

Ferros Fundidos

Aula de PMT 3402 Metalografia e Tratamentos térmicos

2021

Histórico dos Ferros Fundidos

- O primeiro artefato datado por arqueólogos, fabricado em ferro fundido foi encontrado na China e data de cerca de 550 aC, portanto a humanidade produz ferro fundido a pelo menos 2500 anos. Ainda hoje é o mais importante material de fundição, cerca de 70% em peso do que é fundido no mundo.



Figure I-1. Iron lion of Cangzhou, 953 AD [TAN10].

Histórico dos Ferros Fundidos

- No Brasil, o pioneirismo na produção de ferro fundido diretamente a partir de minério foi a Fabrica de Ferro de Ipanema, em Sorocaba, que a partir de 1810 produziu por 110 anos barras e artefatos de ferro batido, lingotes de gusa para fundições pequenas e também peças de ferro fundido, culminando em 1840 com a fundição de três canhões de mais de 700kg. Dois deles podem ser vistos ainda hoje em uma Praça em Sorocaba.



Ruínas do alto forno gêmeo da Real Fábrica de Ferro São João do Ipanema



Pintura de Debret, datada de 1827, mostrando a Real Fábrica de Ferro São João do Ipanema.

PRODUÇÃO DE
CANHÕES RESSALTA O

POTENCIAL DE IPANEMA

*Cannon manufacturing highlights Ipanema
Ironworks' potential*

A fundição das armas na antiga usina inspirou-se no modelo Blomefield, desenvolvido pela Marinha da Inglaterra.

The casting of weapons in the old plant was inspired by the British Navy-developed Blomefield model cannon.

Em 1840, a Fábrica de Ferro de Ipanema vivia um momento especial. Seu diretor Johan Bloem havia conseguido recursos do Ministério da Guerra para comprar equipamentos na Europa e



Fernando José
Gomes Landgraf

Canhão fabricado pela
Fábrica de Ferro de
Ipanema, em exposição
na "praça dos canhões",
centro de Sorocaba



contratar mais de cinquenta "artistas" alemães. Eram operadores de alto-forno, fundidores, refinadores, modeladores, serralheiros e operadores de máquinas de broquear, que se juntaram

aos 47 africanos libertos e 128 escravos que ali trabalhavam.

Pela primeira vez os dois altos-fornos gêmeos estavam operando simultaneamente, permitindo vazamentos de mais de 1000 kg...

LER MAIS

READ MORE

Ferro Fundido, o primeiro *material compósito* feito pelo Homem

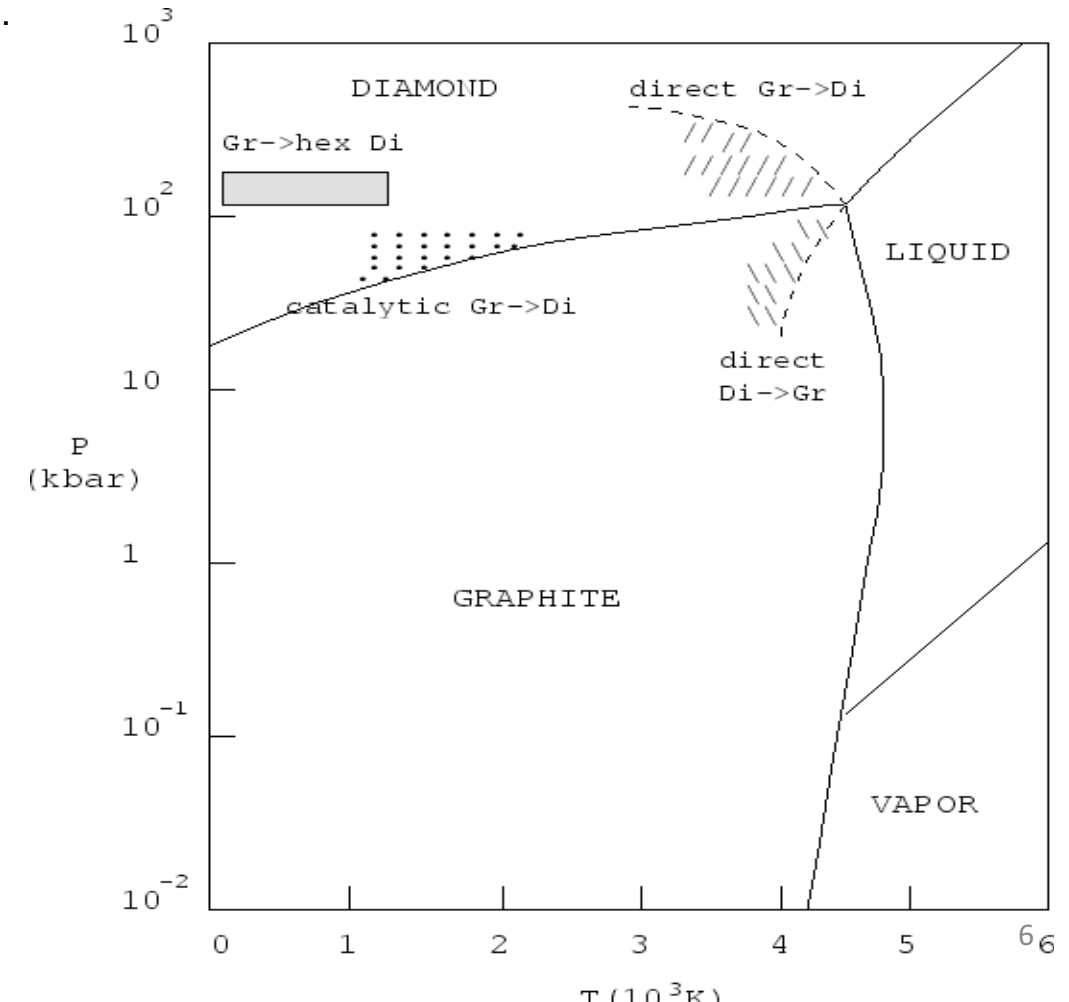
- No início deste curso estudamos ligas ferrosas em que as fases eram austenita, ferrita e cementita e os microconstituintes formados por estas fases. A partir da aula de aços ferramenta travamos contato com outros carbonetos que não o Fe_3C .
- Já o ferro fundido apresenta como uma das fases de equilíbrio a grafita, fase alotrópica do C que cristaliza com estrutura hexagonal, portanto **podemos descrever os ferros fundidos como um compósito em que a matriz é um aço, contendo uma dispersão de cristais de grafita**. É um material compósito em que a estrutura forma-se na solidificação (ou eventualmente durante tratamento térmico, no caso dos maleáveis) e não por um processo deliberado de mistura como nos compósitos de matriz polimérica, tipo epóxi/fibra de vidro, portanto é considerado um compósito *in situ* (latim para dizer "localmente").
- Ferros fundidos são ligas contendo basicamente Fe, C e Si, com % C maior do que o limite de solubilidade na austenita (% C > 2), dentro do patamar eutético e frequentemente com composições próximas do ponto eutético.
- São manufacturadas por fundição, um processo **net shape** em que obtém-se diretamente a forma quase final do artefato, sem necessidade de conformação mecânica.
- **Nas ligas Fe-C puras o equilíbrio das fases metálicas com a grafita apresentam energia livre mais negativa do que o equilíbrio com o Fe_3C** , o que implica que temos dois diagramas de fase, o de equilíbrio (com a fase grafita) e o metaestável (com a fase Fe_3C , que estudamos até agora).
- Os ferros fundidos são ligas complexas, contendo elevados teores de Si, e ainda Mn, S, P, e eventualmente elementos de liga como Mg, Cr, Ni, Mo , com efeitos que veremos em seguida.

As Fases do C – Grafita e Diamante

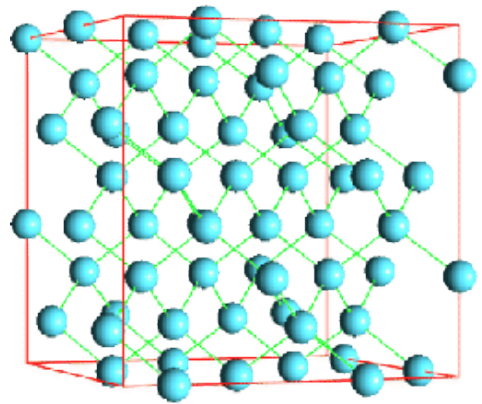
- Na T e P normal o C cristaliza na forma de grafita (hexagonal), com 0,02 eV de diferença de energia por átomo entre a Grafite e a fase alotrópica Diamante.
- As propriedades da G são anisotrópicas, tem uma ligação forte covalente nos planos basais e uma ligação fraca, nos planos prismáticos. Na Tabela [2.1] de propriedades das duas fases a coluna da grafita mostra as propriedades nas direções contidas no plano basal, à esquerda, e as normais ao plano basal, à direita.

Table 2.1: Properties of diamond and graphite.

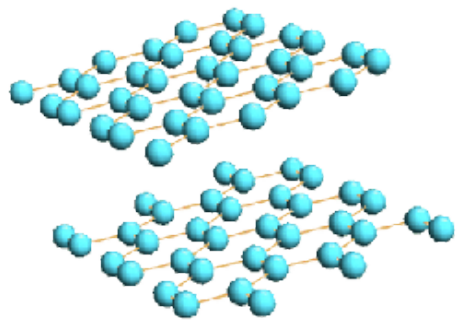
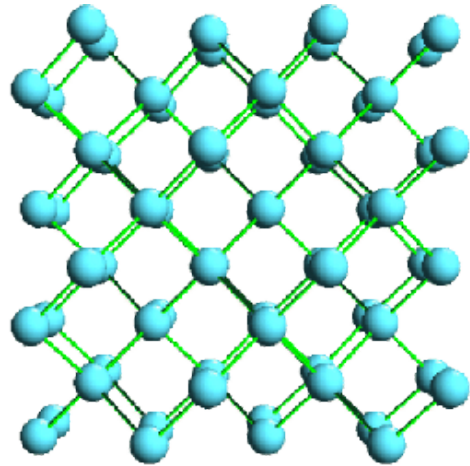
Property	Graphite	Diamond
Lattice constant (RT) [Å]	2.462 6.708	3.567
Bond length (RT) [Å]	1.421	1.545
Atomic density [cm ⁻³]	1.14 × 10 ²³	1.77 × 10 ²³
Thermal conductivity [W/cm-K]	30 0.06	25
Debye temperature [K]	2500 950	1860
Electron mobility [cm ² /V-sec]	20 × 10 ³ 100	1800
Hole mobility [cm ² /V-sec]	15 × 10 ³ 90	1500
Melting point K	4200	4500
Band gap [eV]	-0.04	5.47



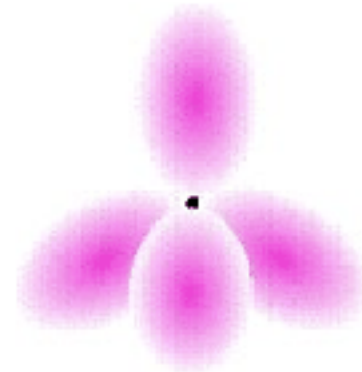
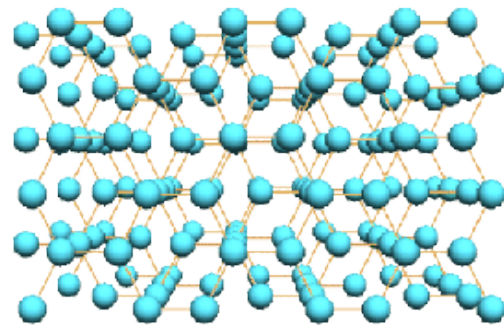
As Fases do C – Grafita e Diamante



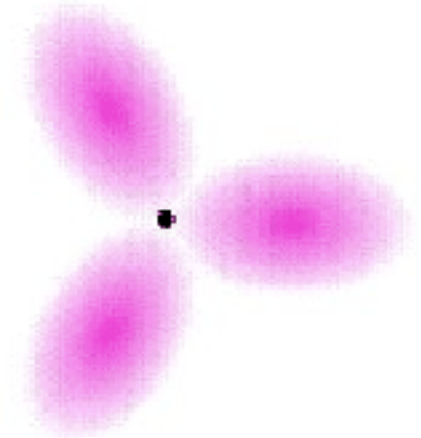
Diamond lattice



Graphite lattice



sp³ hybrid orbitals (tetrahedral)



sp² hybrid orbitals (trigonal planar)

Figure 2.1: Schematic presentation of sp^3 (left) and sp^2 (right) hybridization.

As Fases do C – Grafita e Diamante

- Entre esses dois alótropos de carbono existe toda uma variedade de materiais de carbono, que incluem, entre outros, carbono ligado amorfo sp^2 (por ex. carbono evaporado termicamente), grafita ligada micropolicristalina sp^2 (como carbono vítreo), filmes de diamantes e carbono ligado amorfo sp^3 (às vezes chamado diamante amorfo), que é estruturalmente análogo ao Si amorfo e é formado durante a deposição de íons de carbono de baixa energia. Filmes de **nanodiamante**, por exemplo, podem ser crescidos sobre substratos por diferentes técnicas de deposição, como a deposição química de vapor por plasma (CVD) de uma mistura metano-hidrogênio e outras.
- Outras formas polimórficas de carbono foram descobertas a partir de 1985. A primeira foi uma forma molecular discreta, um aglomerado esférico oco de átomos de carbono. Cada molécula é composta por grupos de átomos de carbono que estão ligados entre si, formando uma configuração geométrica de hexágonos e pentágonos. O material composto por C_{60} é conhecido como **buckminsterfullerene**, familiarmente chamadas de buckyballs, nomeado em homenagem a R. Buckminster Fuller, arquiteto que inventou a cúpula geodésica. No estado sólido, as unidades C_{60} formam uma estrutura cristalina e se agrupam em estrutura CFC.
- Formas moleculares diferentes dos aglomerados de esferas foram recentemente descobertas: incluem estruturas tubulares **nanotubos de C** e poliédricas em nanoescala e mais recentemente folhas monoatômicas de planos basais, o **grafeno**.

FORMAÇÃO DA MICROESTRUTURA DOS FERROS FUNDIDOS

Os dois diagrama de fases
e a
sequência de transformações

Os dois diagramas Fe-C : estável e metaestável

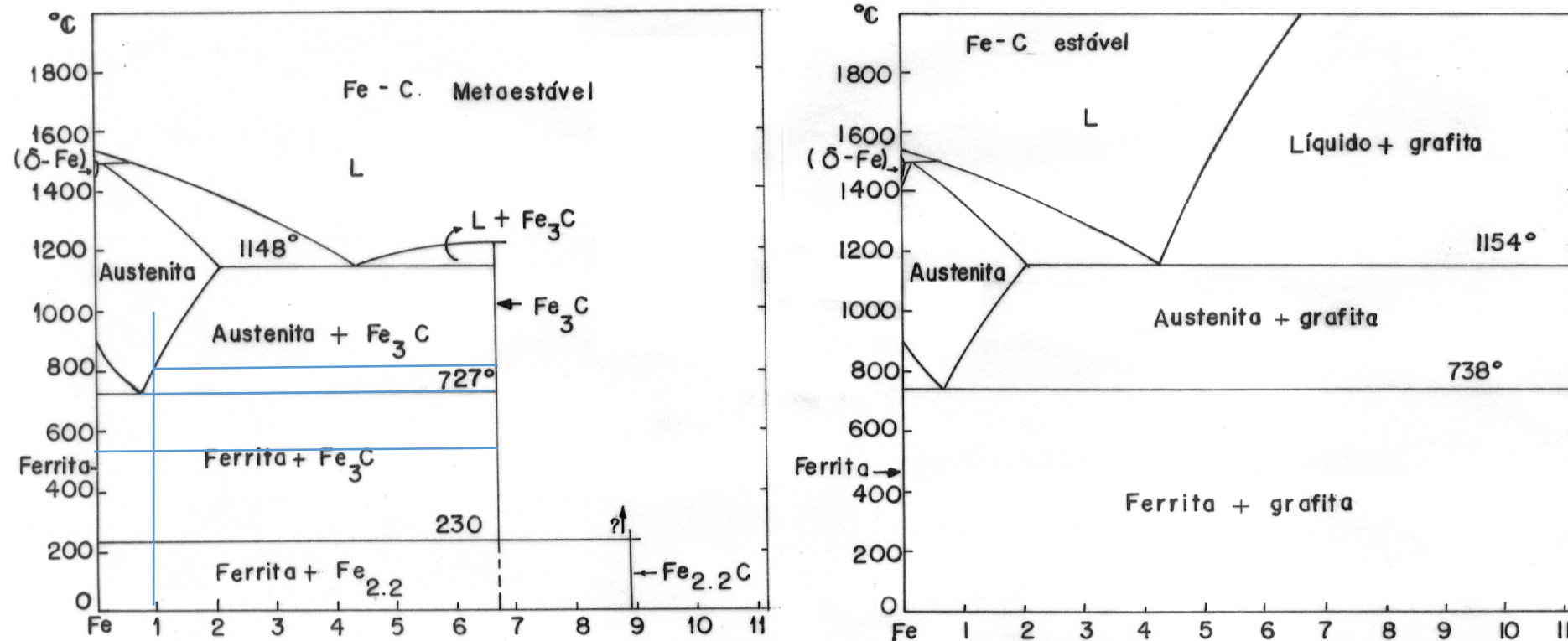


Figura 2.23 - Diagramas de fases Fe-C

.A- Metaestável

.B- Estável.

As Composições Químicas Básicas dos FoFos contém entre 1,5 e 3% de Si

- % carbono : 2,7 a 3,8%
- % silício : 1,5 a 2,6 %
- O Si estabiliza a fase G grafita, muda o diagrama de fase: aumenta o ΔT entre o estável e o metaestável e a composição eutética. A mudança na composição pode ser descrita por um "carbono equivalente" CE
- C.E. = % C + 1/3 % Si (e P)
- CE : 3,5 a 4,4% onde o ponto eutético é 4,3%

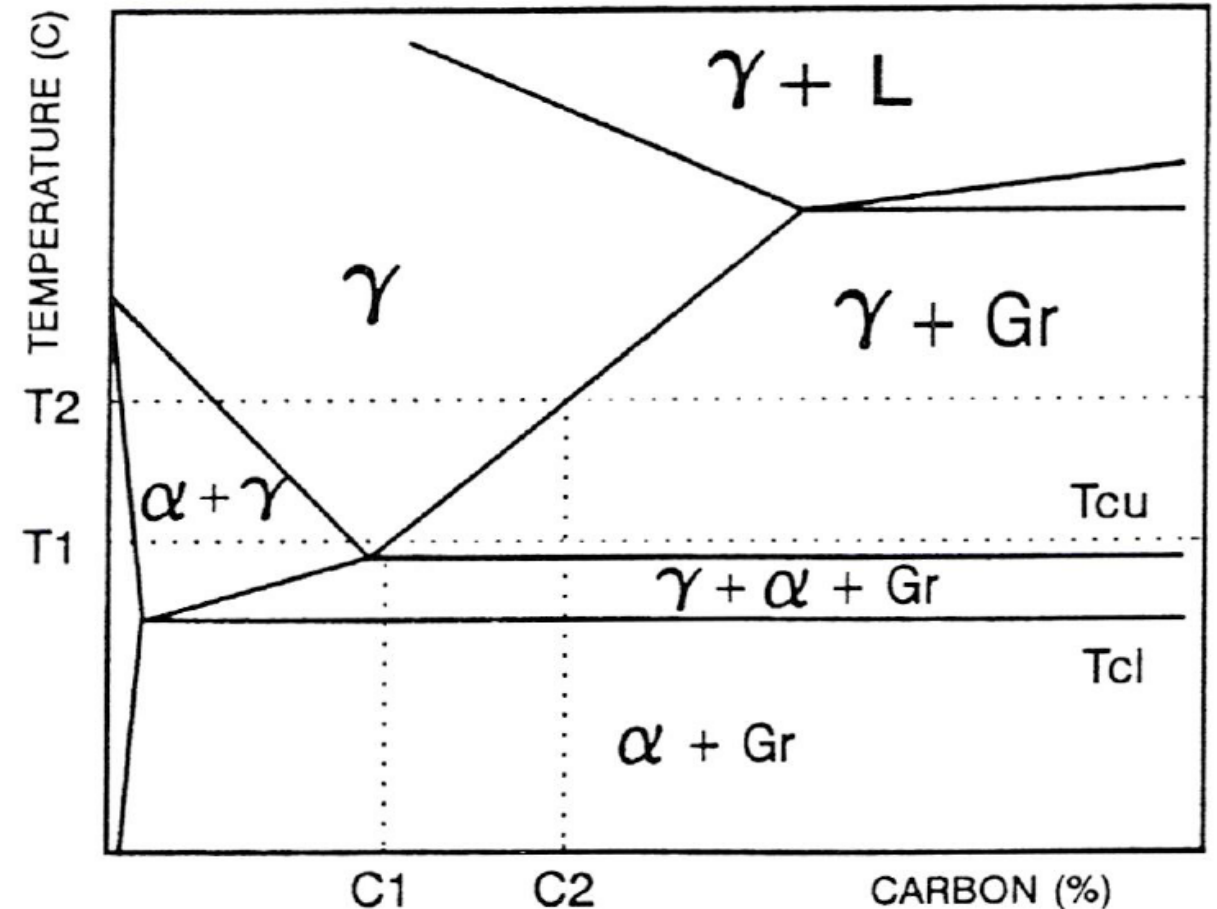
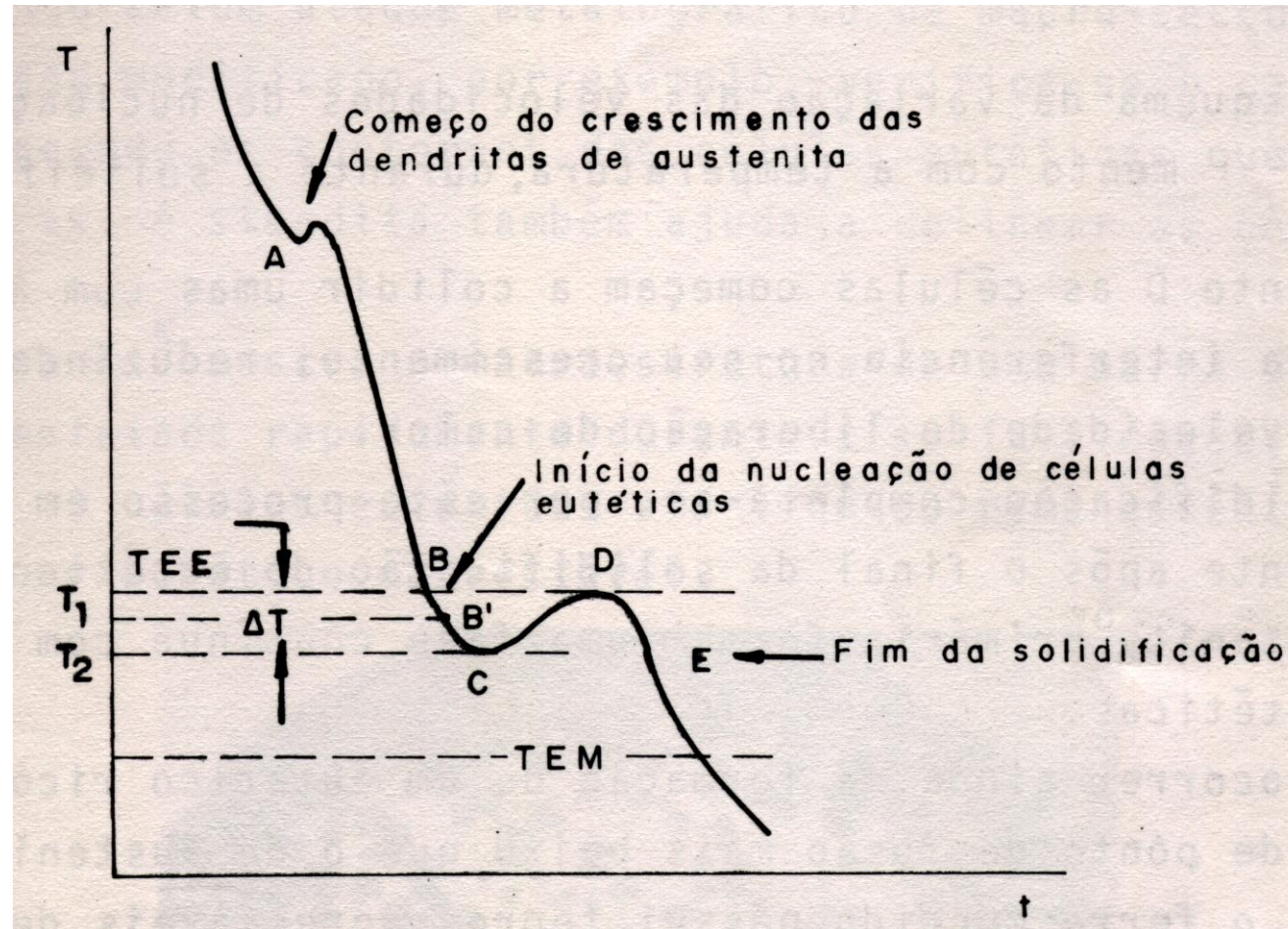


Diagrama pseudo-binário esquemático para 2,5% Si

A sequência de solidificação entendida através de análise térmica

(graças à “recalescência” produzida pelo calor latente de solidificação)



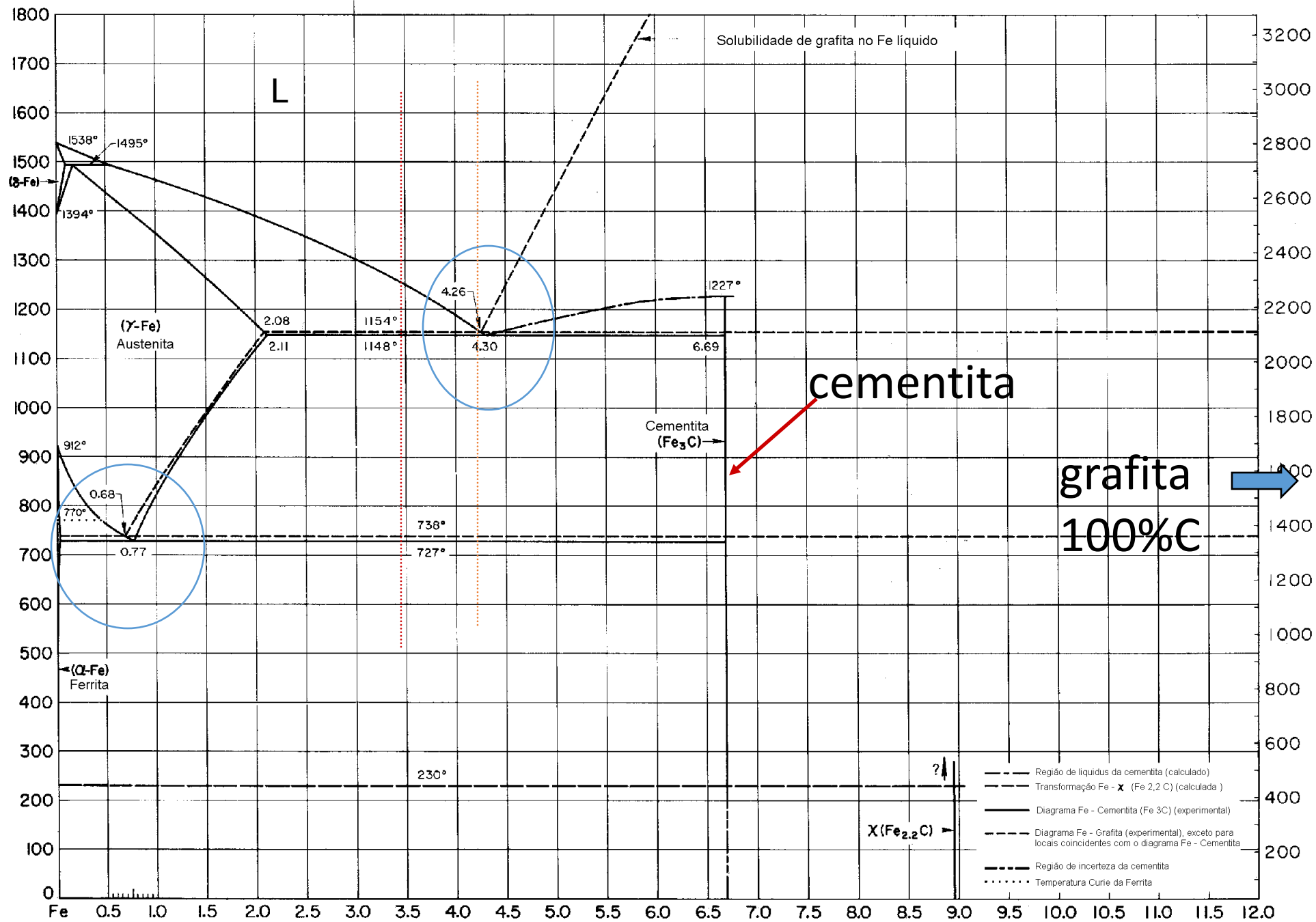


DIAGRAMA DE FASES

- formação da austenita

- reação eutética

 - sistema metaestável $L \rightarrow \gamma + \text{Fe}_3\text{C} = \text{FoFo branco}$

 - sistema estável $L \rightarrow \gamma + \text{grafita} = \text{FoFo cinzento}$

resfriamento até o eutetóide: a estrutura da matriz vai depender do tipo de reação eutetóide:

- reação eutetóide

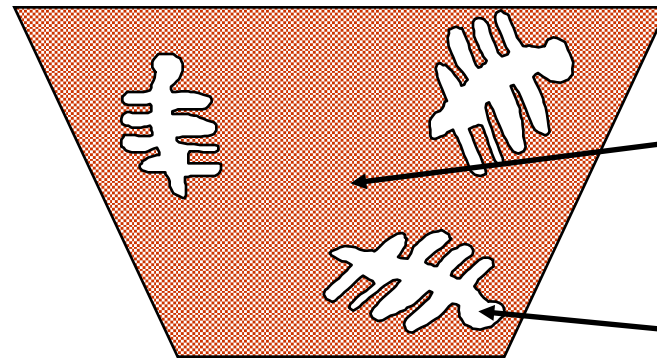
 - eutetóide metaestável $\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ (perlita, conjugado)

 - eutetóide estável $\gamma \rightarrow \alpha + \text{grafita}$ (eutetóide divorciado)

Formação da **austenita** primária

Carbono equivalente

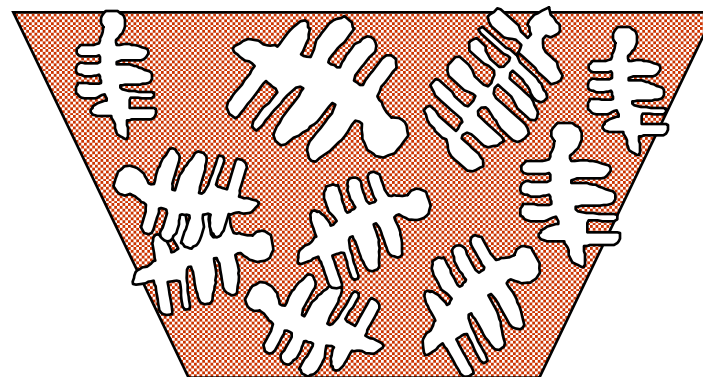
• **alto**



Líquido

Dendrita de
Austenita

• **baixo**



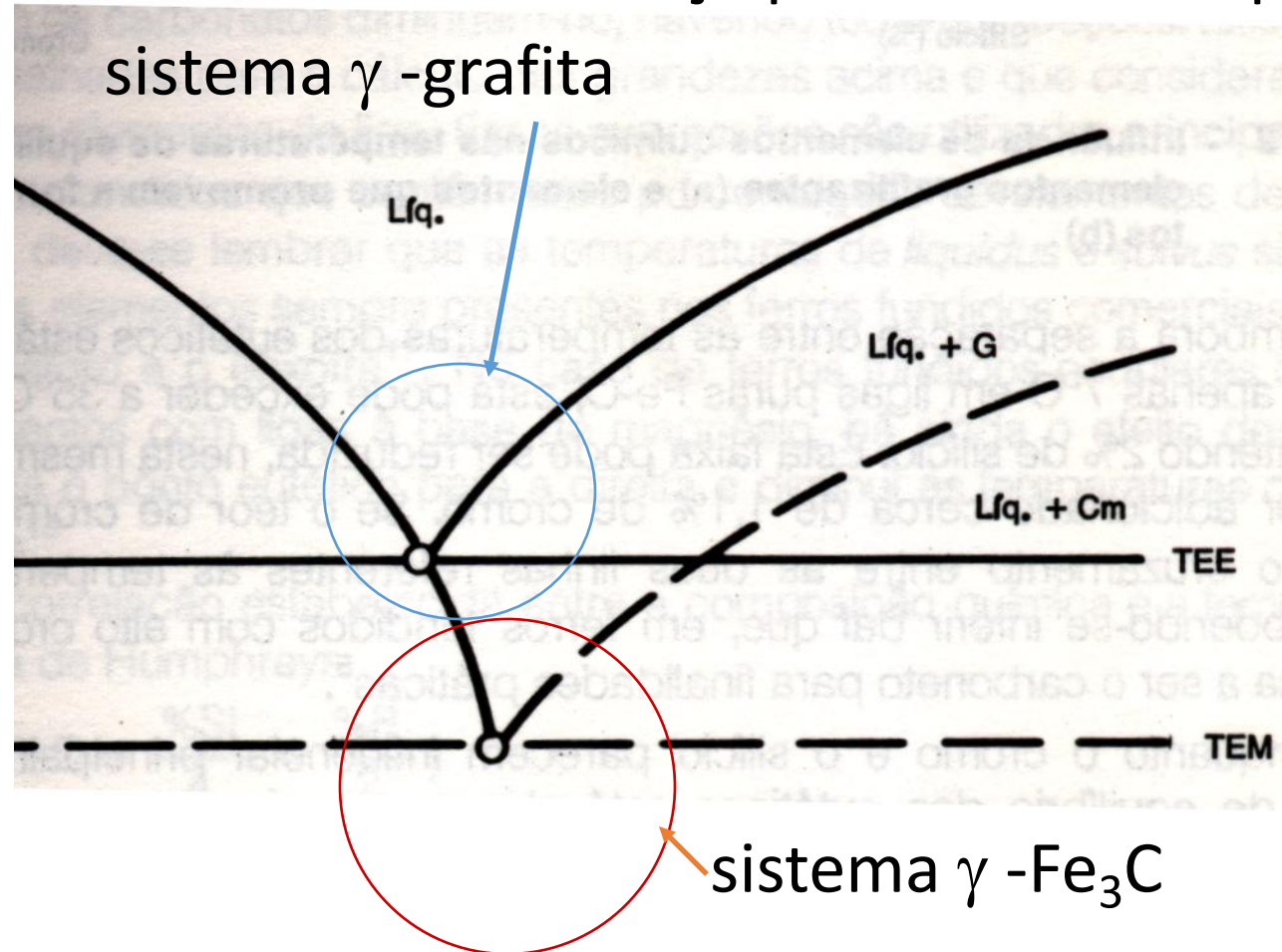
calcular $V_v\gamma$ para

*CE= 3,5%

*CE= 4,2%

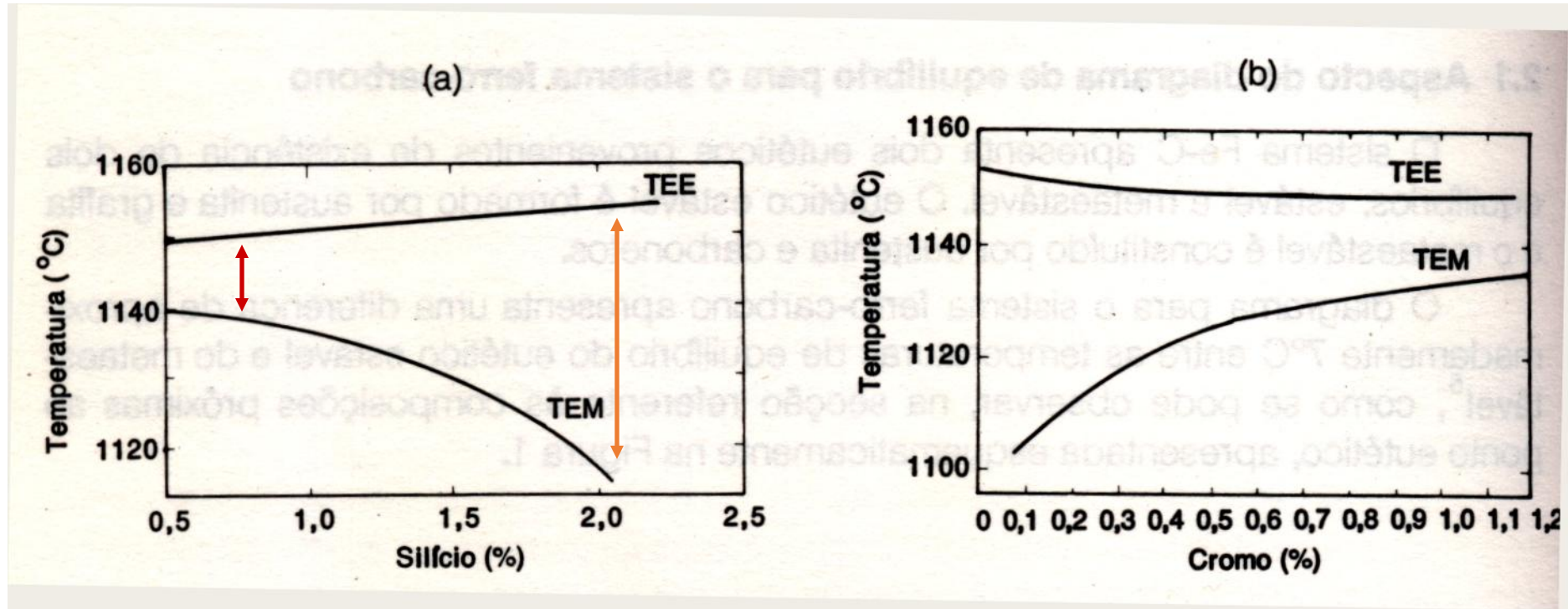
detalhe na região do eutético

O Fe-C puro apresenta 6 °C de diferença entre o eutético estável e o metaestável; no Fe-C-Si esta diferença pode aumentar para cerca de 30°C



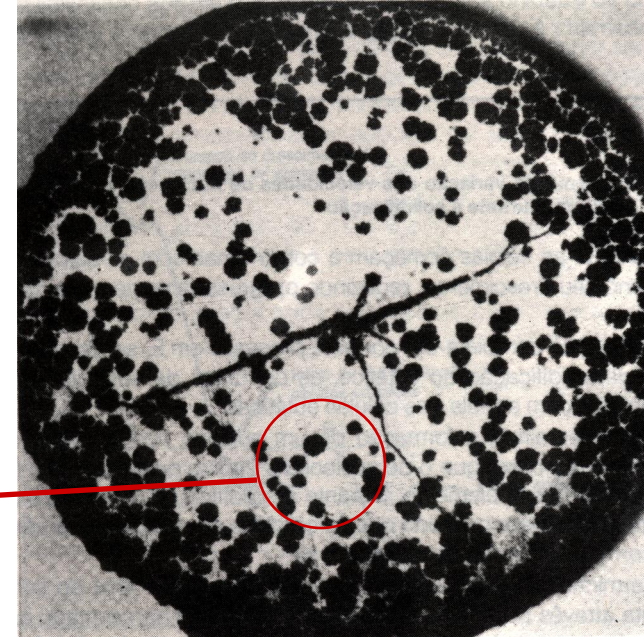
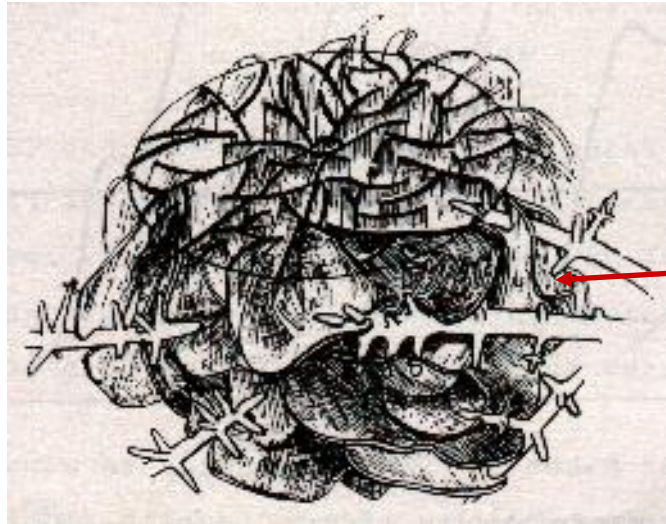
Solidificação do Eutético

Efeito do Si e do Cr



COMO SE SOLIDIFICA O FERRO FUNDIDO?

células eutéicas



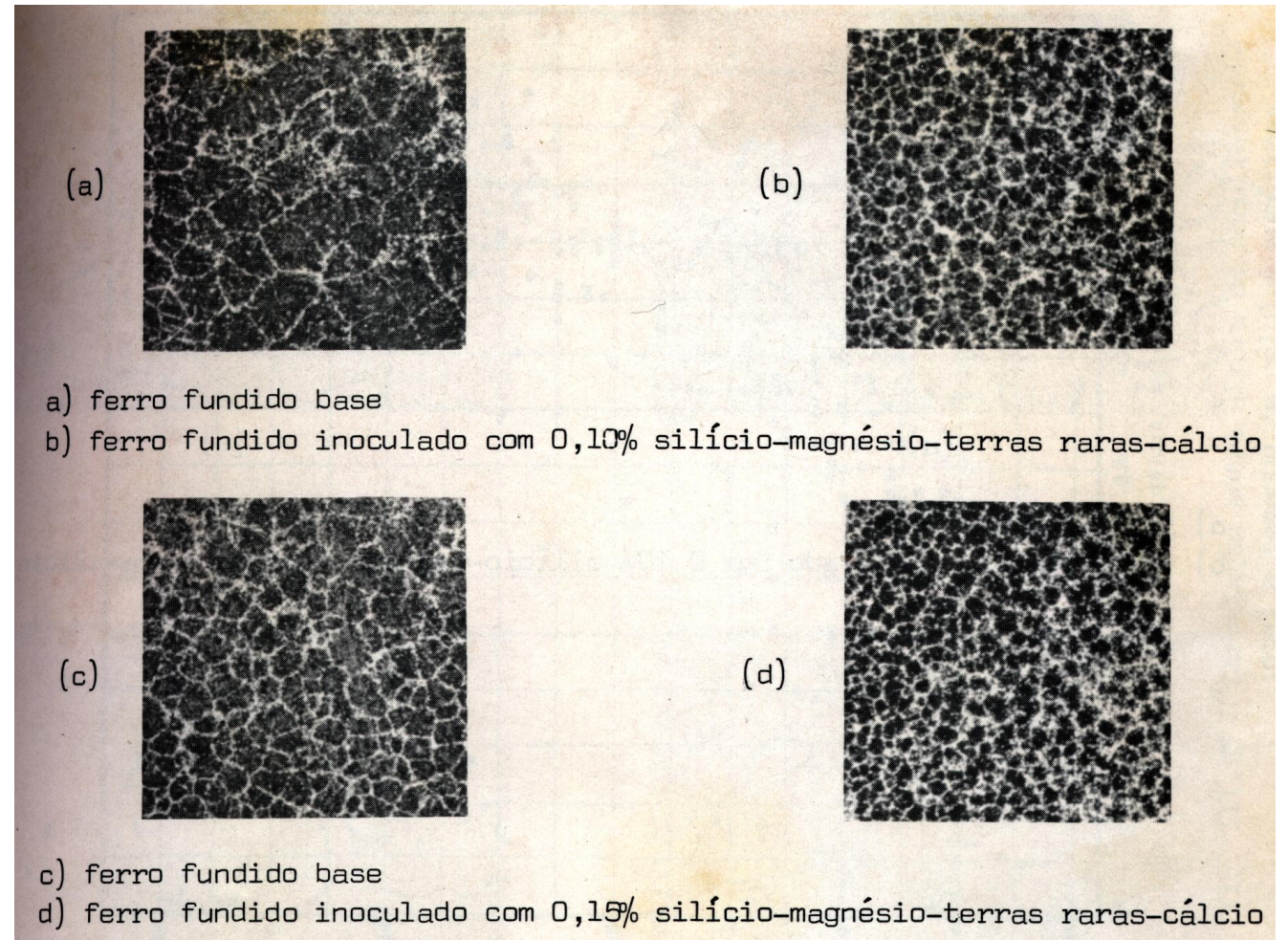
macro: barra congelada
(solidificação interrompida
para estudar o processo)

A nucleação da fase grafita é difícil, precisa ser ajudada através de inoculação!

Células eutécticas: efeito da inoculação

Inoculação corresponde a uma ação de adicionar partículas que servem como substrato para formação de núcleos, na panela de metal fundido ou mesmo dentro do molde, de forma a aumentar a taxa de nucleação na solidificação e refinar a estrutura.

Sem inoculação é muito difícil obter estrutura 100% grafítica



Constituição dos ferros fundidos

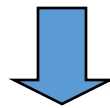
alguns conceitos

grafita

- constitui cerca de 10% do volume

(obs.:densidade=2,25)

- várias morfologias e tamanhos



classificação

Aspecto da grafita lamelar

ferro fundido cinzento, observado no MO com 100X de aumento



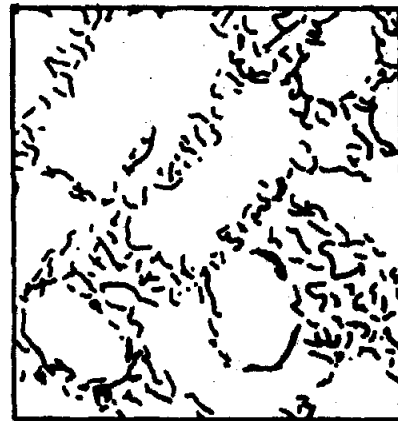
Tipo A



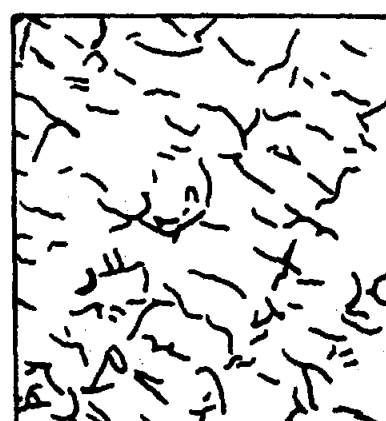
Tipo B



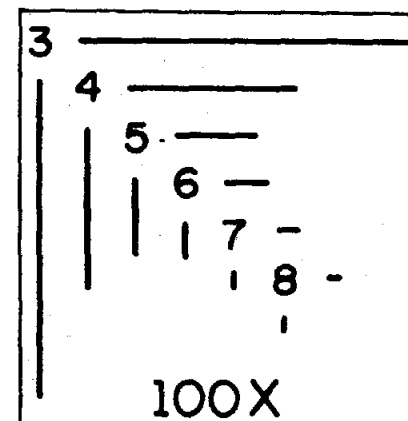
Tipo C



Tipo D



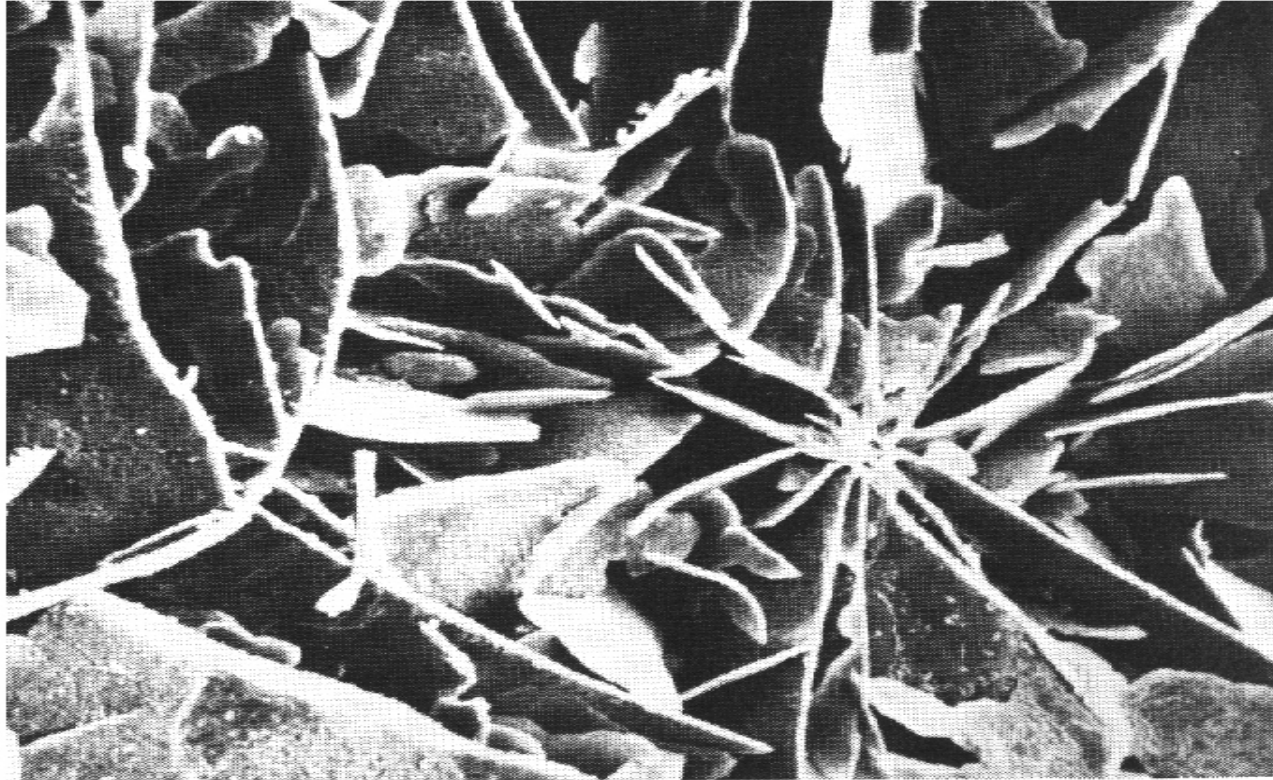
Tipo E



Classificação ASTM e AFS
para tamanho de veios de gra-
fita - 100*

Aspecto da grafita lamelar

em 3 dimensões percebe-se que as lamelas são a intersecção de folhas ou placas de grafita com o plano de polimento !



3:1 methyl acetate – liquid bromine

130×

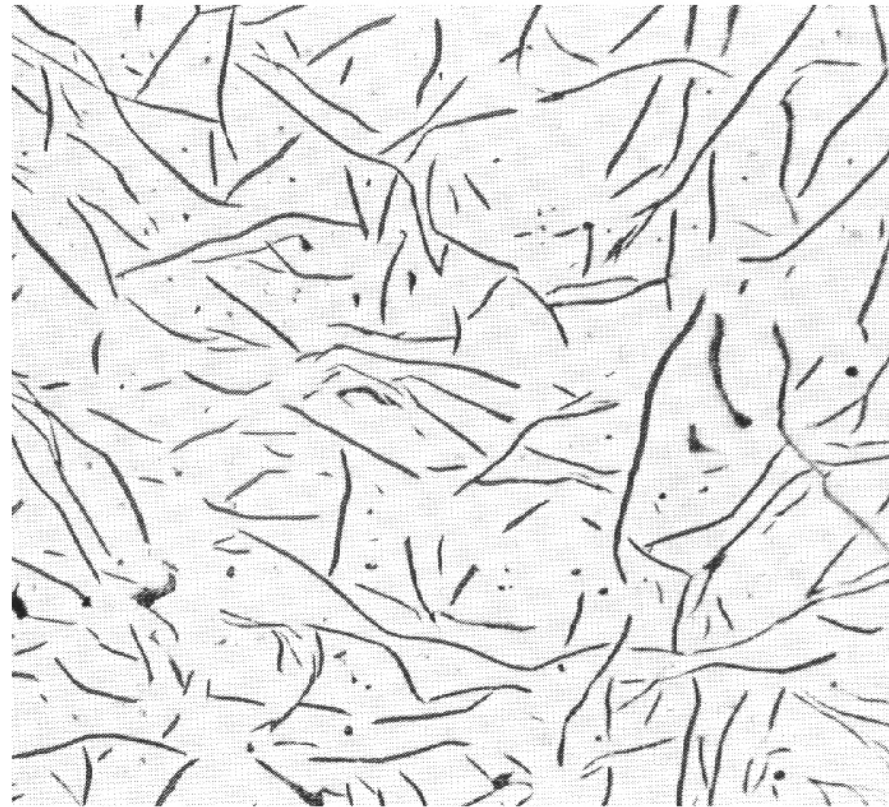
Aspecto dos veios de grafita observados em MEV após ataque profundo. O ataque dissolve a matriz metálica, revelando a estrutura dos veios de grafita.

Aspecto da grafita lamelar

desenho do livro do Eugen Piwowarski (1ª edição em 1929!)



aspecto da grafita lamelar



As polished (not etched)

100X

Ferro fundido cinzento contendo veios de grafitas com distribuição do tipo A (distribuição uniforme, sem orientação preferencial).

Contribuição da Grafita

- Diminui o LR, a Resist. à Fadiga e a Dureza
 - efeitos mais graves para partículas grosseiras
- Melhora a usinabilidade
- Aumenta o efeito de amortecimento de vibrações
- melhora condutividade térmica e resist. a choque ou fadiga térmicos
- responsável pelo efeito de auto-alimentação

Microestruturas de ferros fundidos



Fig. 18 (a) - Ferro fundido cinzento per-
lítico. Perlita fina e gra-
fita tipo A. CE = 3,8. Ata-
que Nital. Aumento 100 x.
Ampliação 1,5 x.

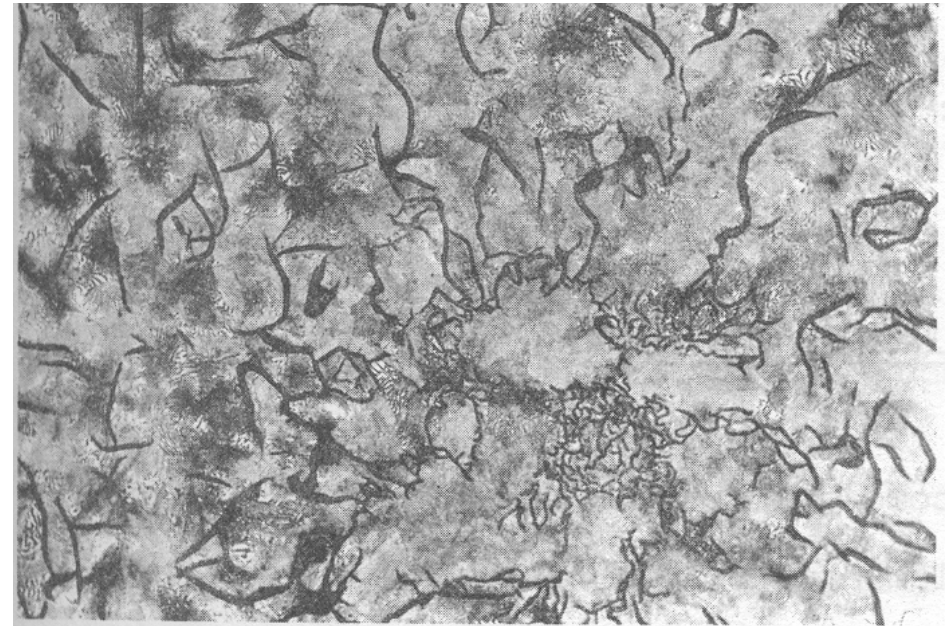


Fig. 18 (b) - Ferro fundido cinzento per-
lítico com 0,1% Sn. Perlita
fina e grafitas tipos A e D.
CE = 3,8. Ataque Nital. Au-
mento 200 x.

Microestruturas de ferros fundidos

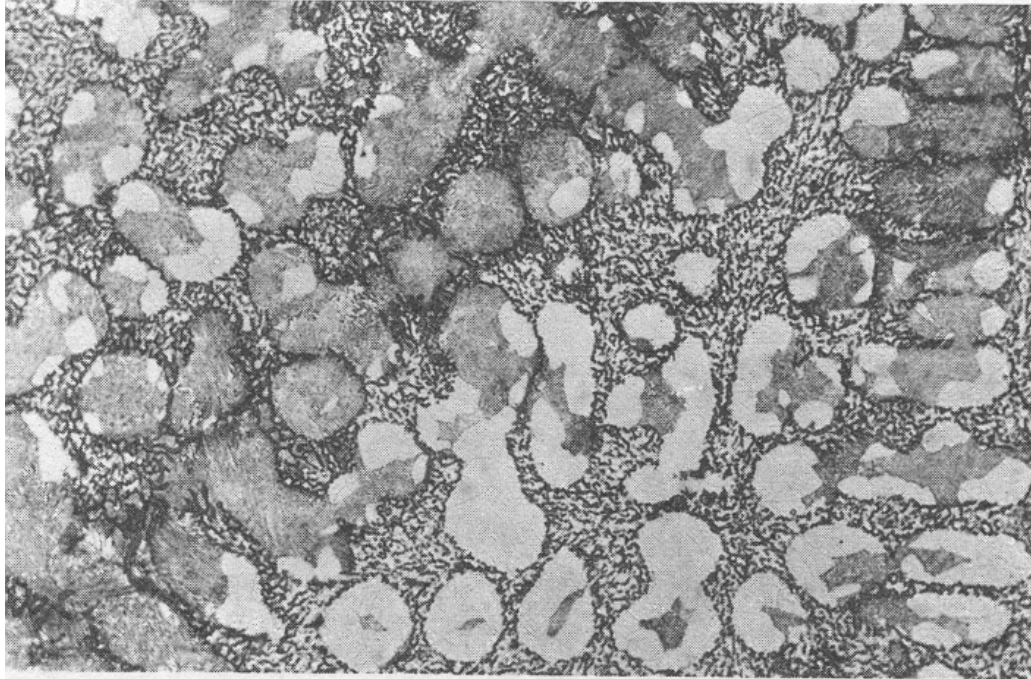


Fig. 17 (b) - Ferro fundido cinzento com grafita tipo D. Ferrita, Per_lita, Grafita, CE 3,8. Ata-
que Nital. Aumento 200 x.

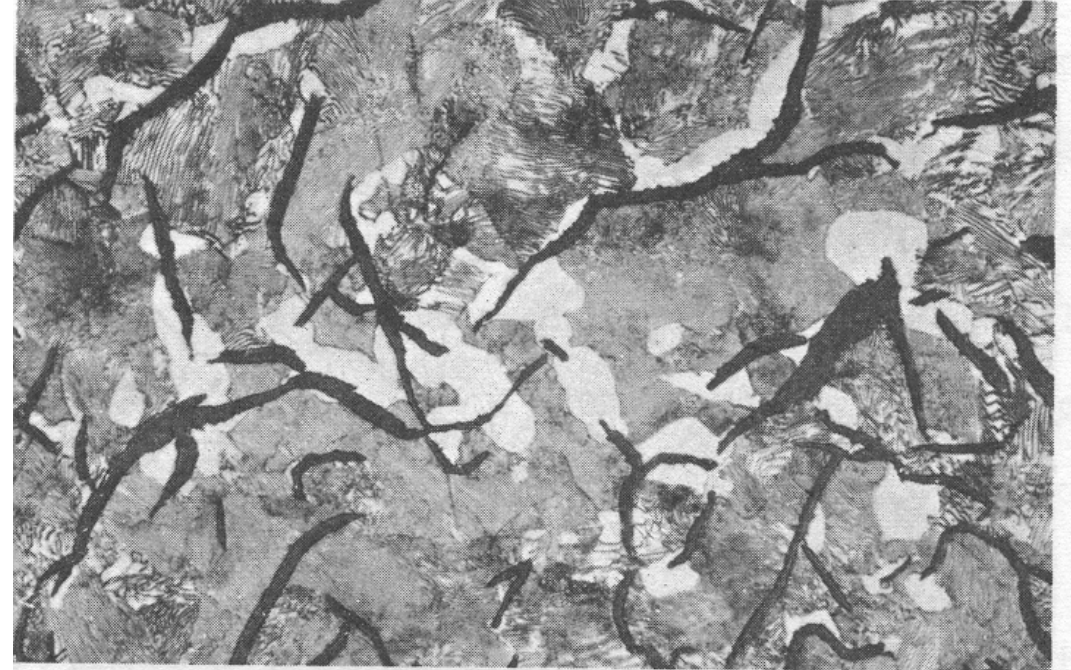
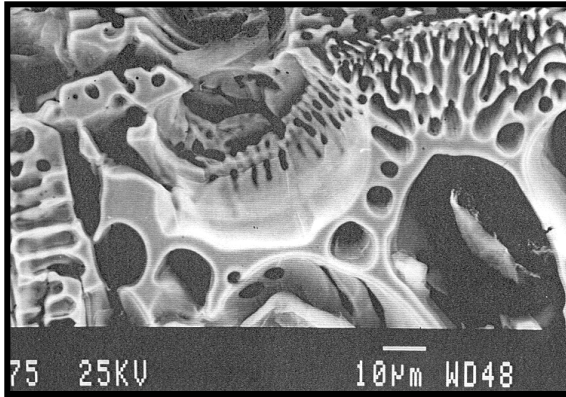


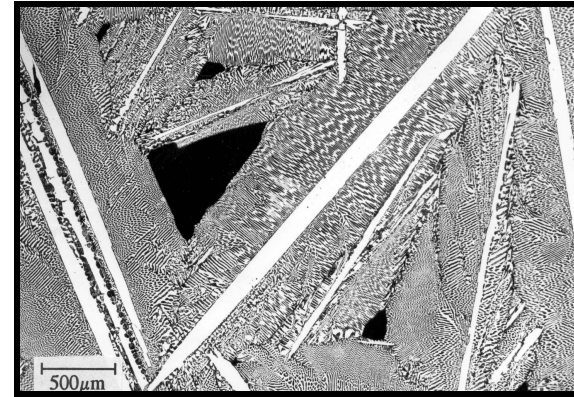
Fig. 17 (a) - Ferro Fundido cinzento per_lítico-ferrítico. Ferrita, per_lita e grafita, CE 4,4. Ata-
que Nital. Aumento 400 x.

FERRO FUNDIDO BRANCO – A estrutura ledeburítica

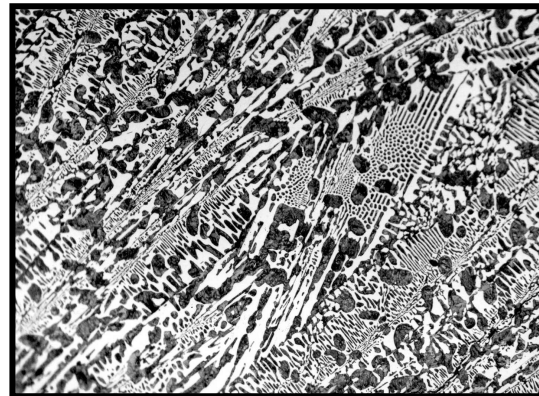
Se usarmos a regra das alavancas veremos que a cementita é a fase majoritária do eutético γ + cementita. A austenita tem a forma de bastonetes em uma matriz de cementita quando o crescimento é cooperativo; o eutético é apenas parcialmente cooperativo, as vezes a cementita cresce em avanço. A estrutura foi desvendada pelo Matts Hillert nos anos 60, fazendo polimentos sucessivos e desenhando em 3D



Ledeburita (MEV ataque profundo)

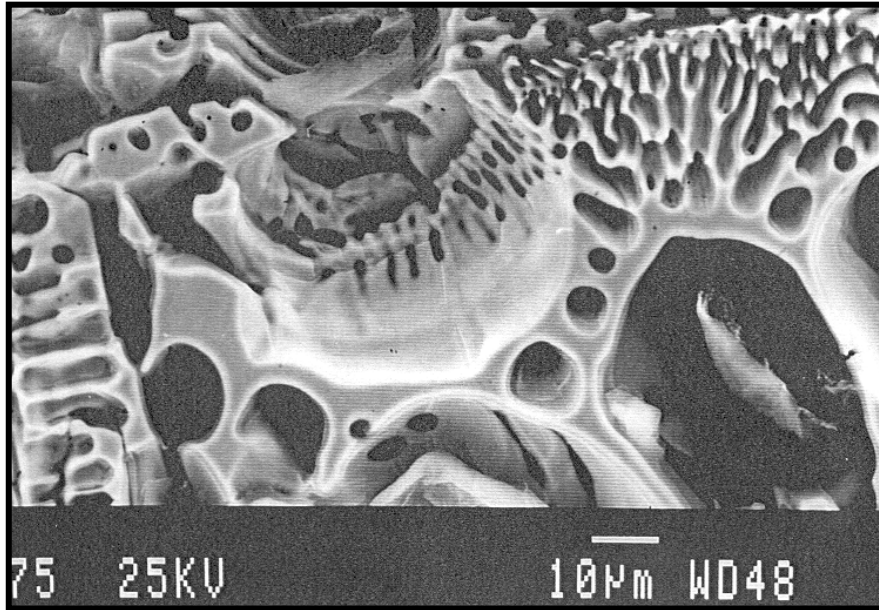


Liga
hipereutética

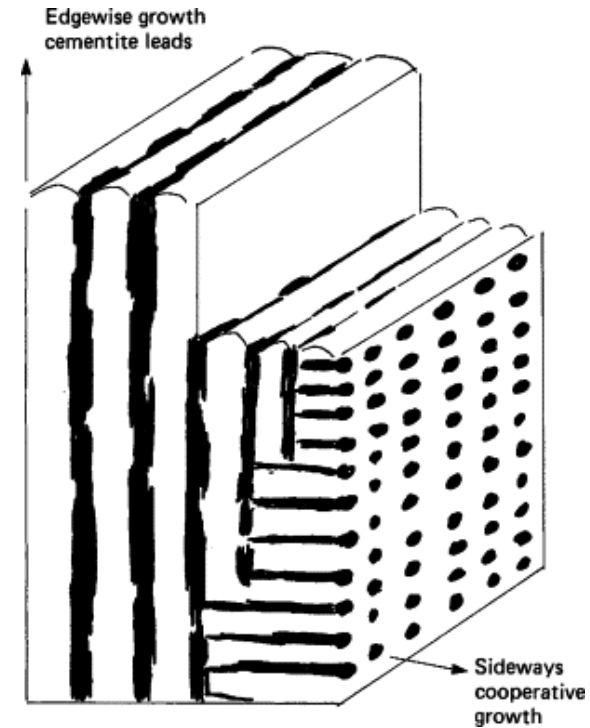


Liga hipoeutética (100X)

O microconstituente ledeburita



Ledeburita (MEV ataque profundo)



Esquema de crescimento do eutético $L \rightarrow \gamma + \text{Fe}_3\text{C}$

Ledeburita: Fe_3C a fase branca e austenita a preta, as fases tem OR

$(104)\text{Fe}_3\text{C} // (101)\gamma$

$(010)\text{Fe}_3\text{C} // (3^{-1}\bar{1}0)\gamma$

Microestrutura de ferro fundido mesclado

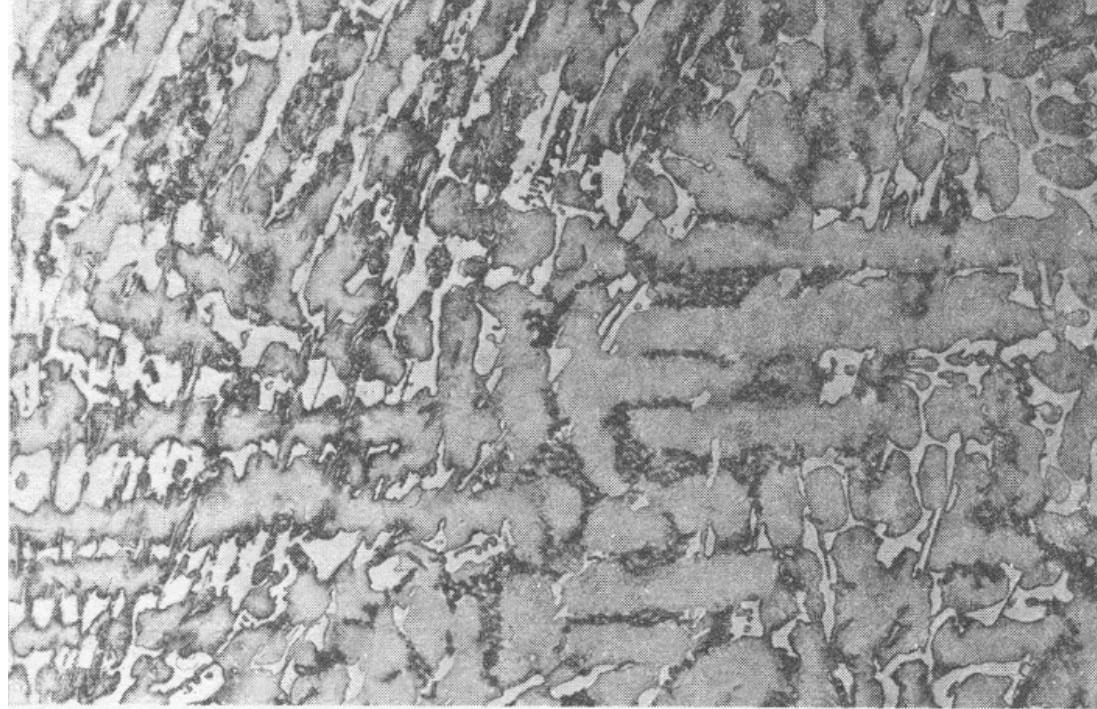



Fig. 18 (c) - Ferro fundido mesclado. Grafito tipo D e carbonetos (brancos), matriz perlítica. CE = 3,8. Ataque Nital. Aumento 200 x.

Constituição dos ferros fundidos

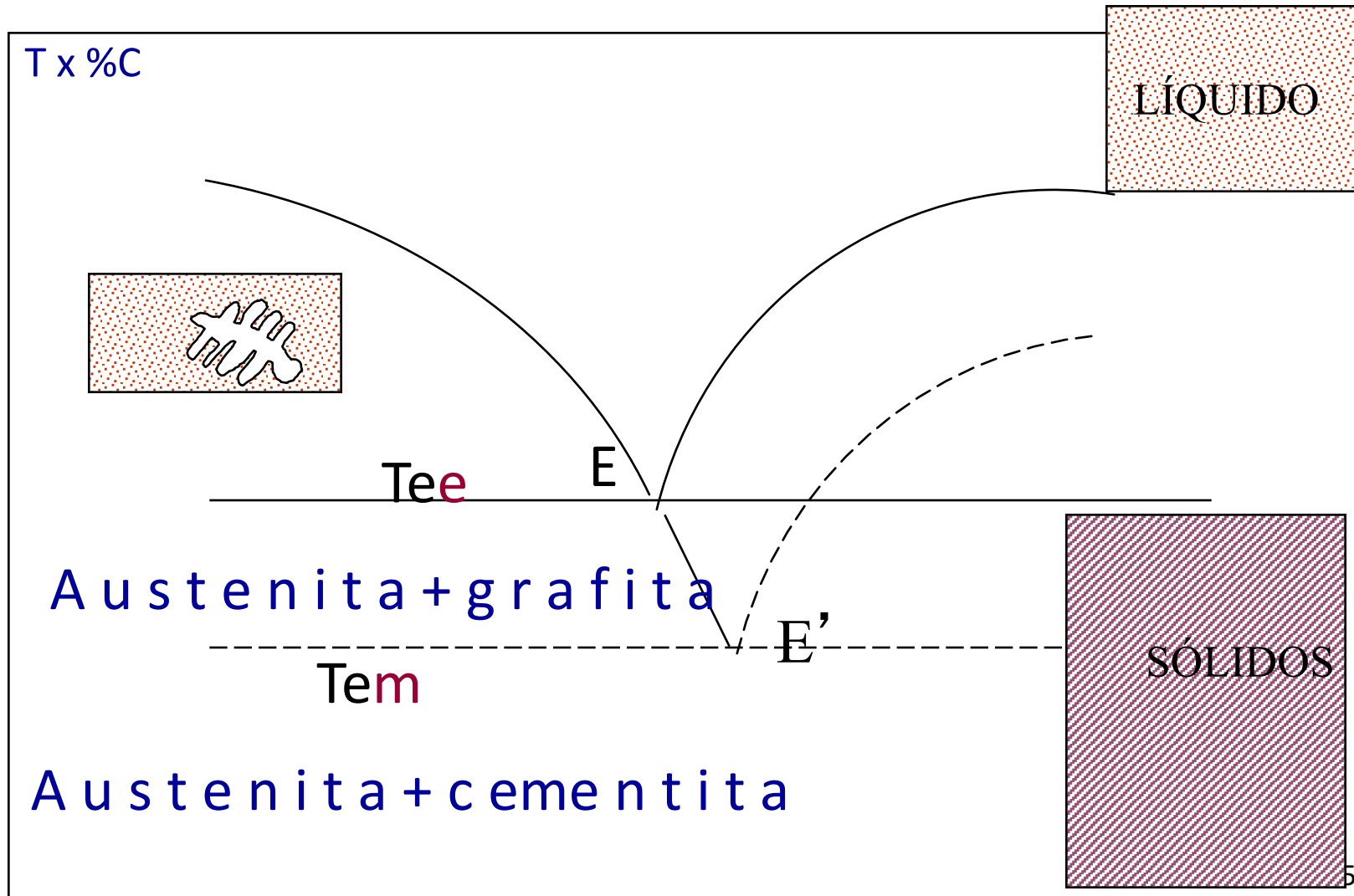
alguns conceitos

cementita livre

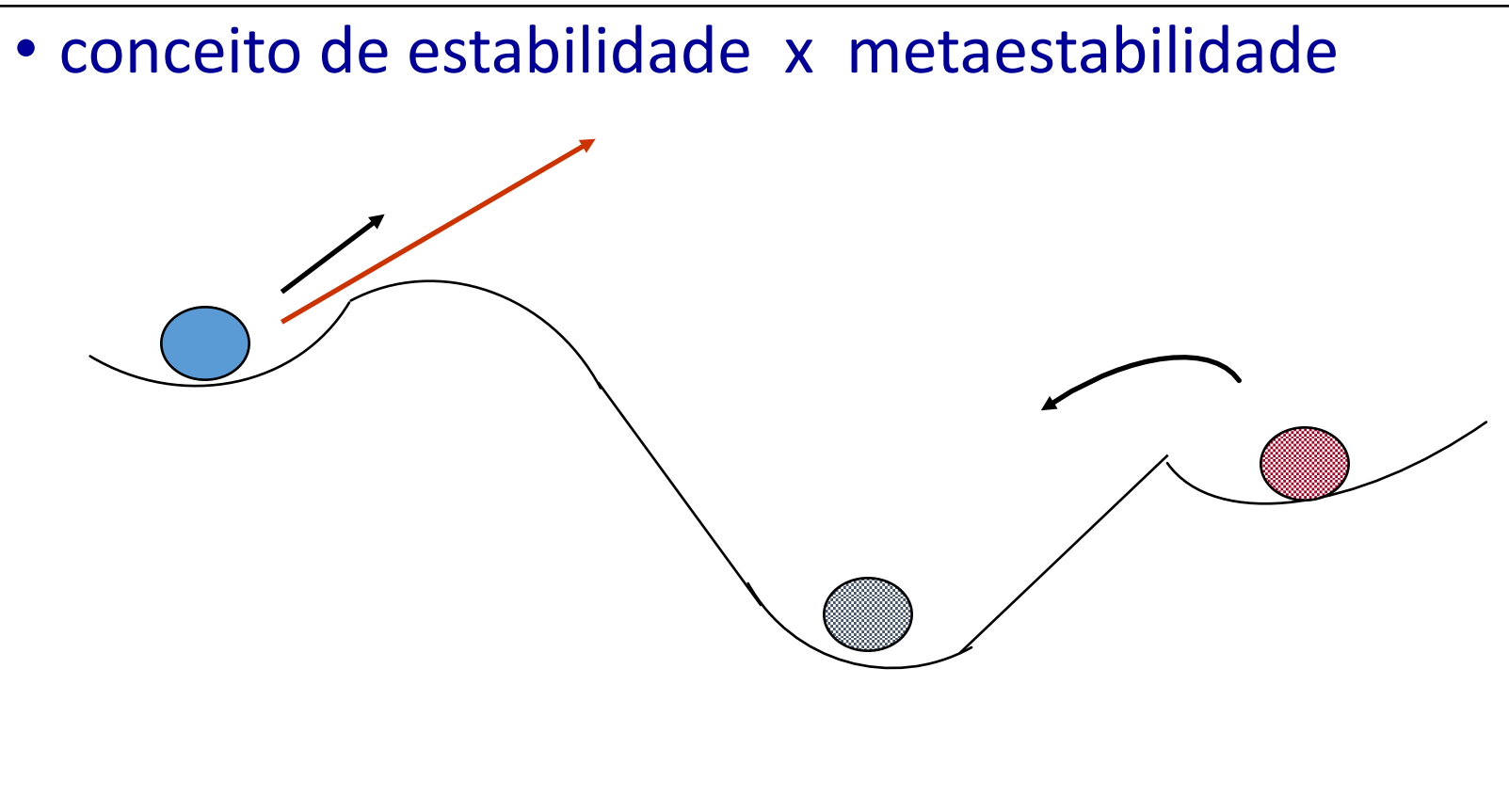
- altíssima dureza: 800 a 1100 HV
- aumenta a dureza do ferro fundido
- diminui a resistência mecânica  gráfico
- **prejudica muito a usinabilidade**
- aumenta a resistência ao desgaste: **discutir aplicações!**
- “rouba” grafita necessária à auto-alimentação (*expansão volumétrica devido à baixa densidade da grafita, que compensa parcialmente a contração da solidificação*)

Temperatura de equilíbrio estável x metaestável :

Competição entre a solidificação segundo o equilíbrio
estável x metaestável



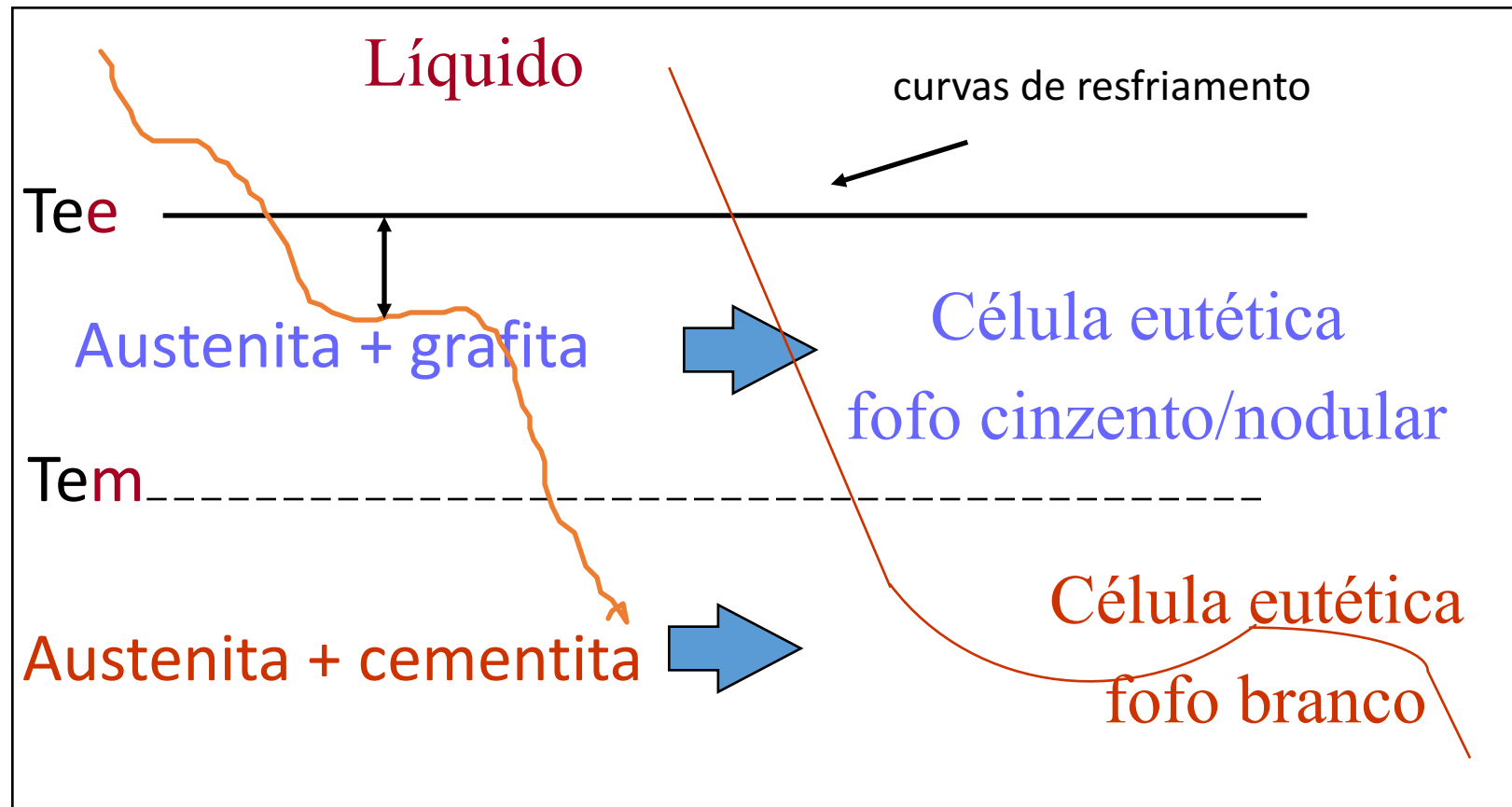
Formação do eutético austenita + cémentita



Estável x metaestável

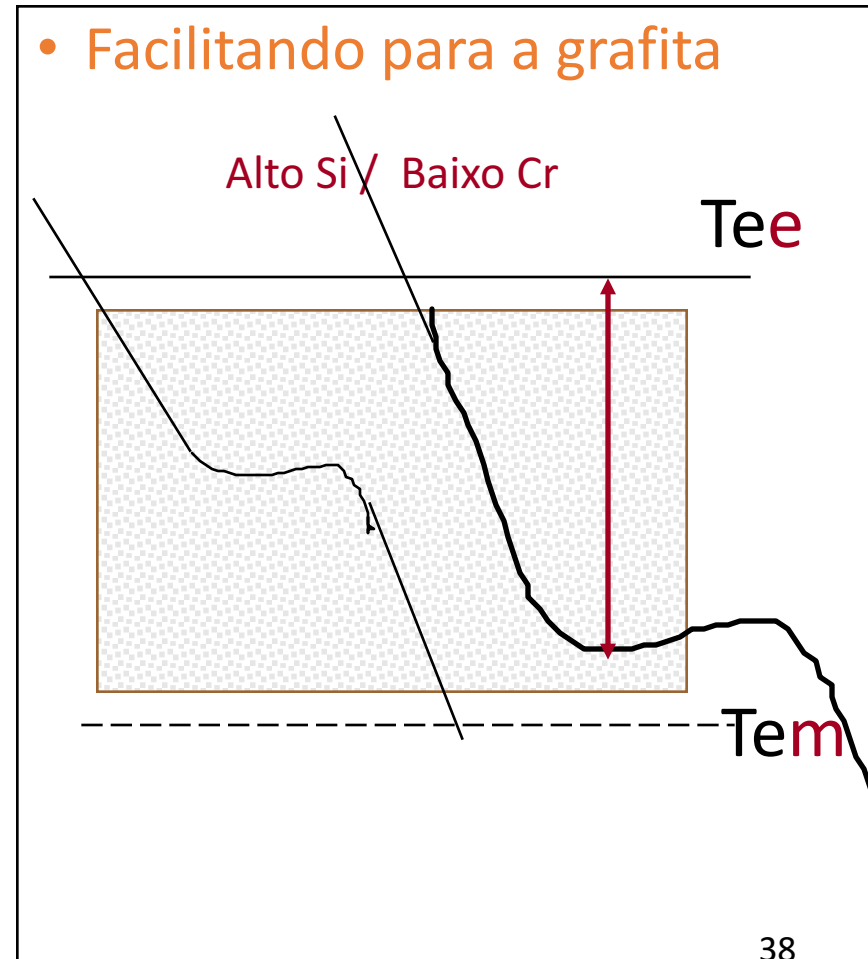
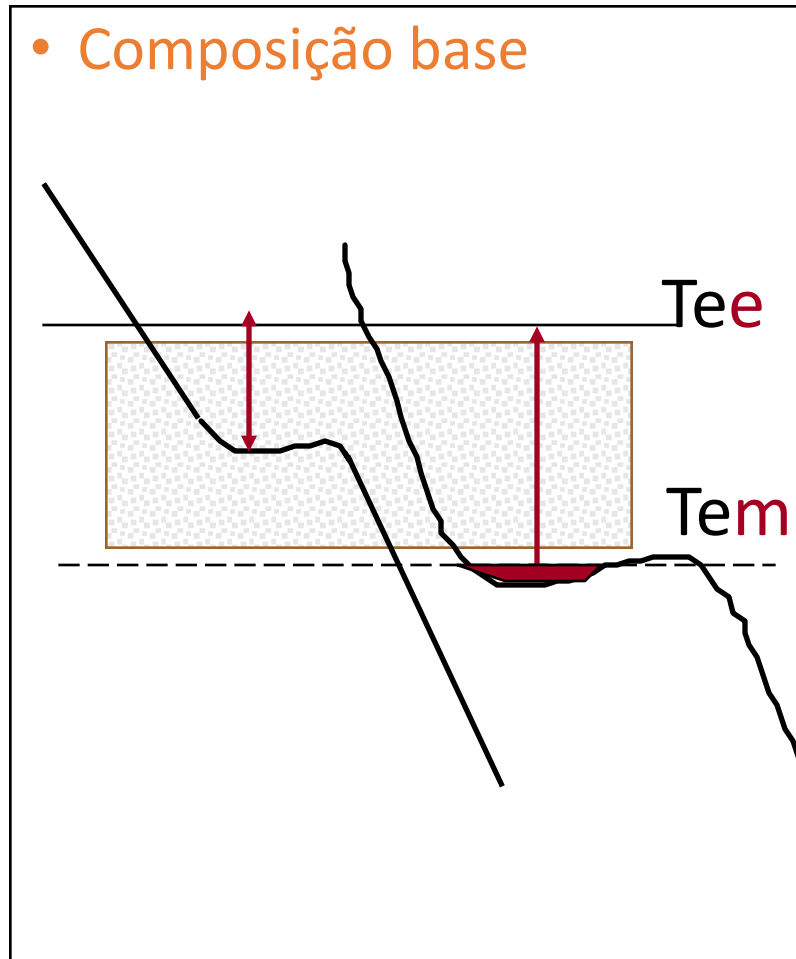
(estudo com curvas de resfriamento)

- grafita ou cementita eutéticas vão depender da temperatura em que ocorre a solidificação

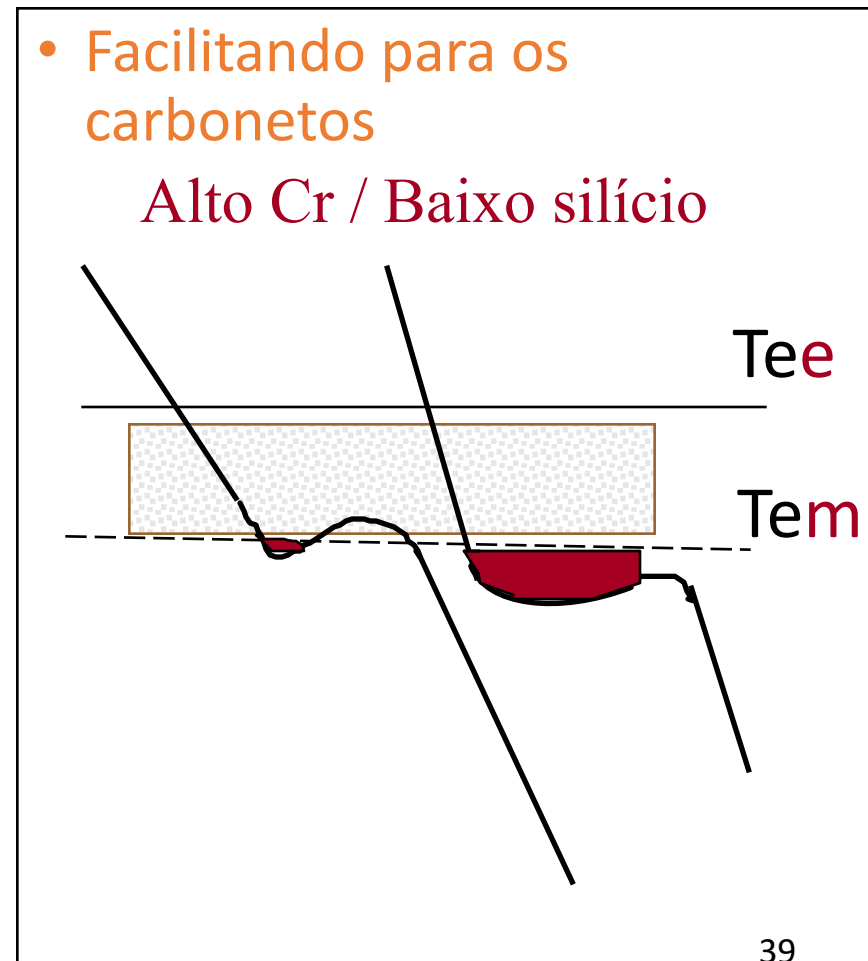
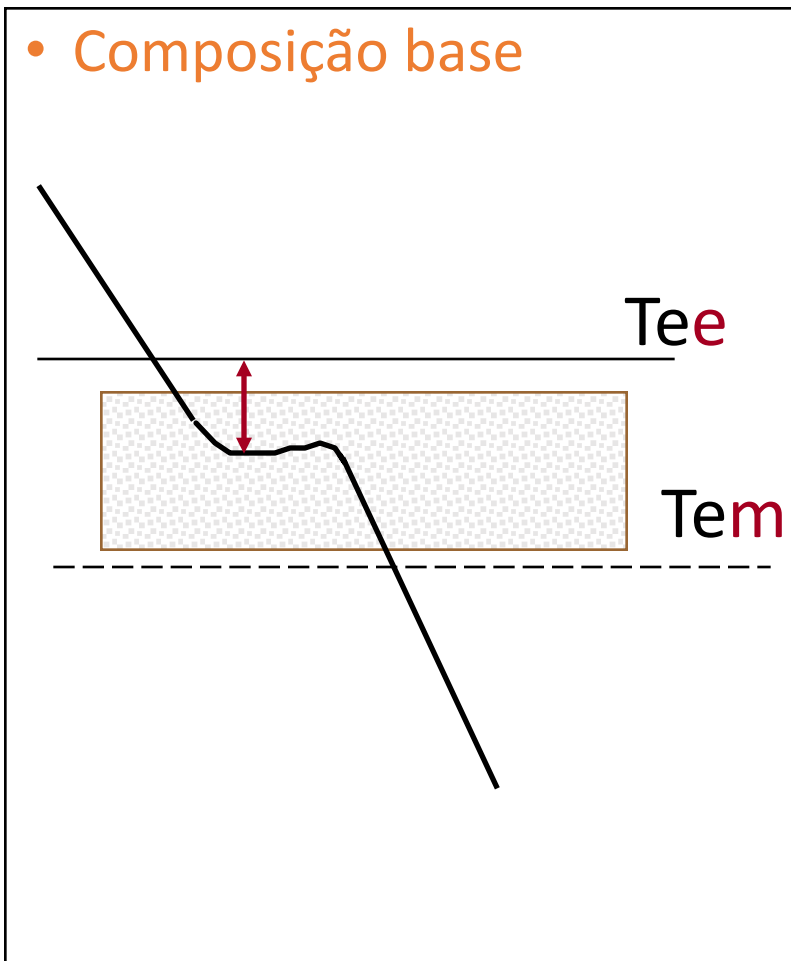


Efeito da composição química

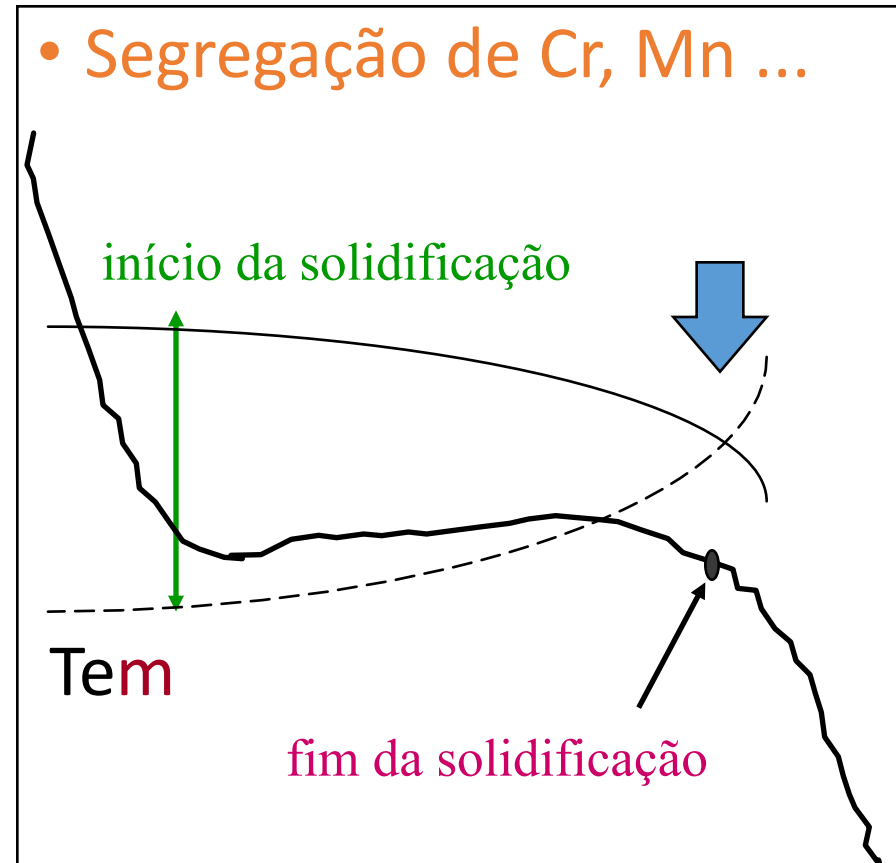
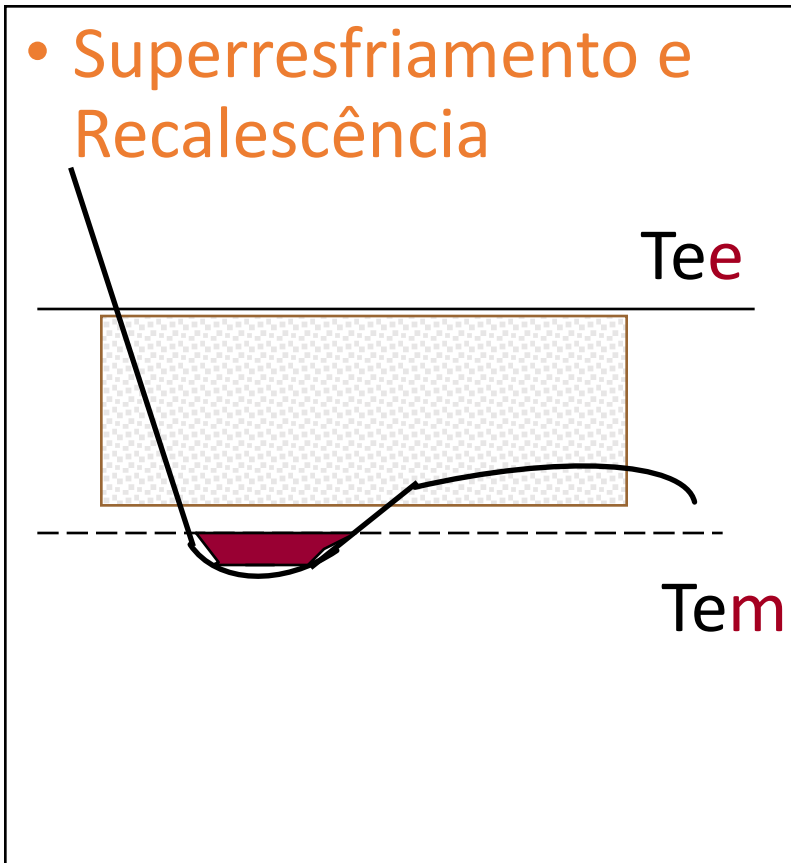
(e da velocidade de resfriamento – esquerda resfriamento mais rápido em cada gráfico)



Efeito da composição química

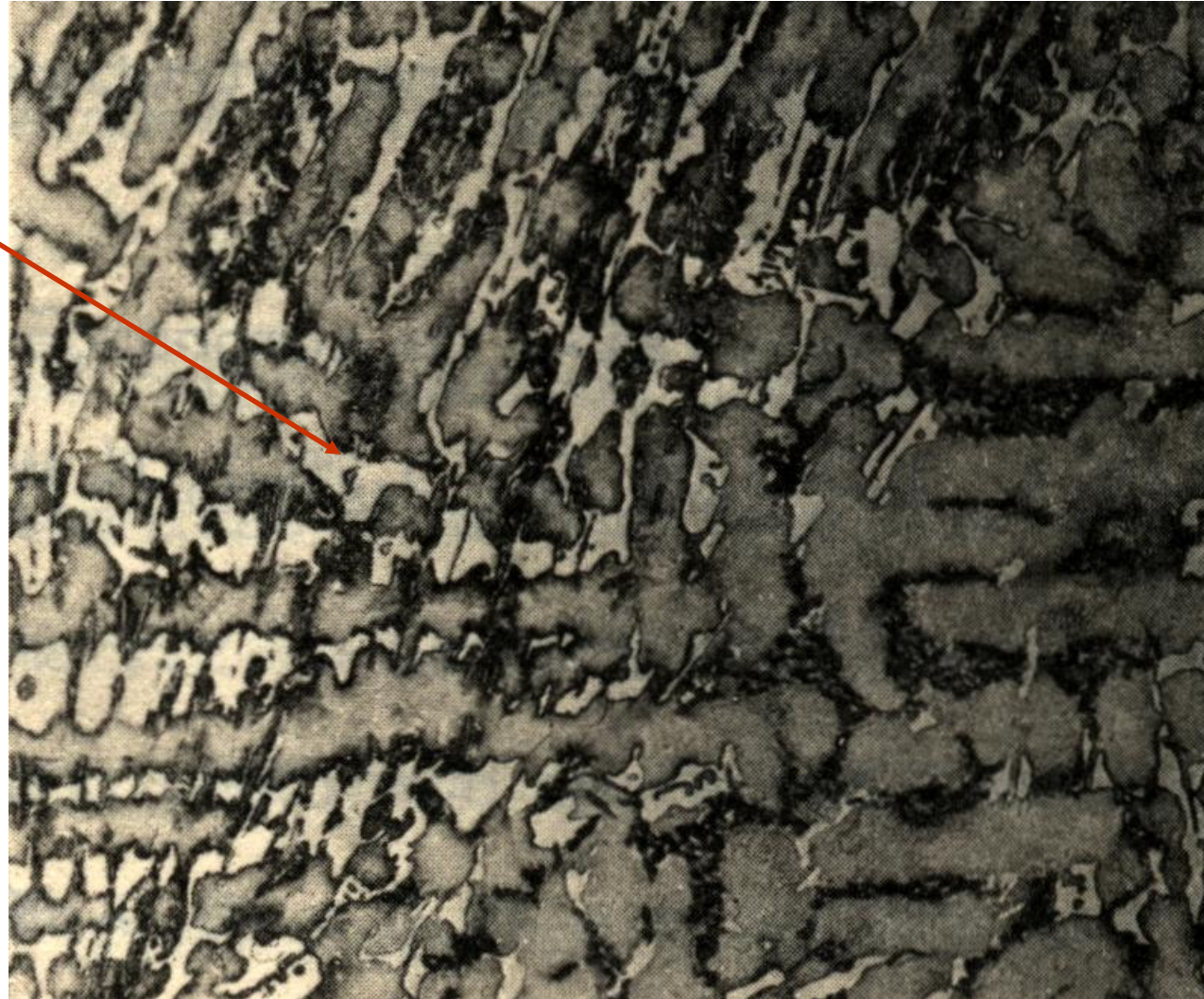


Estrutura mesclada



Constituição dos ferros fundidos

cementita
livre



Prova de coquilhamento

– medida do grau de inoculação

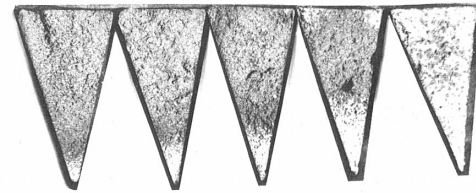
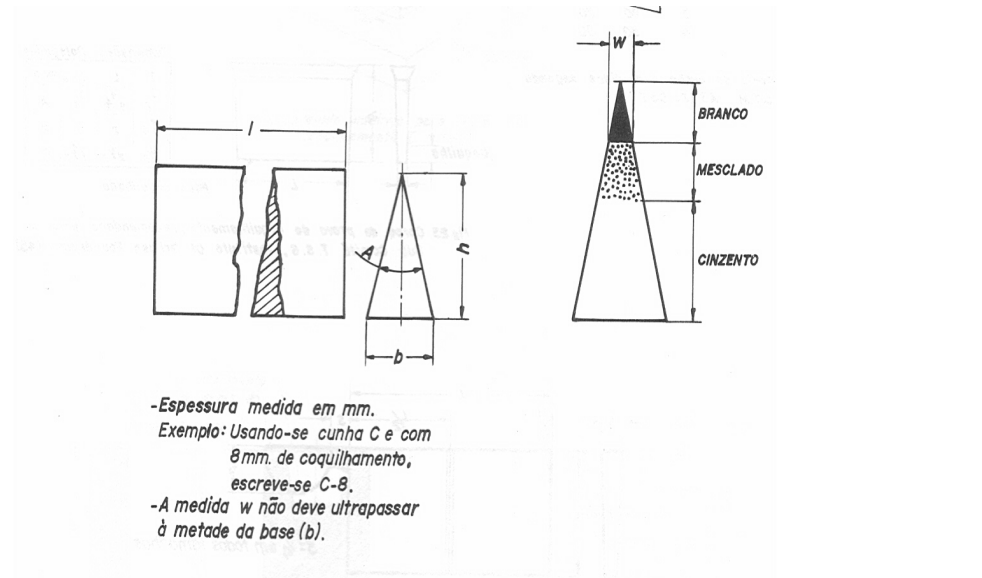
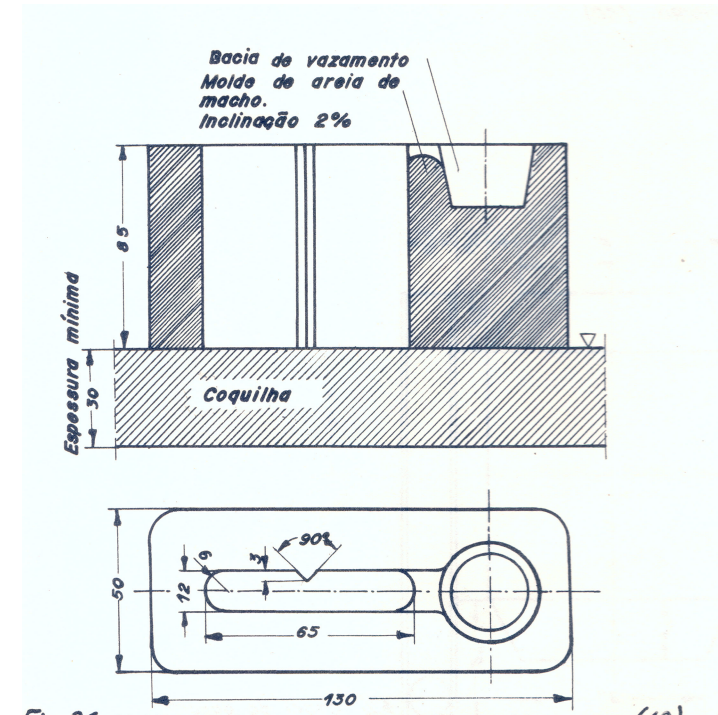
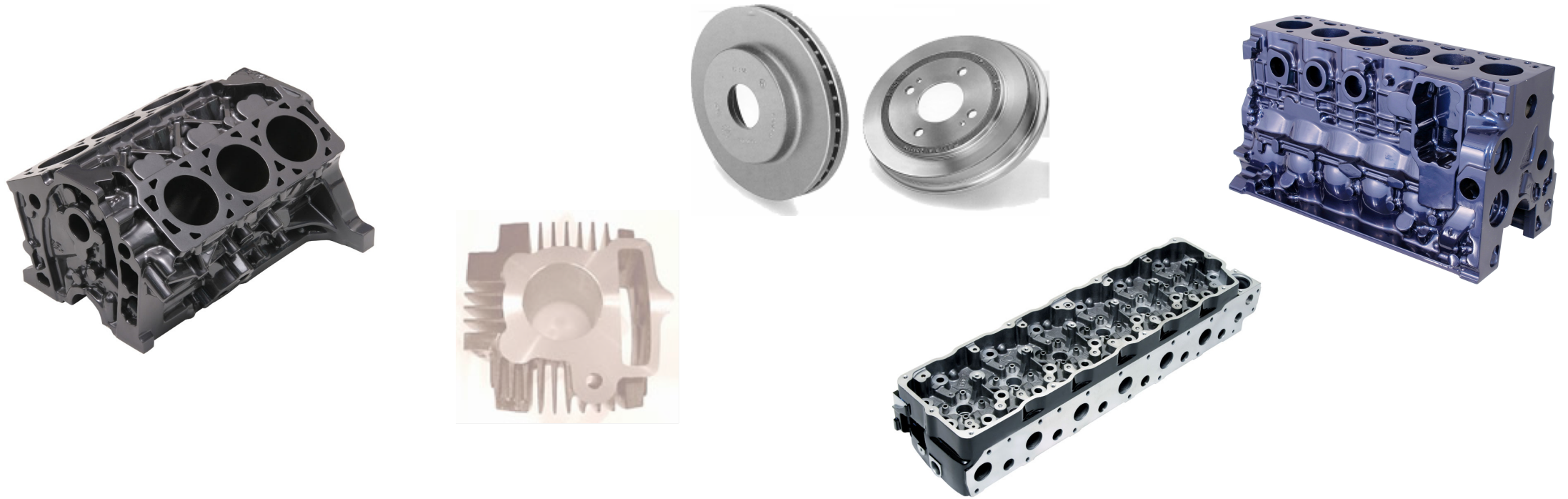


Fig. 30 – Fratura de corpo de prova em cunha tipo ASTM nº 4. Os corpos de prova da esquerda para direita, foram mantidos a temperatura de 1500°C, respectivamente, durante 1, 5, 15, 25 e 35 minutos.



Ferro Fundido cinzento: barato, boa condutividade térmica, amortece vibrações, fácil de usinar



Aplicações típicas de ferros fundidos cinzentos. Discos de freio, blocos e cabeçotes de motor e bloco de motor de motocicleta. Cortesia Tupy Fundições.

Formas de crescimento da grafita

- A forma assumida pela grafita durante a solidificação determina as propriedades do ferro fundido.
- Até meados do século XX só se conhecia o ferro fundido cinzento com a grafita na forma de veios, que parecem partículas isoladas no microscópio ótico, mas que na verdade estão interconectados formando um esqueleto contínuo em cada célula eutética.
- A grafita apresenta resistência mecânica muito baixa, portanto em relação a tensões de cisalhamento pode ser descrita como uma descontinuidade. Como a grafita em veios termina em pontas agudas, esta descontinuidade traduz-se em um forte efeito de concentração de tensão, levando a um alongamento desprezível nos ferros fundidos com grafita lamelar ou em veios.
- No meio do século passado foi inventada uma forma de produzir ferro fundido com a grafita na forma de esferas ou nódulos, conseguindo desta forma um aumento considerável da ductilidade – é o ferro fundido nodular

Formas de crescimento da grafita

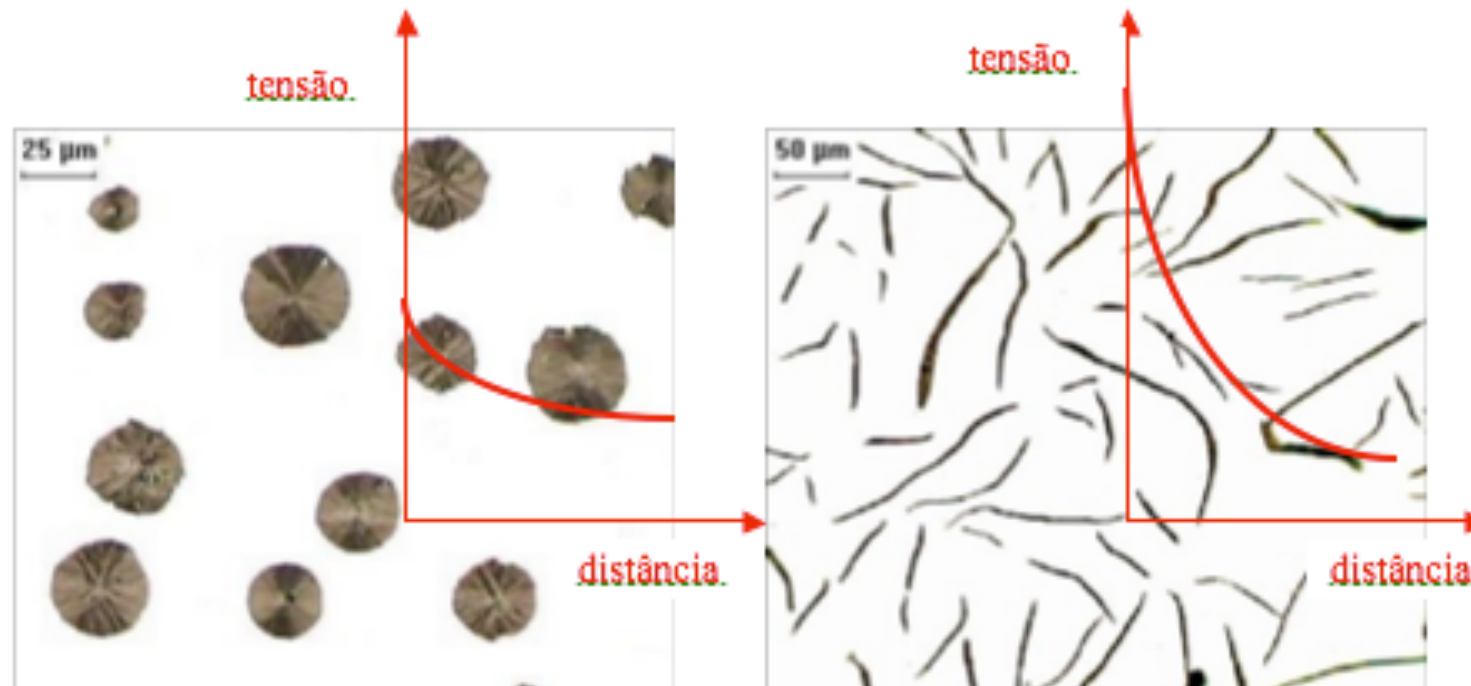
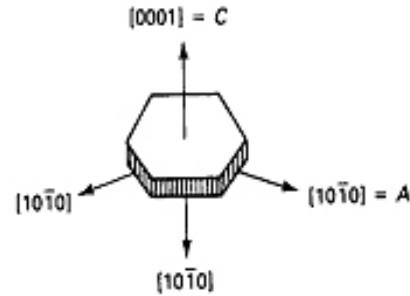
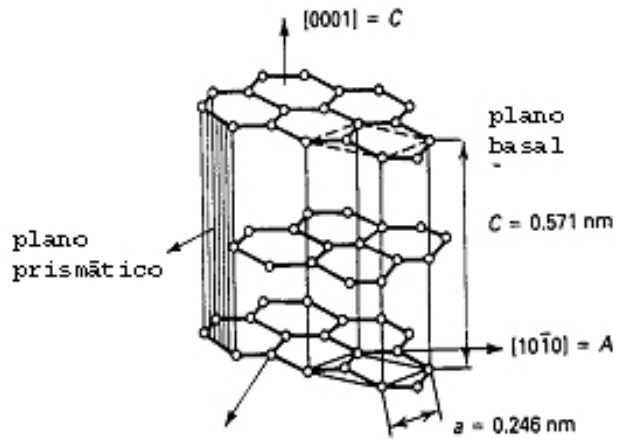


Figura 2.1 – A presença da grafita traduz-se em efeito de concentração de tensões na matriz próxima à grafita. A intensidade da concentração de tensões depende da forma da grafita. Ferro fundido nodular (a – 400 X) e ferro fundido cinzento (b – 200 X). Sem ataque.

Formas de crescimento da grafita

- Nas ligas Fe-C de alta pureza a grafita cristaliza a partir do líquido crescendo na direção dos planos basais, que são mais compactos e apresentam baixa energia de interface com o líquido. O crescimento basal, a partir de núcleos heterogêneos, dá origem a esferulitos policristalinos, resultando na forma nodular (análogo à forma de cristalização de polímeros)
- Os ferros fundidos industriais são ligas complexas, contendo grande quantidade de impurezas, em particular S, O e P. Estes elementos são tensoativos, e são adsorvidos nos planos prismáticos reduzindo sua energia interfacial para valores menores do que o plano basal, resultando no crescimento de grafita lamelar, em veios.
- A adição de pequenas quantidades de magnésio ao metal líquido antes do vazamento em moldes tem forte efeito desoxidante e desulfurante, removendo S e O da solução e alterando as energias interfaciais de forma a favorecer o crescimento dos planos basais. **Este tratamento é chamado de nodulização.**

Formas de crescimento da grafita

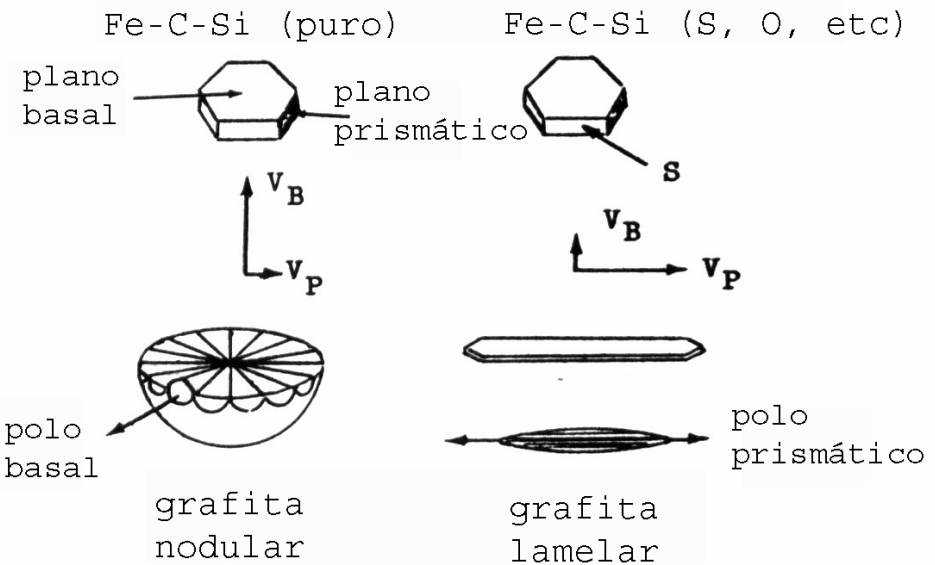


– Estrutura hexagonal da grafita. O crescimento preferencial na direção C (plano basal) resulta em grafita nodular, enquanto crescimento na direção A (planos prismáticos) produz grafita lamelar (Gruzleski, 2000).

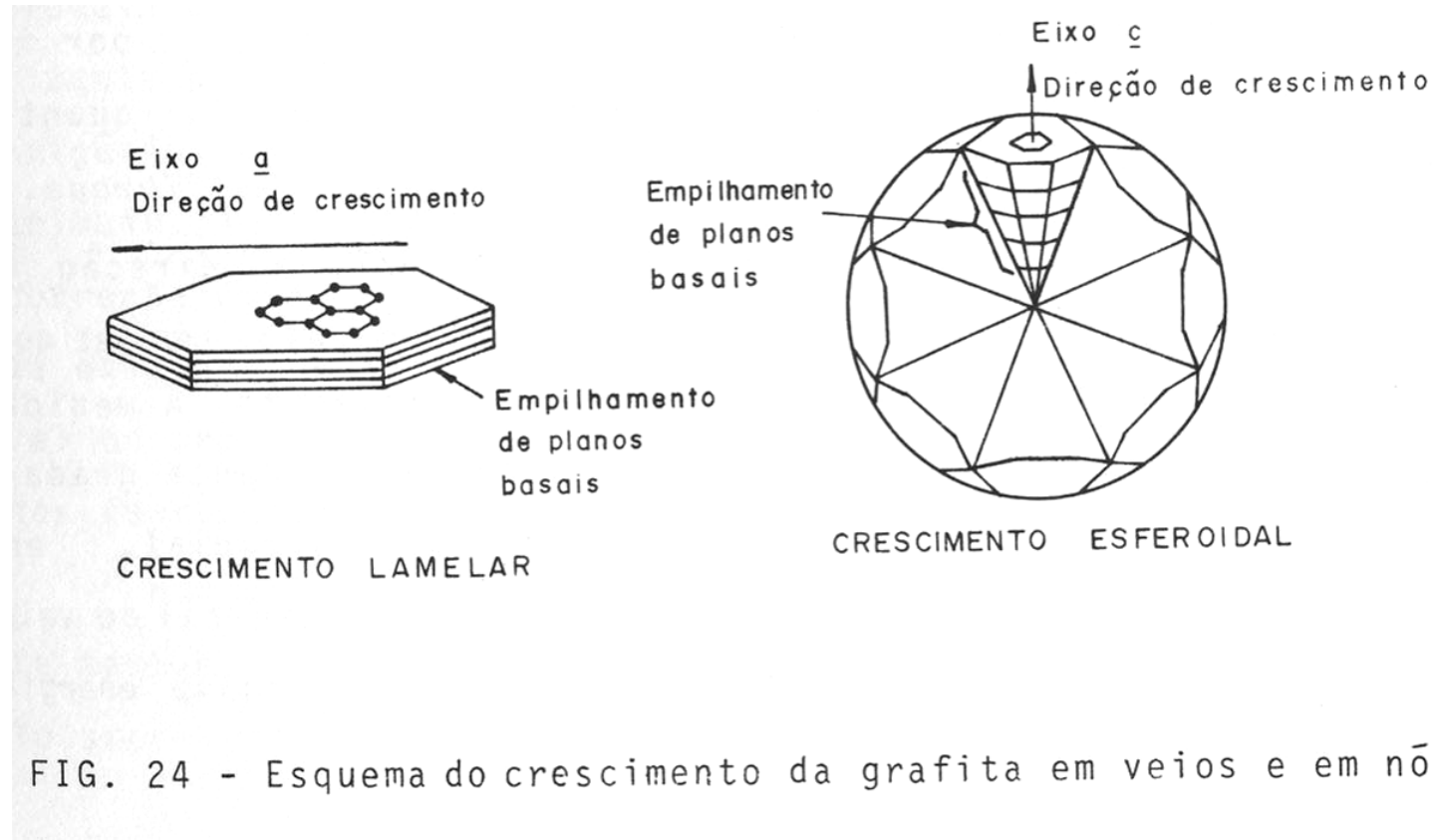
L
i
g
a
s

– Esquema do crescimento da grafita em veios e em nódulos (McSwain & Bates, 1974).

Ligas de alta pureza solidificam como nódulos, ligas com S e O solidificam como veios

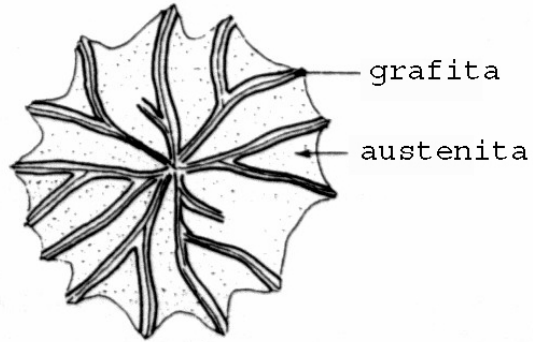


Formas de crescimento da grafita



os nódulos são formados por policristais cônicos, que apresentam interface de macla (baixa energia) entre si estes cristais podem ser enxergados observando com luz polarizada no MO

Formas de crescimento da grafita

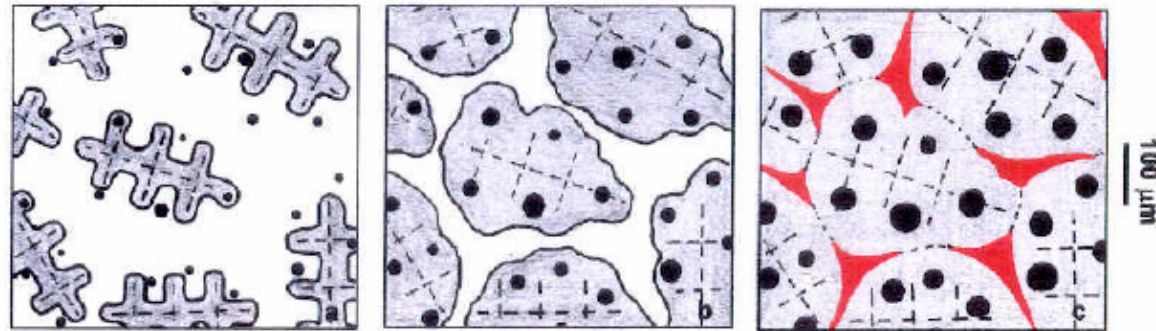


grafita
austenita

Eutético acoplado ou conjugado: Célula eutética de ferro fundido cinzento.
Grafita e austenita em contato com o líquido (Loper, 1989).



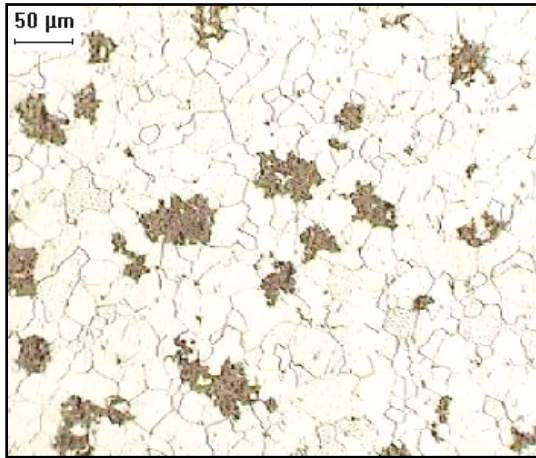
líquido
10 μ
2 μ
halo de austenita
dendrita de austenita



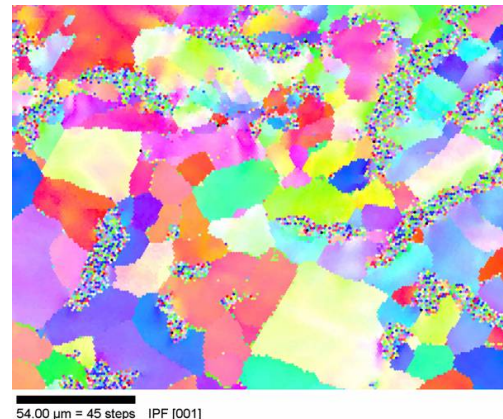
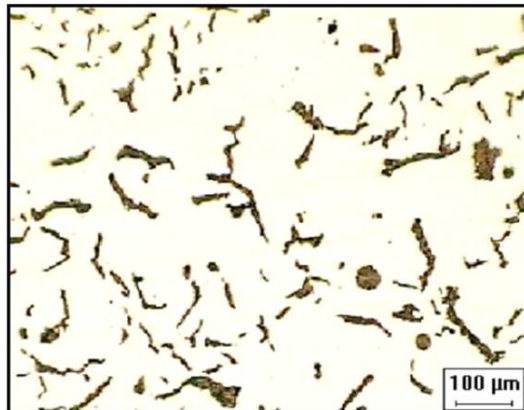
Eutético divorciado: Célula eutética de ferro fundido nodular .
Grafita pró-eutética, após um certo estágio do crescimento, o nódulo de grafita é envolvido por um halo de austenita e a grafita não tem mais contato com o líquido .

Outros tipos de ferro fundido: maleável e vermicular

Microestrutura de ferro fundido maleável preto ferrítico. 200 x



Ferro fundido maleável: fundido como ferro fundido branco, sem grafita, e depois sofre um longo tratamento térmico para decompor a cementita no estado sólido. Pode ser maleável preto, onde a grafita de estado sólido precipita na forma aproximada de nódulos, ou branco, que é tratado em uma caixa com hematita para descarbonetar e ficar dúctil e soldável



Ferro fundido vermicular, intermediário entre nodular e cinzento, mais dúctil e mais resistente que o cinzento, porém com as propriedades de dissipação de calor, amortecimento de vibrações e resistência à fadiga térmica. Mais caro, é hoje o estado da arte para blocos de motor diesel de alto desempenho.

- Microestrutura de ferro fundido vermicular. Grafita predominantemente em forma de vermes, com alguns nódulos.
- metalografia ótica – 5% nodularidade, sem ataque.
- imagem EBSD. Cada grão ferrítico apresenta uma cor diferente (Campos, M.F et all, 2005).

Outros tipos de ferro fundido: vermicular



Bloco de motor V6 em ferro fundido vermicular classe 450

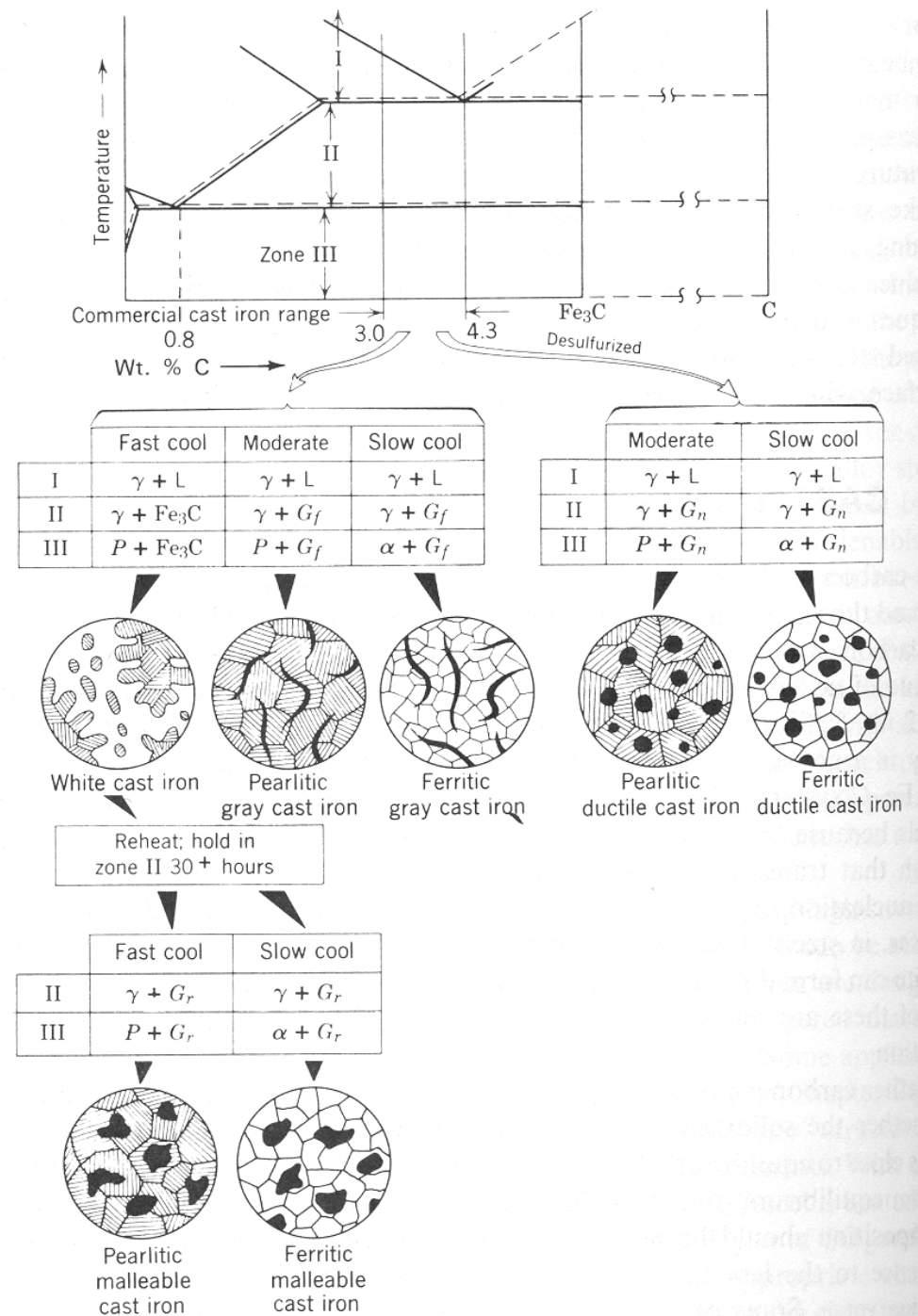
usado no Jaguar e Land Rover, fundido no Brasil pela Fundição Tupy

Comparação de propriedades entre ferros fundidos cinzento, nodular e vermicular, com matriz perlítica. Norma SAE J1887/2002.

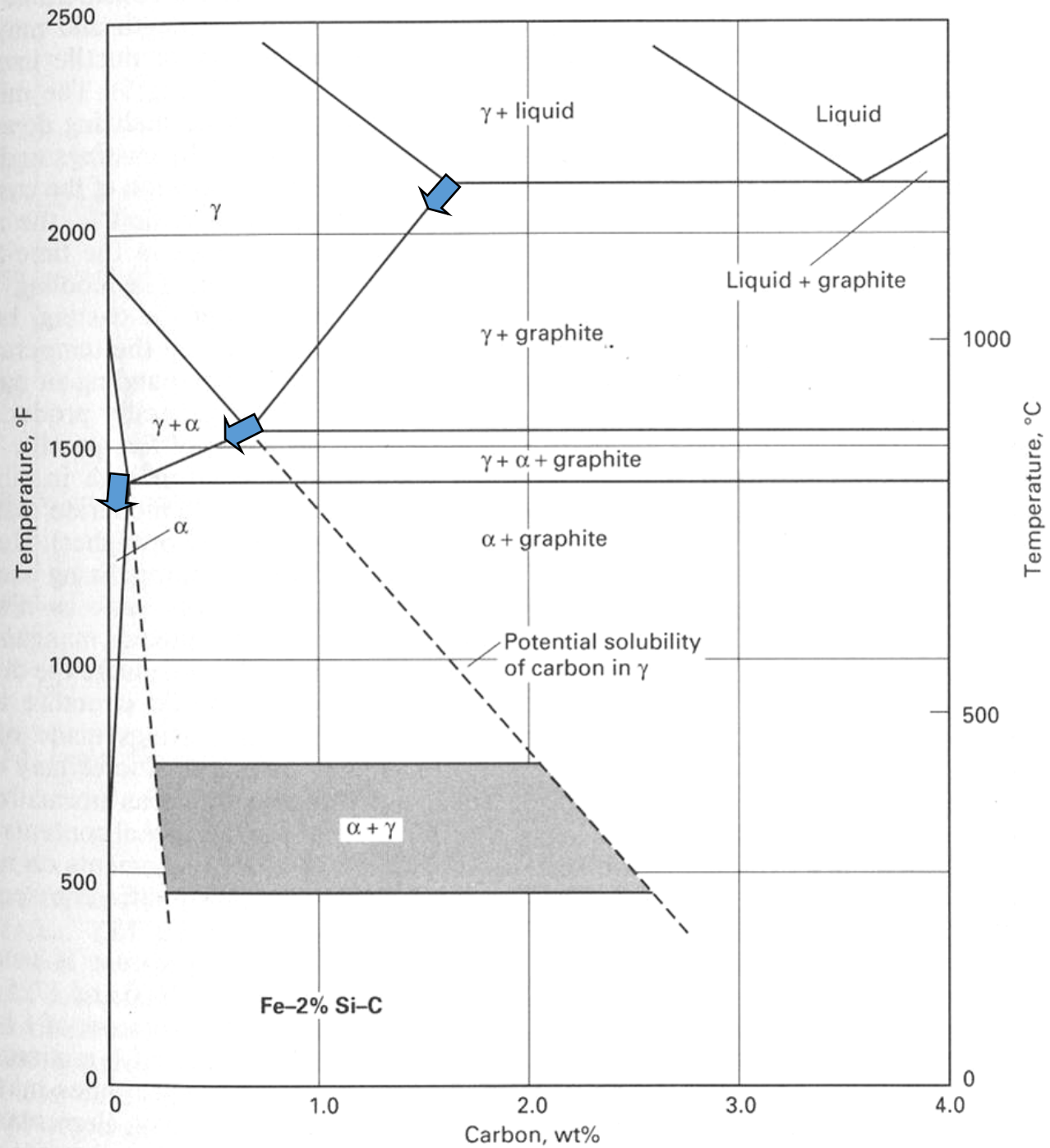
Propriedade	Cinzento	Vermicular	Nodular
Limite de Resistência	55	100	155
Limite de Escoamento 0,2	-	100	155
Módulo de Elasticidade	75	100	110
Alongamento	0	100	200
Limite de Fadiga – flexão rotativa	55	100	125
Dureza	85	100	115
Condutividade Térmica	130	100	75
Amortecimento de vibrações	285	100	65

FIM DA PARTE 1

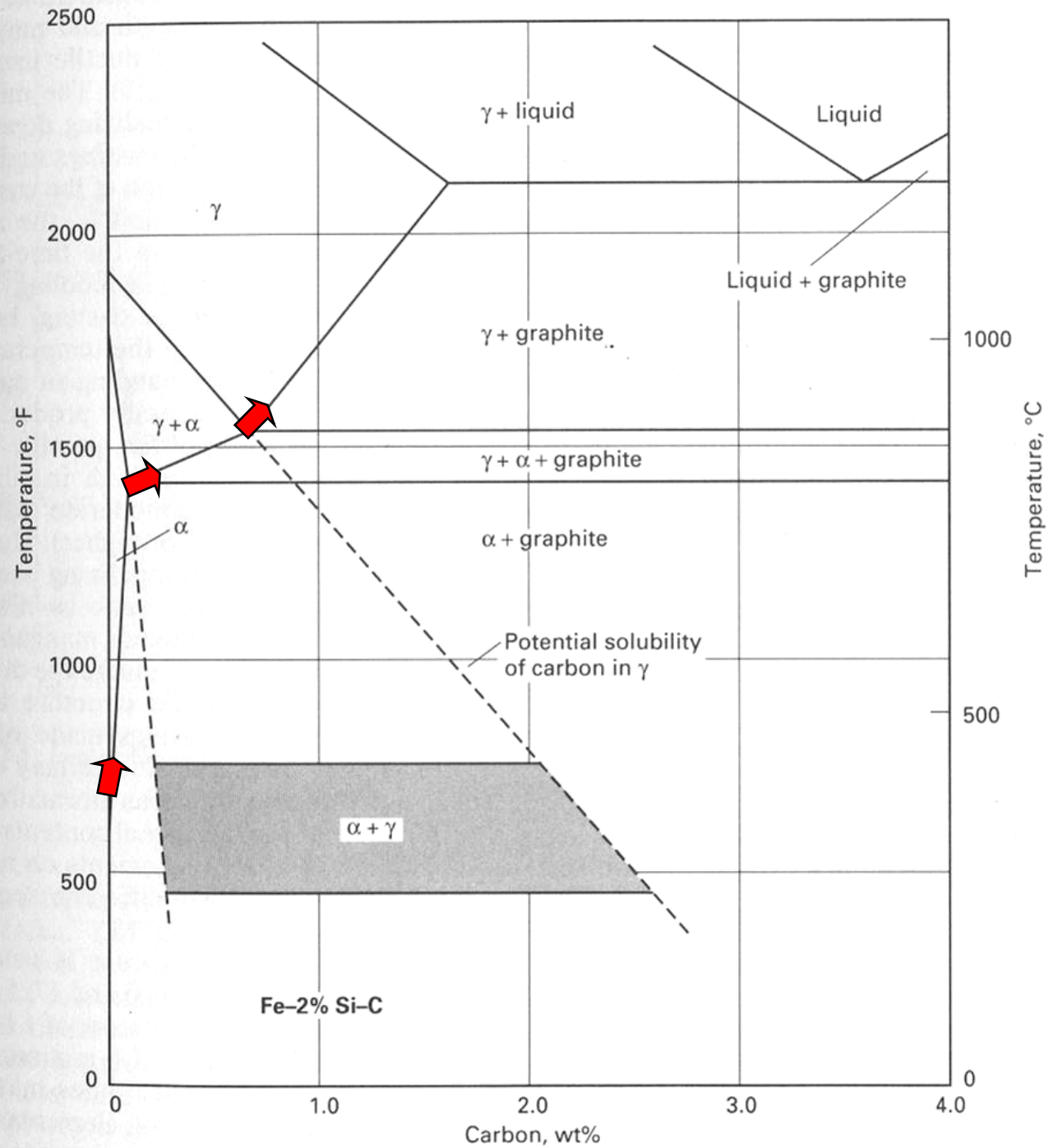
TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE FERROS FUNDIDOS



VARIAÇÃO DO
TEOR DE
CARBONO DA
MATRIZ DE
FERROS
FUNDIDOS



VARIAÇÃO DO
TEOR DE
CARBONO DA
MATRIZ DE
FERROS
FUNDIDOS



CURVAS DE RESFRIAMENTO CONTÍNUO DE FERROS FUNDIDOS

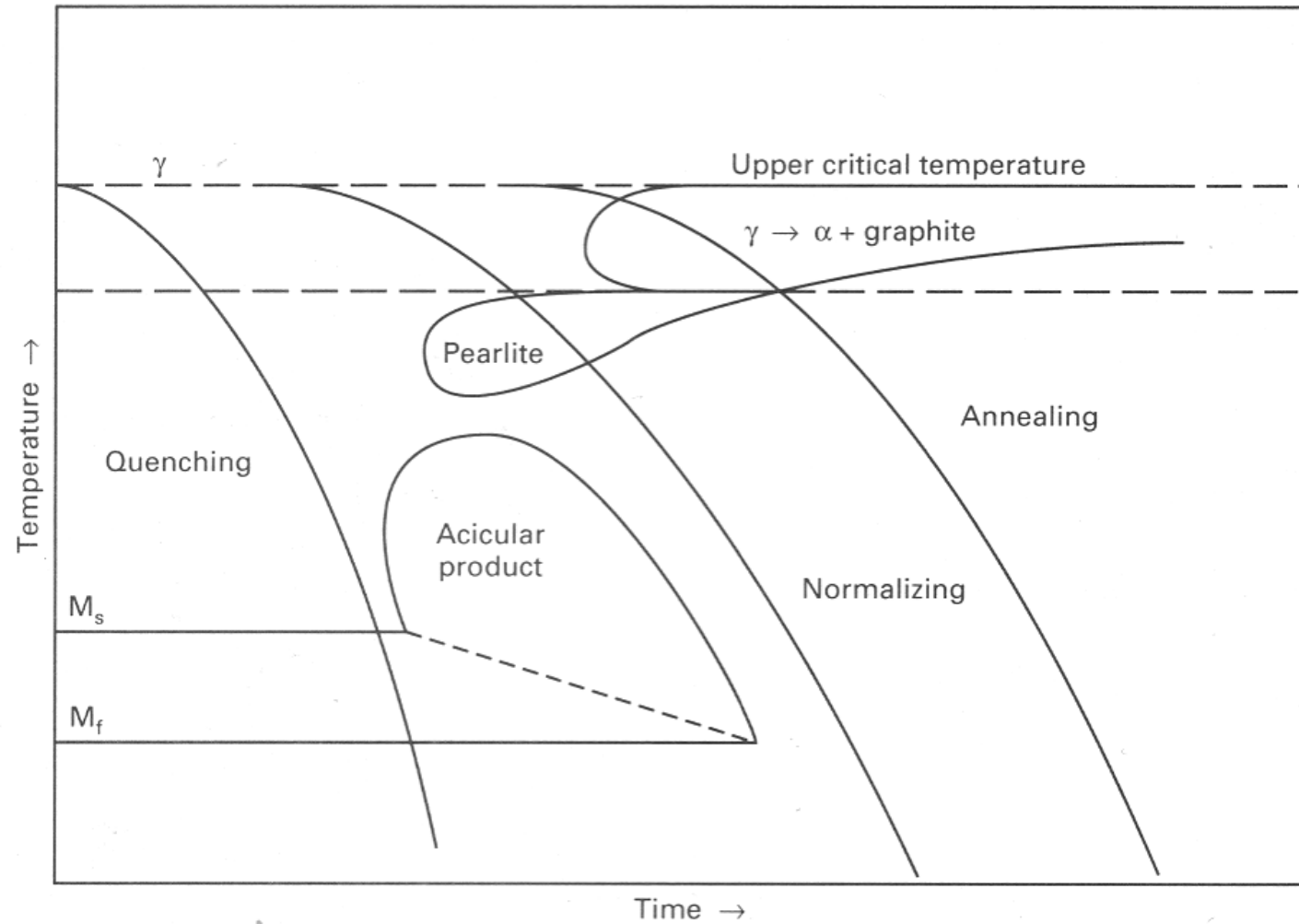


Fig 1 CCT diagram showing annealing, normalizing, and quenching. M_s, martensite start; M_f, martensite finish

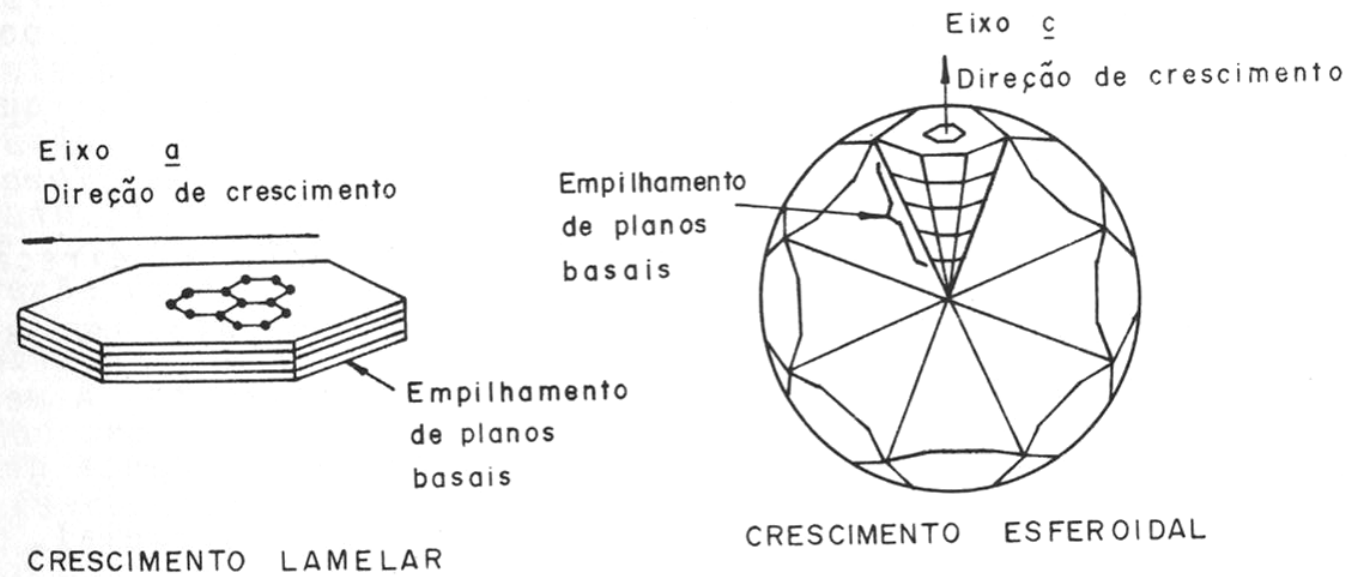
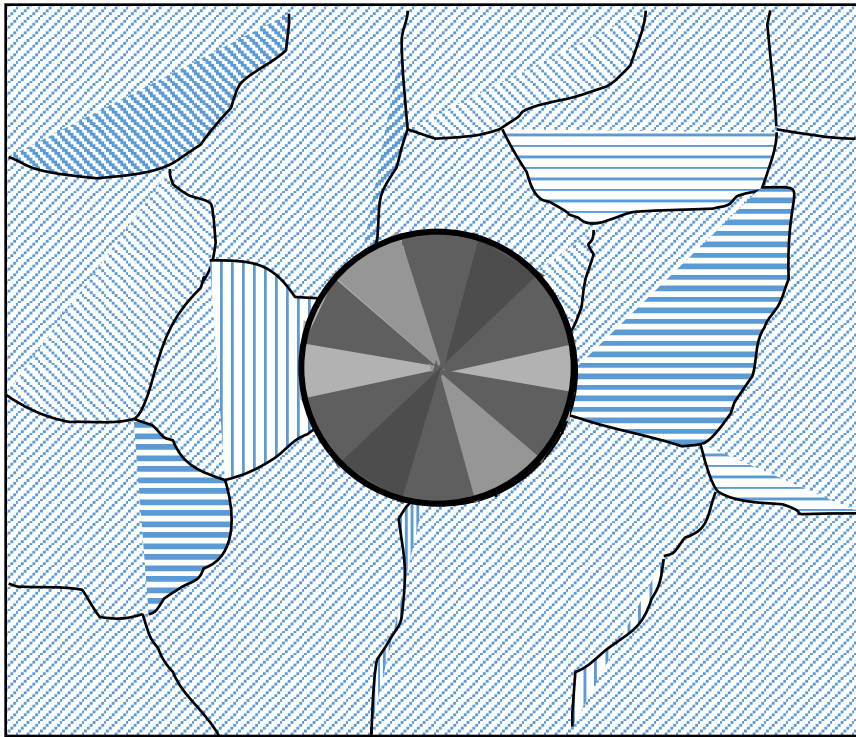


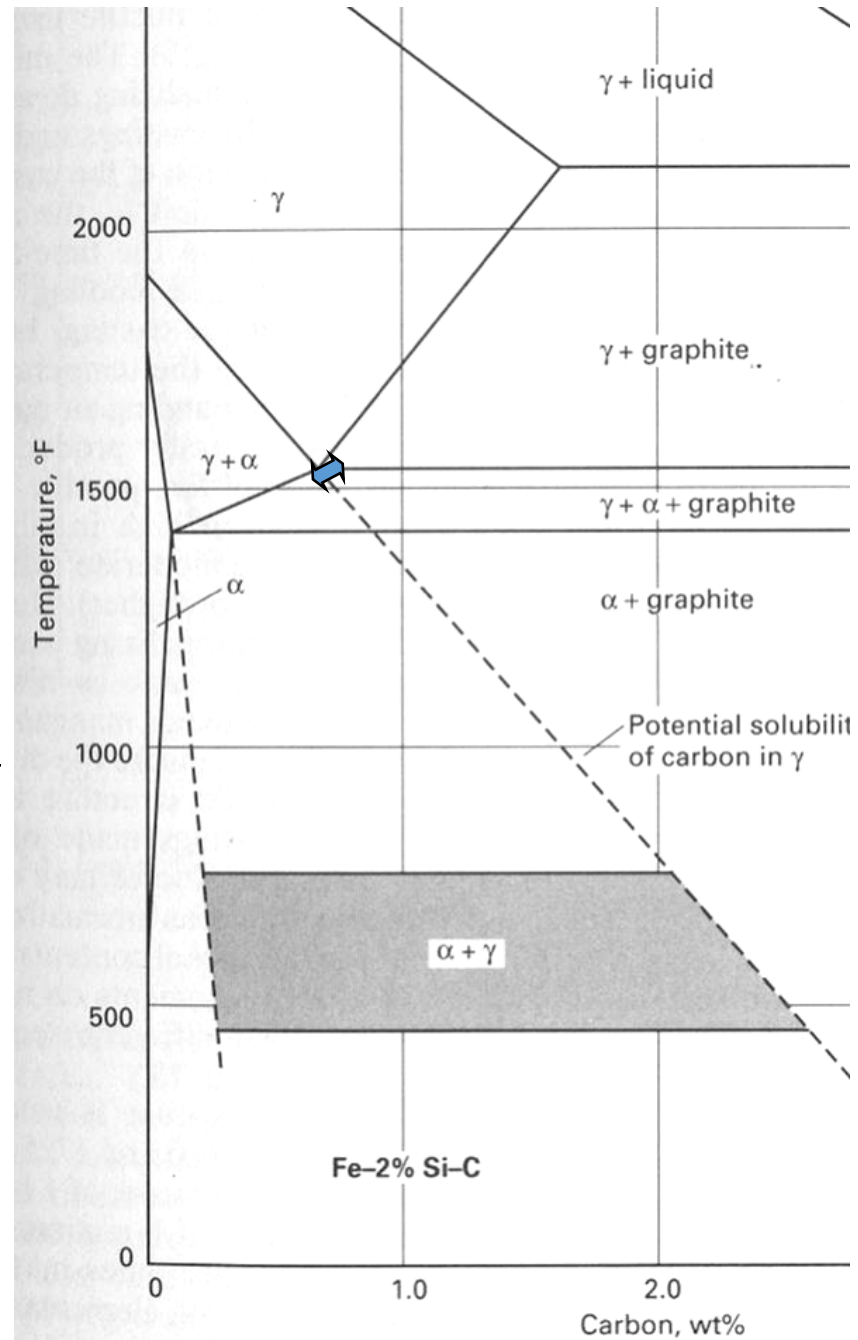
FIG. 24 - Esquema do crescimento da grafita em veios e em nódulos

50

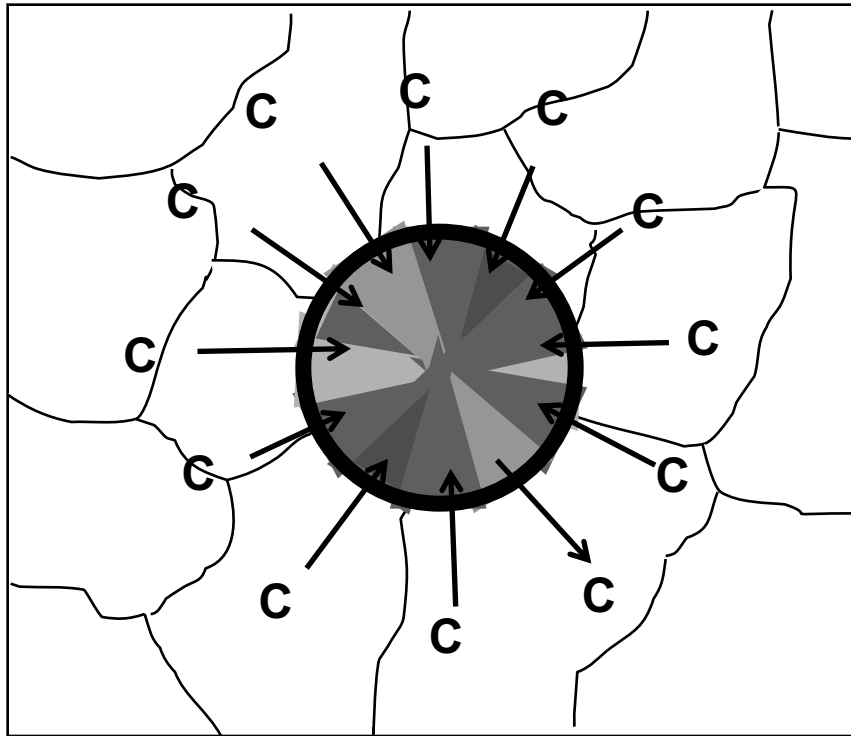


Os Ferros Fundidos respiram:

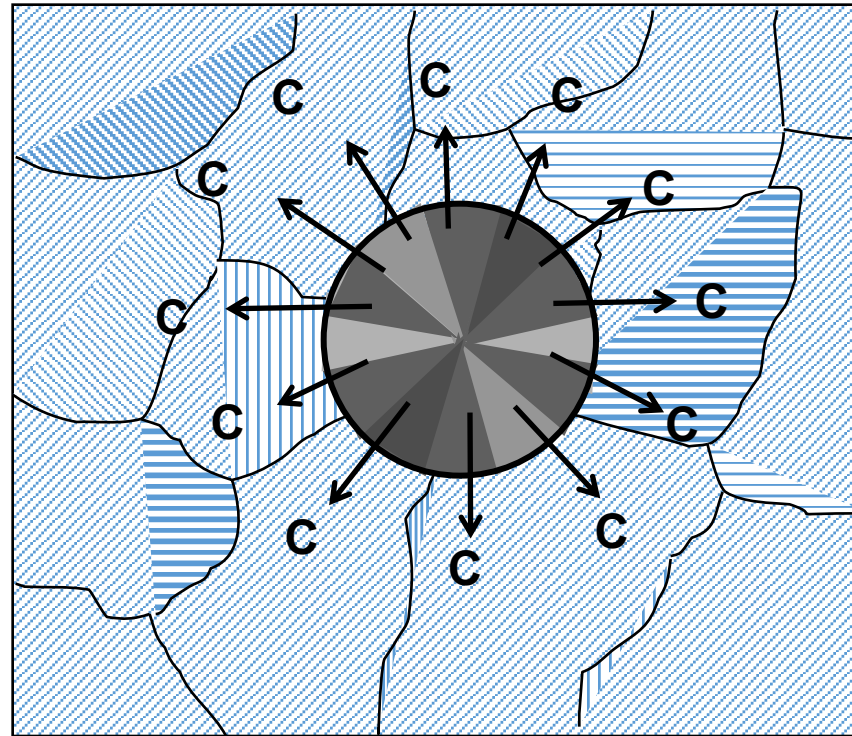
- a) expiração
- b) inspiração



RECOZIMENTO E NORMALIZAÇÃO

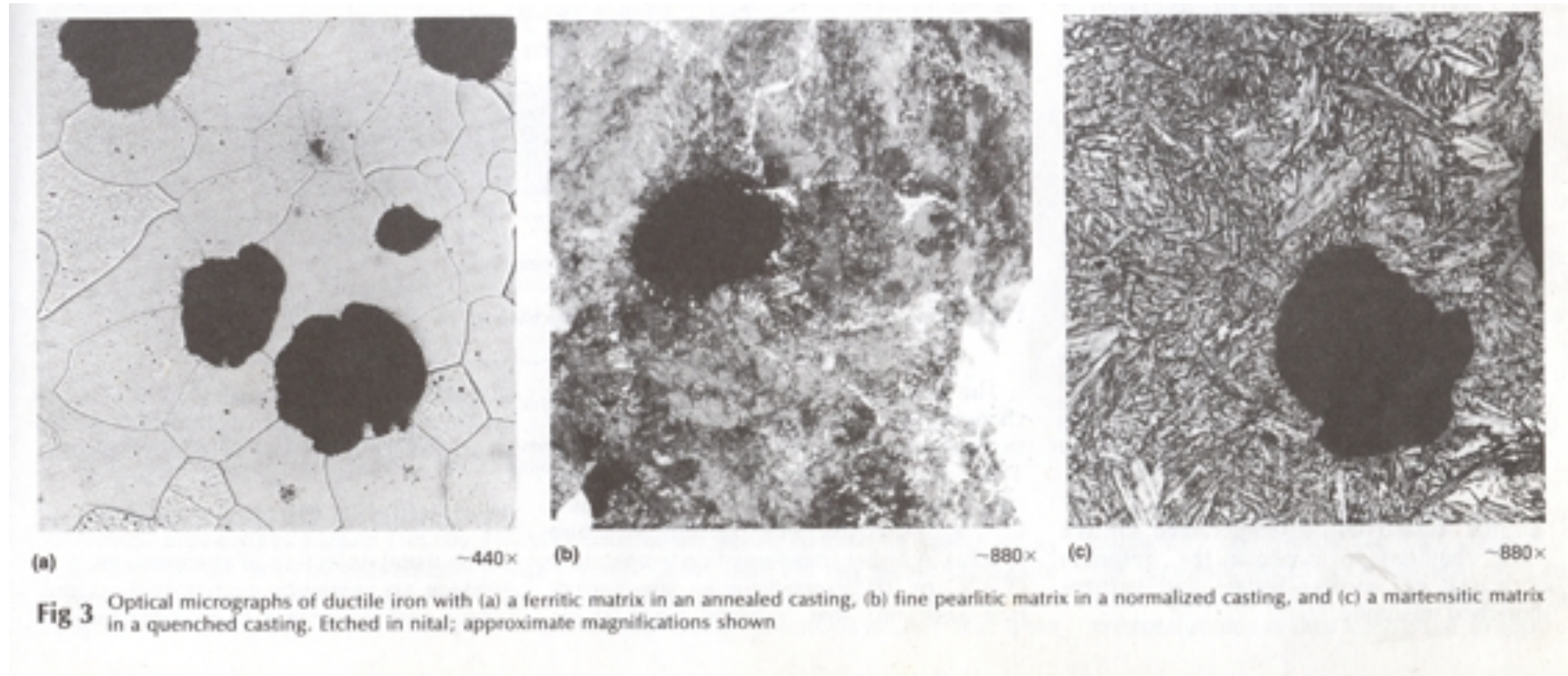


Ferro fundido nodular ferrítico



Ferro fundido nodular perlítico

FERRO FUNDIDO TRATADO TERMICAMENTE



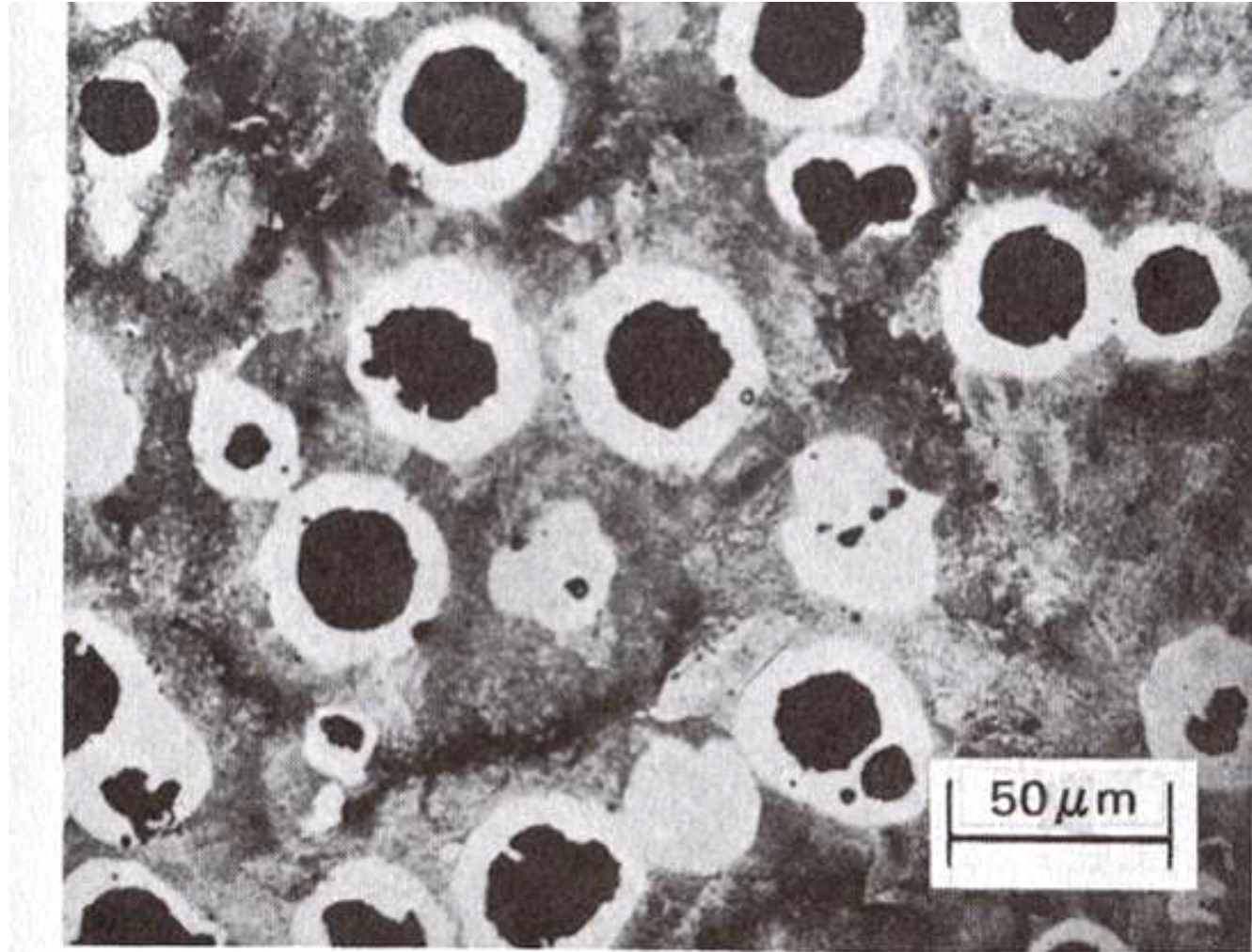
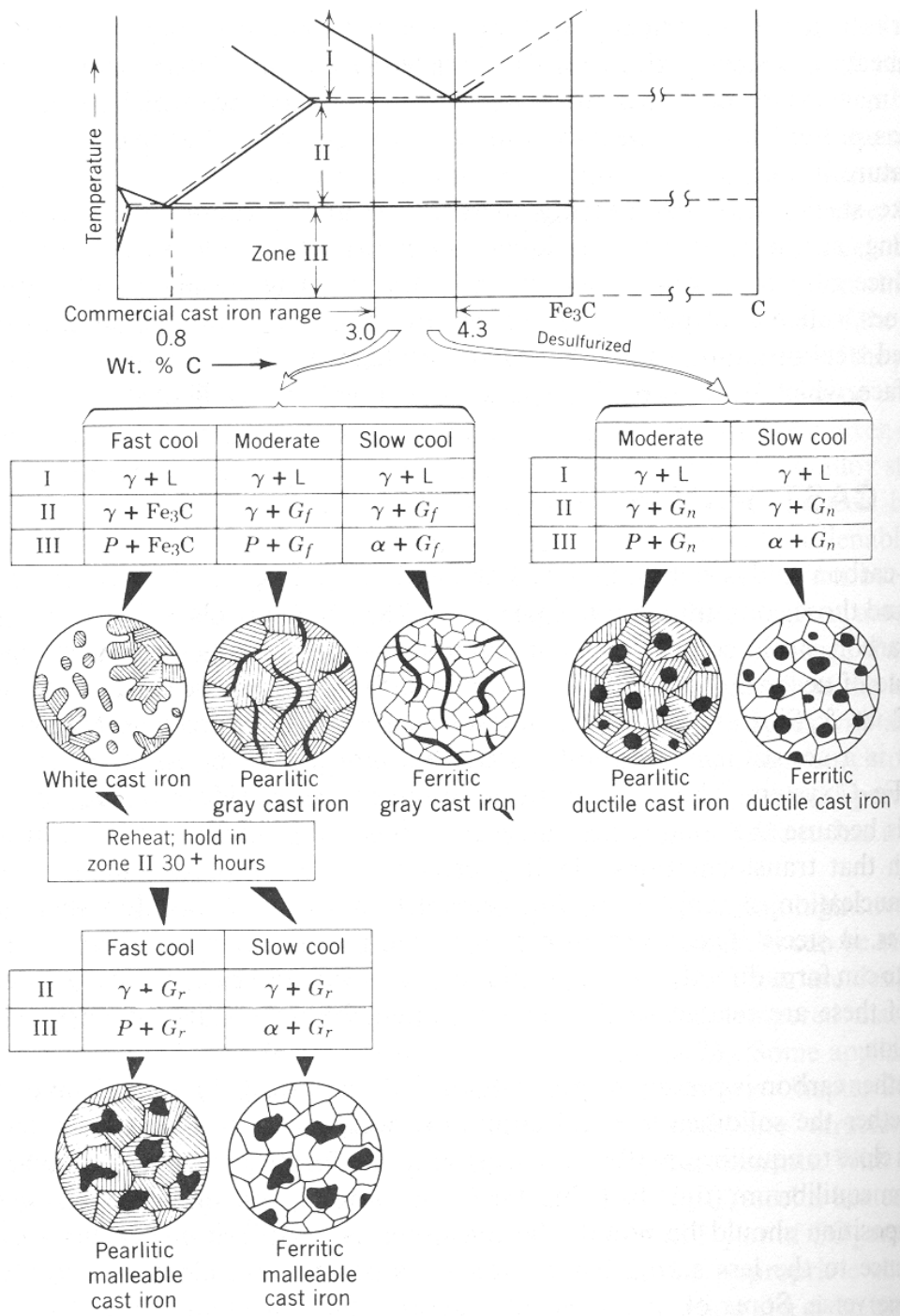
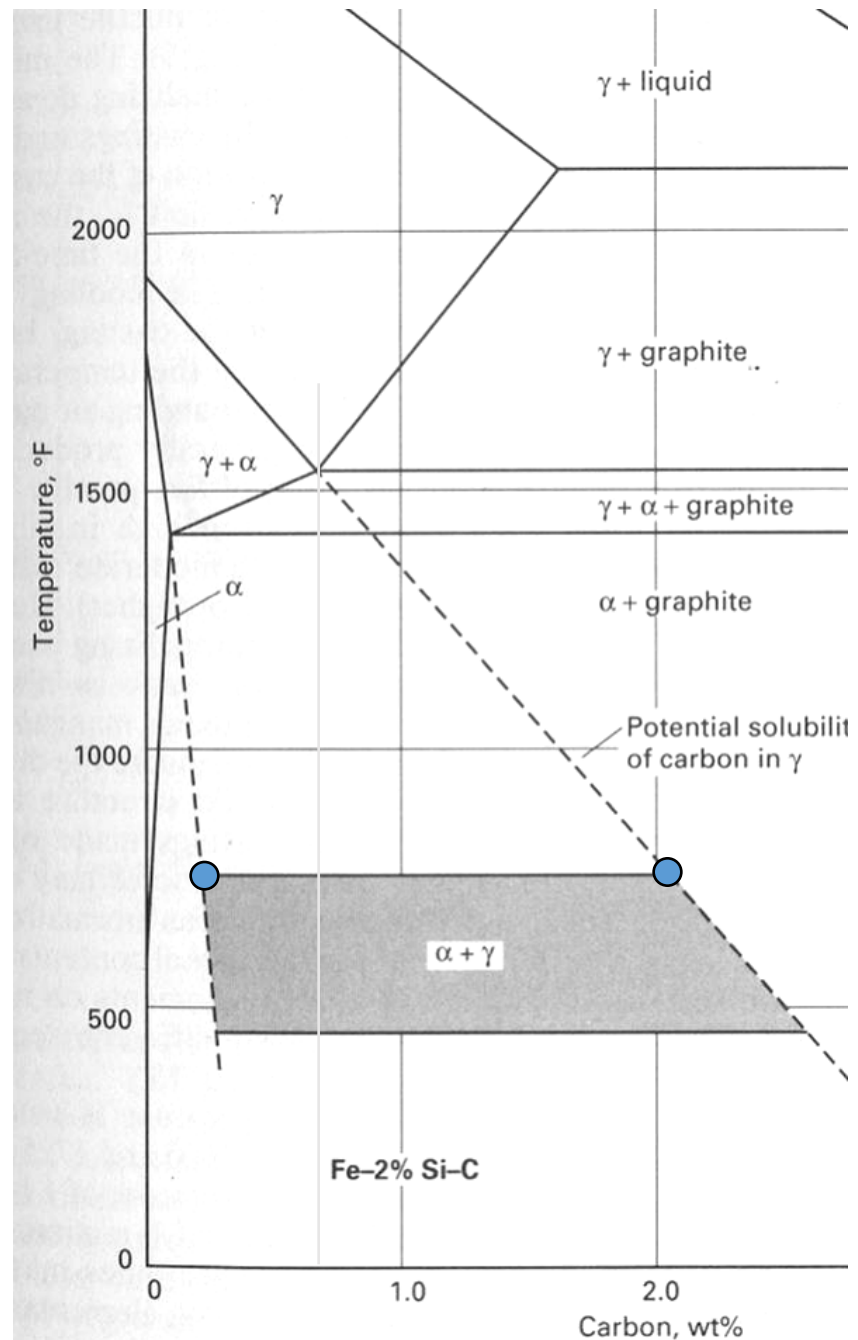


FIGURE 18.11 A mixed ferritic–pearlitic nodular cast iron. The graphite nodules are surrounded by free ferrite in a pearlitic matrix (the mottled area is





CURVA TTT DE FERROS FUNDIDOS

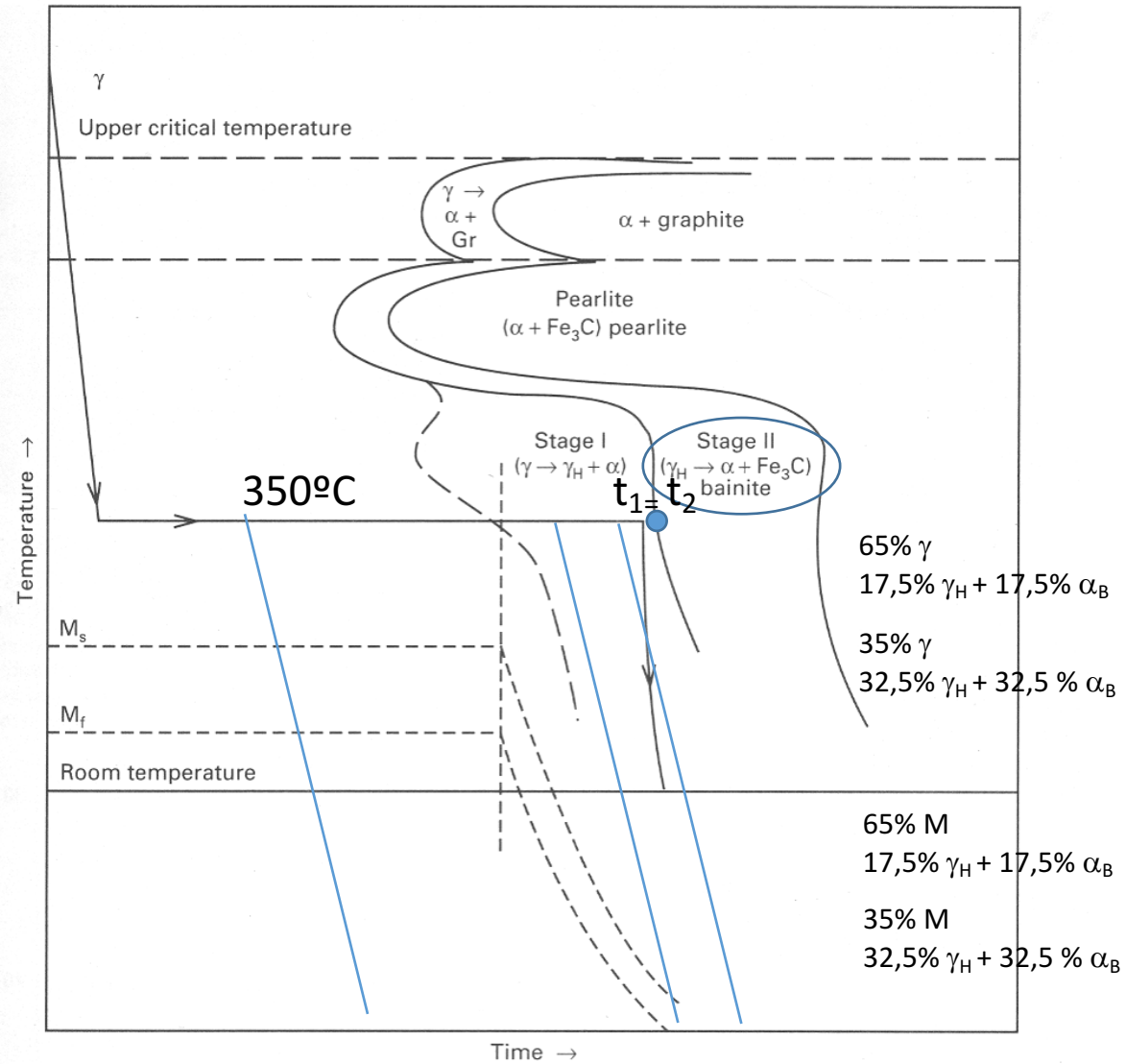
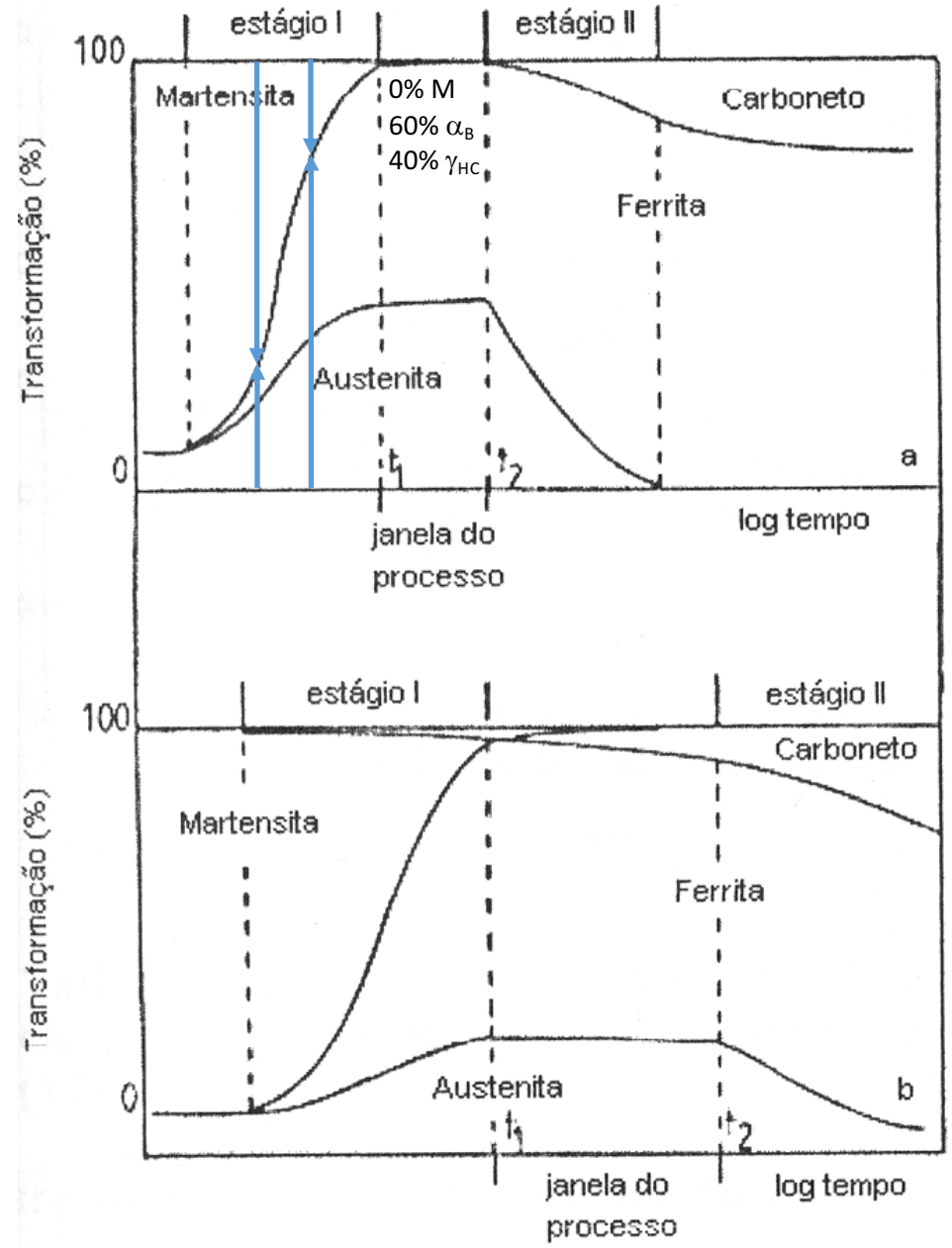
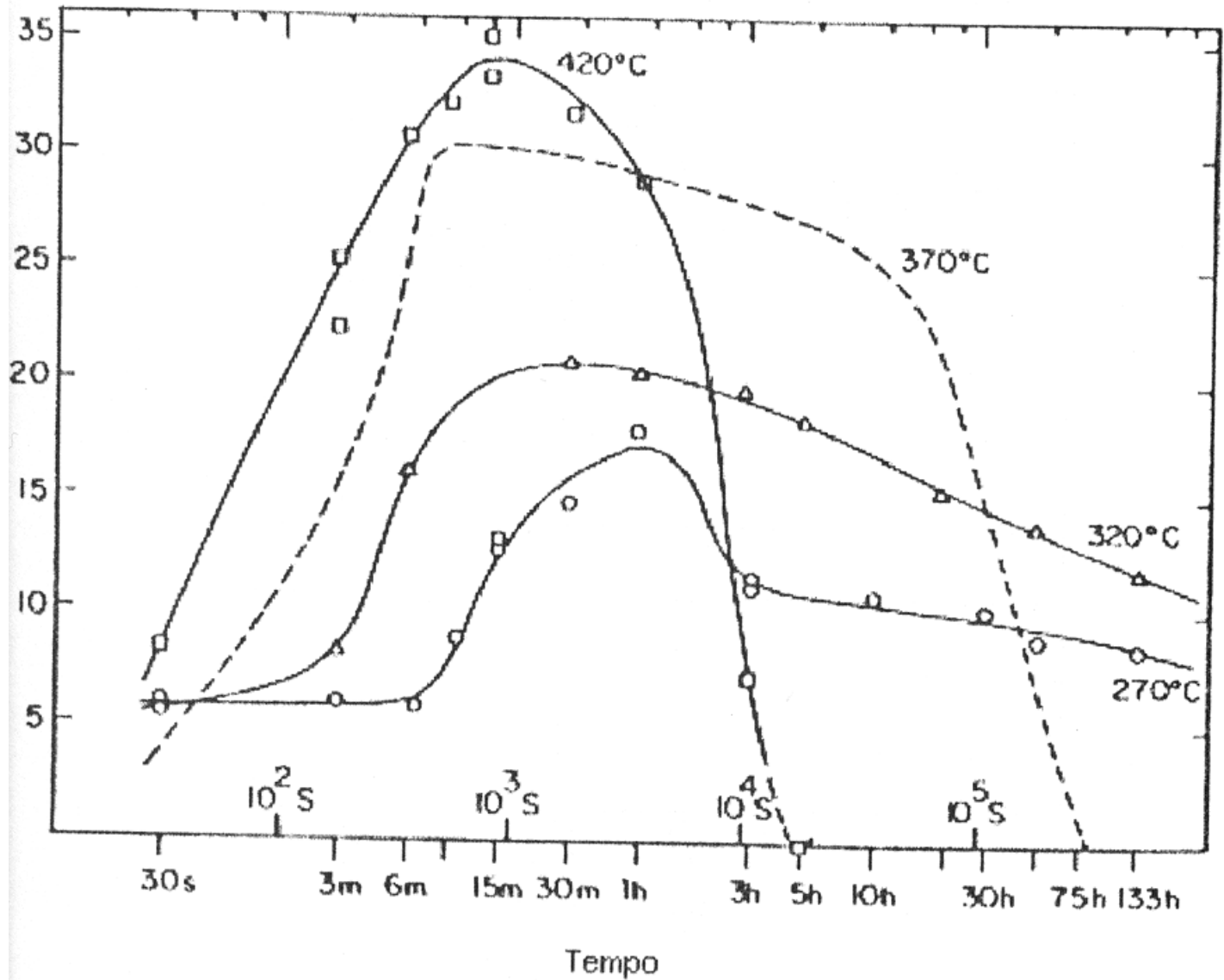


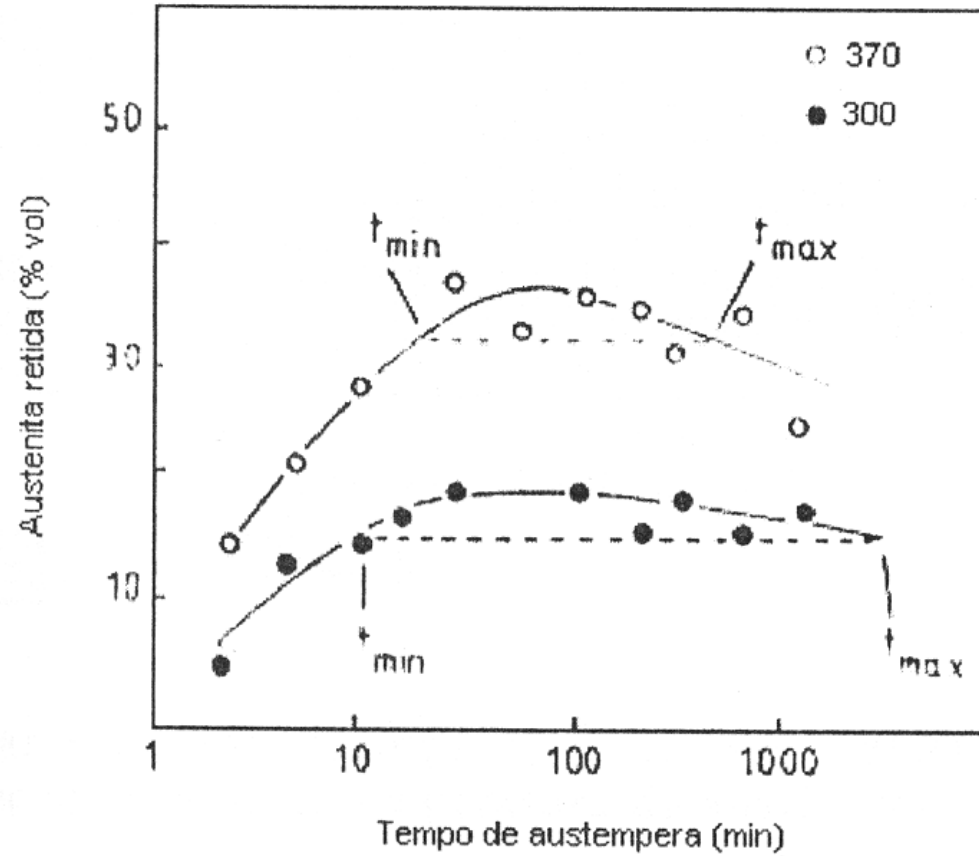
Fig 2 IT diagram of a processing sequence for austempering, with the M_s and M_f decreasing as the γ is enriched with carbon during stage I



% de austenita retida

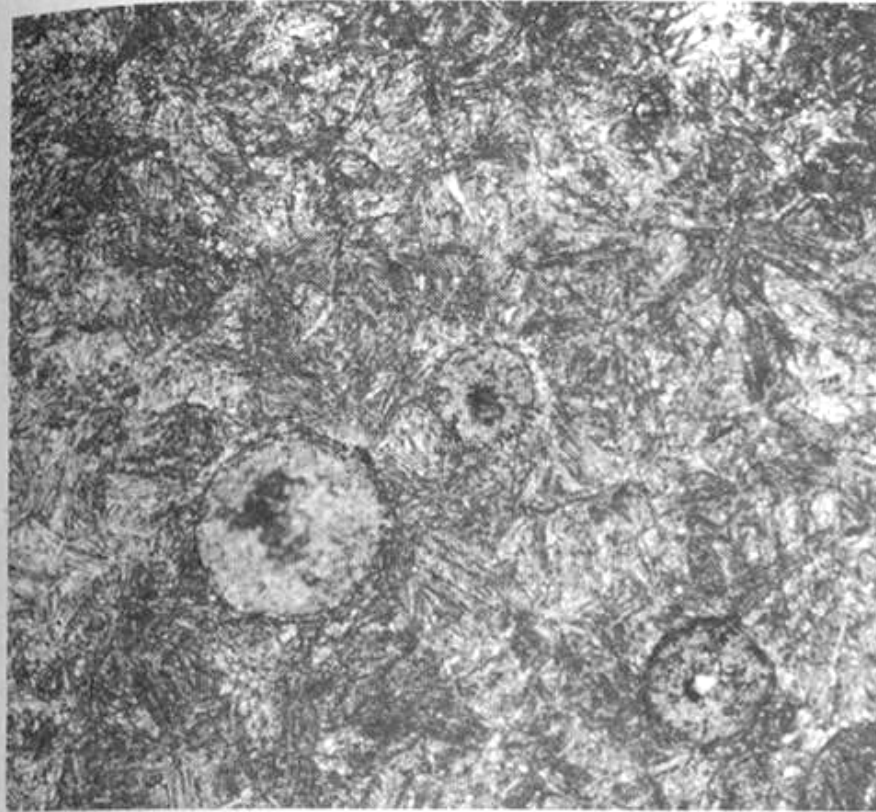


$$\ln(t_2) = \frac{\ln(t_{\min}) + \ln(t_{\max})}{2}$$

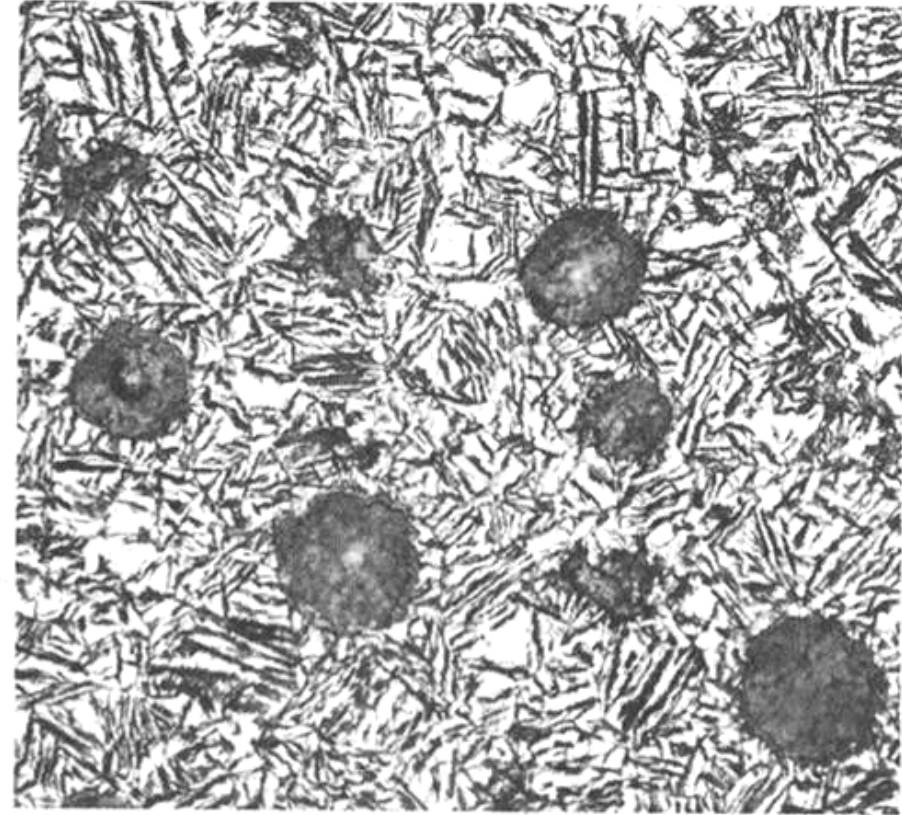


Representação esquemática do cálculo do tempo t_2 para temperatura de austêmpera de 370°C e 300°C (141).

FERRO FUNDIDO AUSTEMPERADO



(a)



(b)

Fig 6 Micrographs of ductile iron treated at different austempering temperatures. (a) Ductile iron austempered at 260 °C (500 °F) exhibits a fine acicular structure with the following properties: tensile strength, 1585 MPa (230 ksi); yield strength, 1380 MPa (200 ksi); elongation, 3%; unnotched impact, 54 J (40 ft · lbf); hardness, 475 HB. (b) Same iron as in (a) austempered at 370 °C (700 °F) exhibits a coarse acicular structure with the following properties: tensile strength, 1035 MPa (150 ksi); yield strength, 825 MPa (120 ksi); elongation, 11%; unnotched impact, 130 J (95 ft · lbf); hardness, 321 HB. Both etched with 3% nital. 300×. Courtesy of Applied Process, Inc.