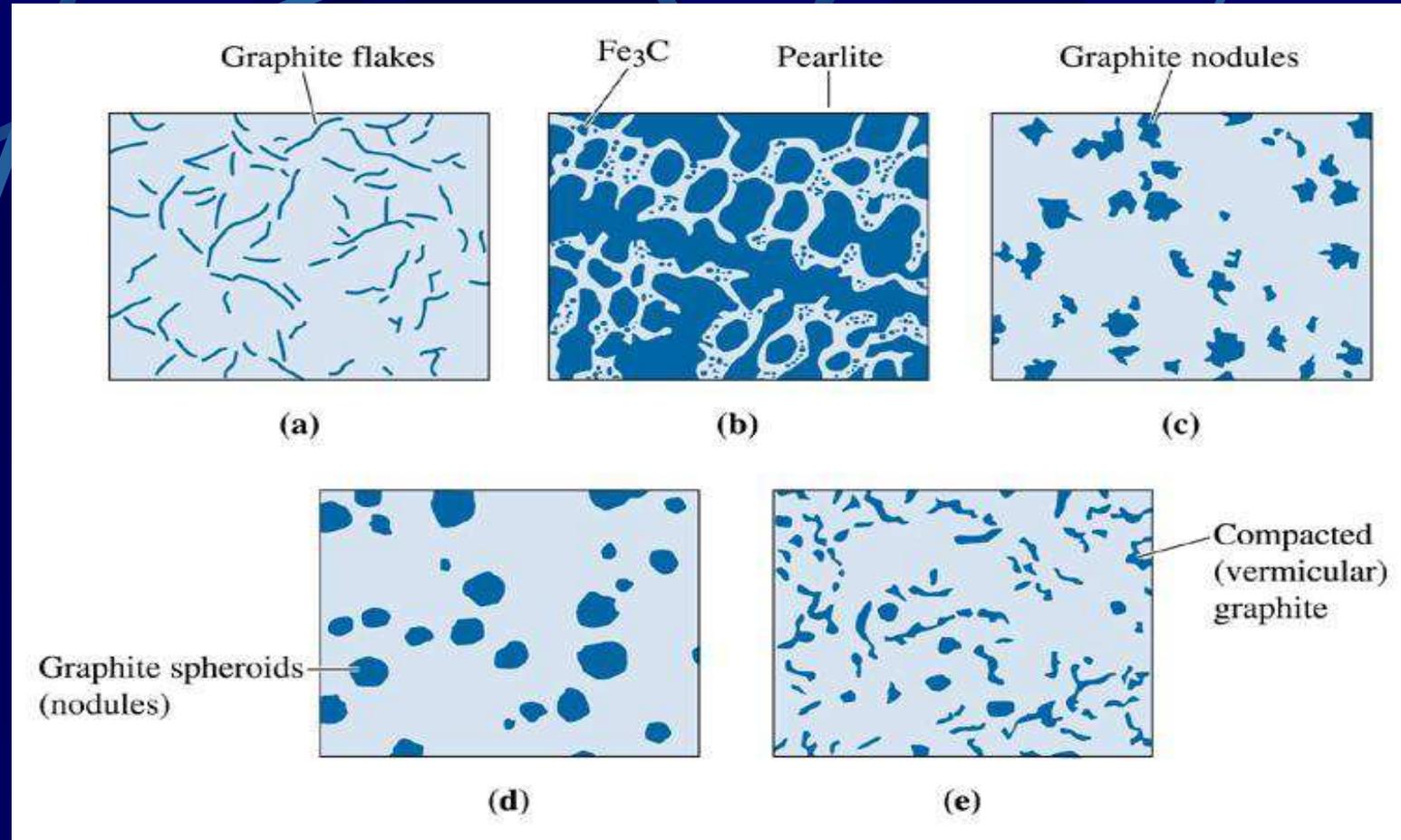
FERROS FUNDIDOS

Tipos básicos de ferros fundidos, conforme a sua composição, microestrutura e processamento



Adaptado de Callister 9 ed.

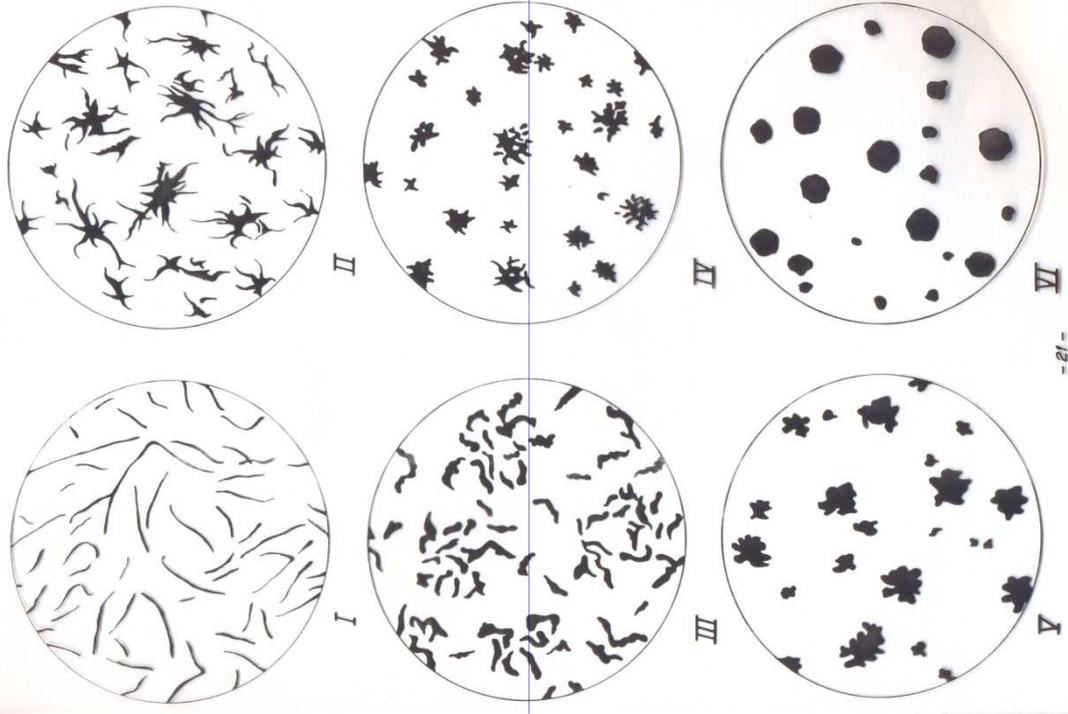
FERROS FUNDIDOS

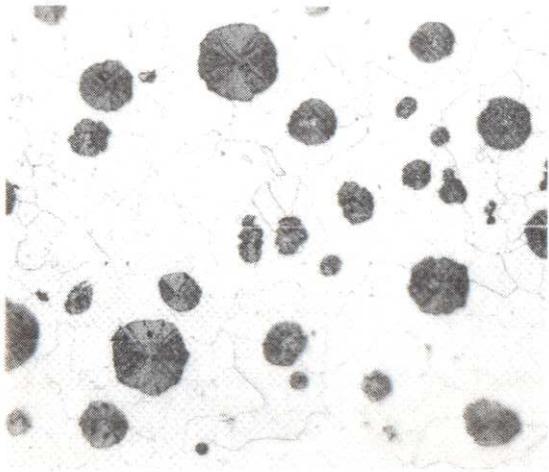


©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning[™] is a trademark used herein under license.

Tipos básicos de ferros fundidos, conforme a sua microestrutura

Fig.13 - FORMAS DA GRAFITA





Nodular



Branco



Cinzento



Mateável

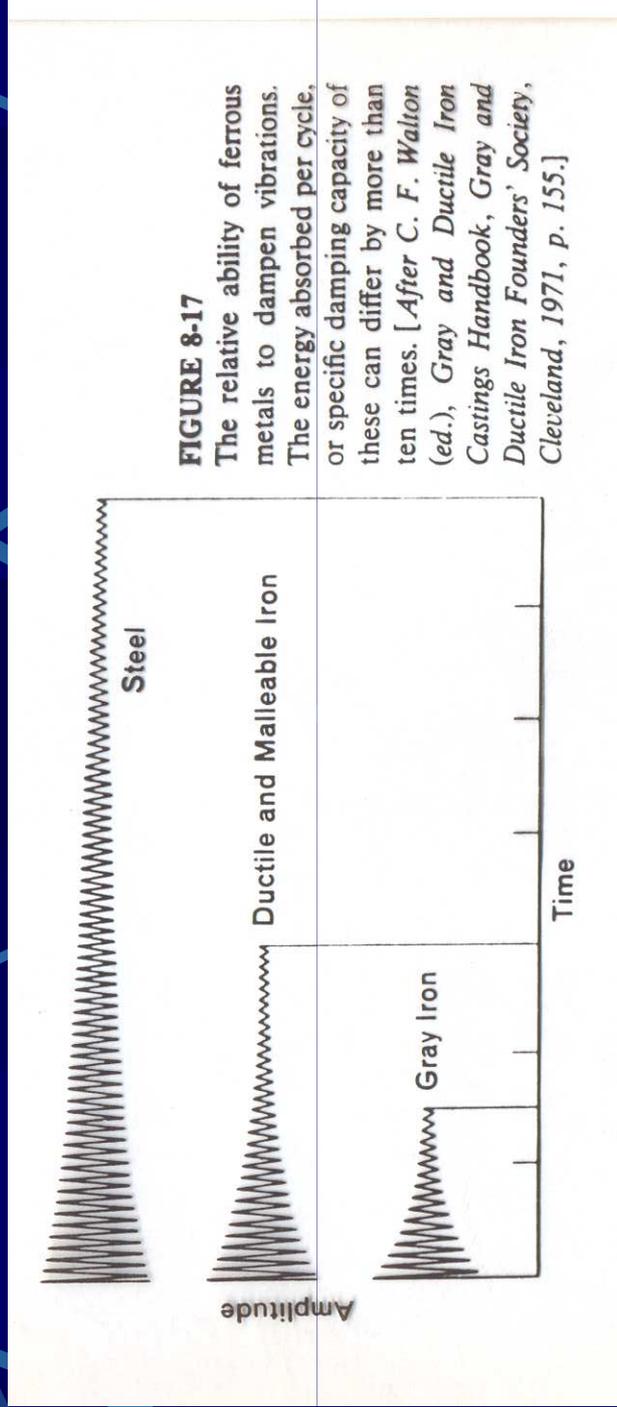


FIGURE 8-17

The relative ability of ferrous metals to dampen vibrations. The energy absorbed per cycle, or specific damping capacity of these can differ by more than ten times. [After C. F. Walton (ed.), *Gray and Ductile Iron Castings Handbook*, Gray and Ductile Iron Founders' Society, Cleveland, 1971, p. 155.]



FIGURA 95 – Ferro fundido nodular, corpo-de-prova de 100 mm de diâmetro. Ataque: Nital (2%), 100 X

Observa-se, nesta figura¹⁹⁰, nódulos dos tipos I e II, em matriz quase totalmente ferrítica, com restos de perfitita.



FIGURA 96 – Ferro fundido com grafita esteroidai, corpo-de-prova de 25 mm de espessura. Ataque: Nital (1%), 100 X

A figura acima²³² apresenta nódulos do tipo I, em matriz ferrítico-perfítica com 40% de perfitita.

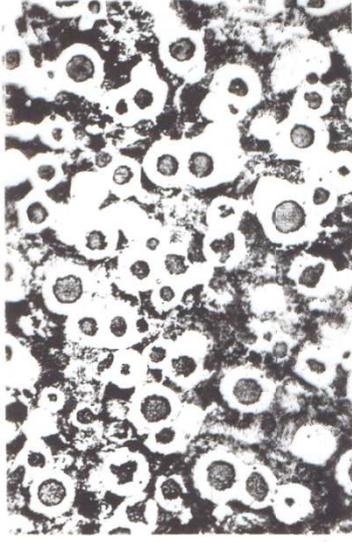


FIGURA 97 – Ferro fundido nodular, corpo-de-prova de 25 mm de espessura. Ataque: Nital (1%), 100 X

Nota-se, nesta figura²³², a presença de nódulos do tipo I, em matriz perfítico-ferrítica com 55% de perfitita.

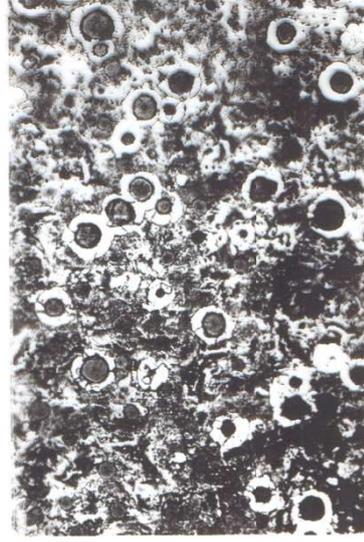
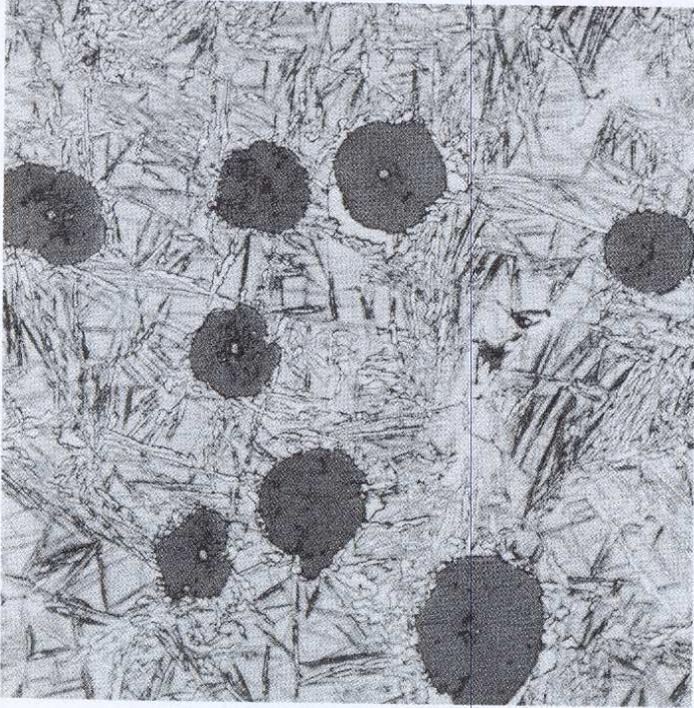


FIGURA 98 – Ferro fundido nodular, corpo-de-prova de 25 mm de espessura. Ataque: Nital (1%), 100 X

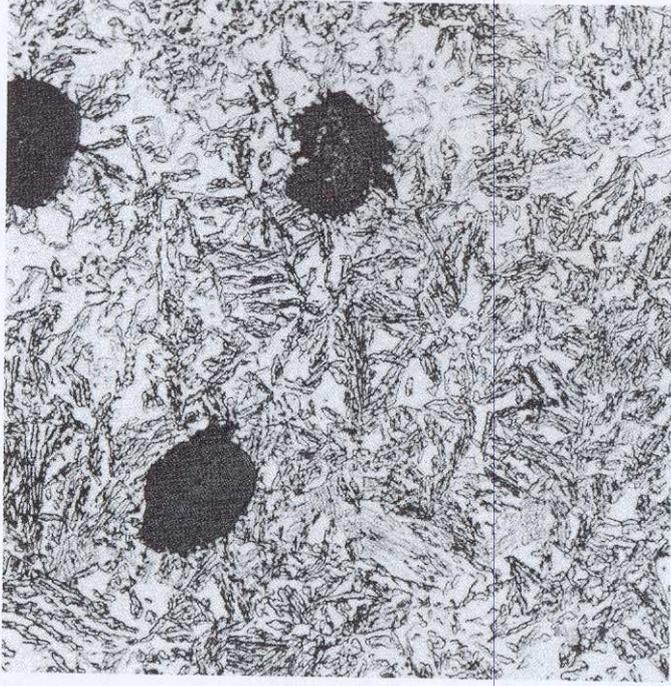
Verifica-se, nesta figura²³², nódulos do tipo I, em matriz perfítico-ferrítica com 80% de perfitita. Esta estrutura é comumente denominada "olho de boi".



500X

4% *Picral*

Acicular Ductile Iron. As Cast. 3.30% C, 2.97% Si, 0.42% Mn, 1.03% Mo, 1.32% Cu. Microstructure consists of graphite nodules and ferrite islands (white) in a matrix of coarse martensite needles and retained austenite (light gray).



500X

2% *Nital*

Austempered (isothermally transformed) Ductile Iron. Austenitized at 1650F (900C) and transformed at 705F (374C) for 128 minutes. 3.39% C, 2.45% Si, 0.32% Mn, 0.62% Ni, 0.50% Mo. Microstructure consists of graphite nodules in a matrix of bainitic ferrite (acicular) and retained austenite.

FERRO FUNDIDO CINZENTO

MICROESTRUTURA

- $2,5 \leq \%C \leq 4,0$; $1,0 \leq \%Si \leq 3,0$
- Baixa veloc. resfriamento => Carb. solidifica em forma de grafita (flocos) – forma estável
- A matriz é ferrítica (veloc. baixa) ou perlítica (veloc. moderada)
- Flocos de grafita atuam como entalhes, baixando a tenacidade e a resistência

APLICAÇÕES

- Ferro fundido mais usado (75%)
- Blocos de motores, disco de freio, volantes de motor, etc.
- Engrenagens de grandes dimensões
- Máquinas agrícolas
- Carcaças e suportes de máquinas
- Tubulações

PROPRIEDADES

- Elevada fluidez => peças complicadas
- Boa usinabilidade (flocos)
- Grande resist. ao desgaste (grafita)
- Excelente amortecedor de vibrações
- Bom à comp., mau à tração (frágil)
- Soldabilidade difícil
- Baixo custo (mais barato)

TRATAMENTOS TÉRMICOS

- Recozimentos para alívio de tensões (taxas de resf. diferentes) ou para facilitar a usinagem (obtendo matriz ferrítica)
- Têmpera e revenido, para obtenção de martensita (maior dureza)
- Tratamentos térmicos atuam apenas na matriz => obtenção de grafita em lamelas é irreversível

FERRO FUNDIDO CINZENTO

NOMENCLATURA

- Não se faz pela composição química, mas sim pela resistência
- ASTM A48 Classe 20, 30, ...
- A Classe determina a resistência à tração mínima, em 1000 psi

Classe	Resist. mínima tração (psi)	(MPa)
20	20 000	138
25	25 000	172
30	30 000	207
35	35 000	241
40	40 000	276
45	45 000	310
50	50 000	344
55	55 000	380
60	60 000	414

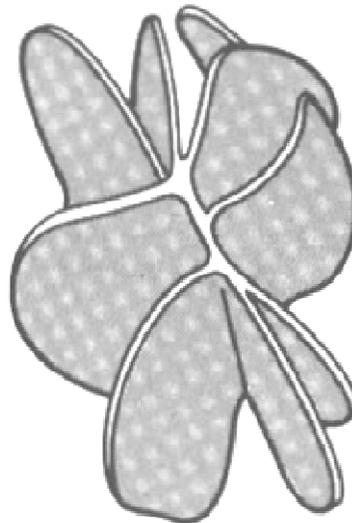
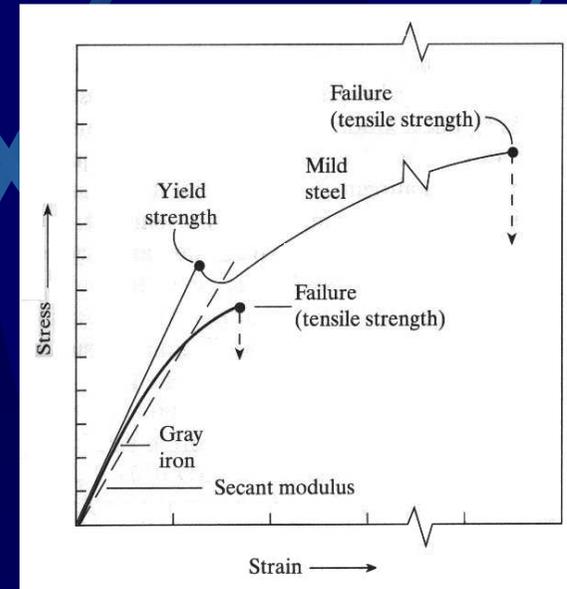




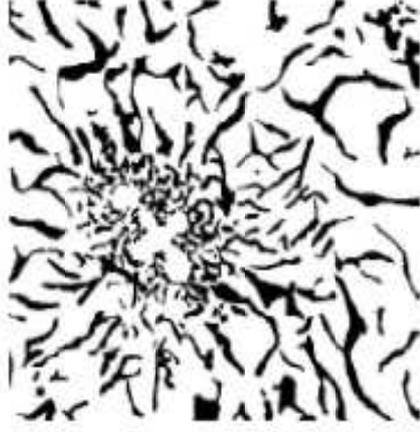
Fig. (9) - Colônia de grafita (3)

➤ **Classificação dos Veios de Grafita**

- **Tipo A**
- **Tipo B**
- **Tipo C**
- **Tipo D**
- **Tipo E**



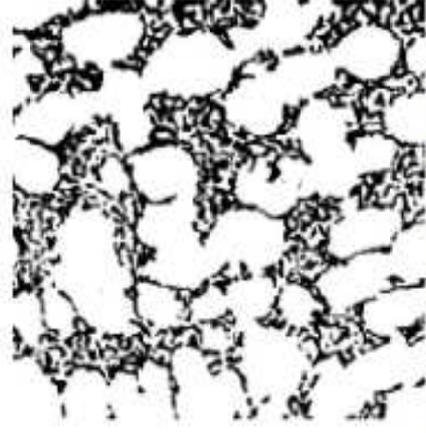
A – irregular desorientada



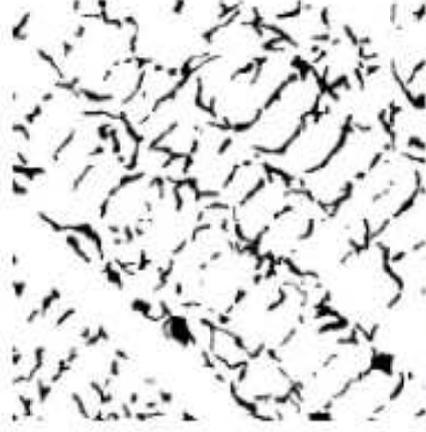
B – em roseta



C – desigual irregular



D – interdendrítica desorientada



E – interdendrítica orientada

FoFo cinzento

Dureza em função da matriz



DUREZA (HB)
140 – 170

Predominantemente
ferrítico



DUREZA (HB)
163 – 217

Perlítico /ferrítico
(predominantemente perlítico, até
20% de ferrita)



DUREZA (HB)
197 - 269

Perlítico (até 10% de
ferrita)

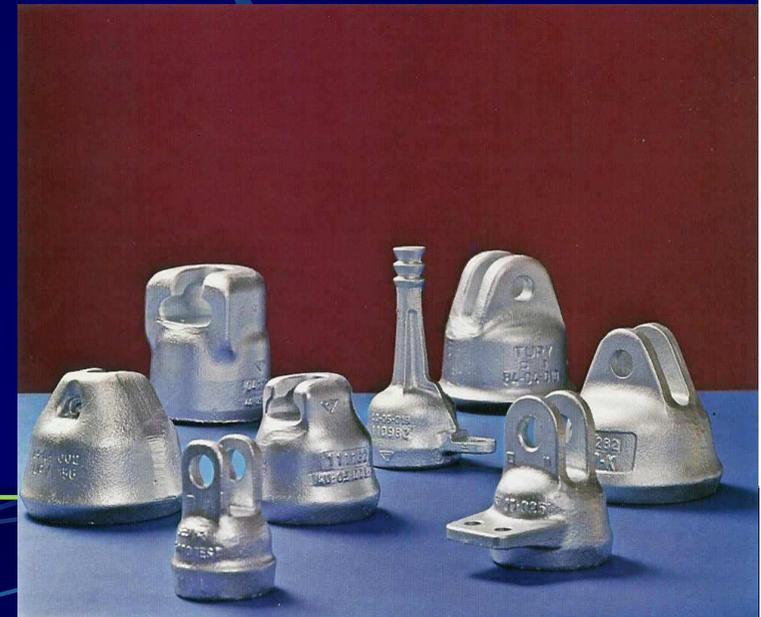
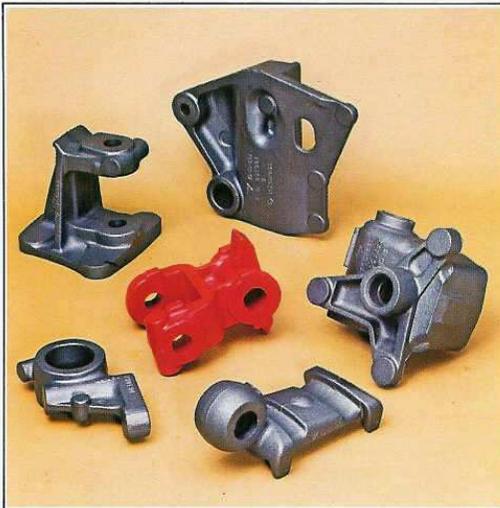
FERRO FUNDIDO DÚCTIL (ou nodular, ou esferoidal)

APLICAÇÕES

- Desenvolvimento iniciado em 1948
- Engrenagens e pinhões
- Virabrequins
- Juntas universais
- Máquinas de trabalho pesado
- Válvulas
- Componentes sujeitos a desgaste e impacto em geral
- Ferragens para setor elétrico

PROPRIEDADES

- Alta resistência, tenacidade e ductilidade
- Possibilidade de deformação a quente
- Grande resistência ao desgaste
- Fluidez boa
- Baixo custo (superior ao ff cinzento)



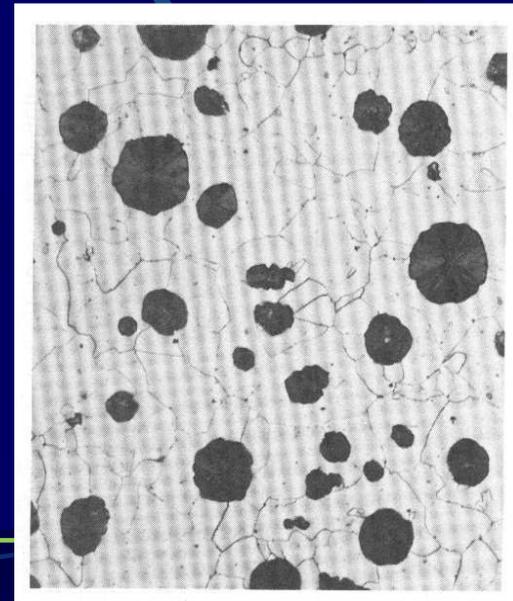
FERRO FUNDIDO DÚCTIL

NOMENCLATURA

- Faz-se pela ASTM A536, em 5 classes:
 - Classe 5 (60-40-18)
 - Classe 4 (65-45-12)
 - Classe 3 (80-55-06)
 - Classe 2 (100-70-03)
 - Classe 1 (120-90-02)
- Os números entre parênteses significam:
 - 1º - resistência mínima à tração, em 1000psi
 - 2º - tensão de escoamento mínima à tração, 1000psi
 - 3º - alongamento após ruptura em tração

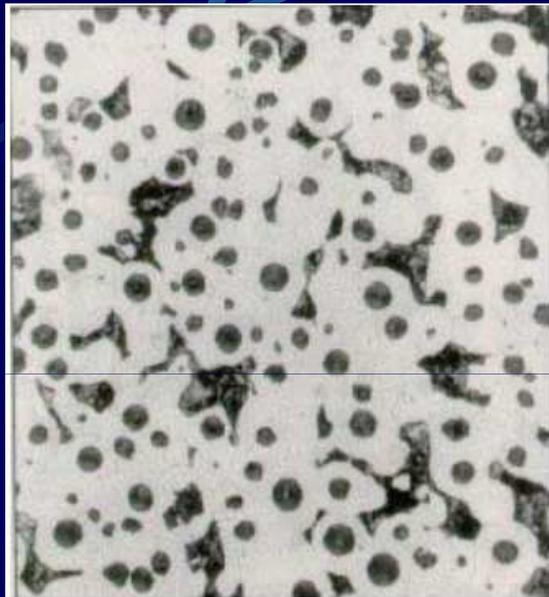
MICROESTRUTURA

- $3,5 \leq \%C \leq 4,0$; $1,8 \leq \%Si \leq 3,0$
- Pequenas adições de Mg e Ce
- Em vez de flocos formam-se nódulos de grafita
- A matriz é ferrítica (veloc. baixa) ou perlítica (veloc. moderada)
- Grafita em nódulos origina maior resistência, ductilidade e tenacidade



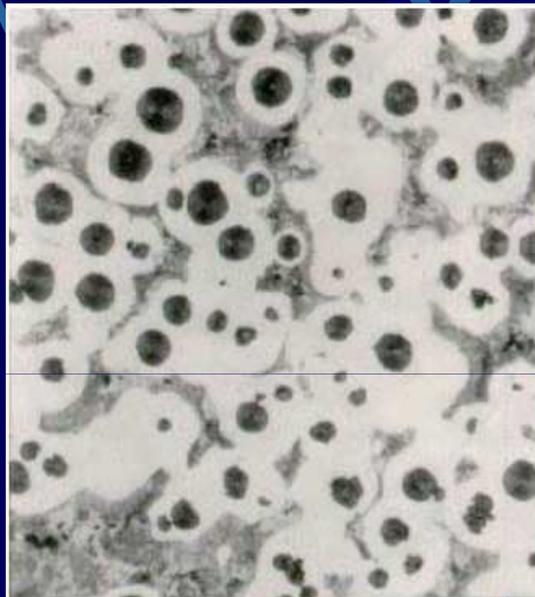
FoFo. nodular/dúctil/esferoidal

Dureza em função da matriz



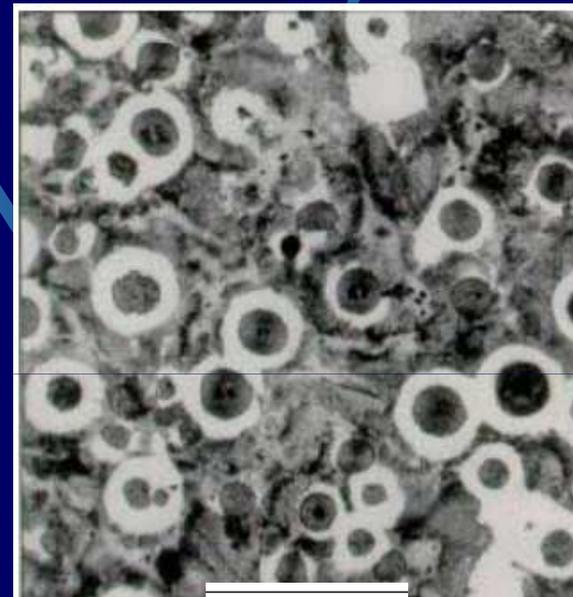
DUREZA (HB)
160 – 207

Nodular Ferrítico/Perlítico
(Predominantemente ferrítico)



DUREZA (HB)
217 – 269

Nodular perlítico/ ferrítico
(50%-50%)



DUREZA (HB)
241 – 302

Nodular perlítico
(predominantemente)

➤ Matriz Ferrítica → LR: 380-450 MPa e Al: 10 a 22%

➤ Matriz Perlítica → LR: Até 700 MPa e Al: 2%

FERRO FUNDIDO BRANCO

MICROESTRUTURA

- $2,0 \leq \%C \leq 3,5$; $0,5 \leq \%Si \leq 1,0$; $0,5\%Mn$
- Alta veloc. resfriamento \Rightarrow Carb. solidifica sob a forma de cementita
- A extrema dureza e fragilidade da cementita caracterizam este ferro fundido.
- Em peças de maior tamanho pode obter-se ff branco à superfície e ff cinzento no núcleo

TRATAMENTOS TÉRMICOS

- O único tratamento térmico que pode ser feito é o tratamento para obtenção do ferro fundido maleável

PROPRIEDADES

- Grande resistência ao desgaste (cementita)
- Extremamente frágil
- Não pode ser usinado
- Soldagem praticamente impossível

APLICAÇÕES

- Principal aplicação é a produção de ferro fundido maleável
- Peças sujeitas a elevada compressão e atrito
- Esferas de moinhos e rolos de laminadores



Ferro Fundido Branco Eutético



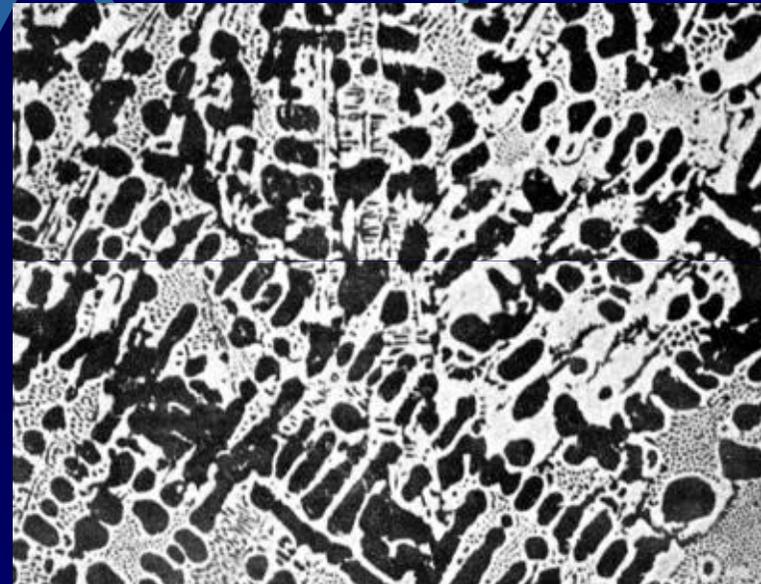
Ferro Fundido Branco Hipoeutético



Ferro Fundido Branco Hipereutético

FoFo. Branco

- Solidific < 1 wt% Si ou coquilhado
- a conforme diagrama Fe-C metaestável (Fe_3C)
- O que esperar de suas propriedades mecânicas?
- Duro e frágil (+ cementita)
- Excelente resistência ao desgaste
- Não pode ser usinado ou soldado
- Difícil prevenir FF Branco em peças de espessuras finas
- Algumas aplicações: Moinhos, martelos, usinas de carvão, moagem de minérios.



FoFo branco
Hipoeutético

FERRO MALEÁVEL

MICROESTRUTURA

- % elementos constituintes idênticas ao ferro fundido branco
- Obtido do ff branco por tratamento térmico de maleabilização
- A microestrutura obtida resulta da decomposição da cementita em “nódulos” de grafita, uma matriz de ferrita, perlita ou martensita

PROPRIEDADES

- Variando a taxa de resfriamento, pode obter-se um amplo espectro de propriedades
- Boa usinabilidade
- Propriedades similares ao ff dúctil
- Alta resistência, tenacidade e ductilidade

APLICAÇÕES

- Aplicação similares ao ff dúctil
- Peças sujeitas a alta temperatura
- Elementos de ligação (conexões)
- Juntas universais
- Pequenas ferramentas



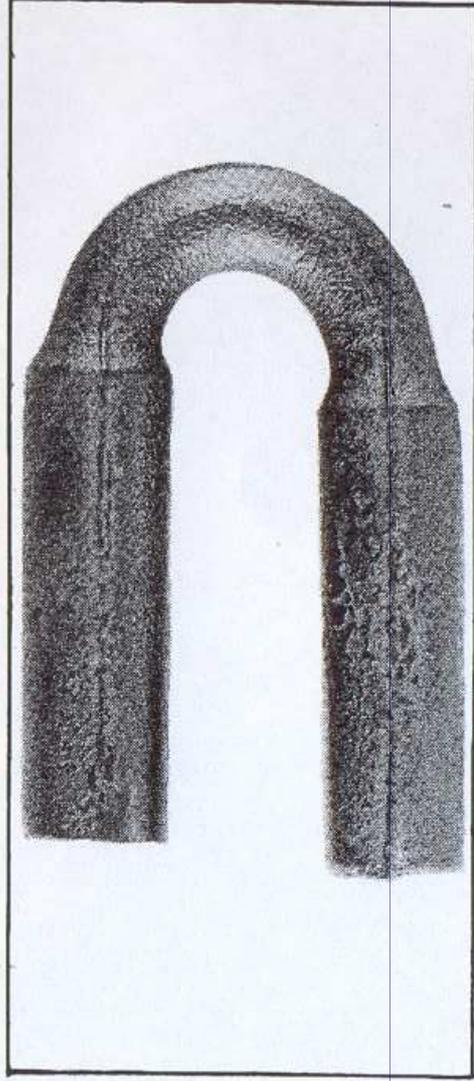
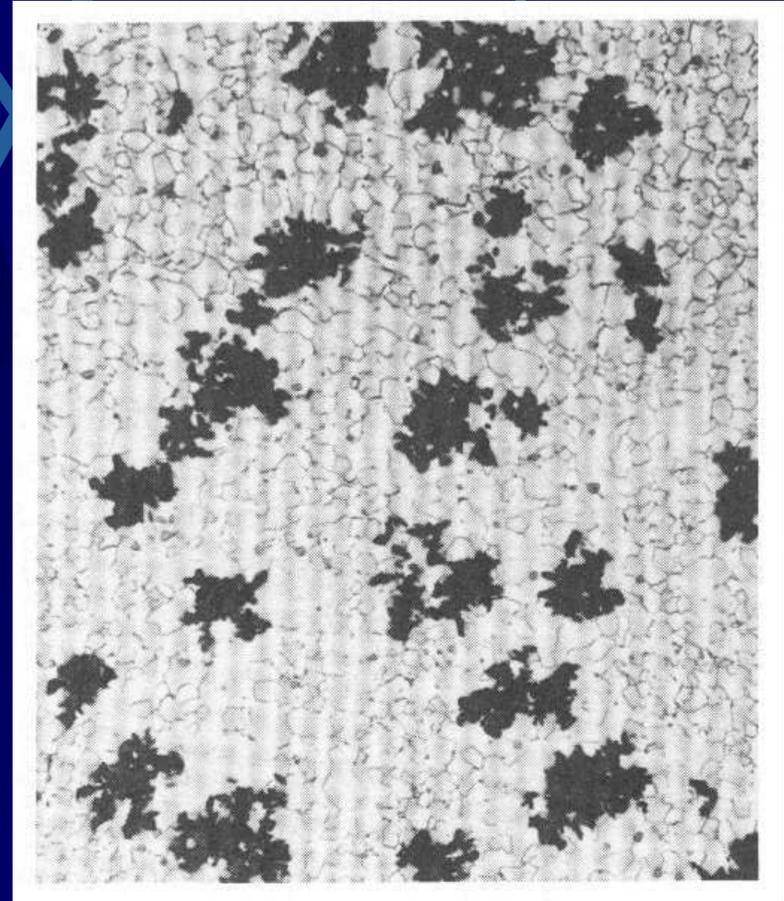


Fig. 24 - Ensaio de dobramento a 180°, de um corpo-de-prova padrão de FMB, não apresentando trinca ou fratura.

FERRO FUNDIDO MALEÁVEL

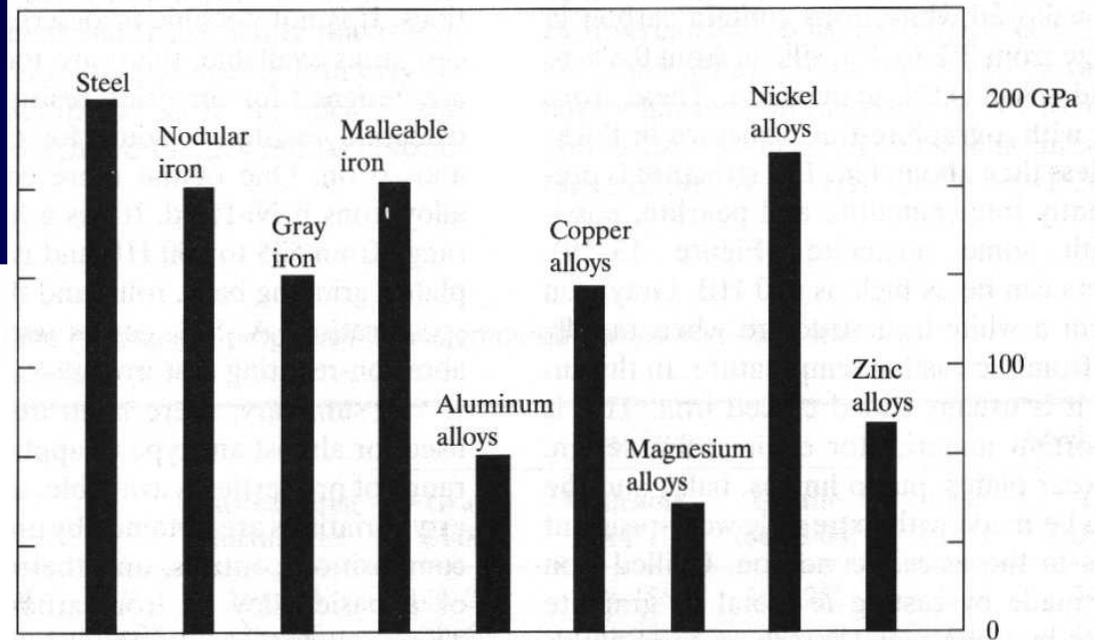
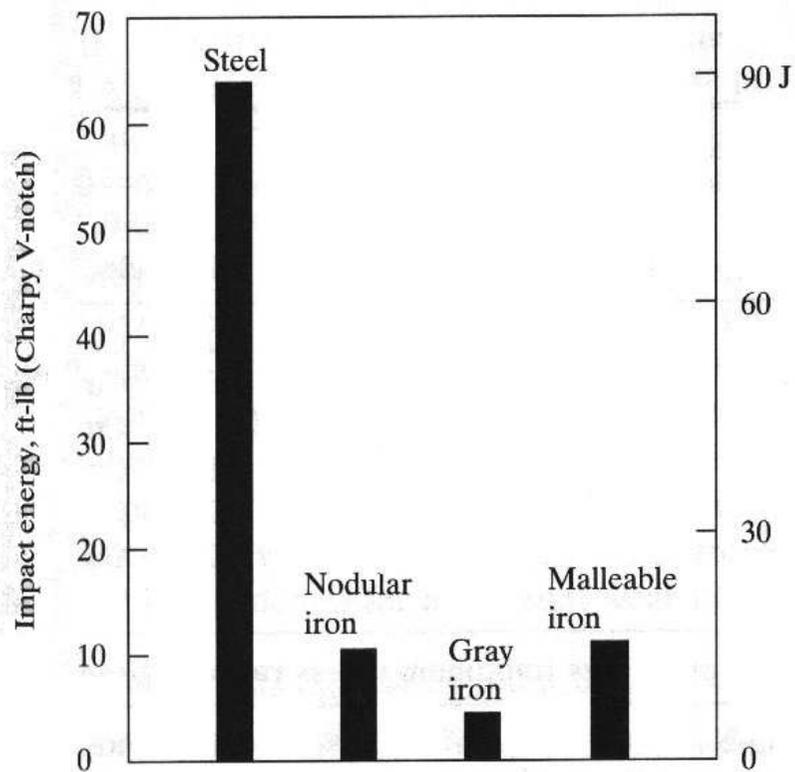
NOMENCLATURA

- Faz-se pela ASTM A47, com 5 dígitos, correspondentes à tensão de escoamento e alongamento
- Exemplo: ASTM A47 Classe 32510 (ferro fundido maleável com tensão de escoamento mínima em tração de 32,5ksi e alongamento de 10%)
- Exemplo: ASTM A47 Classe 35018 (idem de 35,0ksi e alongamento de 18%)



FERRO FUNDIDO MALEÁVEL

Resistência ao impacto

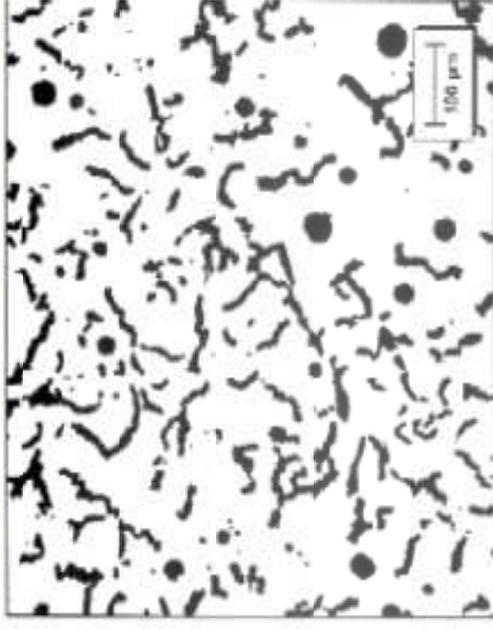


Módulo de Elasticidade - GPa

Metalurgia dos Ferros Fundidos Vermiculares

Os Ferros Vermiculares (ou de Grafita Compacta) possuem a Grafita intermediária entre os ferros Cinzentos e Nodulares. Desta forma, as propriedades são também intermediárias entre os dois anteriores.

Desenvolvimento de motores Diesel de alto desempenho (mais eficientes e menos poluentes) indicam necessidade de altas pressões e temperaturas de trabalho, podendo levar os materiais normais (Cinzento) a falhas prematuras.

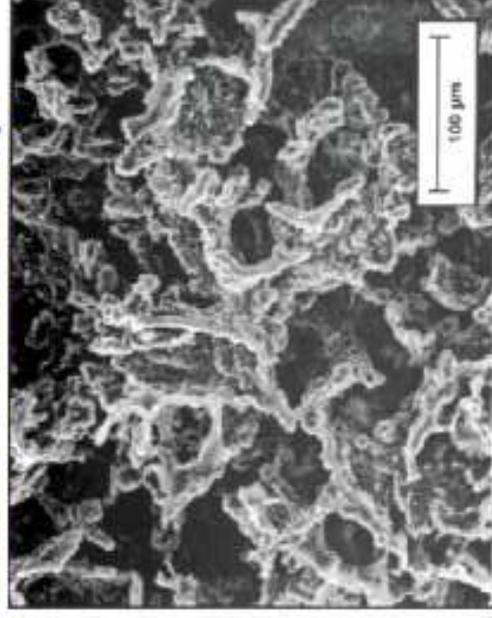
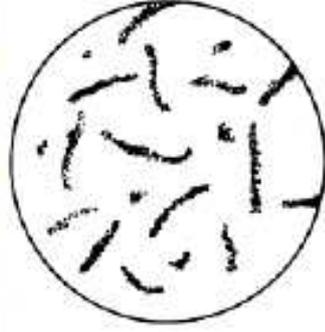


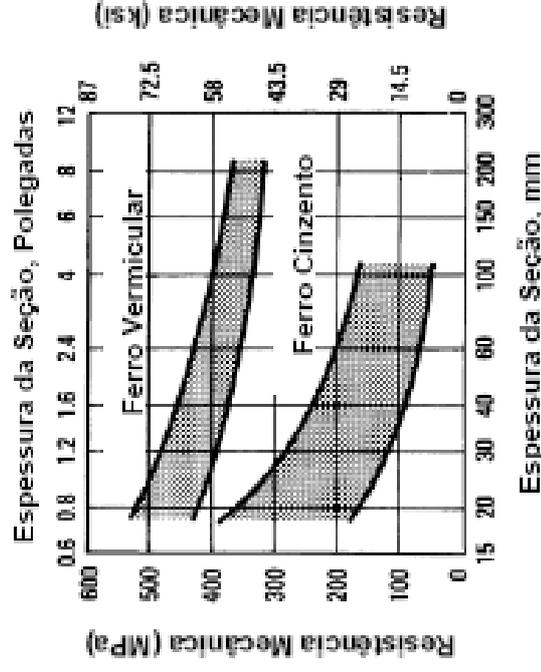
Ferro de Grafita Compacta ou Vermicular.

Metalurgia dos Ferros Fundidos Vermiculares

1- Composição Química

A escolha da composição do ferro fundido está baseada nos mesmos aspectos apresentados para Cinzentos e Nodulares, entretanto, para a obtenção dos ferros Vermiculares é necessário combinar a adição de elementos Esferoidizantes (Magnésio, Cálcio e Terras Raras) com elementos Degeneradores da Grafita (Titânio e Alumínio).





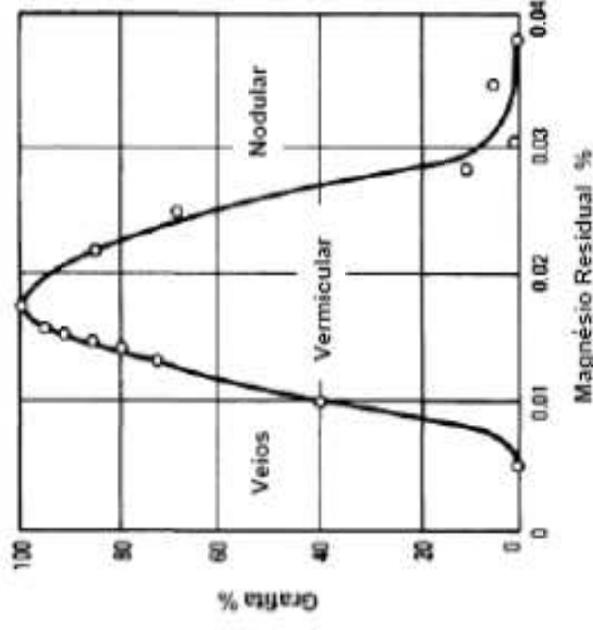
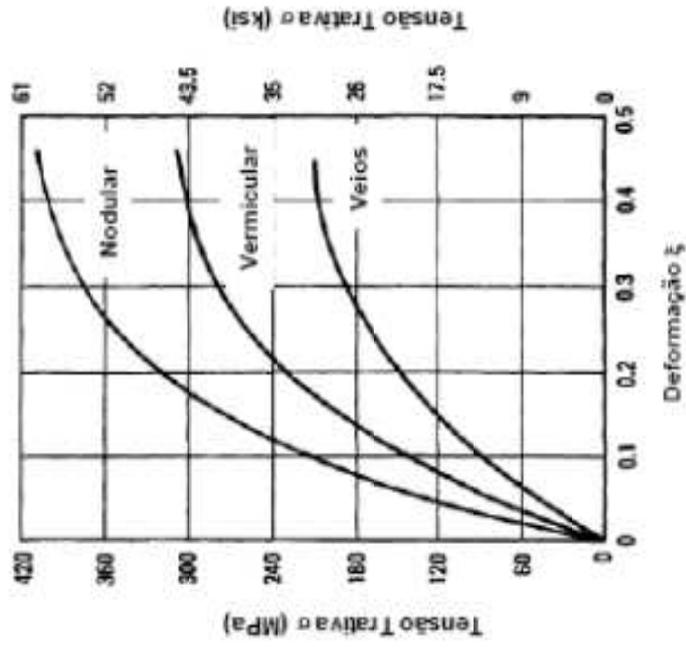
Aplicações

- Peças para Motores Diesel, Carcaças de Caixas de Câmbio, Eixos Excêntricos, Rodas Dentadas, Blocos de Motor, Moldes de Ligoteiras, Coletores de Escapamento e Exaustores.

Características:

- Alta resistência,
- Tenacidade e Ductilidade superior aos Cinzentos
- Boa Usinabilidade
- Alta Resistência ao Desgaste
- Melhor resistência à Fadiga (em relação aos Cinzentos)

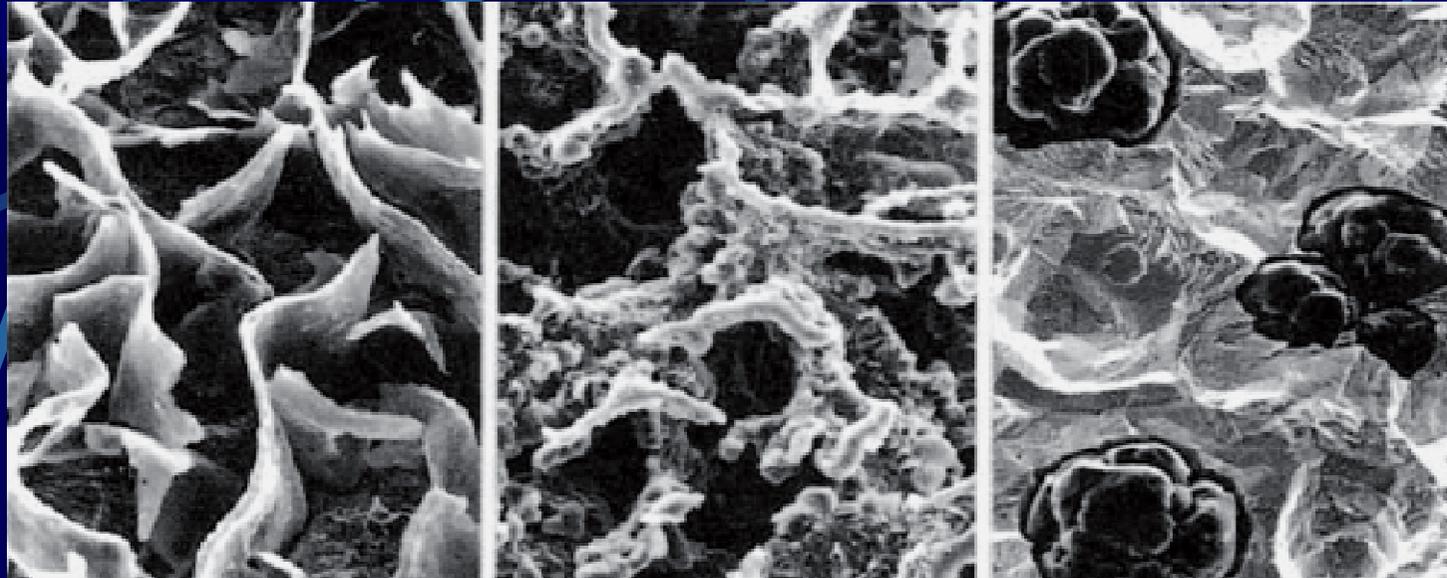
Comparação entre Ferros Fundidos



Cinzento

Vermicular

Nodular



Propriedade	Cinzento	Vermicular	Nodular
LR	55	100	155
E	75	100	110
AI	0	100	200
Dureza	85	100	115
Condutividade térmica	130	100	75
Amortecimento de vibrações	285	100	65

Metalurgia dos Ferros Fundidos Especiais

São ferros fundidos que apresentam mudanças drásticas na microestrutura pela adição de elevado teor de elementos de liga. A diferenciada Resistência ao Desgaste ABRASIVO é obtida pela formação de Carbonetos de elevada dureza associados algumas vezes a estruturas Martensíticas. À seguir algumas composições:

- Adições de 3,0 a 5,0% de Níquel e 1,5 – 2,5% de Cromo podem resultar em Carbonetos $(Fe,Cr)_3C$ e estruturas mertensíticas diretamente de fundição.
- Adições de 11,0 – 13,0% de Cromo podem resultar em Carbonetos $(Cr,Fe)_7C_3$ de maior dureza em relação aos carbonetos tipo Cementita. Adições de 4,0 – 16,0% de Manganês resultam na formação de $(Fe,Mn)_3C$, Martensita e Austenita Endurecível por Deformação.

Metalurgia dos Ferros Fundidos Especiais

- Ferros Especiais Ligados para Alta Temperatura (Resistência a Quente) são produzidos com diversas possibilidades:

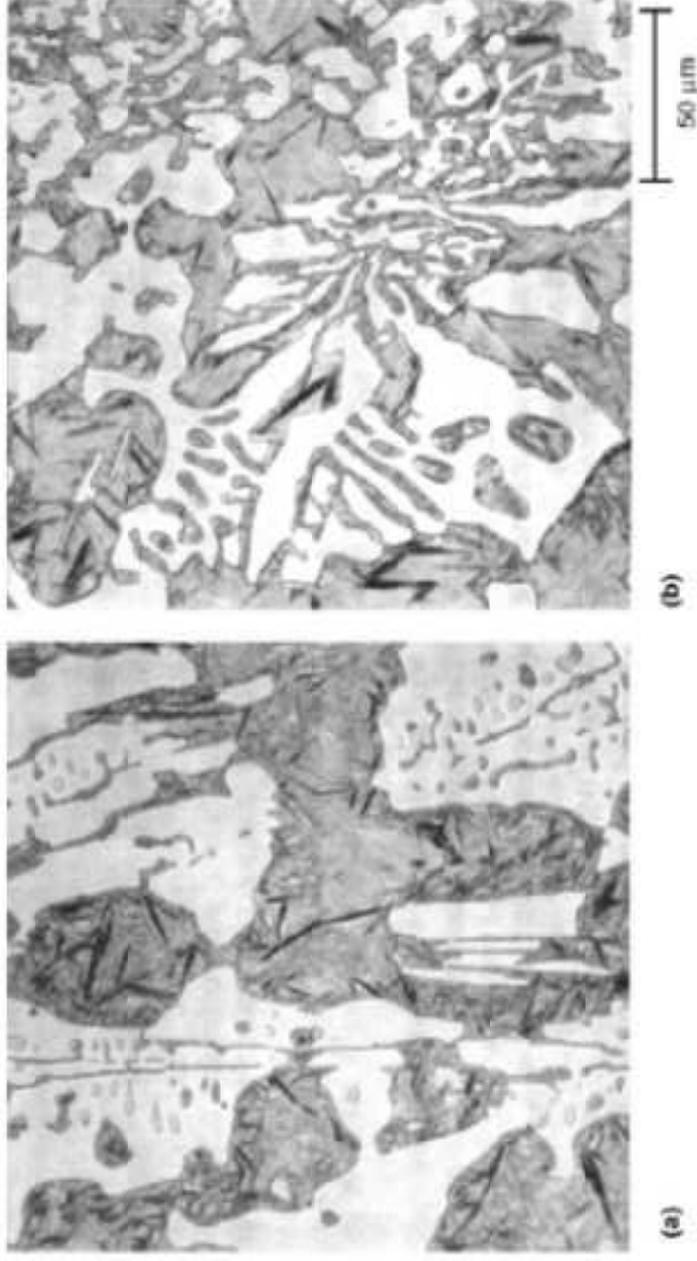
Adições de 5,0% de Silício geram estruturas com **Ferrita e Grafita**,

Adições de 11 – 28% de Cromo pode gerar estrutura com **Ferrita e Carbonetos**

Adições de 18% de Níquel e 5% de Silício resultam em estrutura com **Austenita e Grafita Esferoidal ou em Veios**.

- Ferros Especiais Ligados Resistentes à Corrosão: São produzidos a partir de ligas com elevados teores de elementos de liga, como: Cromo > 28%, Níquel > 18% e Silício > 15%.

Metalurgia dos Ferros Fundidos Especiais

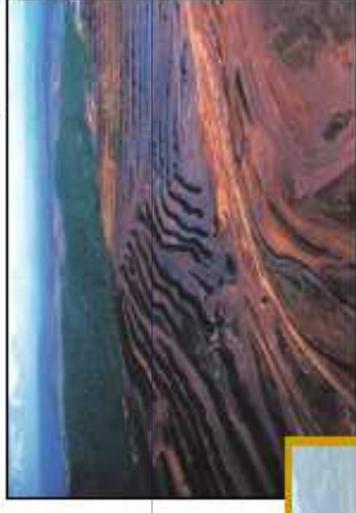


- (a) Ferro fundido Cromo-Niquel Resistente ao Desgaste Abrasivo (Cr: 1,1 – 4%)
- (b) Ferro fundido Cromo-Niquel Resistente ao Desgaste Abrasivo (Cr: 7,0 – 11,0%)

Ferros Fundidos Especiais

Aplicações

- Mineração (brocas para escavação)
- Moedores e Britadores
- Termoelétricas (moagem de carvão mineral)



- Características:

- Alta Resistência ao Desgaste Abrasivo
- Fluidez (fundibilidade)
- Elevada Resistência à Corrosão
- Estabilidade em Alta Temperatura...



FERROS FUNDIDOS

Comparative properties of ferrous castings

Material	Tensile ^a strength, ksi	Yield strength, ksi	Compressive ^a strength, ksi	Percent elongation %	Modulus ^b of elasticity, 10 ⁶ psi	HB ^c	Minimum ^d casting section, in. (mm)	Characteristics
Gray iron—ASTM A 48								
Class 20	20	—	95	Nil	12	175	0.125 (3.1)	Good for thin sections and low-strength castings
Class 35	35	—	135	Nil	16	200	0.187 (4.7)	For structural parts, pumps, pipes, bases, etc.
Class 40	40	—	135	Nil	18	210	0.250 (6.3)	For medium-strength castings; can be hardened
Ductile iron—ASTM A 536								
Grade 5 60-45-18	60	45	120	18	25	175	0.187 (4.7)	Excellent mechanical properties; can tolerate bending
Grade 3 80-55-06	80	60	160	6	25	235	0.187 (4.7)	High strength, some ductility; hardenable
Malleable iron								
ASTM A 47-77 Grade 32510	50	32	208	10	26	125	0.125 (3.1)	Ferritic, free from casting strains
ASTM A 220-76 Grade 60004	80	60	240	3	26	225	0.125 (3.1)	Pearlitic, free from casting strains; hardenable
White iron								
ASTM A 532 Grade A, Nitr-HiC	45	—	—	Nil	25	550	0.250 (6.3)	Extreme abrasion resistance; grinding balls, slurry pumps, etc.
Steel castings								
ASTM A 27 Grade 60-30	60	30	50	24	30	156	0.250 (6.3)	For high stiffness, shock loading, and for welded fabrications

^a1 ksi = 6.89 MPa. ^b1 psi = 6.89 kPa. ^cBrinell hardness. ^dIncreases for large castings.