

# DIAGRAMA FERRO CARBONO

---

Referências Bibliográficas:

Ciência e Engenharia dos Materiais uma Introdução. William D. Calister Jr.

Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns. Colpaert

**Prof. Dr. João Manuel Domingos de Almeida Rollo**

Representamos pela figura 6 a classificação periódica dos elementos. Para “misturar” os elementos, é primordial conhecer o seu raio atômico, desta forma estamos destacando este parâmetro, como também as regras de solubilidade. Observe que tais regras são válidas para soluções sólidas substitucionais, porém temos que pensar em soluções sólidas intersticiais.

Como exemplo, vamos considerar o átomo de ferro ou o elemento ferro. Este elemento apresenta vãos octaédricos e tetraédricos em suas estruturas ccc e cfc (dependendo da temperatura temos o elemento ferro em uma dessas estruturas).

Para elementos de estrutura cúbica como o ferro, as relações entre o raio ( $r$ ) do átomo que se alojaria num vão tetraédrico ou octaédrico e o ( $R$ ) da matriz (solvente) são representados pela tabela 1.

# Figura 1 – Classificação periódica dos elementos

## Periodic Table of the Elements

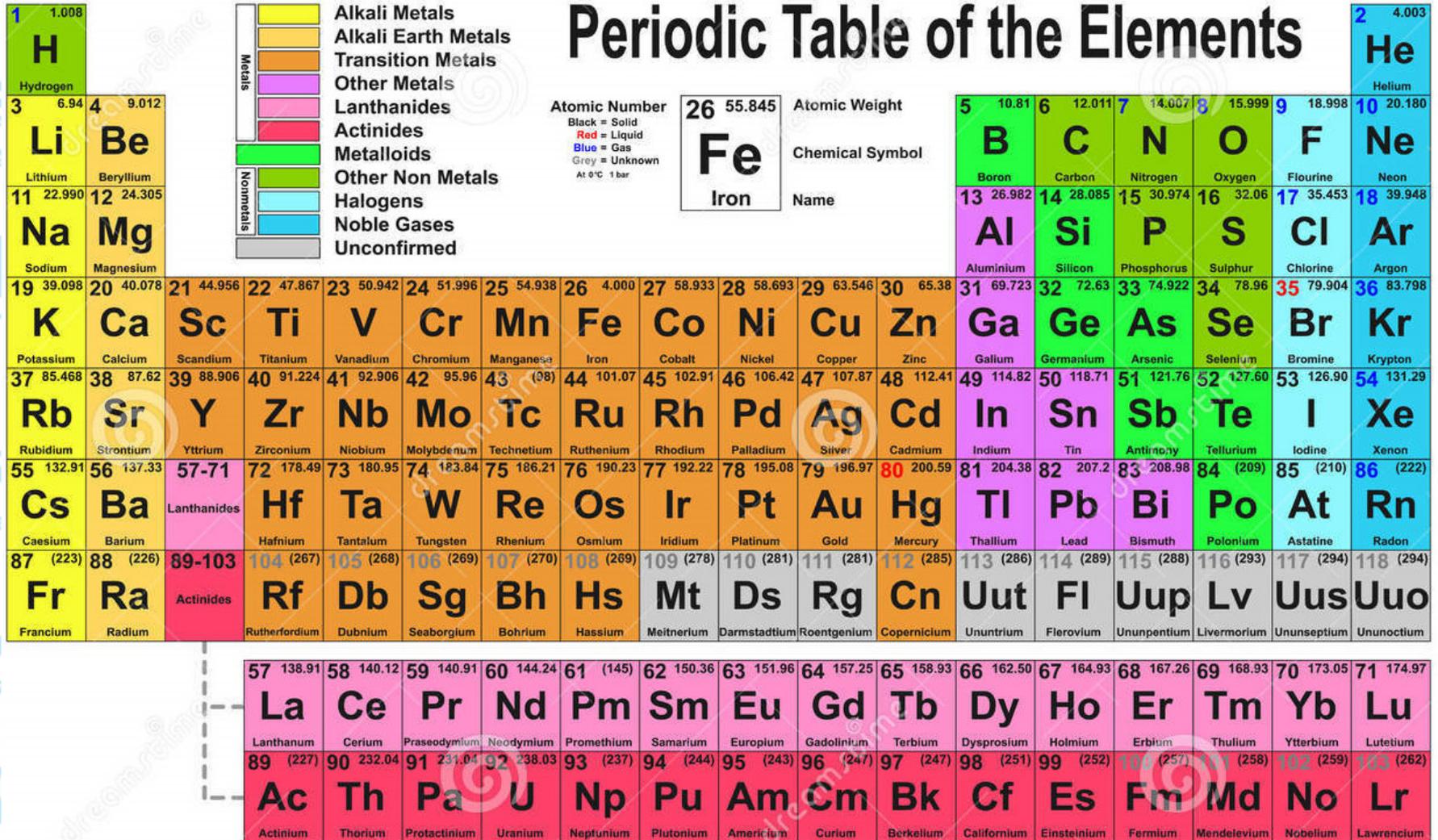


Tabela 1 – Relação entre o raio atômico do elemento intersticial ( $r$ ) e o raio do átomo do solvente ( $R$ ).

Estrutura	Relação $r/R$		FE
	OCTAÉDRICO	TETRAÉDRICO	
CFC	0,414	0,225	0,74
CCC	0,154	0,291	0,68

Para a *tabela 1* observamos que além da estrutura (cfc) ser mais compacta do que a (ccc), ela apresenta vãos maiores, embora obviamente em menor número.

## Tabela 2 – Comparação entre o raio atômico do carbono e os vãos da estrutura do ferro

A seguir, na tabela 2, vamos comparar o tamanho do átomo de carbono com os interstícios da matriz do elemento ferro, em duas temperaturas distintas, 500°C e 1000°C.

Ferro			Carbono			
Temperatura °C	Estrutura	Raio Fe (Å)	INTERSTÍCIO		SUBSTITUCIONAL	Raio do carbono em Å a 15°C (grafite)
			Raio do vão octaédrico (Å)	Raio do vão tetraédrico (Å)	± 15% do raio do Fe (Å)	
500	ccc	1,25	0,19	0,36		0,71
1000	cfc	1,29	0,53	0,29		

## A análise da tabela 2 indica que:

- a) O carbono não forma solução sólida substitucional com o ferro;
- b) O carbono é maior que o maior vão da estrutura (cfc) do ferro (aproximadamente 0,71 e 0,53, respectivamente), o que acarretará uma baixa solubilidade do carbono no ferro  $\gamma$  ou (cfc), sendo que apenas 2% de carbono será incorporado ao ferro  $\gamma$  quando este estiver a 1148°C;
- c) O carbono é muito maior que o maior vão da estrutura (ccc) do ferro, aproximadamente 0,71 a 0,36Å, respectivamente, o que acarretará uma solubilidade quase nula no ferro  $\alpha$  ou (ccc) sendo que apenas 0,02% de carbono será incorporado ao ferro  $\alpha$  e ainda quando este estiver a 727°C.

# DIAGRAMA DE FASES FERRO CARBONO

---

# Diagrama de Fases Ferro Carbono

Nas aplicações mais gerais são utilizadas ligas de ferro e carbono, geralmente denominadas aços não ligados ou por causa da produção em larga escala, **AÇOS COMUNS**. São vendidos com base em sua resistência mecânica e não conforme sua constituição química; contém pequenos teores, inevitáveis e às vezes até desejáveis de outros elementos tais como manganês e silício, e não necessitam de nenhum tratamento térmico especial após a laminação ou forjamento, exceto um eventual recozimento. Estes aços comuns têm grande aplicação na construção civil em geral, em estruturas de aços, na indústria naval e na fabricação de tubos.

**Aços não ligados** ou **poucos ligados** que são comercializados de acordo com sua composição química, têm elementos de liga adicionados ao metal em fusão, com estreita tolerância de teor e necessitam de um tratamento térmico para melhoria de suas propriedades. São designados como aço de qualidade e aplicados, por exemplo, na construção de máquinas e veículos.

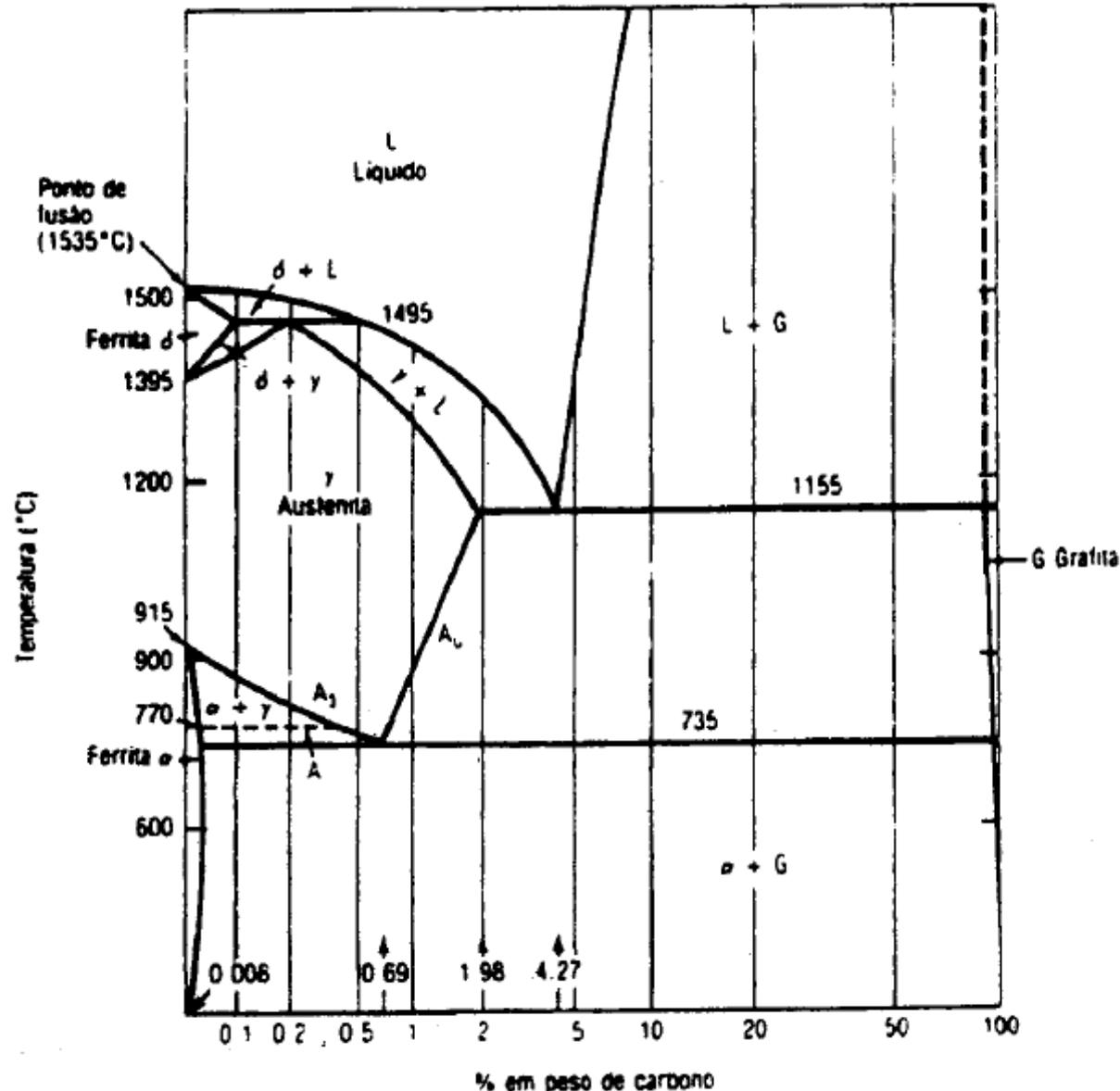
**Aço nobre** é a denominação dada aos aços ligados que são produzidos e controlados com alta precisão e atingem um alto grau de pureza química e uniformidade de propriedades.

Exemplos de aços nobres são: aços-ferramenta, aços resistentes à corrosão e aços com alta resistência à oxidação.

A combinação de aço carbono (elemento intersticial) e o ferro (diâmetro de suas esferas atômicas  $\sim 2,5\text{\AA}$ ), em equilíbrio termodinâmico dará origem a diferentes fases para as diversas temperaturas avaliadas. Isto é indicado no diagrama de equilíbrio Fe-C (grafita), figura 2a. A temperatura ambiente, os constituintes do sistema Fe-C seriam ferrita ( $\alpha$ ) e grafita.

Na produção industrial do aço, entretanto, a solidificação e o resfriamento são muito rápidos para que o equilíbrio termodinâmico seja alcançado. Ocorre, então, a formação de uma fase metaestável, a cementita (carboneto de ferro), no lugar da grafita. Embora esta fase seja termodinamicamente metaestável, em termos de aplicações práticas ela é considerada estável, pois a temperatura ambiente, a difusão do carbono de ferro é muito baixa ( $D_c = 2,9 \times 10^{-19} \text{ cm}^2/\text{s}$ ), e a transformação de cementita em grafita é praticamente nula. O diagrama de fase (e não de equilíbrio como é erroneamente chamado) entre o ferro e a cementita é ilustrado pelas figuras 2b e 2c.

## Figura 2a – Diagrama Fe – Grafita



# Descrição das Fases do Diagrama Fe-C ou Ferro-Cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ )

**Ferrita ( $\alpha$ ):** solução sólida do carbono em ferro (ccc), existente até a temperatura de  $912^\circ\text{C}$ . Nesta faixa de temperatura, a solubilidade do carbono no ferro é muito baixa, chegando ao máximo de  $0,0218\%$  a  $727^\circ\text{C}$ .

Na temperatura ambiente, a solubilidade máxima do carbono no ferro  $\alpha$  (ccc) é a de  $0,008\%$ . Assim,  $0,008\%$  de carbono, o produto siderúrgico seria chamado de ferro comercialmente puro.

**Austenita ( $\gamma$ ):** solução sólida do carbono em ferro  $\gamma$  (cfc), existindo entre as temperaturas de  $912$  a  $1495^\circ\text{C}$  e com solubilidade máxima do carbono no ferro  $\gamma$  de  $2,11\%$  a  $1148^\circ\text{C}$ . O teor de carbono  $2,11\%$  é adotado como separação teórica entre os dois principais produtos siderúrgicos. Aços, teores de carbono menores que  $2,11\%$  e ferros fundidos, teores de carbono maiores que  $2,11\%$ .



**Ferrita ( $\delta$ ):** para pequenos teores de carbono acima de 1394 °C, o ferro muda novamente para cúbico de corpo centrado, dando origem à ferrita delta (ferro delta), que é uma solução sólida de carbono em ferro (ccc), sendo estável até 1538 °C quando o ferro se liquefaz. Tendo o ferro uma estrutura (ccc), a solubilidade do carbono é baixa, atingindo um máximo de 0,09% a 1495 °C. Os nomes de ferro  $\alpha$  e ferro  $\delta$  são usados para indicar a mesma solução sólida de carbono em ferro (ccc), porém ocorrendo em diferentes faixas de temperatura. A solubilidade máxima de carbono no ferro  $\delta$  é um pouco maior que no ferro  $\alpha$  (0,09% e 0,02% respectivamente), devido ao fato de que o ferro  $\delta$  ocorre em temperaturas maiores, onde a agitação térmica da matriz de ferro é também maior, favorecendo a maior dissolução do carbono.

**Cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ):** é um carboneto de ferro com estrutura ortorrômbica de alta dureza. A cementita dá origem a um eutetóide de extrema importância no estudo dos aços, a perlita.

**Perlita:** é uma combinação de ferro ( $\alpha$ ) e cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ).

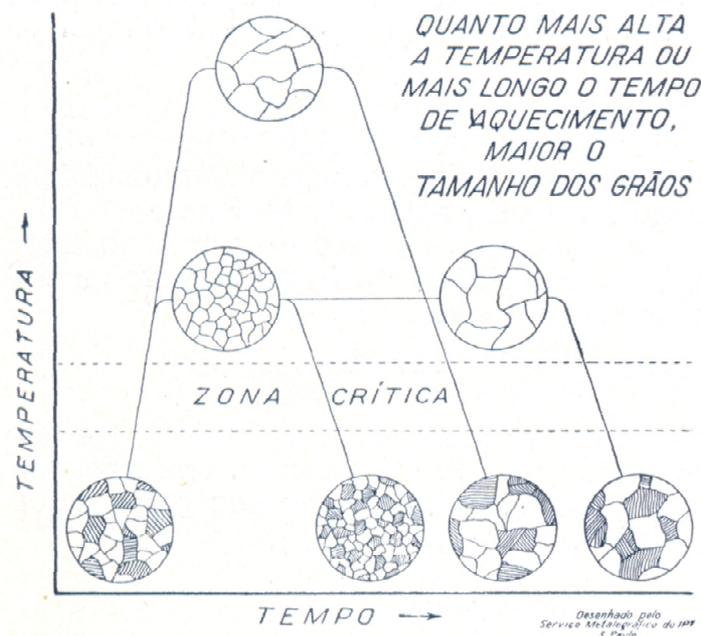
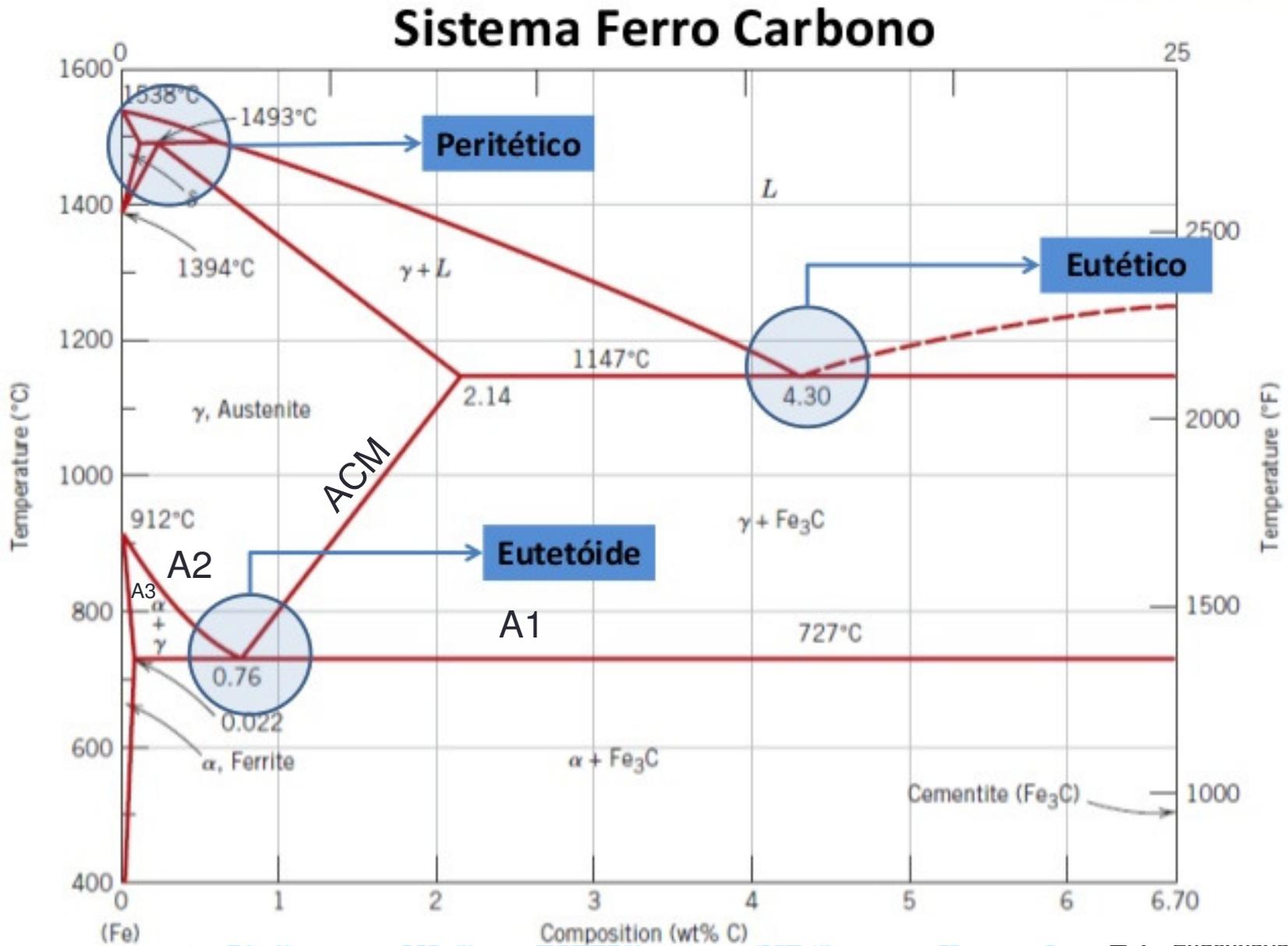


Fig. 346 — Influência da temperatura e do tempo sobre o tamanho dos grãos.

Figura 2b – Diagrama Fases Ferro-Cementita



# Pontos Relevantes do diagrama Ferro Cementita

**Linha  $A_1$ :** Indica a reação eutédóide  $\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ , a  $727^\circ\text{C}$ . Ao resfriar o aço com  $0,77\%\text{C}$ , observa-se uma parada na temperatura de  $727^\circ\text{C}$ , ou seja, enquanto a transformação  $\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$  não se completar, a temperatura permanecerá invariante, ou seja, é semelhante a metal puro.

**Linha  $A_2$ :** Transformação magnética do ferro (ccc), ocorrendo a  $\sim 700^\circ\text{C}$ . Nesta temperatura o ferro muda de paramagnético para ferro magnético.

**Linha  $A_3$ :** Temperatura de transformação  $\gamma \rightarrow \alpha$ . Para o ferro puro, ocorre a  $912^\circ\text{C}$ . A medida que o teor de carbono vai aumentando, a temperatura  $A_3$  vai diminuindo, até o limite de  $727^\circ\text{C}$ , onde se encontra com  $A_1$ .

**Linha  $ACM$ :** Transformação de transformação  $\gamma \rightarrow \text{Fe}_3\text{C}$ . Inicia-se a  $727^\circ\text{C}$  com  $0,77\%\text{C}$  e vai aumentando com a elevação do teor de carbono até atingir  $1148^\circ\text{C}$  com  $2,11\%\text{C}$ .

**Linha  $A_3$ :** Temperatura de transformação  $\gamma \rightarrow \delta$ . Inicia-se a  $1394^\circ\text{C}$  para o ferro puro e vai aumentando com com a adição de carbono no ferro, atingindo um máximo a  $1495^\circ\text{C}$  com  $0,17\%\text{C}$ .

# Observações

1) No diagrama da figura 2b, as transformações limitadas pelas linhas  $A_1$ ,  $A_2$ , ACM, etc, são supostas de ocorrer no equilíbrio. Nas condições industriais de procedimento metalúrgico, estas transformações ocorrem fora do equilíbrio termodinâmico e as linhas de transformações para o aquecimento e resfriamento apresentam-se defasadas. Para as condições de equilíbrio utilizam-se as notações  $A_1, A_2$ , etc ou  $Ac_1, Ac_2$ , etc.

Para o aquecimento utiliza-se  $Ac_1, Ac_2$ , etc, pois a sigla vem do francês (c = “chaufflage” = aquecimento).

2) Embora a perlita não seja uma fase e sim um constituinte, é possível interpretar o diagrama de fase ferro-cementita de modo a prever sua ocorrência e quantidade relativa na microestrutura. Assim, os aços com menos de 0,77% possuem ferrita em sua microestrutura; com 0,77%C só perlita, e acima de 0,77%C, perlita e cementita. Isto, obviamente, se obtidos através de um resfriamento lento (dentro do forno, por exemplo). Se o resfriamento for mais rápido (em óleo, em água), aparecerão outras fases, metaestáveis, e que **não** são previstas pelo diagrama ferro-cementita.

3) A utilização da letra “A” para designar estas linhas foi primeiramente utilizada pelo francês Le Chatelier e indica a ocorrência de uma parada (Arrêt) durante a transformação.

# FERROS FUNDIDOS; TIPOS E PROPRIEDADES; FERROS FUNDIDOS LIGADOS

---

Referências Bibliográficas:  
Ciência e Engenharia de Materias uma Introdução.  
William D. Callister Jr  
Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns.  
Colpaert

# Introdução

- Ligas ferrosas contendo 1,7 a 4,0% C e 0,5 a 3,5% Si
- Composição torna excelente para fundição (fluidez)

*Utilizados em geral quando se deseja:*

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



## Vantagens

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

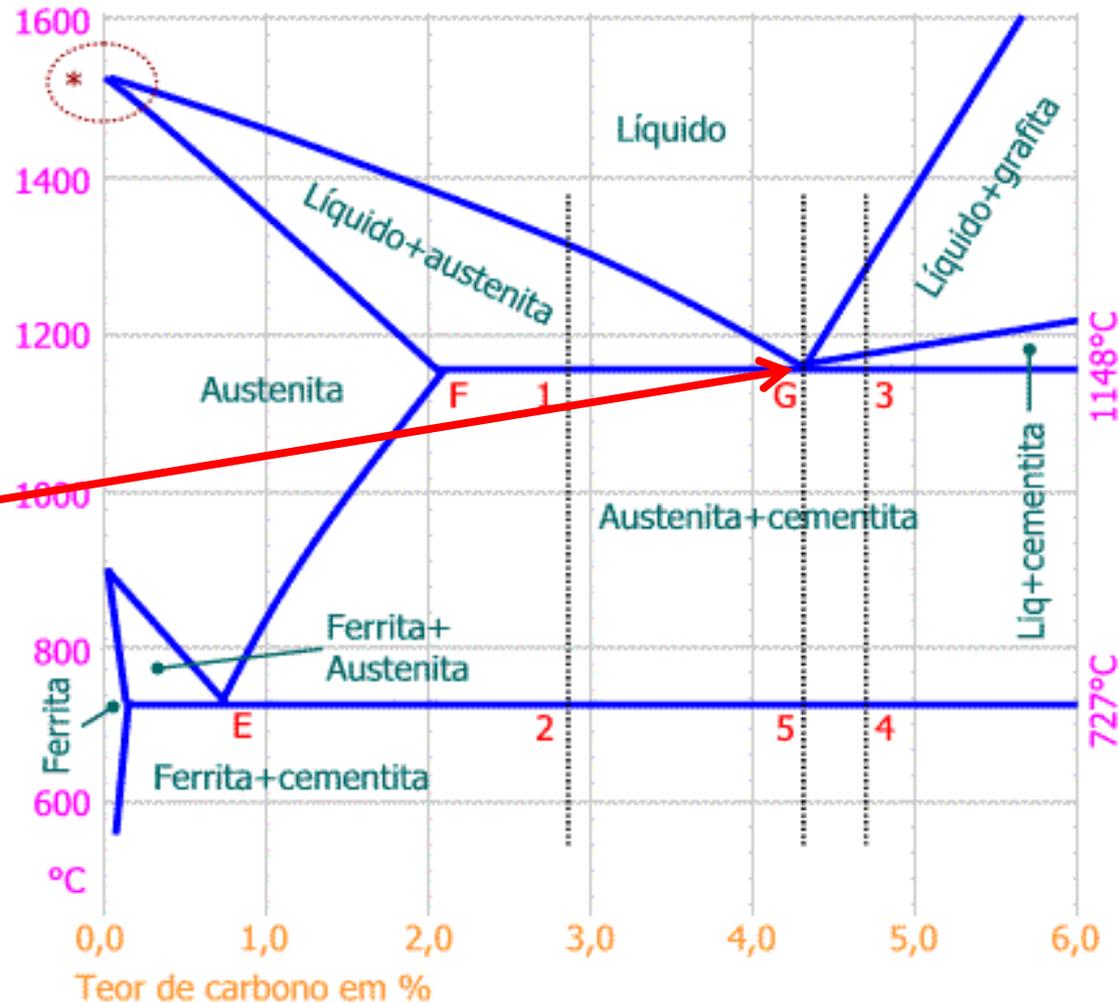
## Desvantagens

- Grande fragilidade e baixa ductilidade;
- Deformação plástica impossível à temperatura ambiente;
- Soldadura muito limitada.

## Definição

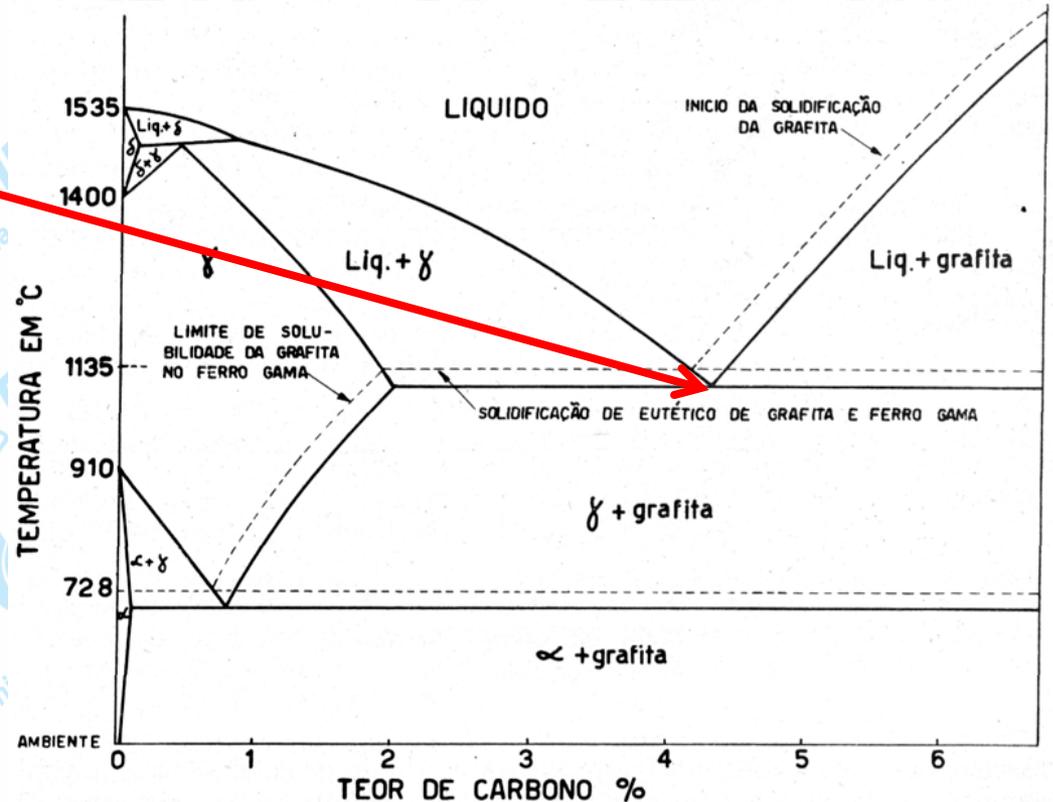
De forma similar aos aços, ferros fundidos podem ser **hipoeutéticos**, **eutéticos** ou **hipereutéticos**.

O valor **eutético** definido pelo ponto de **equilíbrio** entre a austenita e a cementsita (aprox 4,3%, linha G-5 no diagrama).



# Diagrama Fe-C

O diagrama Fe-C apresenta dois eutéticos provenientes de dois equilíbrios: estável e metaestável. O eutético estável é formado pela austenita e grafita e o eutético metaestável por austenita e carbonetos (cementita).



No caso dos aços as estruturas provenientes do resfriamento lento podem ser relacionadas com o diagrama metaestável.

# Classificação

Os ferros fundidos apresentam uma extensa gama de **resistências mecânicas e de durezas**, e na maioria dos casos são de fácil usinagem.

Através da **adição de elementos de liga** é possível obter-se excelente **resistência ao desgaste, à abrasão e à corrosão**, porém em geral a resistência ao **impacto e a ductilidade** são **relativamente baixas**

De acordo com a **composição química** e com a **distribuição de carbono na sua microestrutura**, os ferros fundidos podem ser **classificados** em quatro grandes categorias:

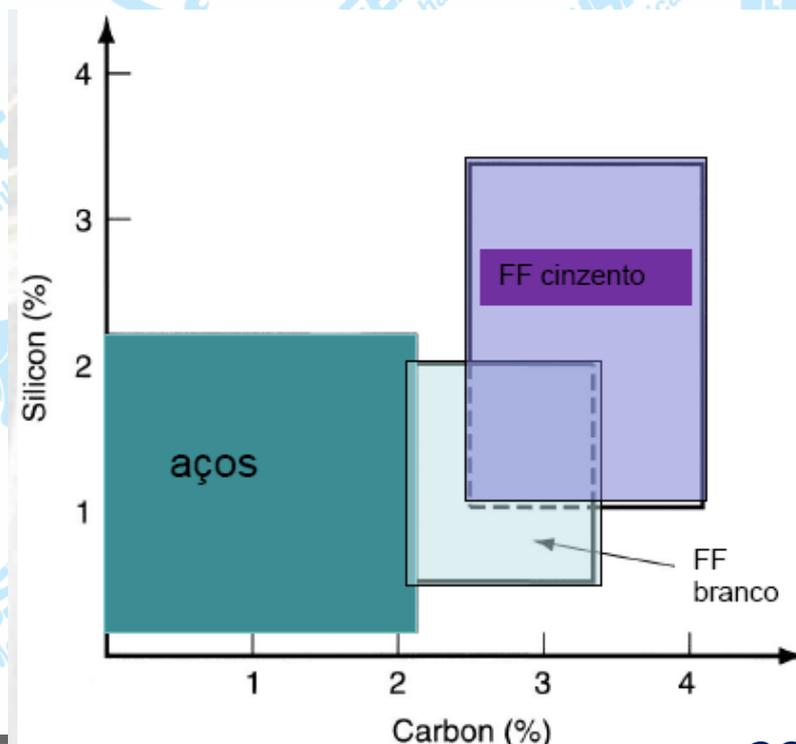
- Branco
- Cinzento
- Maleável
- Dúctil (nodular)

# Classificação

	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	0,5-1,9	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.
Dúctil	3,0-4,0	1,8-2,8	0,10-1,0	0,03 máx.	0,10 máx.

A **tabela** acima ilustra os intervalos de **composição química** dos ferros fundidos típicos, não ligados.

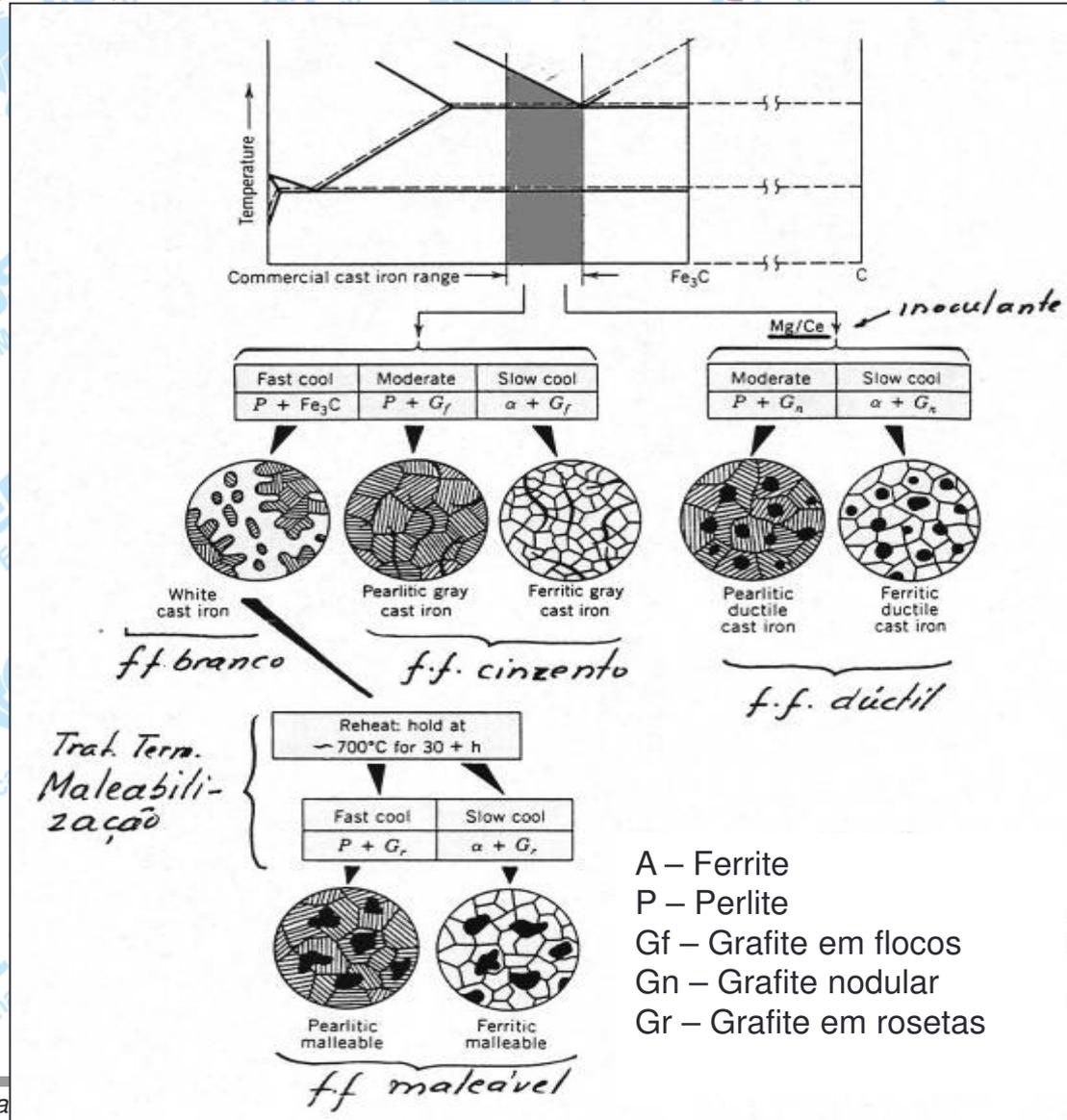
O **gráfico** ao lado ilustra a **relação** típica existente entre os **teores de Carbono e Silício** nas famílias de ferros fundidos.



# Efeitos dos elementos de liga

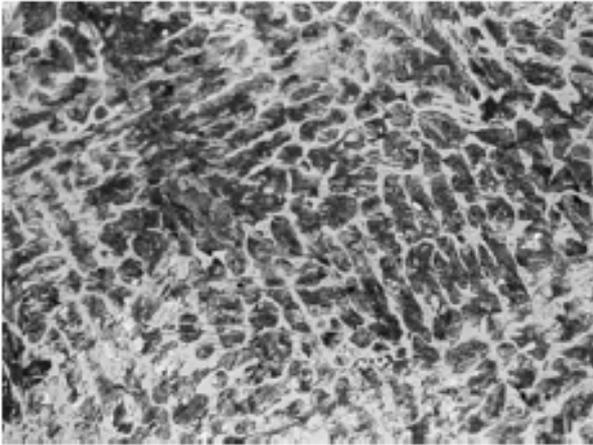
- **Carbono** – como nos aços, é o elemento de liga básico; determina obviamente, a **quantidade de grafita que pode se formar**;
- **Silício** – É o **elemento grafitizante** por excelência, ou seja, favorece a **decomposição do carboneto de ferro**; sua presença, independentemente do teor de carbono, pode **fazer o Fofu tender de fofu cinzento**
- **Enxofre** - nos teores normais, **não tem ação significativa.**

# Tipos básicos de ferros fundidos, em relação à sua composição, microestrutura e processamento

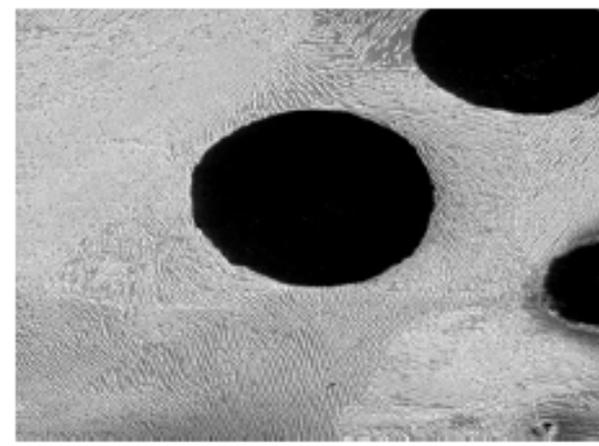
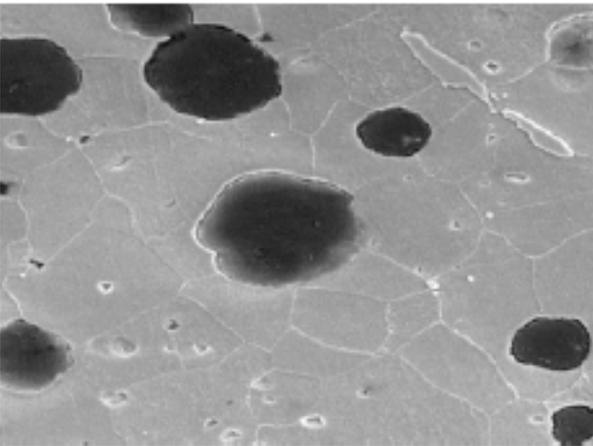
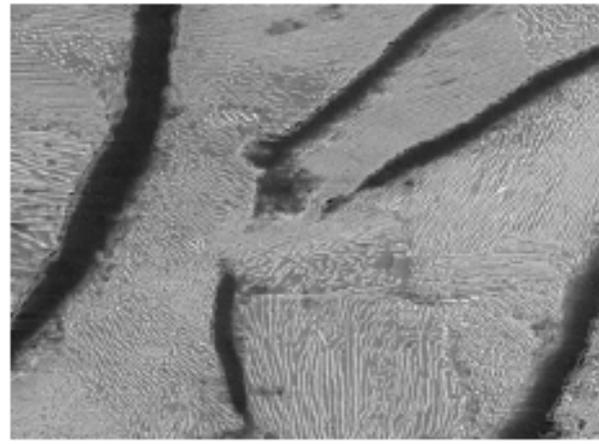


# Estrutura

Branco  
(perlita e ledeburita)



Cinzento  
(veios grafita e perlita)



Nodular

Nodular

(ferrita e nódulos grafita) (perlita e nódulos grafita)

# Ferro Fundido Branco

## PROPRIEDADES

- Grande resist. à compressão e ao desgaste (cementita);
- Extremamente frágil;
- Não pode ser usinado;
- Soldagem impossível;
- Baixo custo.

## APLICAÇÕES

- Principal aplicação é a produção de ferro fundido maleável;
- Peças sujeitas a elevada compressão e atrito;
- Esferas de moinhos e rolos de laminadores;
- Elevada taxa de resfriamento necessária limita o tamanho das peças.

# Ferro fundido cinzento

- Esta liga Fe-C-Si, pela sua **fácil fusão e moldagem**, excelente **usinabilidade**, **resistência mecânica satisfatória**, boa **resistência ao desgaste** e boa **capacidade de amortecimento**, é dentre os ferros fundidos os mais usados.
- **É caracterizado pelos fatores que favorecem a formação da grafita**
  - A fratura é de cor cinzenta
  - É barato
  - É o mais usado
  - É de boa resistência Mecânica (até  $40 \text{ Kgf/mm}^2$ ) e ao desgaste
  - É de fácil usinagem e difícil soldagem
  - É obtido pelo resfriamento lento



Audi V8 direct-injection diesel engine.

# Ferro fundido cinzento - Aplicações

- Ferro fundido mais usado (75%);
- Fundição de componentes mecânicos em geral;
- Blocos de motores;
- Engrenagens de grandes dimensões;
- Máquinas agrícolas;
- Carcaças e suportes de máquinas



# Ferro fundido cinzento

**Alto teor de Si  
melhora**

## Composição típica

**C → 2,5-4%**

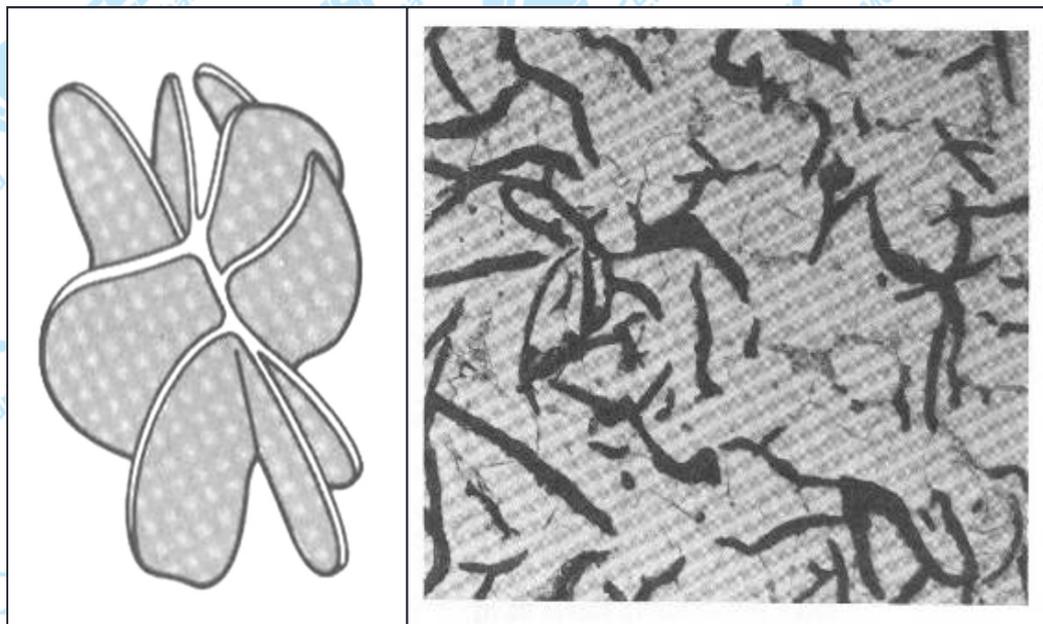
**Si → 1-3%**

**Mn → 0,4 -1%**

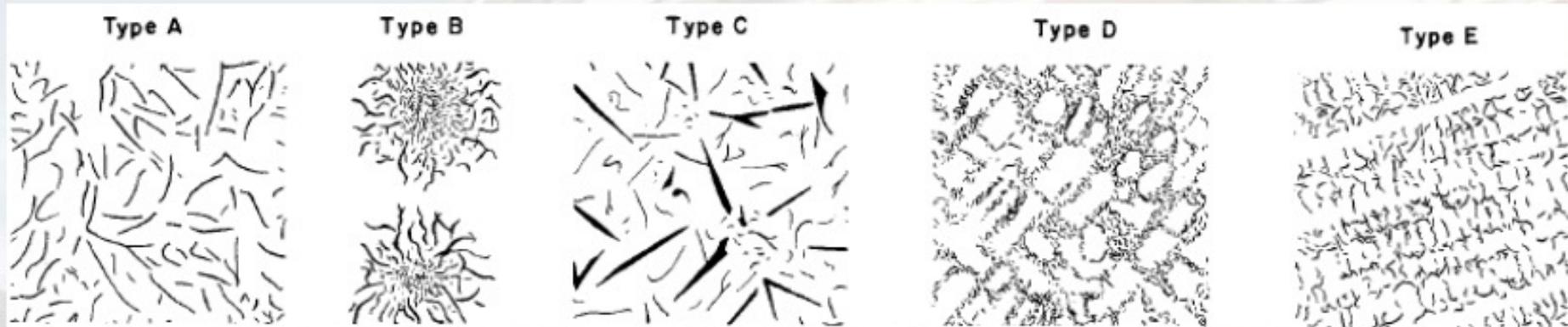
- Resistência à corrosão
- Fluidiez

## Estrutura

- Grafita lamelar devido ao C livre na matriz de ferrita, perlita ou outra estrutura proveniente da austenita.



## Tipos de grafita nos ferros fundidos cinzentos



## Propriedades mecânicas dos ferros fundidos cinzentos:

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 Nodulares

## MICROESTRUTURA

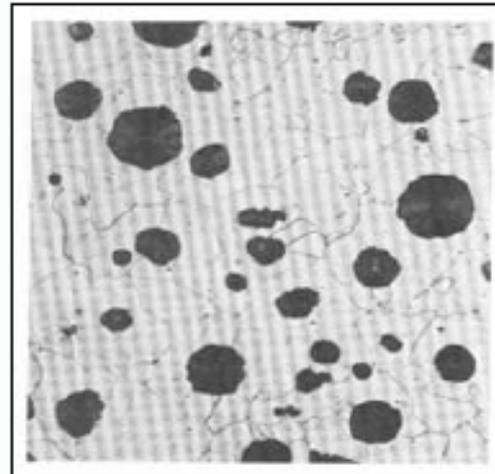
- $3,5 \leq \%C \leq 4,0$ ;  $1,8 \leq \%Si \leq 3,0$
- Pequenas adições de Mg
- Em vez de flocos formam-se nódulos
- A matriz é ferrítica (veloc. baixa) ou perlítica (veloc. moderada)
- Grafite em nódulos origina maior resistência, ductilidade e tenacidade

## PROPRIEDADES

- Melhor resistência, tenacidade e ductilidade
- Excelente maquinabilidade
- Possibilidade de deformação a quente
- Grande resistência ao desgaste
- Boa fluidez
- Soldabilidade melhorada
- Baixo custo (superior ao FF cinzento)

## APLICAÇÕES

- Engrenagens
- Cambotas
- Juntas universais
- Válvulas
- Componentes sujeitos a desgaste



## FF ductil/nodular

- Melhores propriedades mecânicas (ductilidade e resistência mecânica) dentre os ferros fundidos

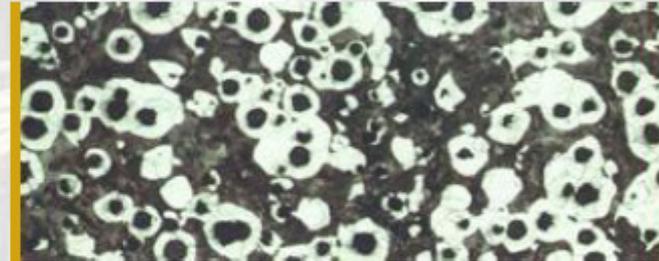
- Microestruturas:

GN + ferrita

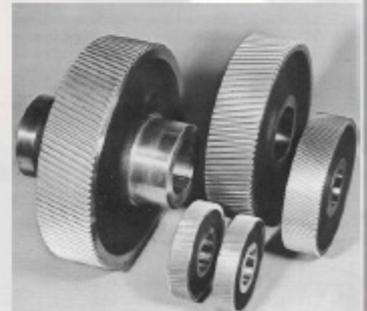
GN + perlita

GN + ferrita/perlit →

GN + austenita/ferrita (ADI)



- Algumas aplicações: tubos centrifugados para saneamento válvulas para vapor e produtos químicos, cilindros para papel, virabrequins, engrenagens, etc.

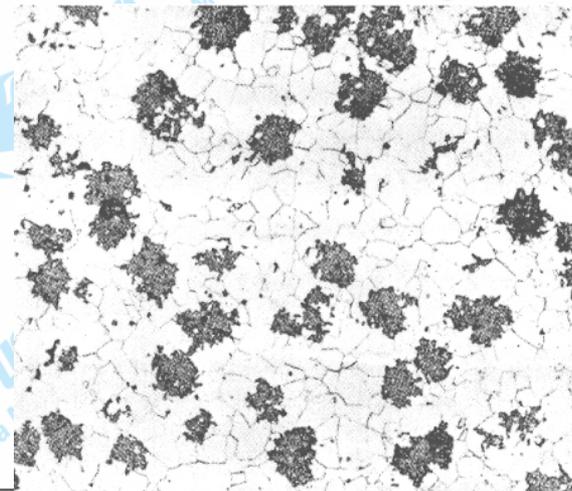


# Ferros Fundidos Maleáveis

Os ferros fundidos maleáveis são **obtidos a partir do ferro fundido branco**, quando submetidos a um tratamento térmico de grafitização (**aprox. 940°C**), quando os carbonetos de ferro transformam-se em grafita (nódulos de carbono revenido).

O modo de resfriamento após o tempo de encharque para grafitização é que determinará a matriz da microestrutura formada por nódulos de carbono revenido, como segue:

Na figura ao lado **vemos nódulos de grafita (carbono revenido)** numa matriz ferrítica. Neste caso ocorreu completa **grafitização**.



# FERROS FUNDIDOS

Ferro fundido cinzento



perlítico



ferrítico



Ferro fundido nodular

perlítico



ferrítico



Ferro fundido branco



Ferro fundido maleável

perlítico



ferrítico



## Tratamentos térmicos aplicáveis aos ferros fundidos nodulares:

- **Alívio de tensões** (550-590°C) → Não produz modificações microestruturais significativas, somente alívio de tensões por microdeformações plásticas. Alivia as tensões do processo de fundição.
- **Normalização** (900 – 950°C) → resfriamento ao ar. Produz uma matriz perlítica.
- **Recozimento ferritizante** → tratamento entre as temperaturas superior eutetóide e inferior eutetóide, podendo ou não ser precedido de uma etapa a 900-950°C. Este tratamento provoca a grafitização da perlita. A etapa de alta temperatura pode servir para dissolver carbonetos eventualmente existentes.
- **Têmpera e revenido**