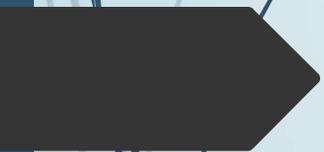


SMM 0193 – Engenharia e Ciência de Materiais

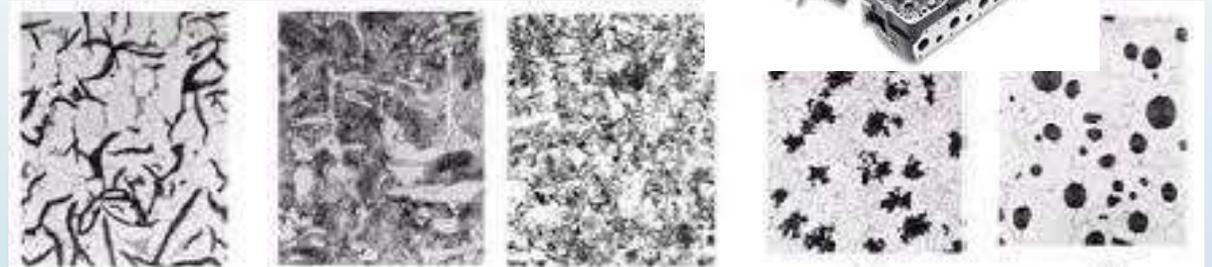


Prof. Dr. Marcelo Paes

► Programa da disciplina

- Apresentação da disciplina.
- Estrutura dos Materiais, Sólidos Cristalinos, Imperfeições Cristalinas, Difusão, Grãos, Microestrutura.
- Diagramas de Fase: Construção e Aplicação.
- Propriedades Mecânicas, Ensaio de Dureza e Ensaio de Impacto.
- Propriedades Mecânicas, Ensaio de Tração/Compressão, Fluência e Fadiga.
- **Ferros Fundidos: Classificação e Propriedades.**
- Trabalho a quente e a Frio: Recristalização/Recuperação, Conformação.
- Diagramas TTT: construção, aplicação, fatores de influência.
- Tratamentos térmicos.
- Temperabilidade: Ensaio Jominy, curva em U, diâmetro crítico.
- Aços especiais, Corrosão e Proteção
- Tratamentos termoquímicos e desgaste.
- Solubilização e precipitação.

Ferros Fundidos



Ferros Fundidos

CONSIDERAÇÕES INICIAIS/PREMISSAS



- DESAFIO: fazer a escolha do correto FoFo para determinada aplicação, devido sua complexidade.
- OBJETIVOS: ao final desta aula você será capaz de:
 - Relacionar microestrutura e fases com propriedades mecânicas;
 - Identificação de FoFos através da microestrutura.

Ferros Fundidos

Por que estudar?

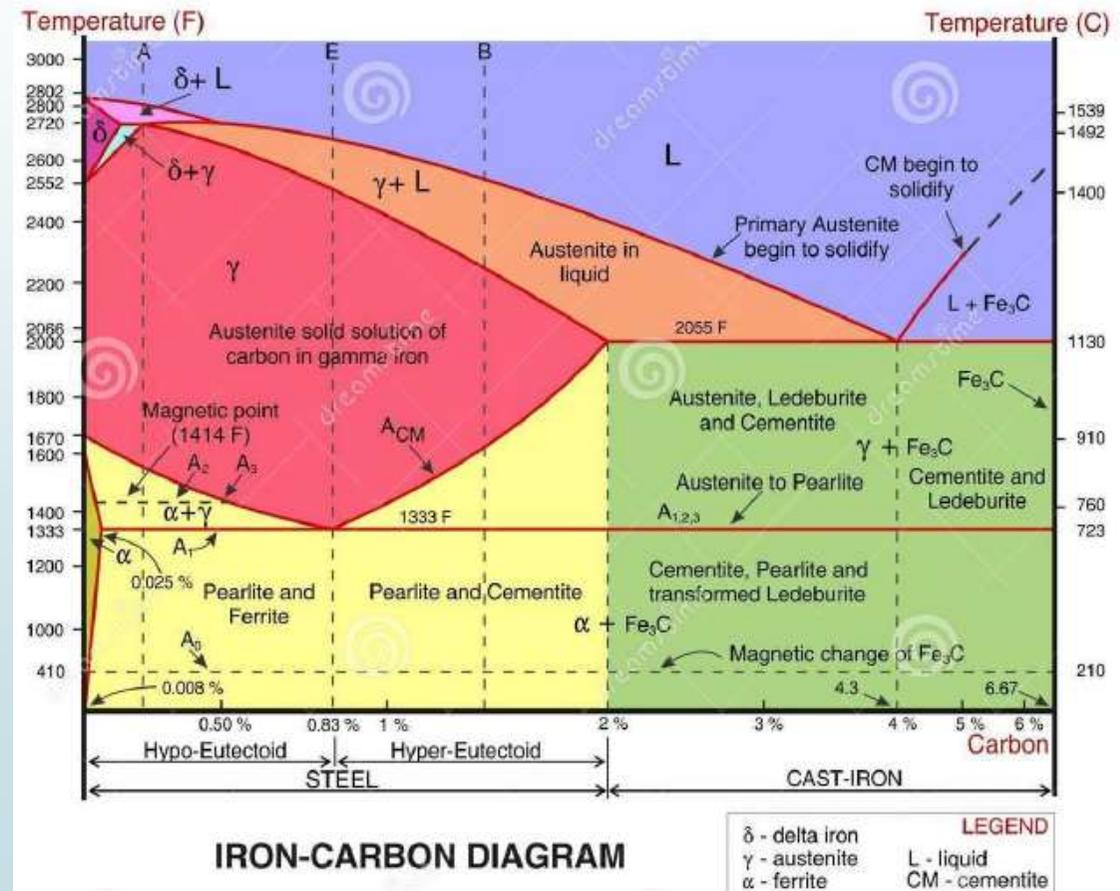


- Elevada resistência ao desgaste e à abrasão;
- Amortecimento de vibrações;
- Componentes de grandes dimensões;
- Peças de geometria complicada;
- Peças nas quais a deformação a frio é inadmissível.

Ferros Fundidos

Conceitos

- Termo usado para as ligas Fe-C nas quais o conteúdo de carbono excede o seu limite de solubilidade na austenita na Temp. eutética;
- Contém no mínimo 2% de carbono, mais silício entre 1% e 3% e enxofre, podendo ou não haver outros elementos de liga;
- Sua composição os torna excelente para fundição;
- A utilização dos FoFos em peças fundidas é superior a de qualquer outro metal.



Ferros Fundidos

Classificação

- Extensa gama de resistências mecânicas e de durezas, sendo, na maioria dos casos, de fácil usinagem;
- Podem apresentar excelente resistência ao desgaste, à abrasão e à corrosão. A resistência ao impacto e a ductilidade são relativamente baixas;

Vantagens:

- Elevada dureza e resistência ao desgaste;
- Boa resistência à corrosão;
- Baixo custo.

- De acordo com a composição química e microestrutura, os ferros fundidos podem ser classificados em:

Branco – Superfície de fratura branca.

Cinzento - Superfície de fratura cinza.

Maleável – um pouco mais dúctil que os outros.

Nodular – o mais dúctil.

Desvantagens:

- Grande fragilidade e baixa ductilidade;
- Pouca deformação plástica em T.amb.;
- Baixa soldabilidade.

Ferros Fundidos

Composição Química

Aços carbono: Si 0,15 a 0,35

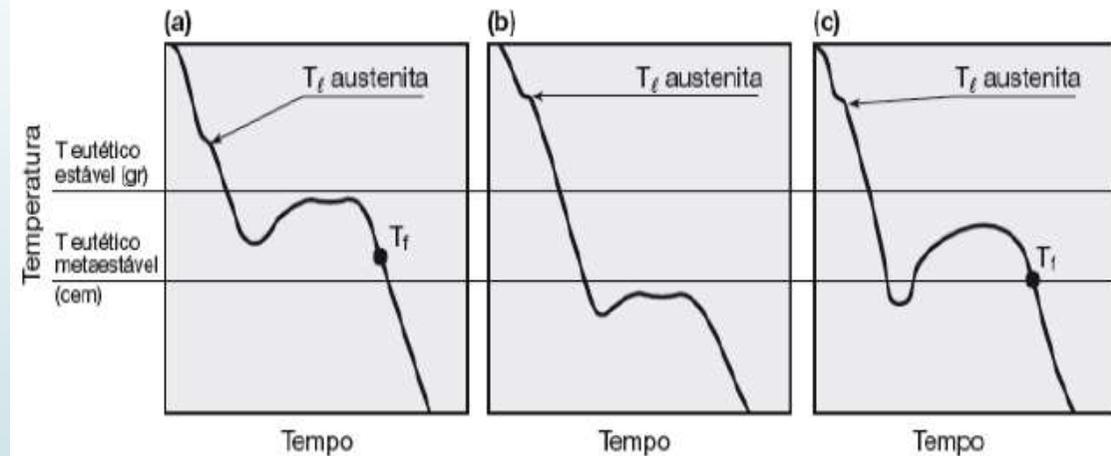
	C	Si	Mn	S	P
Cinzento	2,5-4,0	1,0-3,0	0,25-1,0	0,02-0,25	0,05-1,0
Branco	1,8-3,6	0,5-1,8	0,25-0,80	0,06-0,20	0,06-0,18
Maleável	2,0-2,6	1,1-1,6	0,20-1,0	0,04-0,18	0,18 máx.
Nodular	3,0-4,0	1,8-2,8	0,10-1,0	0,03 máx.	0,10 máx.

Mg ou Ce

Efeito do Si:

Reduz a estabilidade da cementita, favorecendo a formação de grafita.

Curvas Resfriamento



Formas de obtenção dos FoFos:

- (a) Ferro fundido cinzento (Resf. lento)
- (b) Ferro fundido branco (Resf. rápido)
- (c) Ferro fundido maleável

Ferros Fundidos

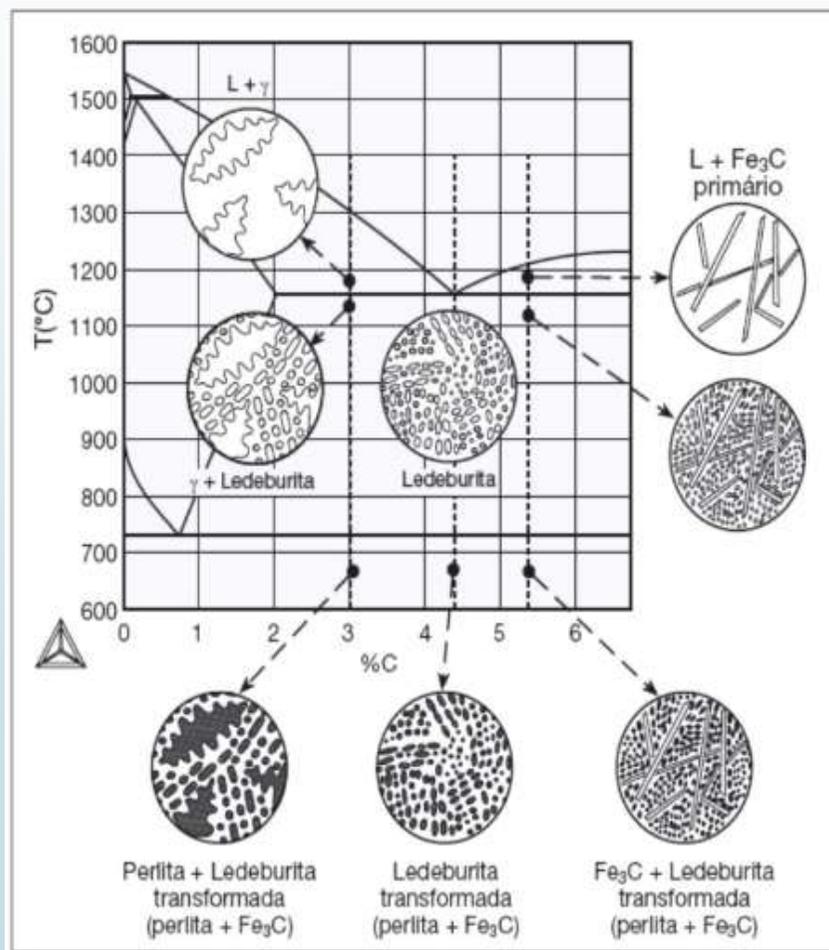
Ferro Fundido Branco

Propriedades:

- Elevada resistência à compressão e desgaste;
- Elevada dureza e fragilidade;
- Baixa usinabilidade;
- Baixa soldabilidade;
- Baixo custo

Aplicações:

- Base de máquinas;
- Conexões de tubulações;
- Sapata de freios;
- Matéria prima para fabricação de FoFo maleável.



Ponto Eutético: 4,3%C

Exemplos:

Hipoeutético: 3%C

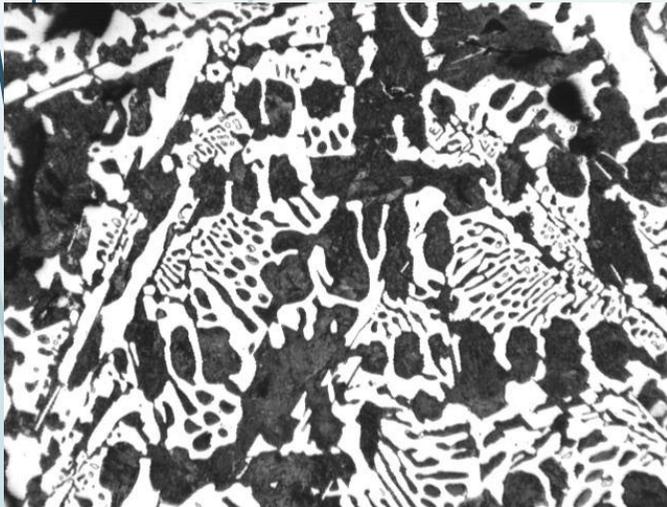
Hipereutético: 5,4%C

Superfície de fratura: cor branca

Ferros Fundidos

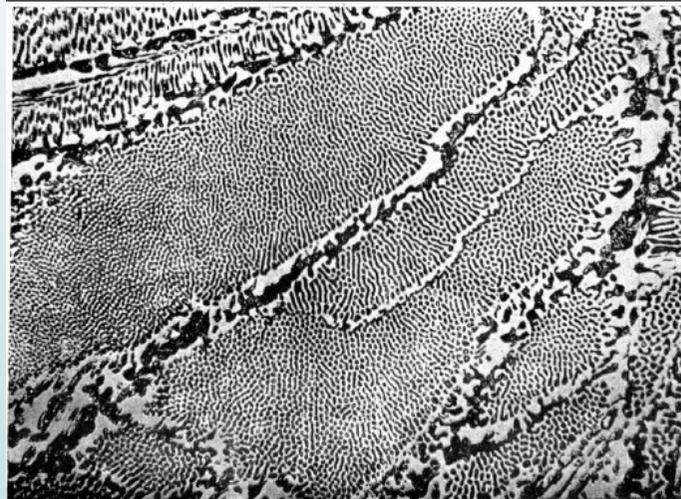
Ferro Fundido Branco

Hipoeutético



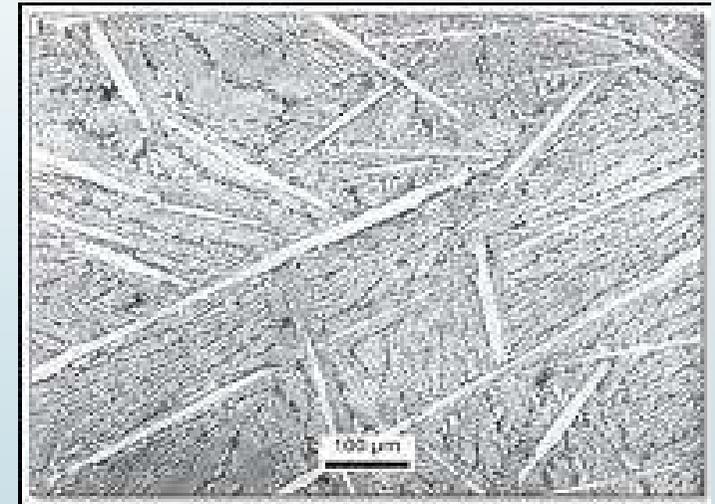
Perlita (Escuro)
Ledeburita (Claro/Escuro)

Eutético



100% Ledeburita
Glóbulos perlita (Escuro)
Matriz de cementita (Claro)

Hipereutético



Ledeburita transf. (Claro/Escuro)
Cementita Placas (Claro)

Ferros Fundidos

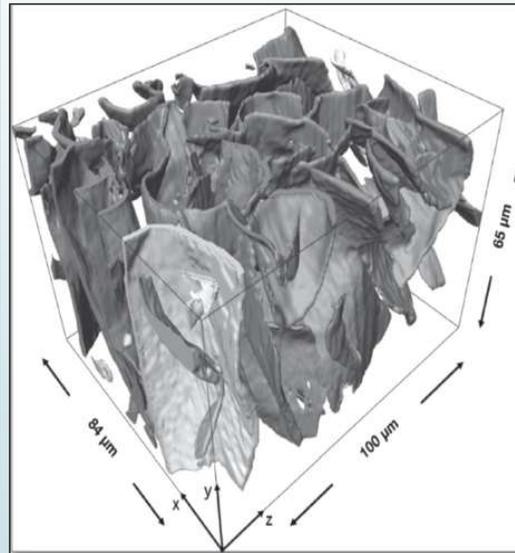
Ferro Fundido Cinzento

Propriedades

- Elevada fluidez na fundição (peças complexas);
- Elevada dureza e resistência à compressão e desgaste;
- Boa usinabilidade;
- Baixa soldabilidade;
- Baixa resistência à tração;
- Excelente absorção de vibrações;
- Baixo custo

Aplicações

- Bloco de motor;
- Tubulações;
- Barramento de torno;
- Base de máquinas;
- Engrenagens de grandes dimensões.



A. Velichko, F. Mucklich



ftp.demec.ufpr.br

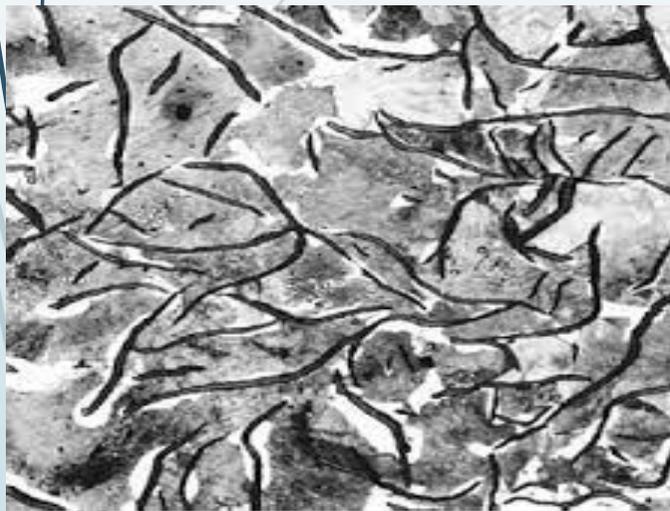
Ponto Eutético: 4%C

Superfície de fratura: cor cinza

Ferros Fundidos

Ferro Fundido Cinzento

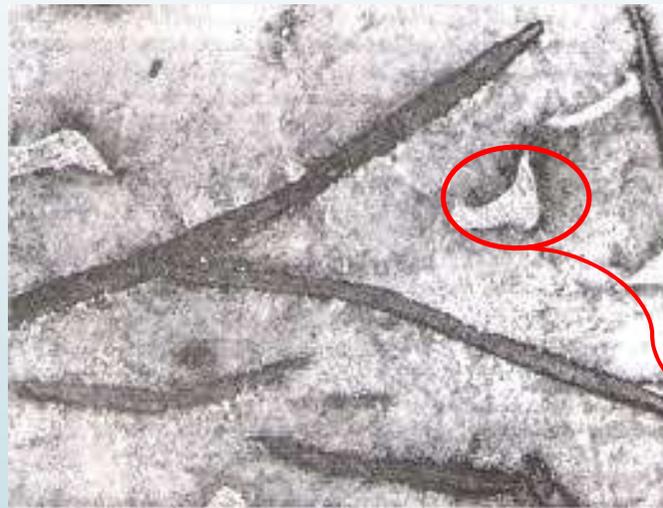
Hipoeutético



Perfilville

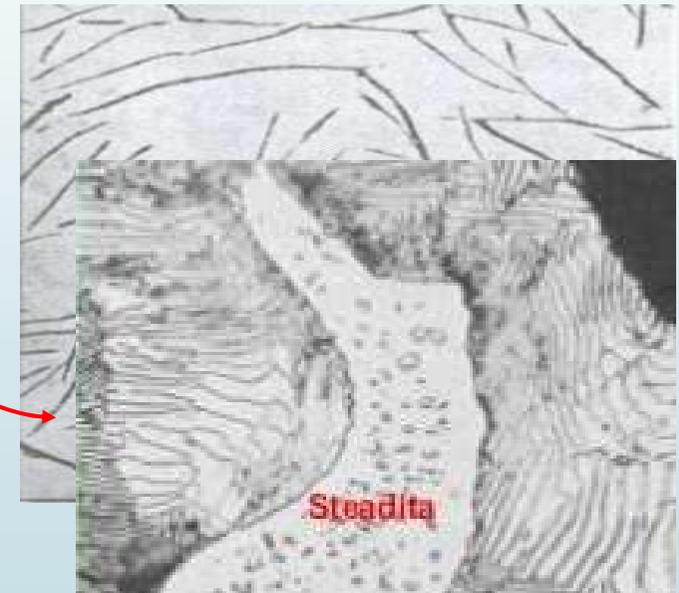
Veios de grafita (Escuro)
Ferrita (Claro)
Perlita (Claro/Escuro)

Eutético



Veios de grafita (Escuro)
Steadita (Claro) Rica em P.
Perlita (Claro/Escuro)

Hipereutético



Veios de grafita retilíneos (Escuro)
Perlita (Claro/Escuro)

Ferros Fundidos

Ferro Fundido Cinzento

Classificação dos Ferros Fundidos

As lamelas de grafita :

- Diversas formas e tamanhos, Fatores: velocidade de resfriamento e composição química.
- Velocidades altas veios finos e velocidades baixas, veios grossos
- Norma ASTM A 247

ASTM A 247 Standard Test Method for

Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings



ASTM A 48 class	Resistência à tração		Resistência à torção		Resistência à compressão		Limite de fadiga em dobramento		dureza (HB)
	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi	
20	152	22	179	26	572	83	69	10	156
25	179	26	220	32	669	97	79	11.5	174
30	214	31	276	40	752	109	97	14	210
35	252	36.5	334	48.5	855	124	110	16	212
40	293	42.5	393	57	965	140	128	18.5	235
50	362	52.5	503	73	1130	164	148	21.5	262
60	431	62.5	610	88.5	1293	187.5	169	24.5	302

Ferros Fundidos

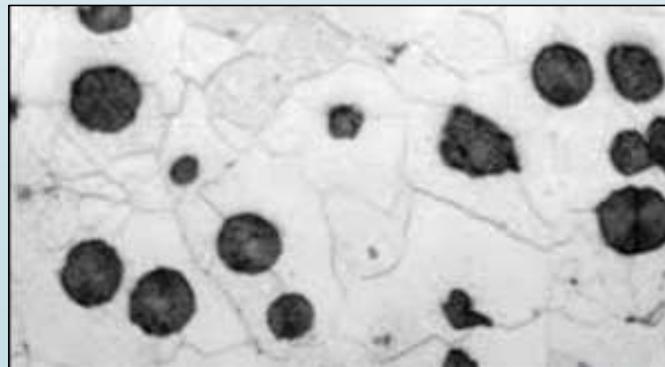
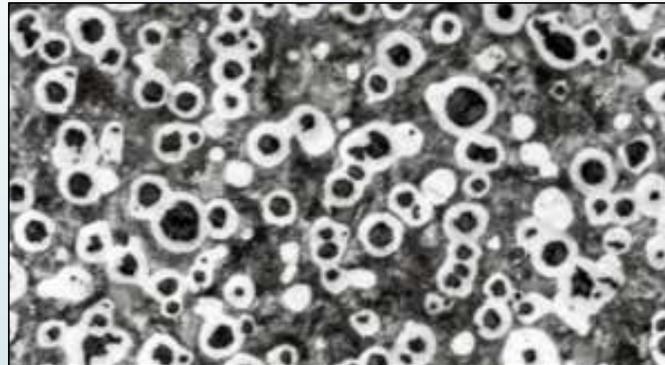
Ferro Fundido Nodular

Propriedades

- Boa combinação de resistência, tenacidade e ductilidade;
- Boa resistência ao impacto;
- Boa resistência ao desgaste;
- Boa usinabilidade;
- Boa soldabilidade.

Aplicações

- Engrenagens;
- Peças automotivas;
- Peças ferroviárias;
- Válvulas.



- As **boas propriedades** devem-se à presença de **nódulos esféricos de grafita**,

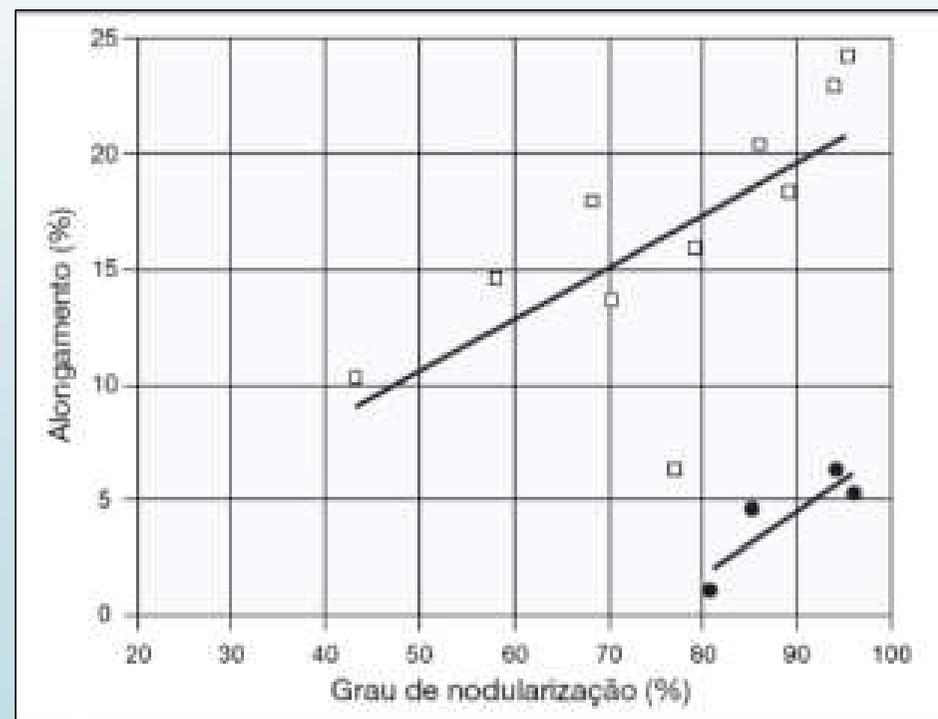
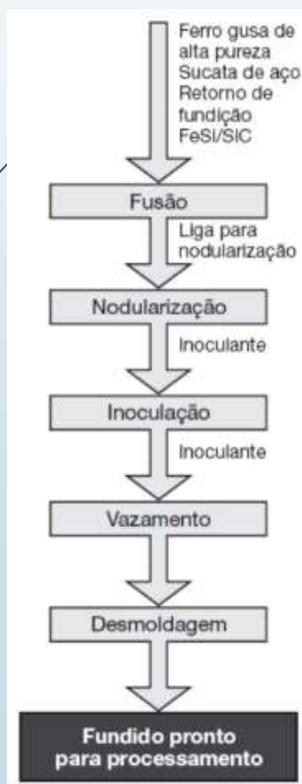
-Nódulos esféricos de grafita envoltos por ferrita numa matriz de perlita ou ferrita.

- Obtenção: Através da adição **de magnésio e/ou cério** na fundição

Ferros Fundidos

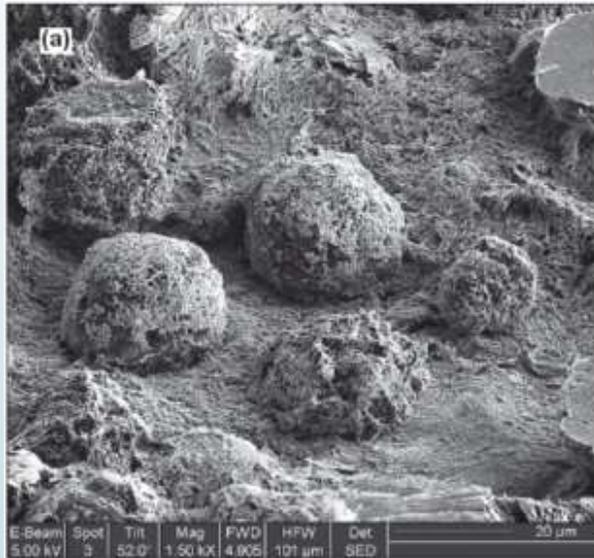
Ferro Fundido Nodular

Obtenção de FoFo Nodular em forno Cubilô

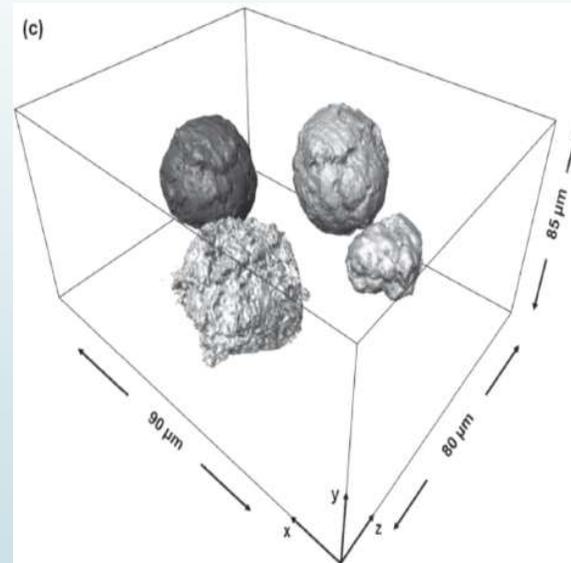


Ferros Fundidos

Ferro Fundido Nodular



A. Velichko, F. Mucklich



Ferros Fundidos

Ferro Fundido Maleável

Obtidos a partir do ferro fundido branco, em tratamento térmico de grafitização (aprox. 940 °C):

Carbonetos de ferro (Fe_3C) transformam se em grafita

A matriz depende da velocidade de resfriamento após o tempo de encharque para a grafitização:

- Fofo Maleável Ferrítico resfriamento rápido até 740 °C, seguido de resfriamento lento.
- Fofo Maleável Perlítico resfriamento lento até 870 °C seguido de resfriamento ao ar.
- Fofo Maleável Martensítico Revenido resfriamento em forno até a temperatura de 845°C mantendo-se 15 a 30 minutos para homogeneização resfriando em banho de óleo agitado para obtenção de uma matriz martensítica, com posterior revenimento.

PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

Maleável branco ou de núcleo branco (Europeu)

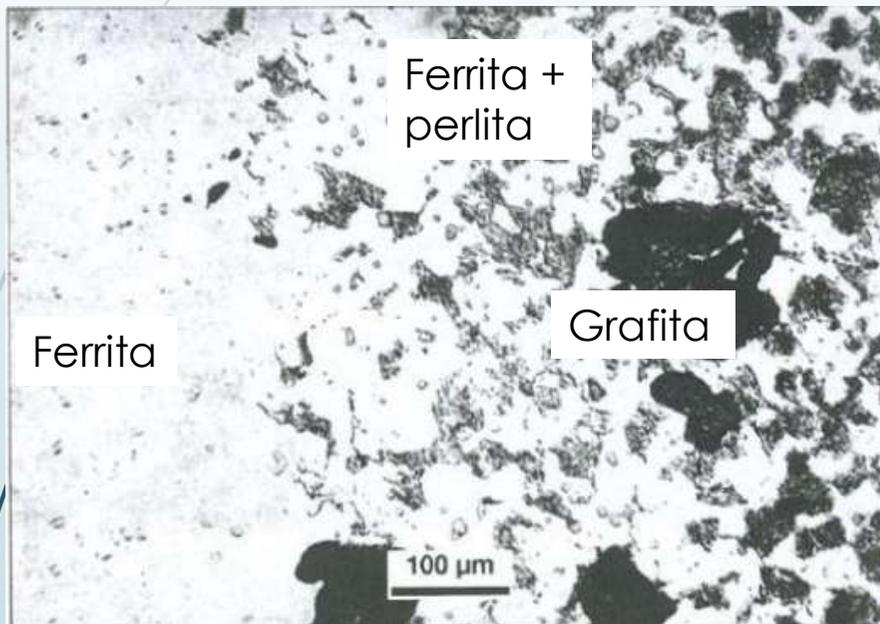
- Parte do FoFo branco descarbonetação por tratamento térmico/recozimento.
- Fratura com núcleo claro.

Maleável preto ou de núcleo preto (Americano)

- Parte do FoFo branco tratamento térmico para decomposição da cementita em grafita.
- Fratura com núcleo escuro.

Ferros Fundidos

Ferro Fundido Maleável



Colpaert, H

Maleável de núcleo branco (Europeu)



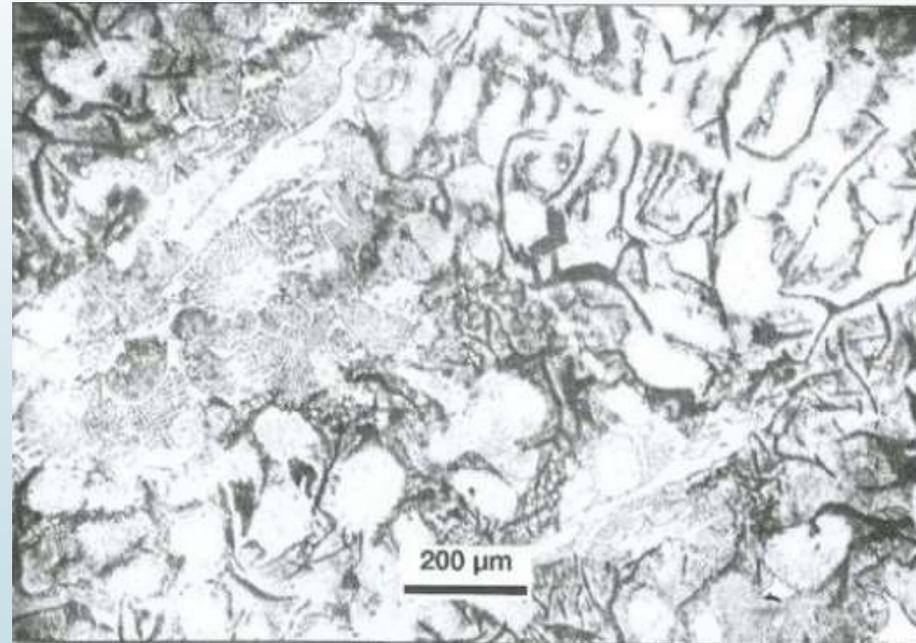
CEFET-MG

Maleável de núcleo preto (Americano)

Ferros Fundidos

Ferro Fundido Mesclado

- Molde de material com alta condutividade térmica;
- Estrutura mesclada entre FoFo Branco e Cinzento (Ledeburita + veios grafita);
- Apresenta propriedades balanceadas como alta resistência ao desgaste e boa tenacidade.

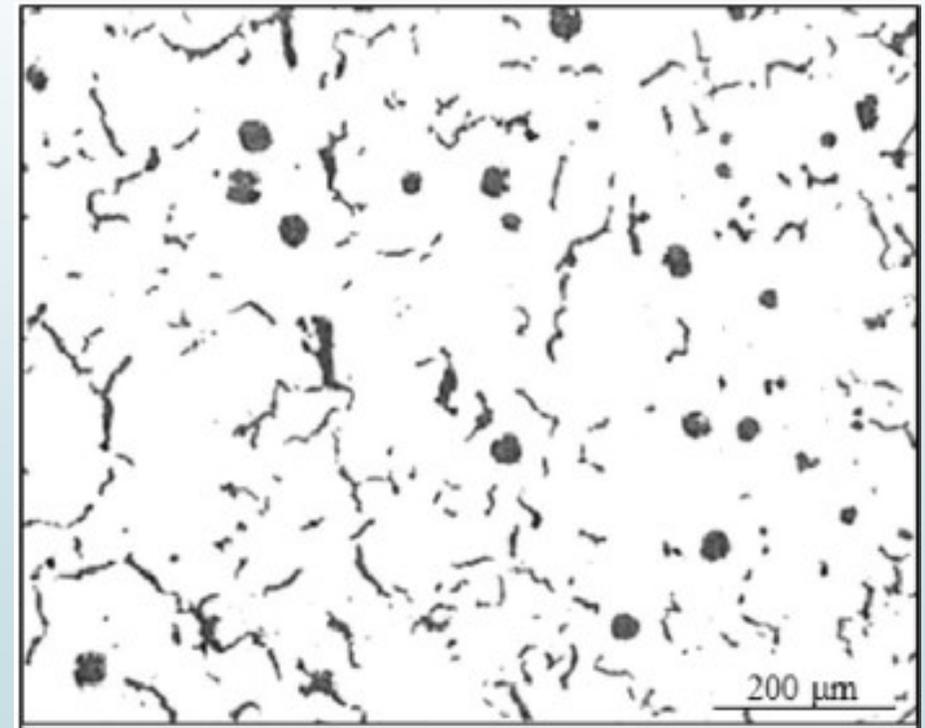


Colpaert, H.

Ferros Fundidos

Ferro Fundido Vermicular

- Estrutura em forma de grafita intermediária entre veios e nódulos, conhecida geralmente por vermicular;
- Limite de resistência à tração entre 30 e 60 kgf/mm², alongamento de 1 a 9% e dureza de 150 a 250 HB;
- Processo de obtenção com inoculantes. Ex: adição de magnésio (ligas Fe Si Mg) em teores inferiores ao necessário para a formação de nódulos de grafita porém suficientemente altos para evitar a formação de veios.



Grafita entre nodular e veios

Ferros Fundidos

Ferros Fundidos-Influência de Elementos de Liga

A adição de elementos de liga:

- aumenta a resistência mecânica, tanto no estado bruto de fusão como após tratamento térmico;
- Aumenta da quantidade de perlita na estrutura;
- Diminui o espaçamento interlamelar (obtenção de perlita mais fina)
- No caso do silício há um endurecimento da ferrita por solução sólida.

•Níquel atua como grafitizante ;

•Cobre é um grafitizante e promove a formação de perlita. Aumenta resistência mecânica pelo endurecimento da ferrita por solução sólida e pela perlita;

•Estanho possui um comportamento perlitizante muito acentuado o que aumenta resistência mecânica ;

•Molibdênio gera aumento de resistência aos ferros fundidos nodulares diminuindo a ductilidade.

•Vanádio e cromo são fortes formadores de carbonetos São utilizados quando se necessita alta resistência à temperatura.

Ferros Fundidos

Tratamentos Térmicos dos Ferros Fundidos

Alívio de Tensões

Objetivo:

Alívio de tensões residuais de processo, causadas por mudanças de volume, forma geométrica e outros.

-O “alívio de tensões” ou “ das peças de ferro fundido foi durante muito tempo, executado de forma natural;

-O alívio de tensões consiste no aquecimento das peças em forno e temperatura entre 550 ° e 650 °C entre 1 e 48 horas, dependendo do objetivo e aplicação da peça, seguido de resfriamento lento dentro do próprio forno.

Recozimento

Objetivo:

Melhorar a usinabilidade dos ferros fundidos, reduzir a dureza das zonas coquilhadas (resfriamento mais rápido);

- Recozimento completo ou pleno 780 °C a 900 °C para ferros fundidos com alto teor de elementos de liga para eliminação de carbonetos;

- Recozimento de ferritização 700 °C e 760 °C transformação dos carbonetos perlíticos em ferrita e grafita, para melhorar a usinabilidade;

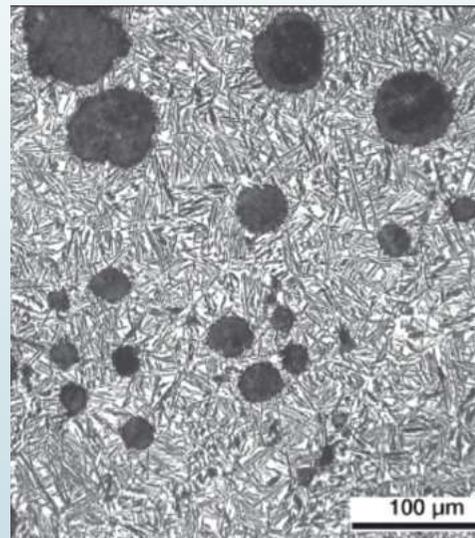
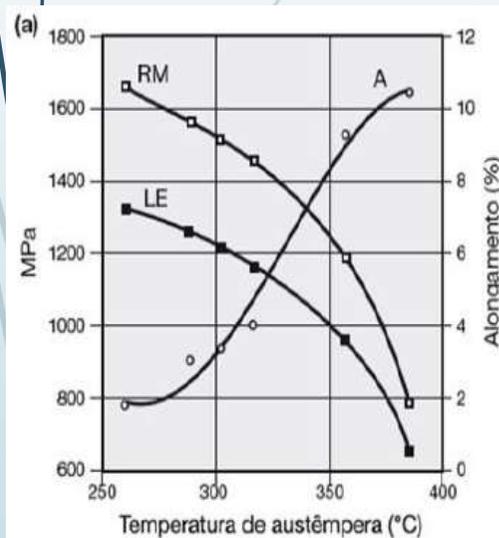
- Recozimento grafitizante 900 °C a 950 °C geralmente para ferros fundidos brancos ou mesclados (carbonetos são transformado em grafita).

Ferros Fundidos

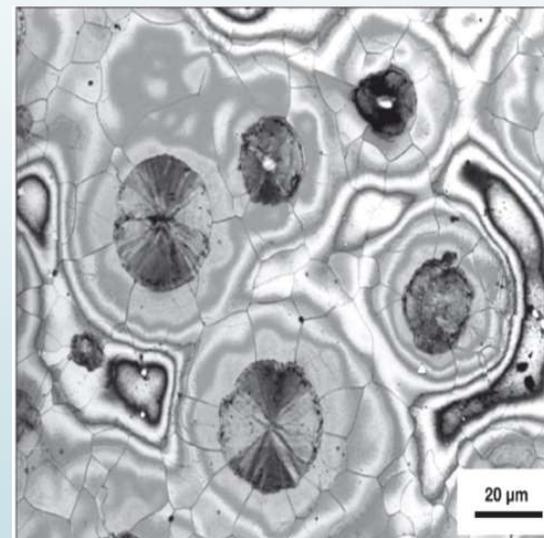
Tratamentos Térmicos dos Ferros Fundidos

Austempera FoFo Nodular

Recozimento FoFo Nodular



FoFo Nodular
austemperado:
Matriz de bainita.



Segregação de Si:
Teor reduz com a distância
ao nódulo

Ferros Fundidos

FoFo CINZENTO:

- GRAFITA EM VEIOS;
- FRÁGIL SOB TENSÃO TRATIVA;
- RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO;
- RESISTÊNCIA AO DESGASTE;
- EXCELENTE ABSORÇÃO DE VIBRAÇÕES;

FoFo DÚCTIL OU NODULAR:

- ADIÇÃO DE Mg OU Ce NO FoFo CINZENTO;
- GRAFITA EM NÓDULOS;
- MATRIZ PERLITICA—MELHOR DUCTILIDADE;

FoFo MALEÁVEL:

- MODIFICAÇÃO DO FoFo BRANCO ATRAVÉS DE TRATAMENTO TÉRMICO;
- MAIOR DUTILIDADE QUE O BRANCO;
- GRAFITA EM NÓDULOS DIFUSOS.

FoFo BRANCO:

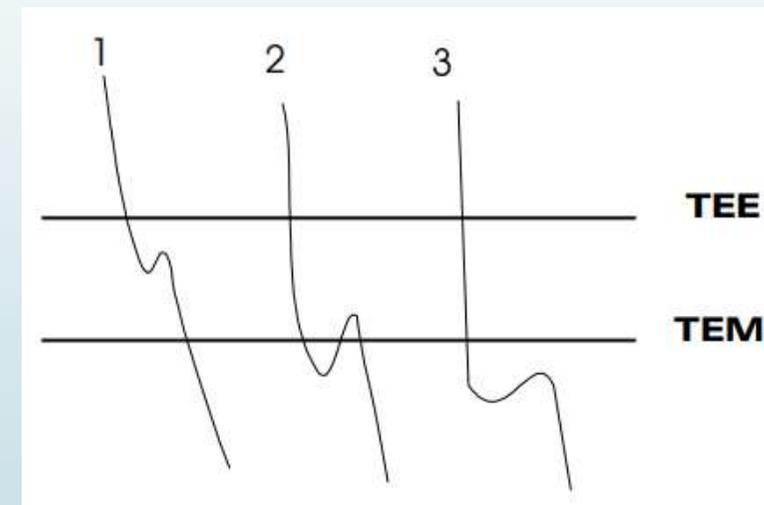
- DURO E FRÁGIL;
- EXCELENTE RESISTÊNCIA AO DESGASTE;
- <1,0%Si.

Ferros Fundidos

Exercícios

1. Um Ferro Fundido foi resfriado a partir da fase líquida com 3 curvas diferentes, conforme indicado ao lado. Responda:

- As curvas 1, 2 e 3 correspondem a quais tipos de Ferro Fundido?
- Qual a microestrutura ao final do resfriamento 2?
- Se o Ferro Fundido em questão, for resfriado conforme a curva 3 e apresentar 3%Si em sua composição. Você ainda concorda com sua resposta na letra a)?

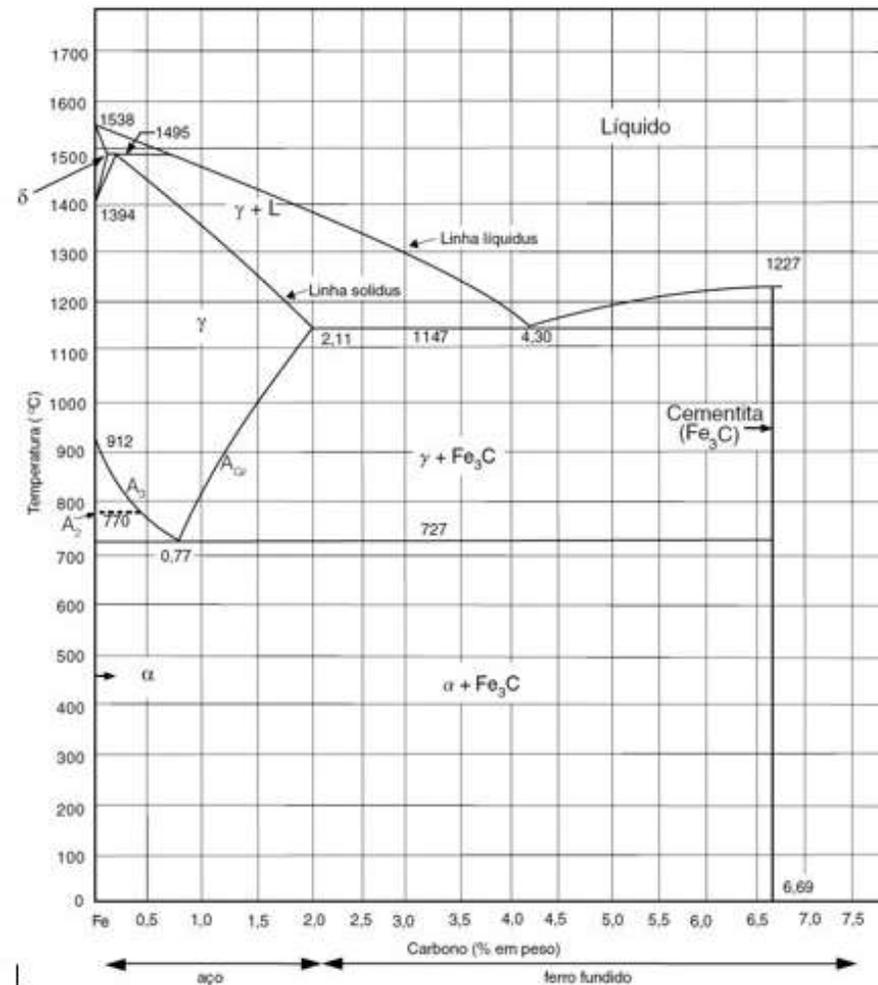


Ferros Fundidos

Exercícios

2. Considere o diagrama Fe-C ao lado e determine:

- A composição de fases de um ferro fundido com 3% C e 0,5% Si, resfriado rapidamente.
 - Esboçar a microestrutura obtida.
- A composição de fases de um ferro fundido com 2,5% C e 3% Si, resfriado lentamente.



FIM