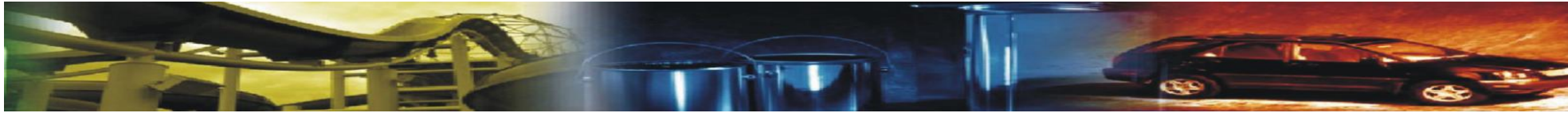


Diagramas de Fase e Transformações de Fase

O Diagrama Fe-Fe₃C

DEMEC – TM242-B

Prof. Scheid



Diagramas de Fase

Diagrama de Fase Fe-Fe₃C - Diagrama de Fase Fe-C

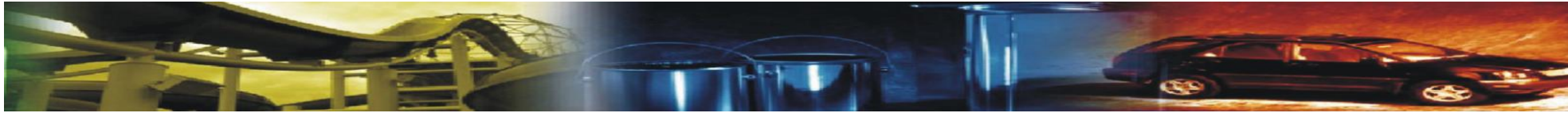
Introdução:

O estudo do sistema ou liga Fe-C é a base para o entendimento do comportamento de dois dos mais importantes grupos de ligas metálicas que existem: Os Aços e Ferros Fundidos.

Fatores como a abundância do elemento na natureza, a facilidade de transformação do minério em elemento metálico, a larga faixa de propriedades que podem ser obtidas dentro das subclasses e do baixo custo, fazem com que estes sejam tratados na Engenharia como as Ligas Ferrosas e de forma separada e especial em relação aos demais metais (que são enquadrados como não-ferrosos).

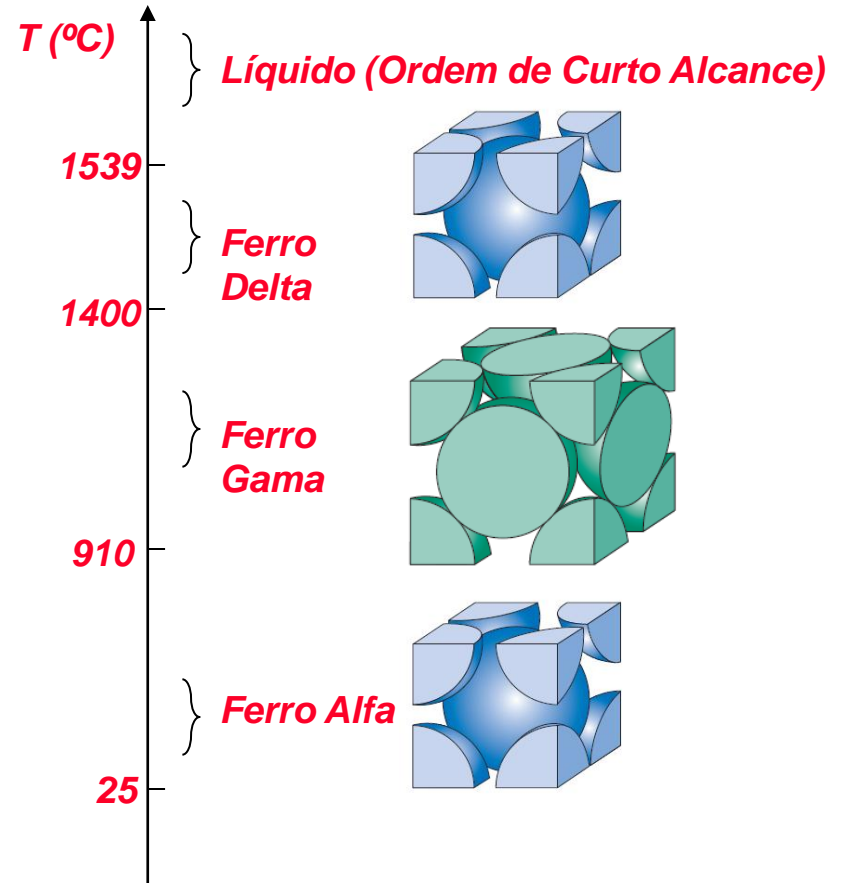
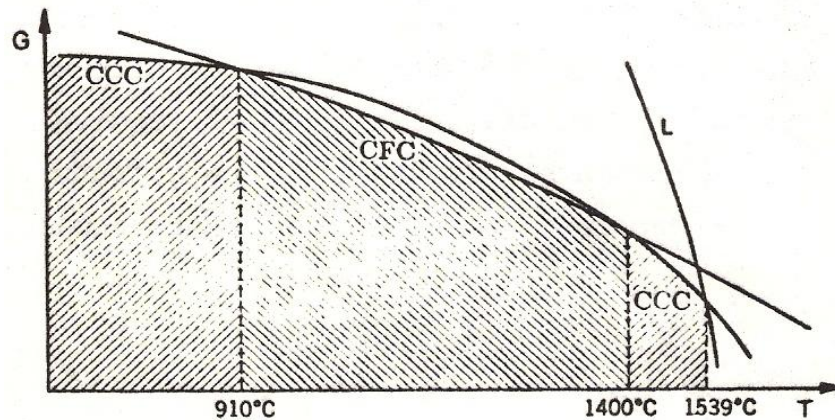
Em seguida serão apresentados os conceitos termodinâmicos mais importantes relacionados à estabilidade de fases para estas ligas.

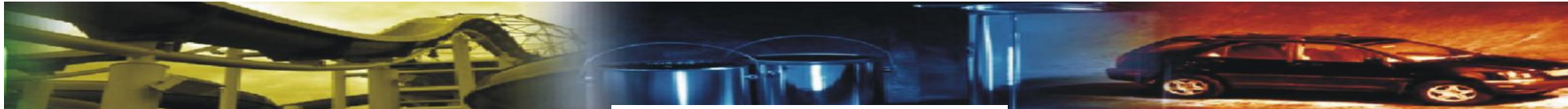
Diagrama Metaestável Fe-Fe₃C X Diagrama Estável Fe-C?



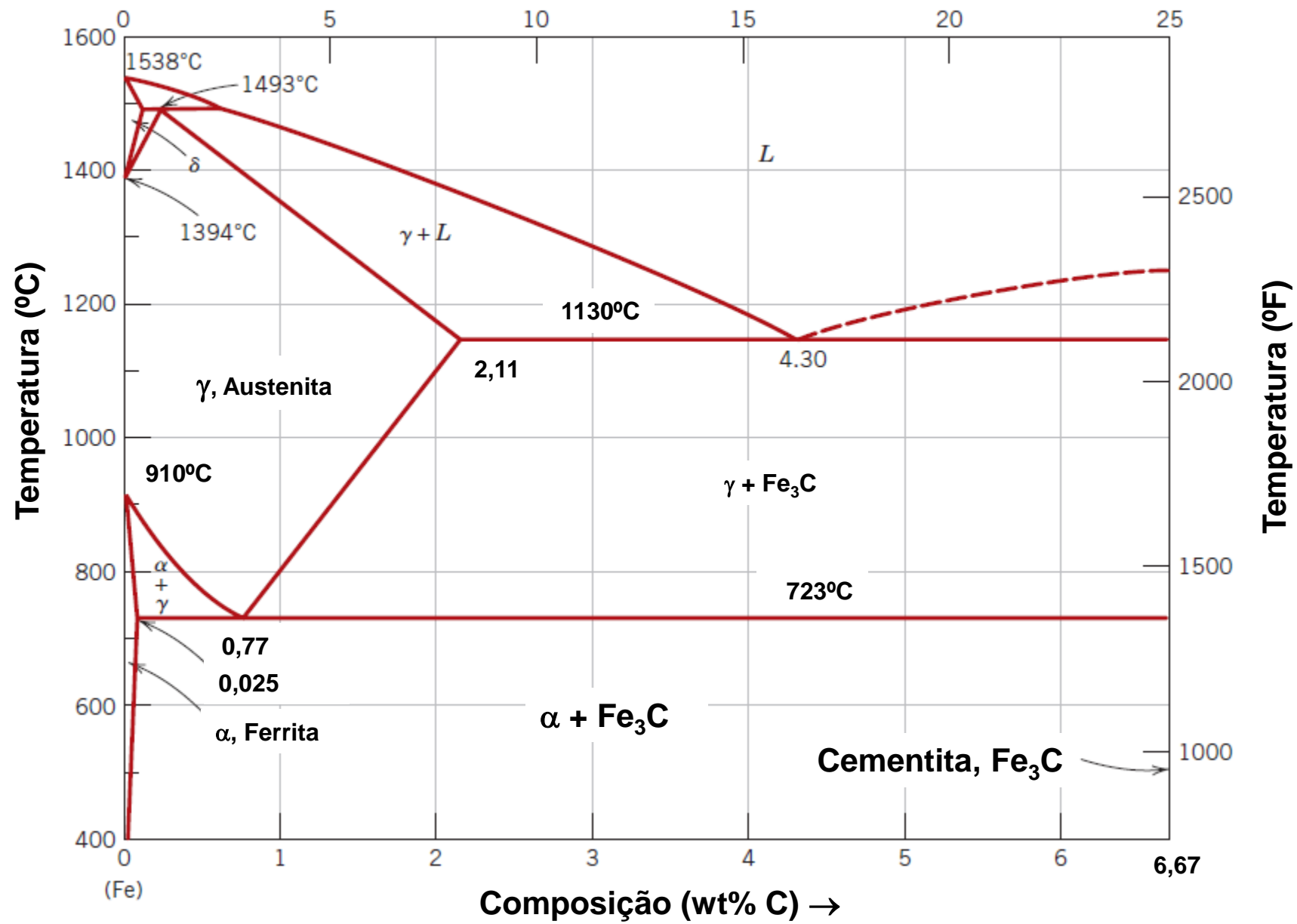
Diagramas de Fase

- Alotropia do Ferro:





Composição (at% C)



Composição (wt% C) →



O Sistema Fe-Fe₃C

- Fases Importantes

Símbolo (Fase)	Nome da Fase	Estrutura Cristalina	% C máximo (Wt%)	Temperatura na Solubilidade Máxima (°C)
α	Ferrita ou Ferro Alfa	CCC	0,025	723
γ	Austenita ou Ferro Gama	CFC	2,11	1130
δ	Ferro Delta ou Ferrita Delta	CCC	0,10	1493
Fe₃C	Cementita ou Carboneto de Ferro	Ortorrômbica	= 6,67	--- --- ---



O Sistema Fe-Fe₃C

- Reações Invariantes

Reação	Composição (Wt% Carbono)	Temperatura (°C)	Transformação
Peritética	0,18	1492	$L_{0,54\%C} + \delta_{0,10\%C} \xrightleftharpoons{1493\text{ }^{\circ}\text{C}} \gamma_{0,18\%C}$
Eutética	4,30	1130	$L_{4,3\%C} \xrightleftharpoons{1130\text{ }^{\circ}\text{C}} \gamma_{2,11\%C} + \text{Fe}_3\text{C}_{6,67\%C}$
Eutetóide	0,77	723	$\gamma_{0,8\%C} \xrightleftharpoons{723\text{ }^{\circ}\text{C}} \alpha_{0,025\%C} + \text{Fe}_3\text{C}_{6,67\%C}$

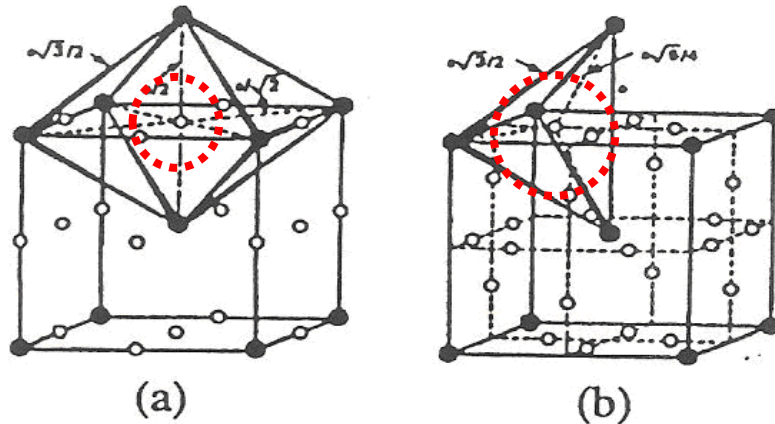


O Sistema Fe-Fe₃C

- Solubilidade de Carbono em Ferro

O carbono é um elemento de pequeno raio atômico (**0,71 ângstrons**) em relação ao Ferro (CCC - 1,24 e CFC - 1,27 ângstrons). Desta forma, desenvolve solução sólida Intersticial, ou seja, o átomo de soluto (Carbono) posiciona-se nos interstícios ou espaços vazios de suas estruturas cristalinas. Ferro α e Ferro γ formam diferentes tipos de interstícios, os Interstícios Octaédricos (a) e os interstícios Tetraédricos (b):

Interstícios da Estrutura do Ferro α

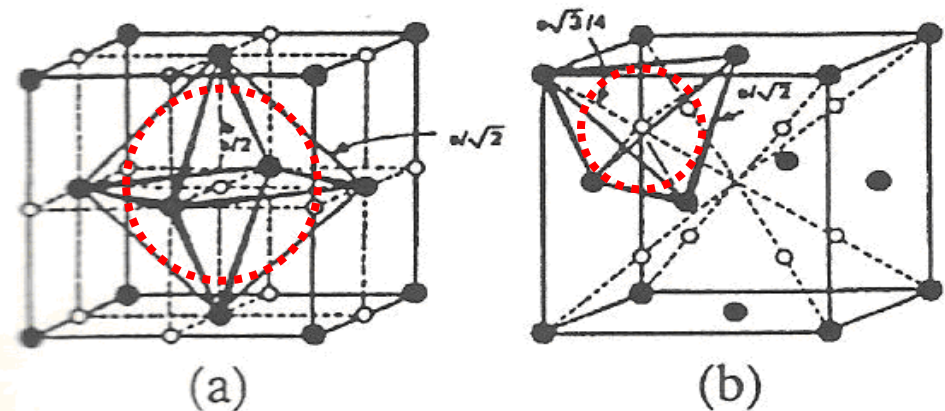


*Espaço
ângstrons*

0,19 (0,15R)

0,36 (0,29R)

Interstícios da Estrutura do Ferro γ



0,52 (0,41R)

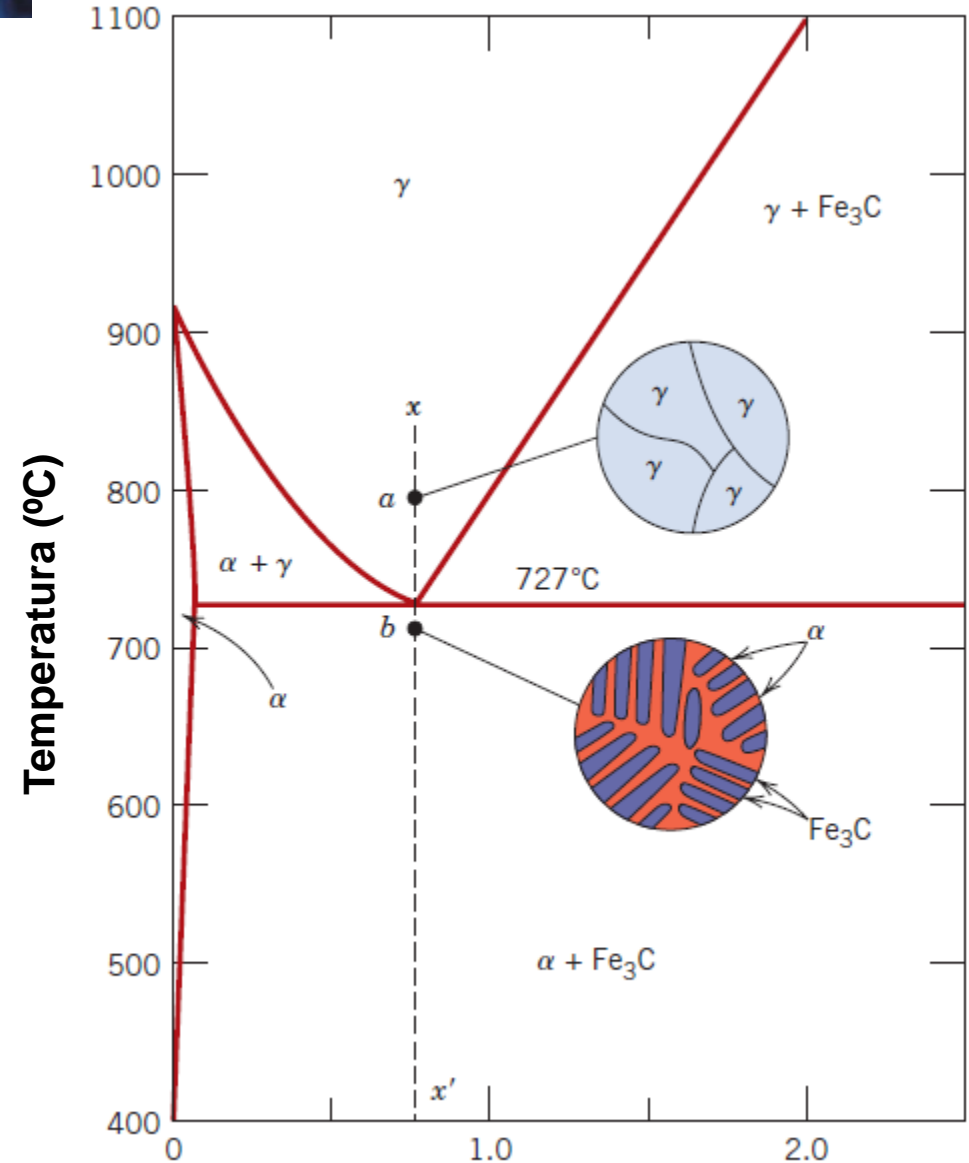
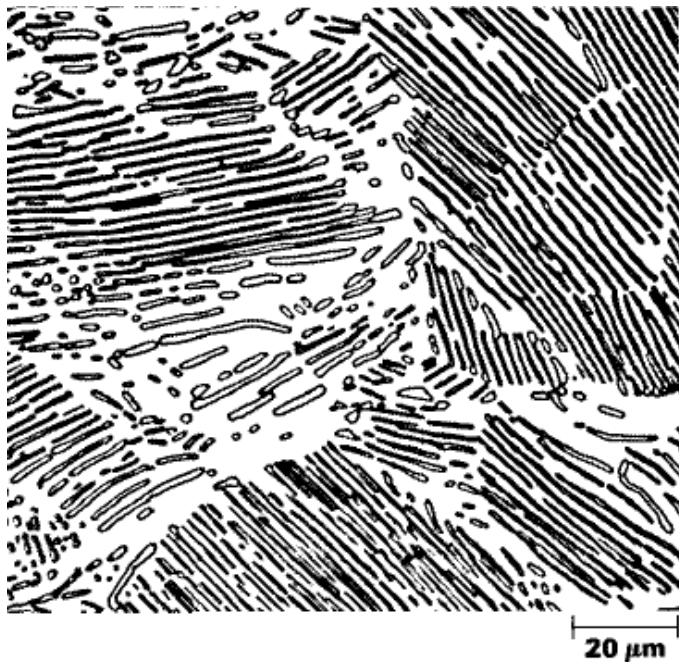
0,29 (0,23R)

O Sistema Fe-Fe₃C

- Microestruturas nos Aços

Transformações no Estado Sólido – Conforme Equilíbrio Termodinâmico.

A transformação **Eutetóide** ocorre pela decomposição da Austenita em Ferrita e Cementita, na forma de lamelas intercaladas. Esta microestrutura é chamada de Perlita e é uma mistura de duas fases.



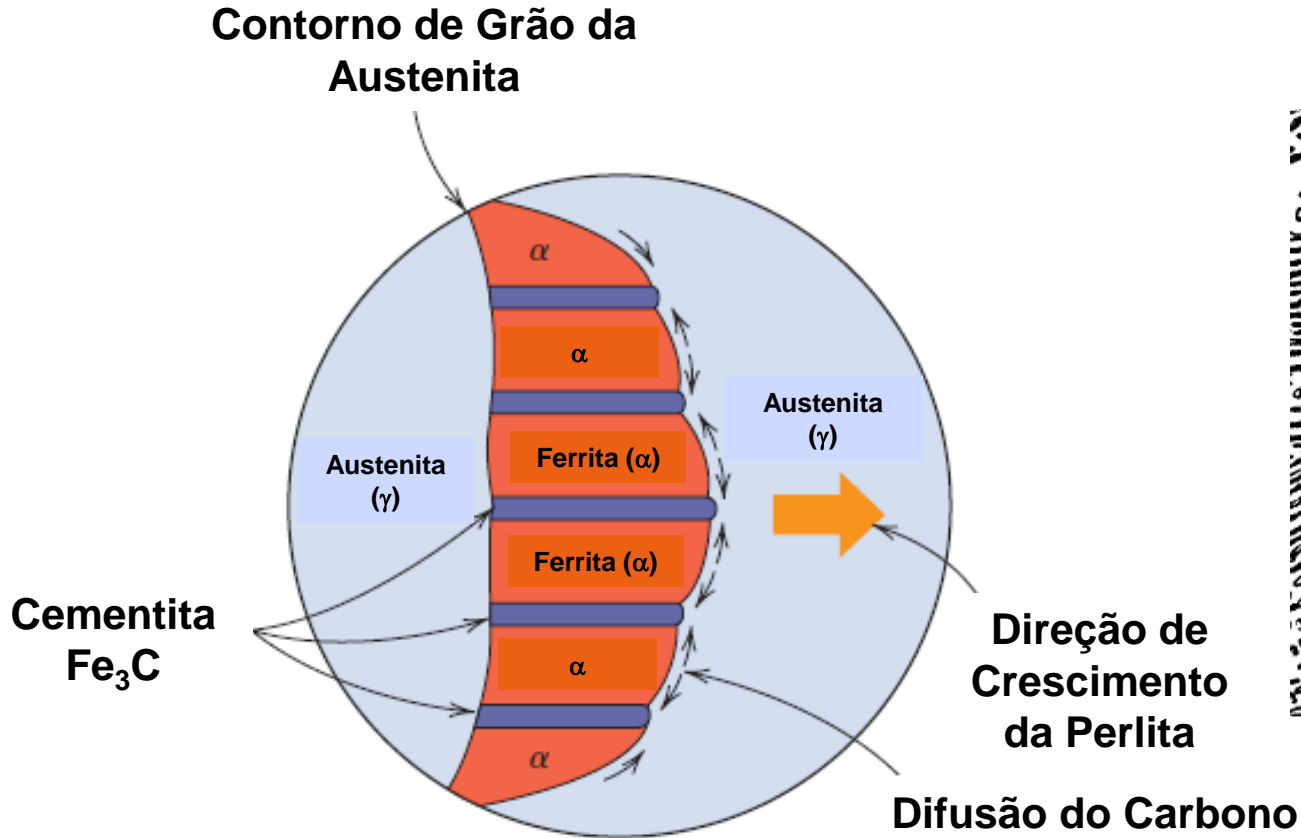
Composição (wt% C)



O Sistema Fe-Fe₃C

- Microestruturas nos Aços

Crescimento cooperativo entre as lamelas de ferrita e cementita.



20 μm

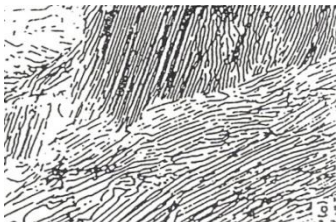
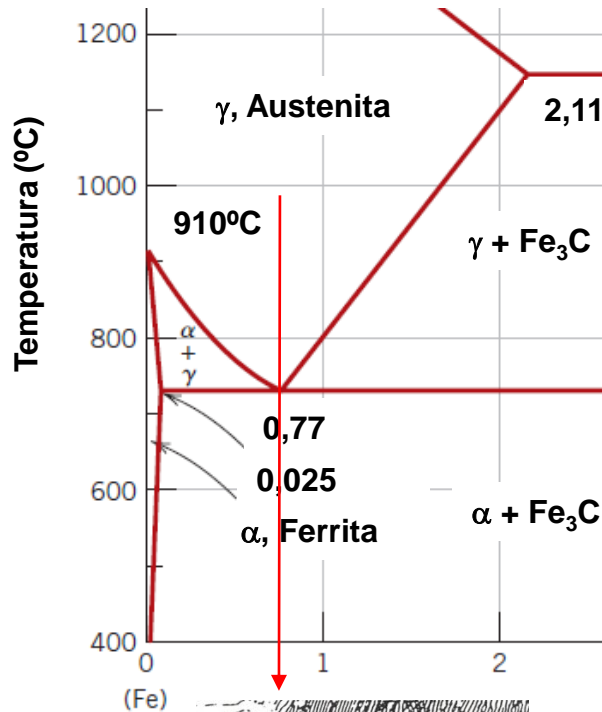




O Sistema Fe-Fe₃C

- Informações e a Regra da Alavanca:

Qual é a proporção de fase Alfa (α) pró-eutetóide formada a partir do resfriamento conforme condições de equilíbrio termodinâmico em uma liga Ferro-Carbono contendo 0,77% em peso de Carbono?



EXERCÍCIO:

Para um aço Eutetóide resfriado lentamente, indique a **Constituição da Liga:**

A composição global:

O nº Fases:

A proporção de fases – Regra da Alavanca:

A composição de química de Cada Fase:

O limite de solubilidade do Carbono na Ferrita (α):

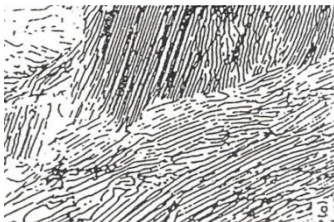
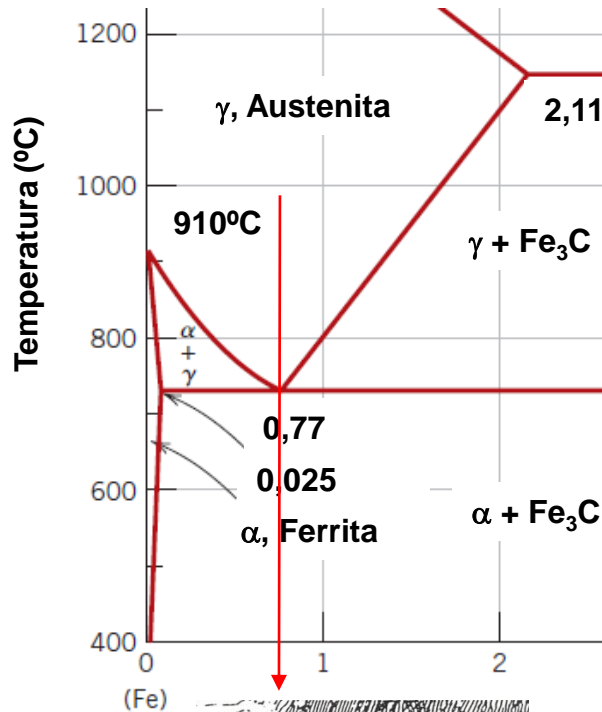
A distribuição de fases:



O Sistema Fe-Fe₃C

- Informações e a Regra da Alavanca:

Qual é a proporção de fase Alfa (α) pró-eutetóide formada a partir do resfriamento conforme condições de equilíbrio termodinâmico em uma liga Ferro-Carbono contendo 0,77% em peso de Carbono?



Constituição da Liga:

Composição Global: 99,23%Fe + 0,77%C

Nº Fases: duas (temp. ambiente)

Proporção de Fases – Regra da Alavanca:

% Ferrita (α): $((6,67 - 0,77) / (6,67 - 0,008)) * 100 = 88,6\%$

% Fe₃C: $((0,77 - 0,008) / (6,67 - 0,008)) * 100 = 11,40\%$

Composição de Química de Cada Fase:

Ferrita (α): solução sólida com 0,008%C

Fe₃C: 6,67%C

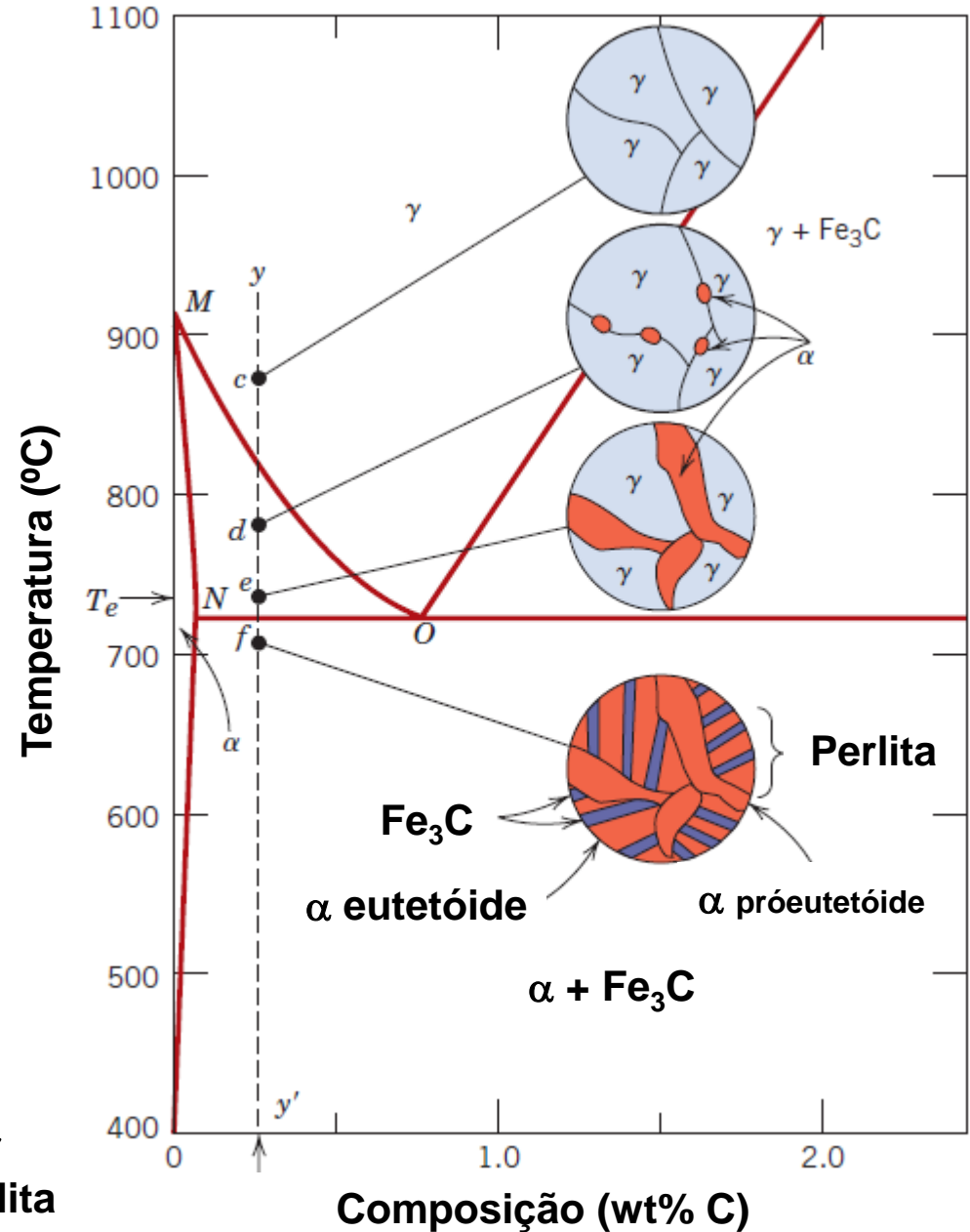
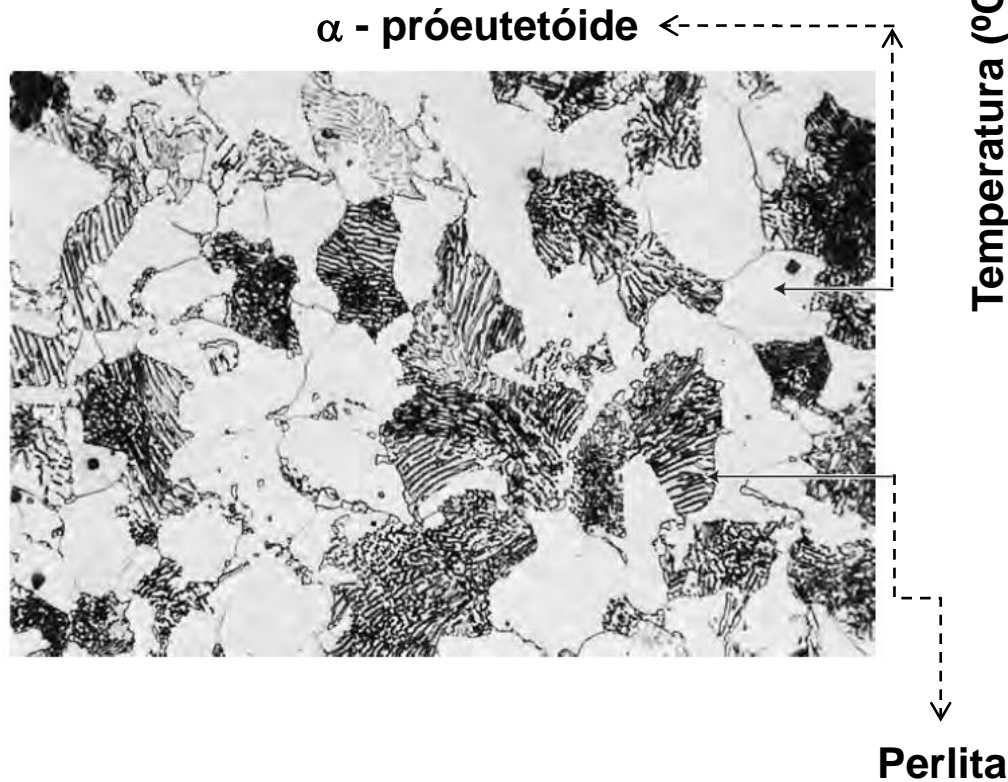
Limite de Solubilidade do carbono na Ferrita (α): 0,008%C a 25°C

Distribuição de Fases: Estrutura Lamelar intercalada de fase Ferrita (α) + Fe₃C (cementita)

O Sistema Fe-Fe₃C

- Microestruturas nos Aços

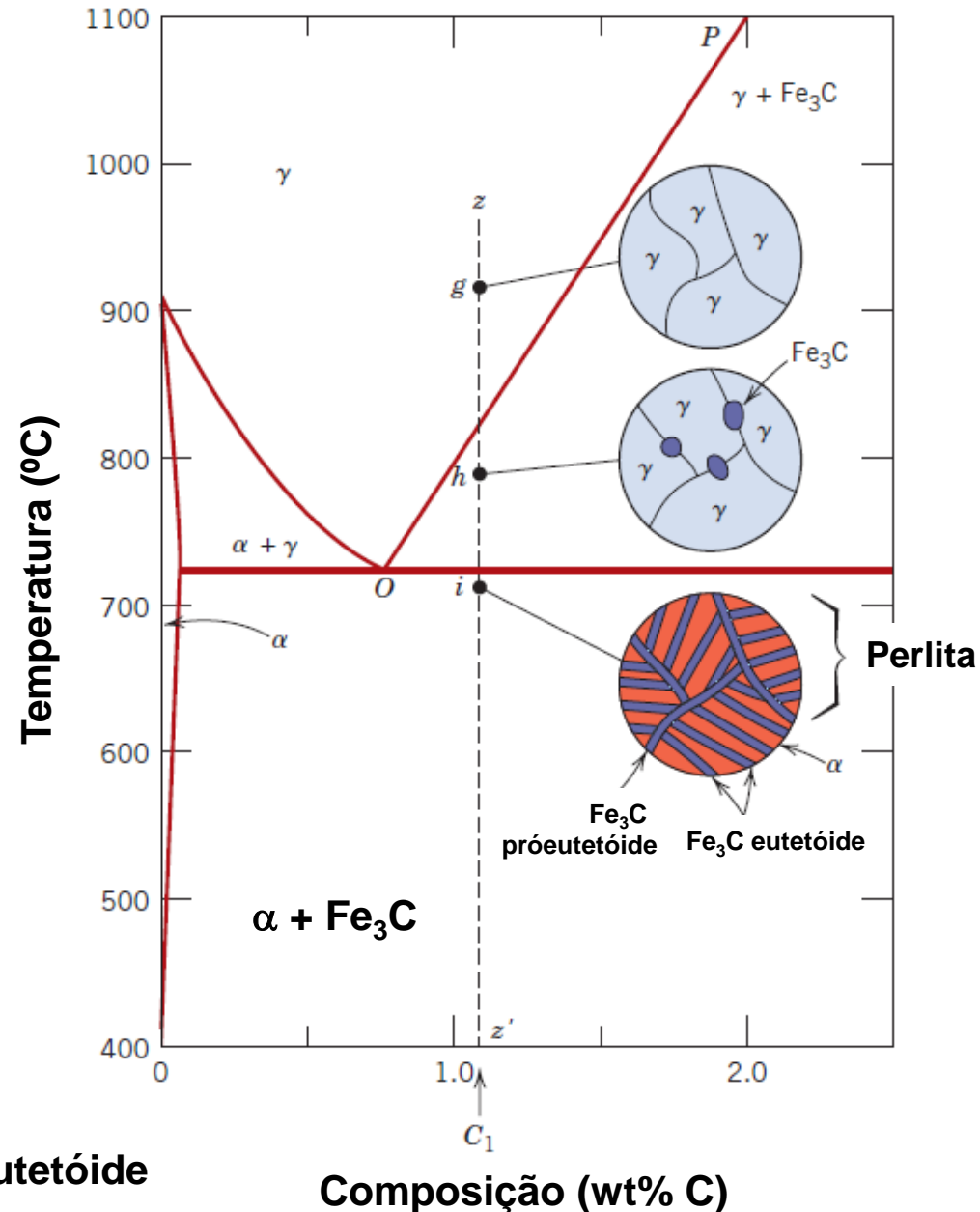
A transformação **Hipoeutetóide** ocorre pela formação de ferrita Proeutetóide, seguida pela decomposição da Austenita em Ferrita e Cementita, na forma de lamelas intercaladas. Esta microestrutura é chamada de Ferrita + Perlita.

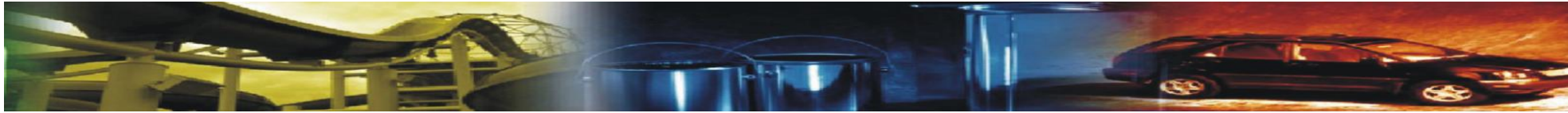


O Sistema Fe-Fe₃C

- Microestruturas nos Aços

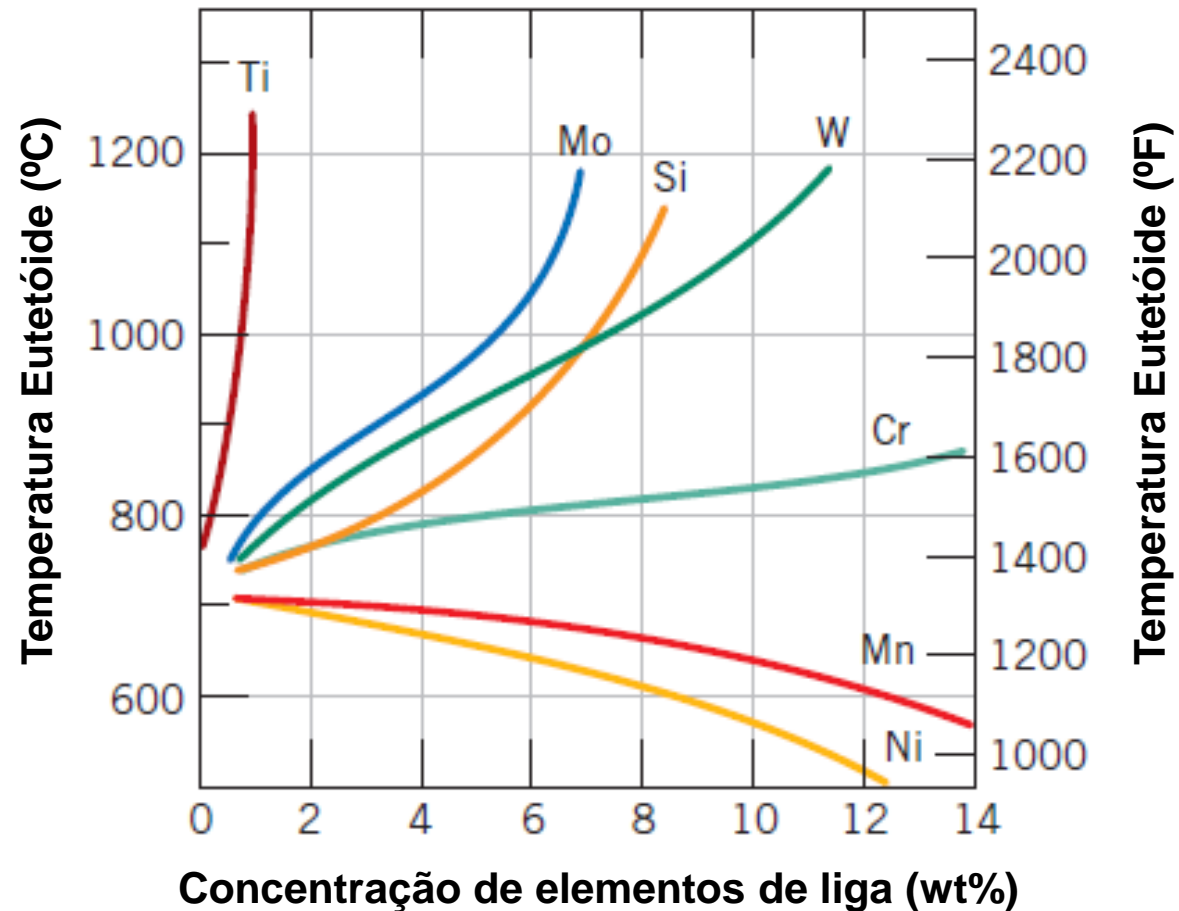
A transformação **Hipereutetóide** ocorre pela formação de Cementita proeutetóide, seguida pela decomposição da Austenita em Ferrita e Cementita, na forma de lamelas intercaladas. Esta microestrutura é chamada de rede de Cementita em contorno de grão + Perlita.





O Sistema Fe-Fe₃C

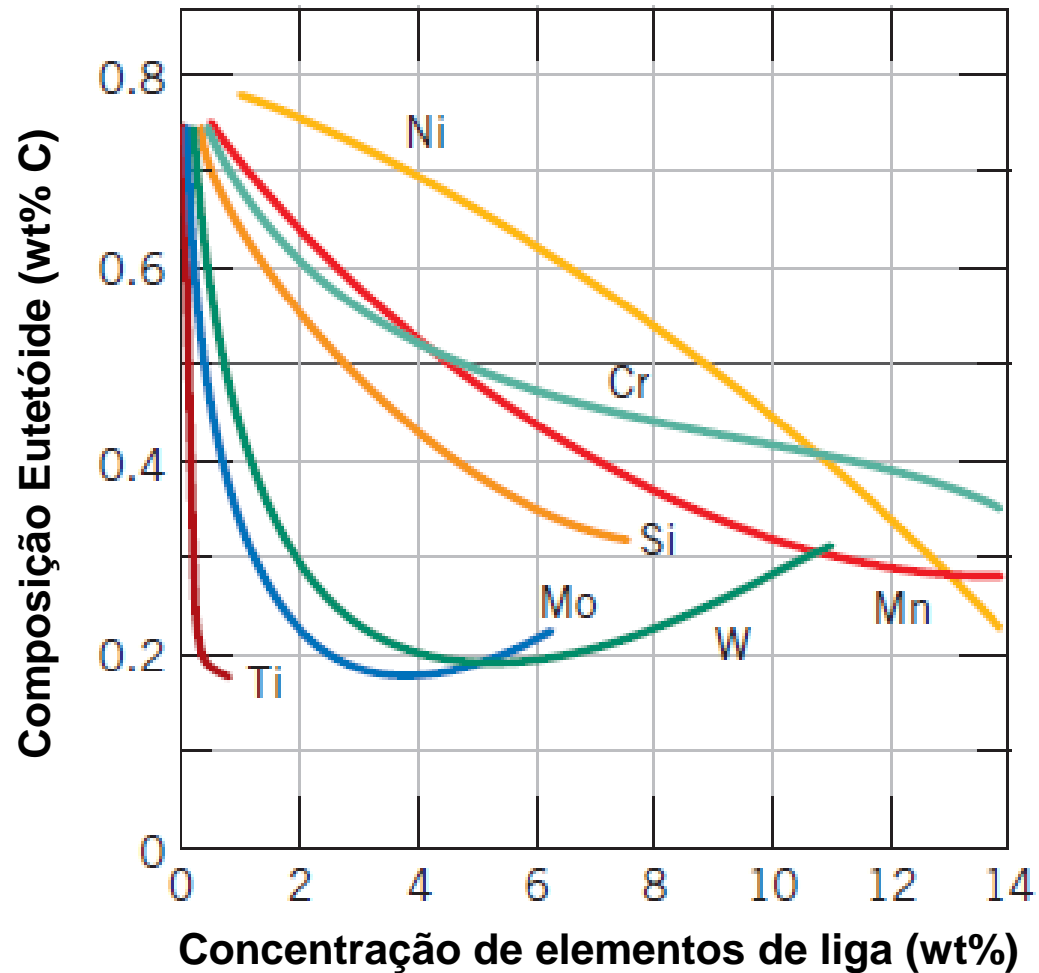
- Influência de elementos de liga na **Temperatura** da reação Eutetóide:





O Sistema Fe-Fe₃C

- Influência de elementos de liga na **Composição** da reação Eutetóide:





Transformações de Fase

DEMEC – TM242-B

Prof. Scheid



Cinética das Transformações de Fase:

Numa transformação de fase aparece, em geral, pelo menos uma nova fase, com características diferentes (físicas, químicas, estrutura cristalina) daquela que a originou.

As transformações de fase envolvem, normalmente, **dois estágios** diferentes:

1- Nucleação: Surgimento de partículas ou núcleos pequenos da nova fase, capazes de crescer.

2- Crescimento: No estágio de crescimento os núcleos aumentam de tamanho, resultando no desaparecimento de parte ou toda a fase original.

Cinética das Transformações de Fase

1- Nucleação

Existem dois tipos de nucleação:

a- Homogênea: núcleos se formam de maneira uniforme ao longo de toda a fase original.

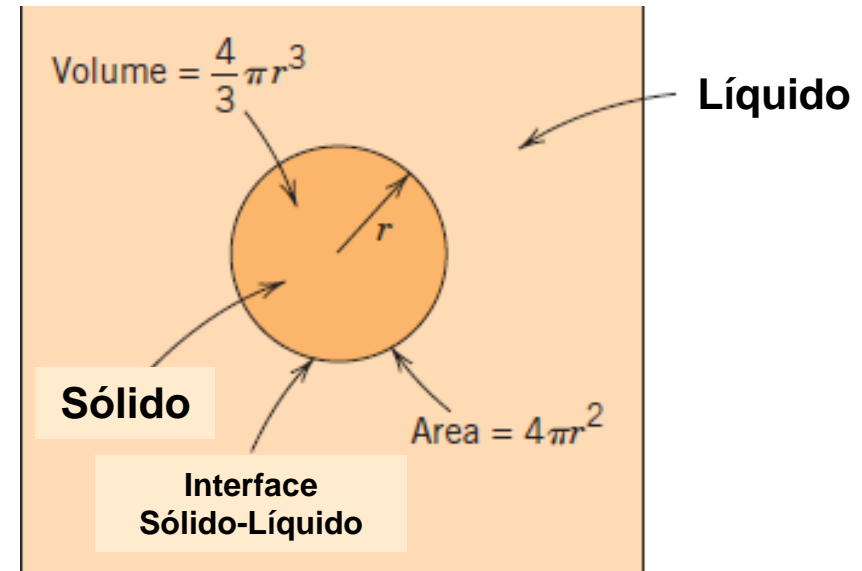
b- Heterogênea: núcleos se formam preferencialmente em heterogeneidades estruturais, como superfícies de moldes, impurezas, contornos de grão ou discordâncias.

a- Homogênea:

Termodinamicamente, uma transformação de fase irá ocorrer de forma espontânea se o ΔG for negativo.

Na **solidificação**, temos:

$$\Delta G = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \gamma$$

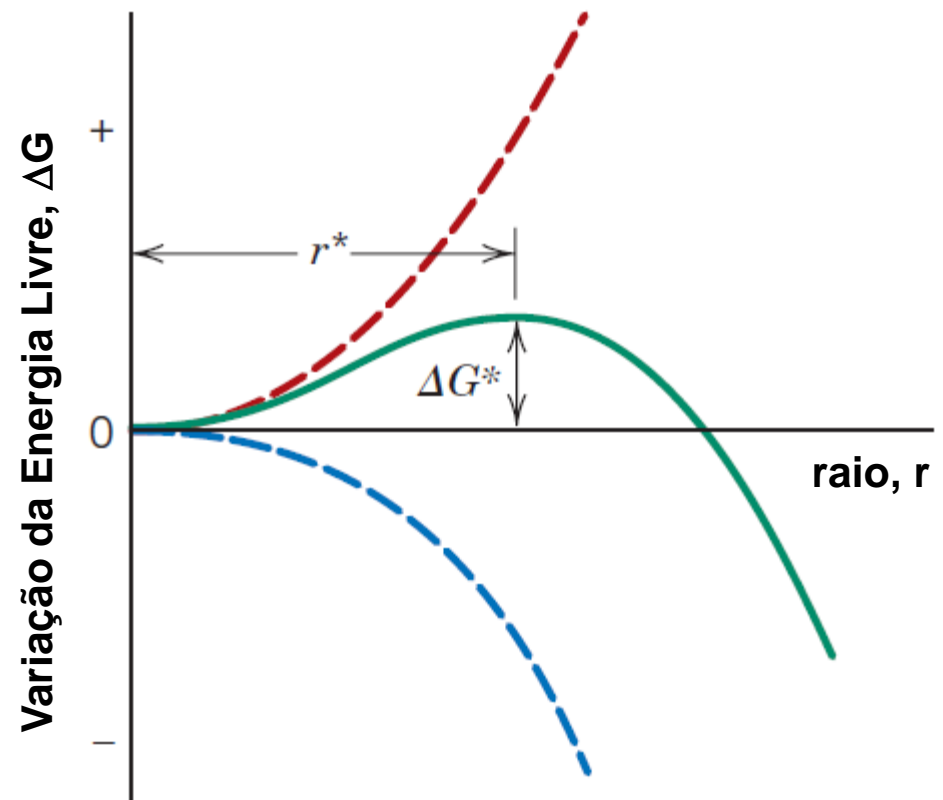
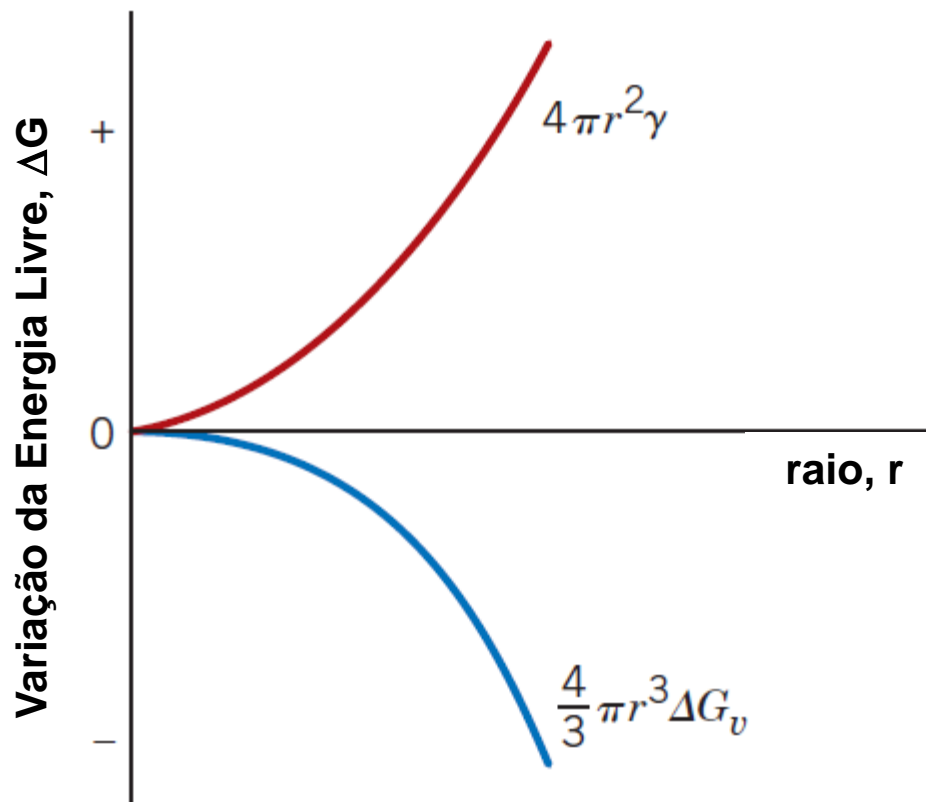


Cinética das Transformações de Fase

a- Nucleação Homogênea

Partículas de sólido com raio crítico menor que r^* são ditos embriões, enquanto partículas maiores que r^* são ditos núcleos.

A energia livre crítica ΔG^* que existe no raio crítico r^* , corresponde ao máximo da curva e é a energia livre de ativação necessária para a formação de um núcleo estável.



Cinética das Transformações de Fase

a- Nucleação Homogênea

Derivando em relação a r , temos:

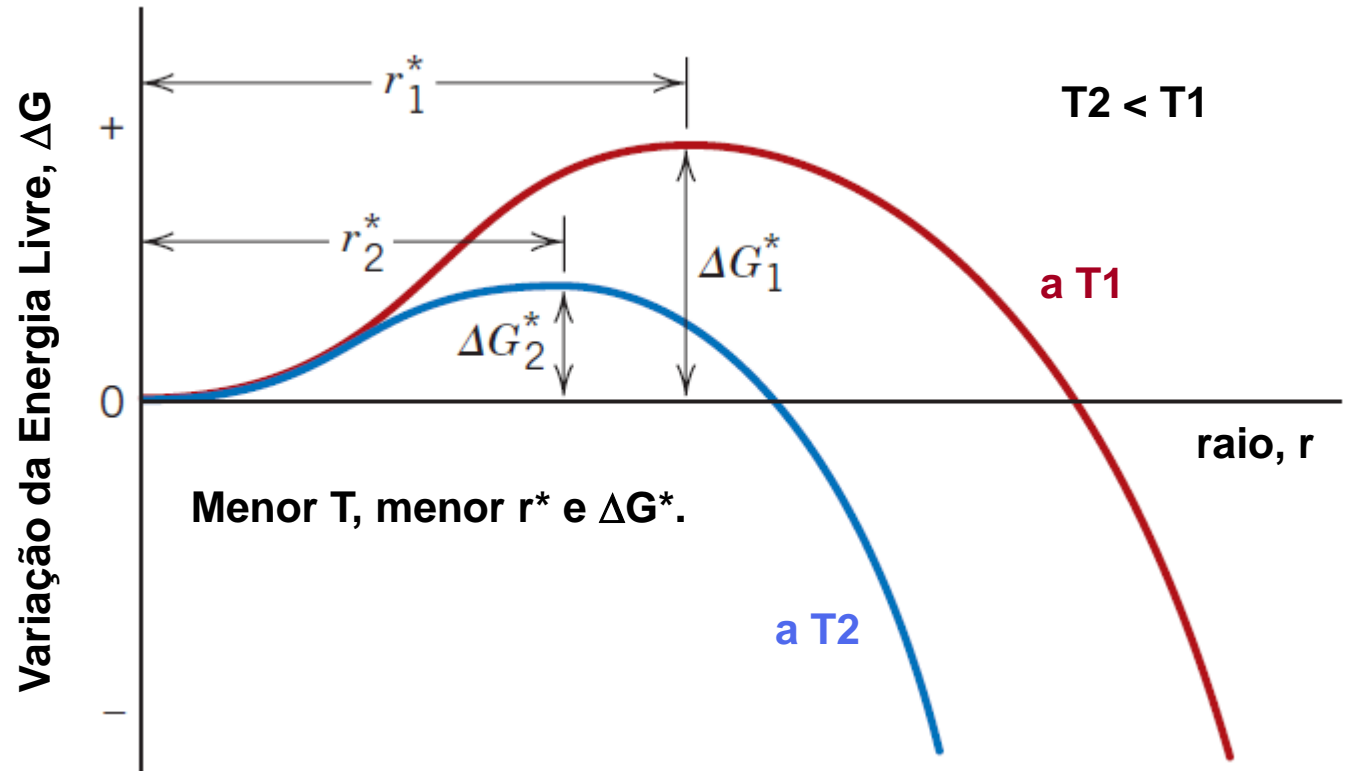
$$r^* = -\frac{2\gamma}{\Delta G_v}$$

Substituindo r^* em

$$\Delta G = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \gamma$$

Temos:

$$\Delta G^* = \frac{16\pi\gamma^3}{3(\Delta G_v)^2}$$

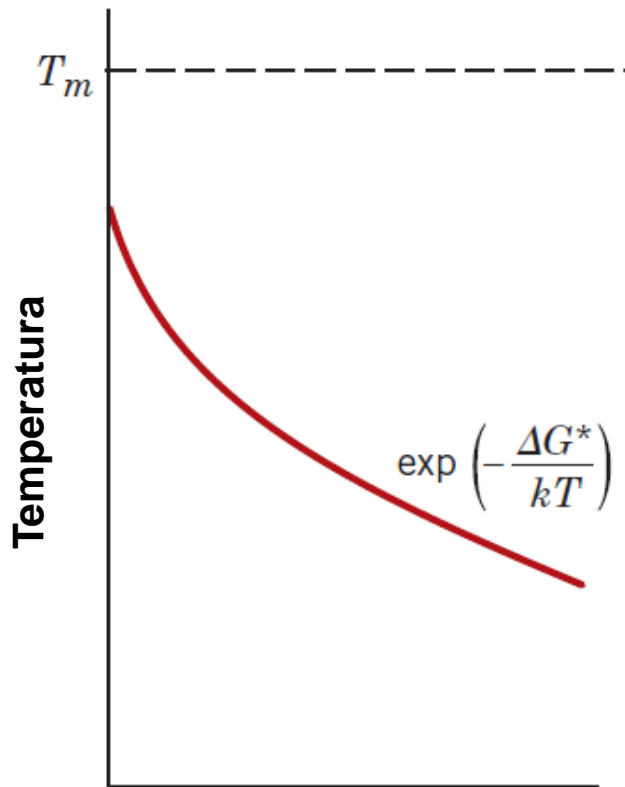


Cinética das Transformações de Fase

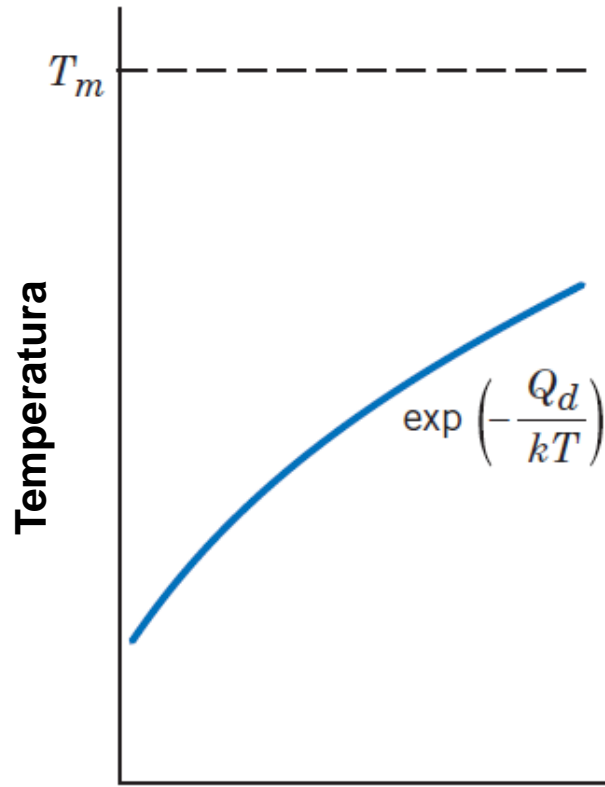
a- Nucleação Homogênea

O número de núcleos estáveis é dado por n^* e ν_d corresponde à frequência com que os átomos do líquido se prendem ao núcleo sólido (depende da difusão) e são expressos por:

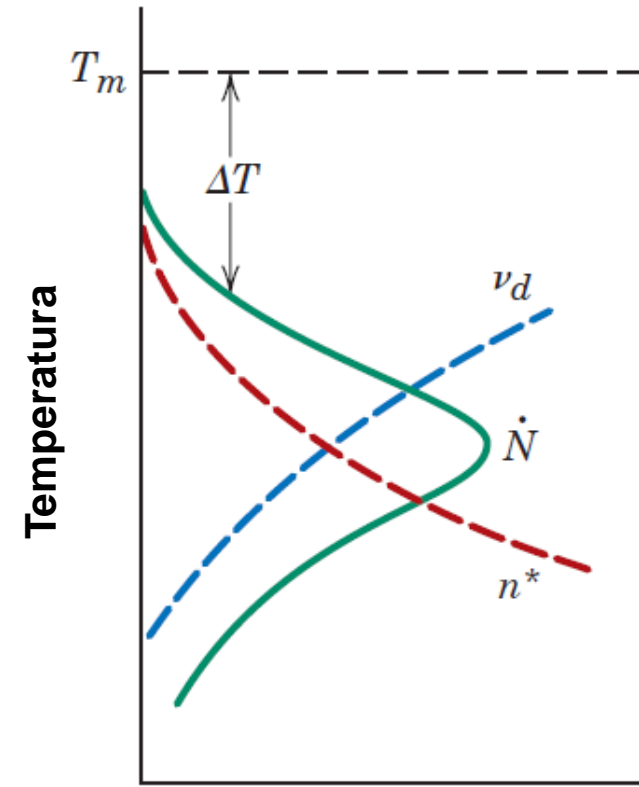
$$n^* = K_1 \exp\left(-\frac{\Delta G^*}{kT}\right) \quad \nu_d = K_2 \exp\left(-\frac{Q_d}{kT}\right)$$



Número de núcleos estáveis, n^*



Frequência de agrupamento, ν_d



n^*, ν_d, \dot{N}

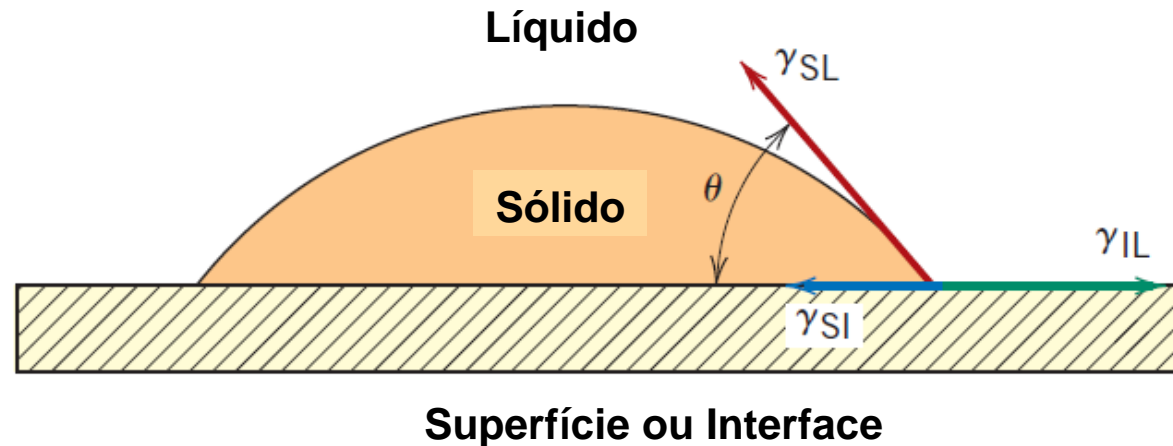
Cinética das Transformações de Fase

b- Nucleação Heterogênea

A nucleação Homogênea ocorre para largos super-resfriamentos.

Na heterogênea, a nucleação ocorre sobre superfícies ou interfaces preexistentes, reduzindo a energia livre superficial γ . O resultado é a necessidade de menores super-resfriamentos para este tipo de nucleação.

Considerando a nucleação de uma partícula sólida sobre uma superfície plana a partir de uma fase líquida.



γ_{SL} – Energia Interfacial Sólido-Líquido,

γ_{SI} – Energia Interfacial Sólido-Interface,

γ_{IL} – Energia Interfacial Interface-Líquido

θ é o ângulo entre as energias γ_{SL} e γ_{SI} .

Equilíbrio das forças de
tensão superficial:

$$\gamma_{IL} = \gamma_{SI} + \gamma_{SL} \cos \theta$$

Cinética das Transformações de Fase

b- Nucleação Heterogênea

Novas expressões para r^* e ΔG^* :

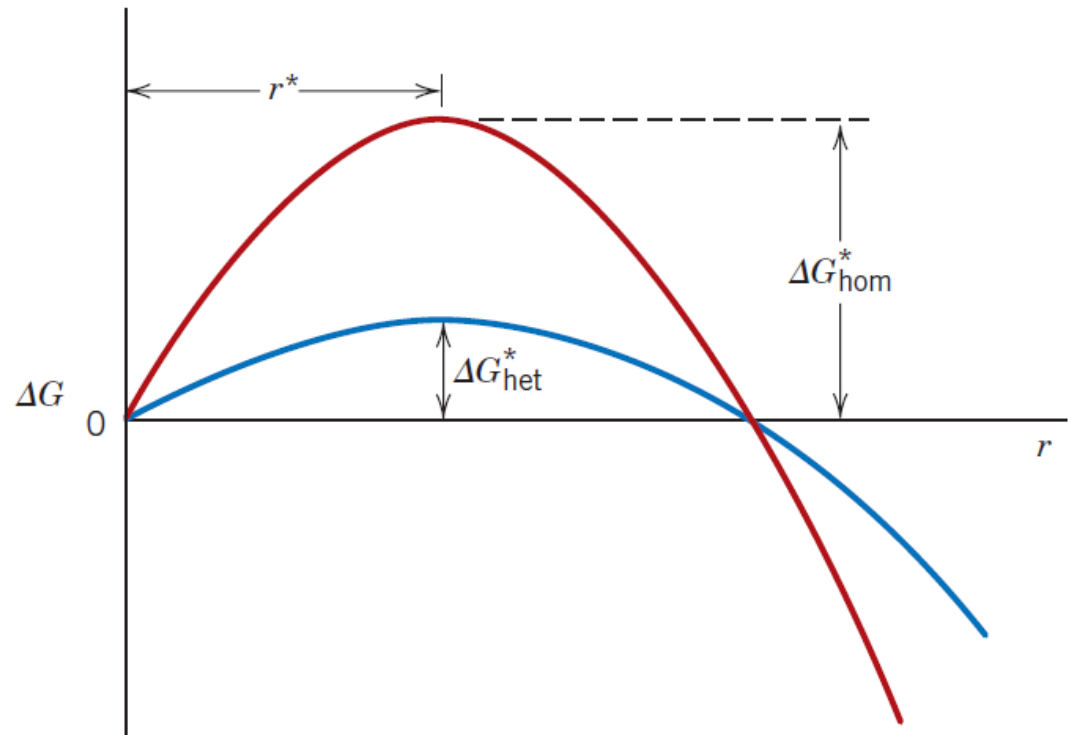
$$r^* = -\frac{2\gamma_{SL}}{\Delta G_v}$$

$$\Delta G^* = \left(\frac{16\pi\gamma_{SL}^3}{3\Delta G_v^2} \right) S(\theta)$$

Sendo a função $S(\theta)$ dependente apenas da forma do núcleo, apresentando valor entre zero e a unidade.

r^* é o mesmo para a Nucleação Homogênea e Heterogênea e dependente da energia interfacial Sólido-Líquido.

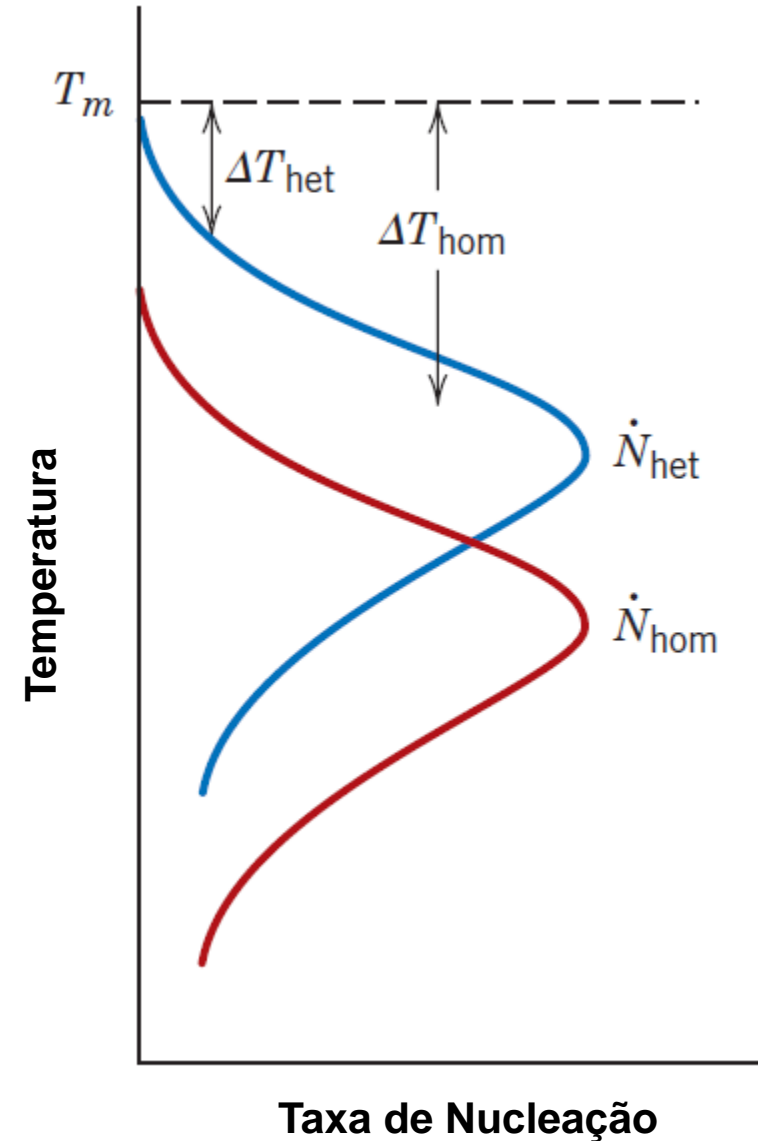
ΔG^* é menor para a nucleação heterogênea, por uma quantidade correspondente a $S(\theta)$.



b- Nucleação Heterogênea

Na nucleação Heterogênea, a elevação da energia (barreira na nucleação) pela formação de uma interface é reduzida, uma vez que já havia uma interface (defeito).

O resultado é a nucleação heterogênea com menores super-resfriamentos



Cinética das Transformações de Fase

2- Crescimento

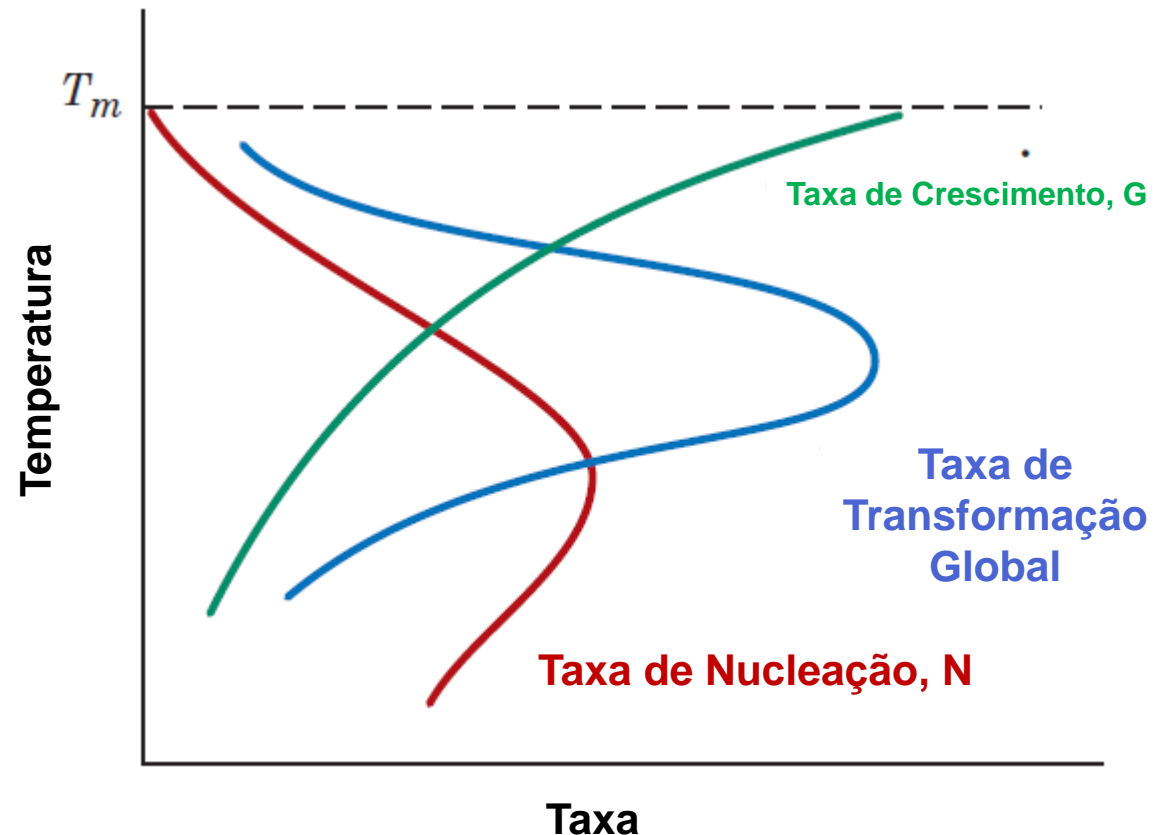
O crescimento inicia no momento que o núcleo se tornou estável.

A taxa de crescimento dos núcleos dependa da difusão atômica e pode ser representada pela expressão:

$$\dot{G} = C \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right)$$

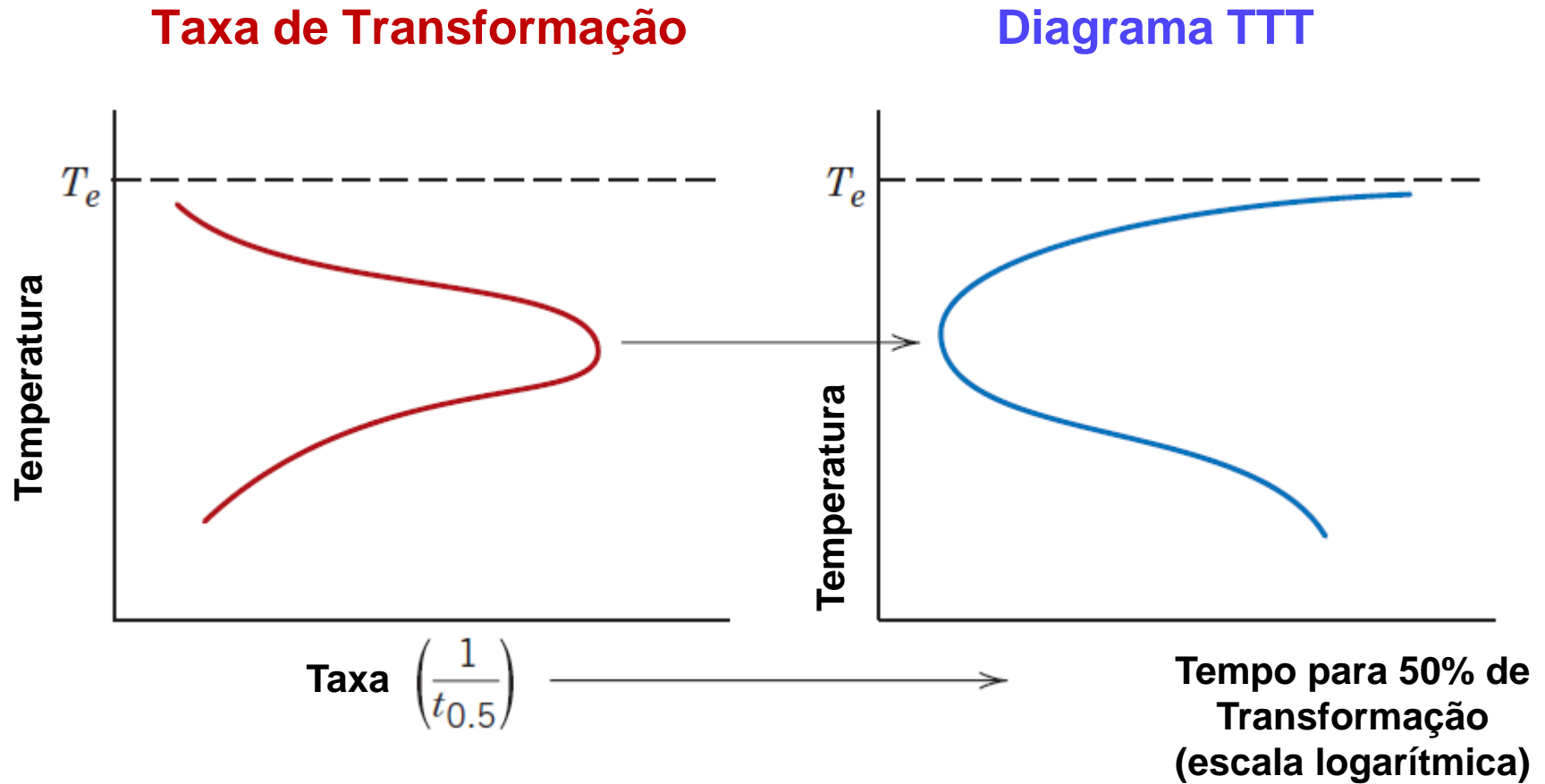
Onde:

Q é a energia de ativação e
C um termo independente da temperatura.



Cinética das Transformações de Fase

2- Crescimento



Cinética das Transformações de Fase

Cinética das Transformações no Estado Sólido

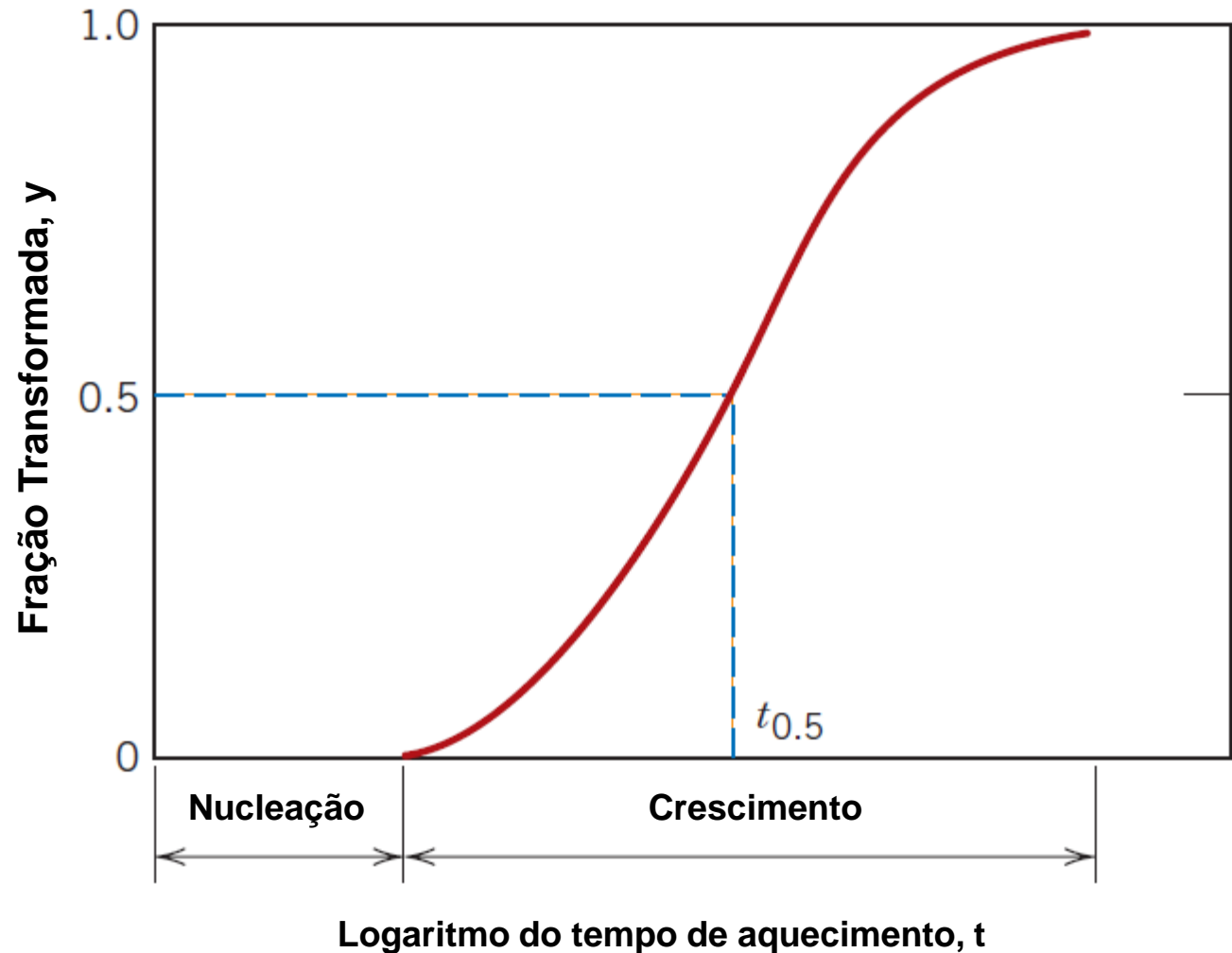
As transformações no estado sólido exibem comportamento cinético conforme a expressão:

$$y = 1 - \exp(-kt^n)$$

Equação de Avrami

Onde:

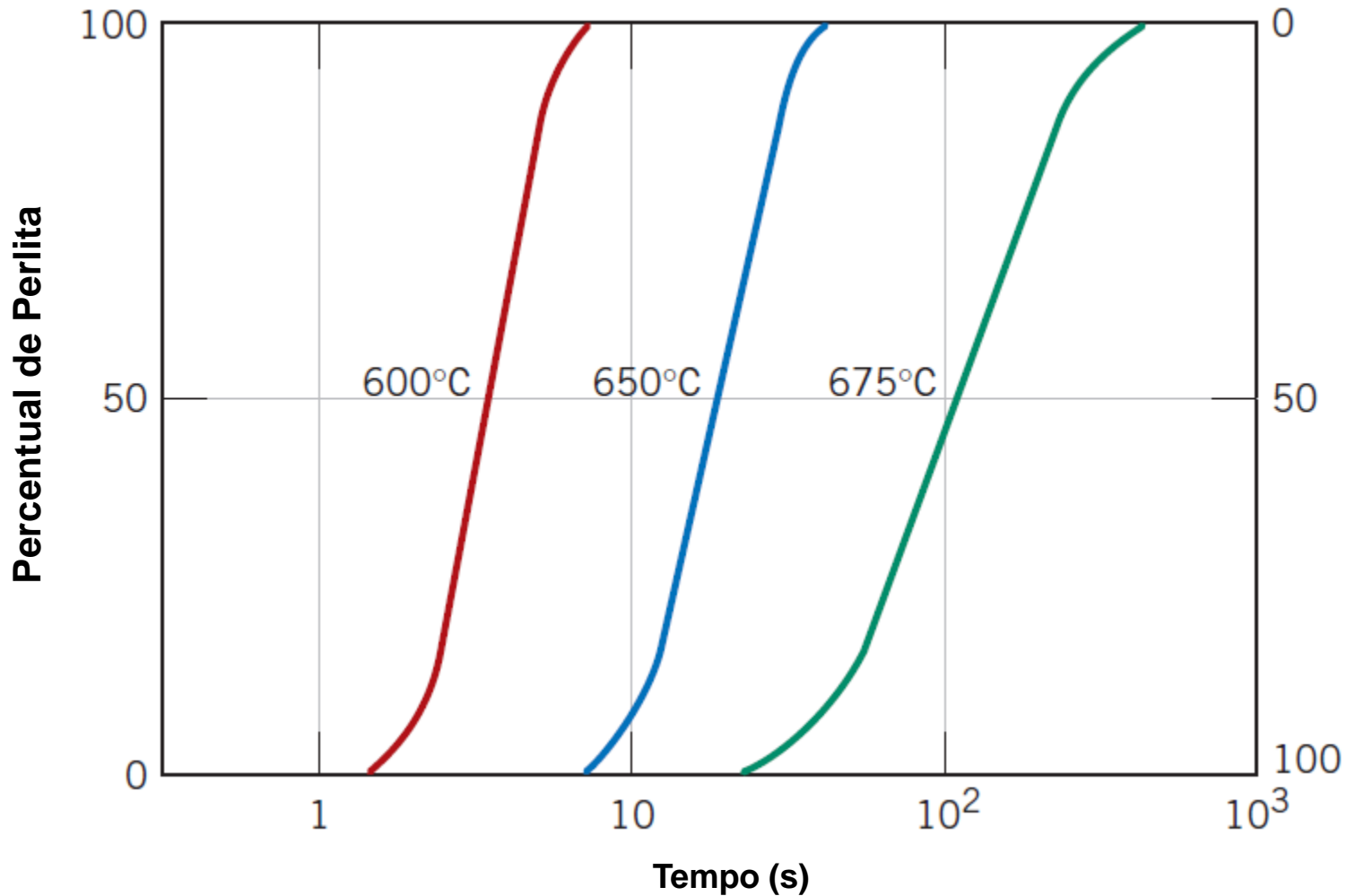
k e **n** são constantes independentes do tempo.



Cinética das Transformações de Fase

Cinética das Transformações no Estado Sólido

Transformação Perlítica

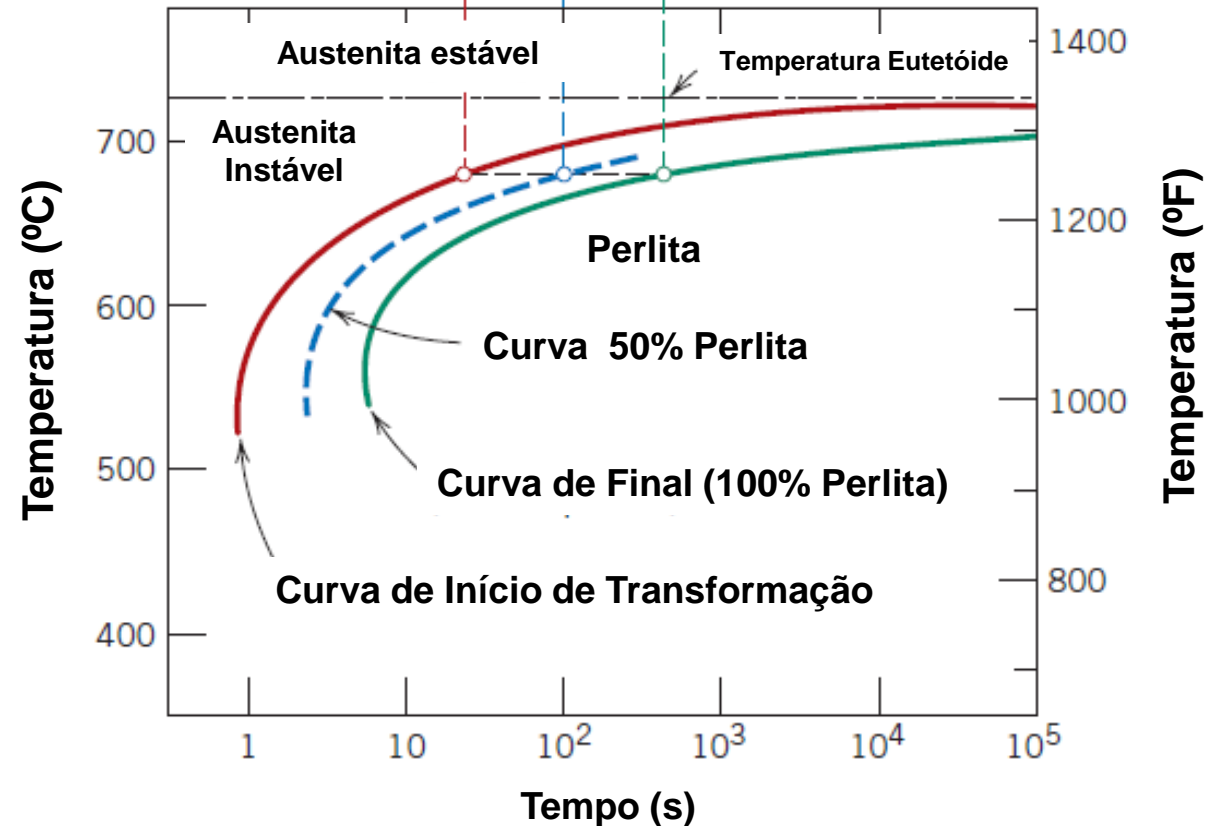
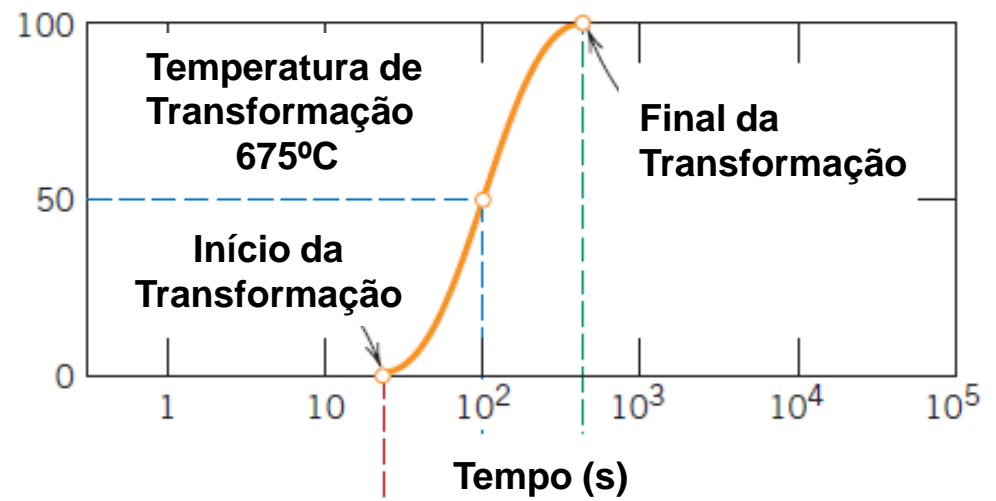




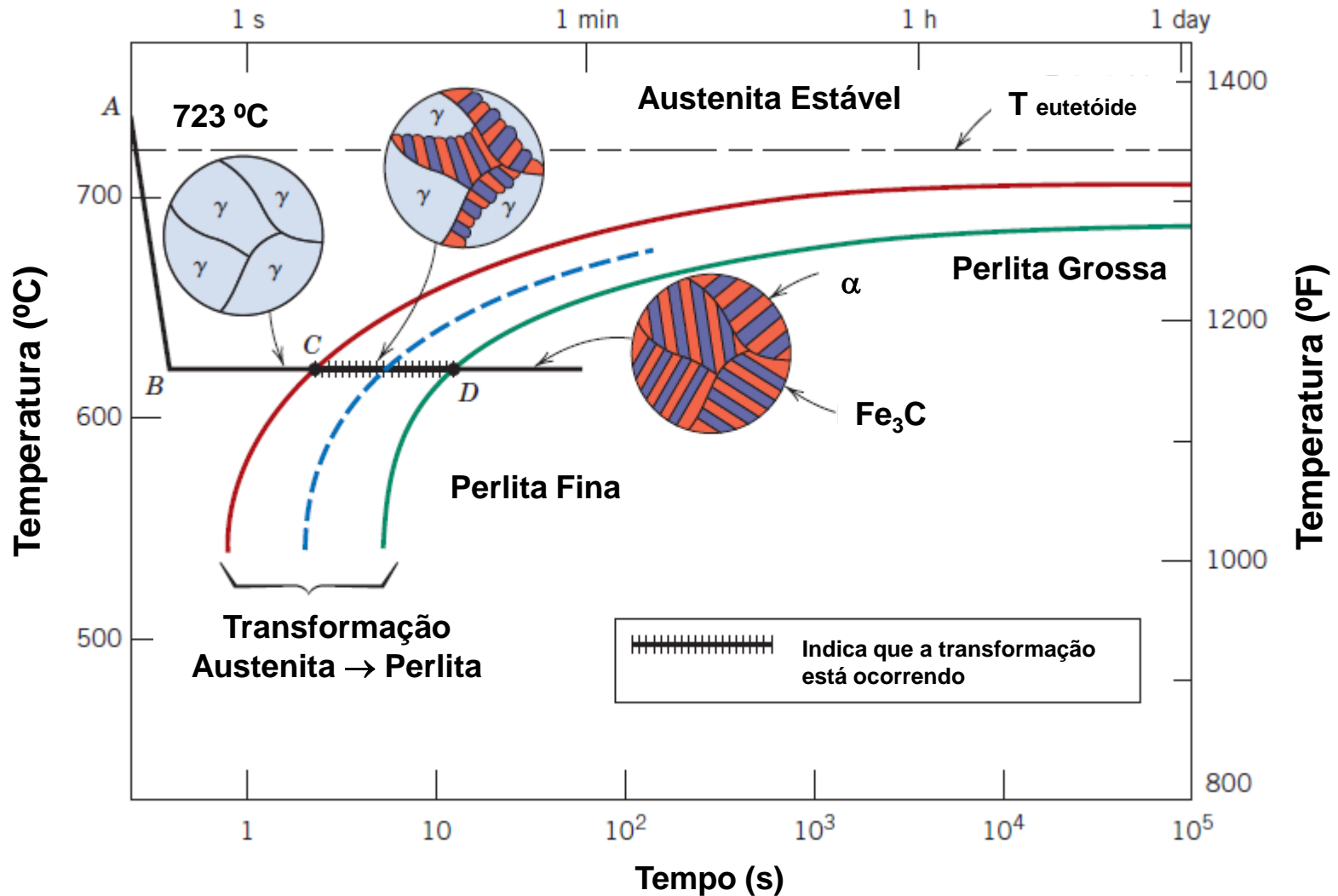
Cinética

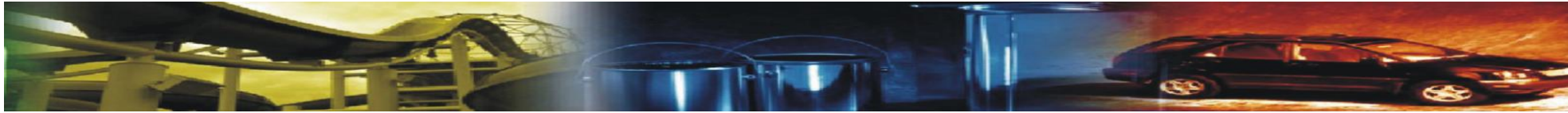
Transformação Perlítica Aço Eutetóide

% Austenita
Transformada
em Perlita

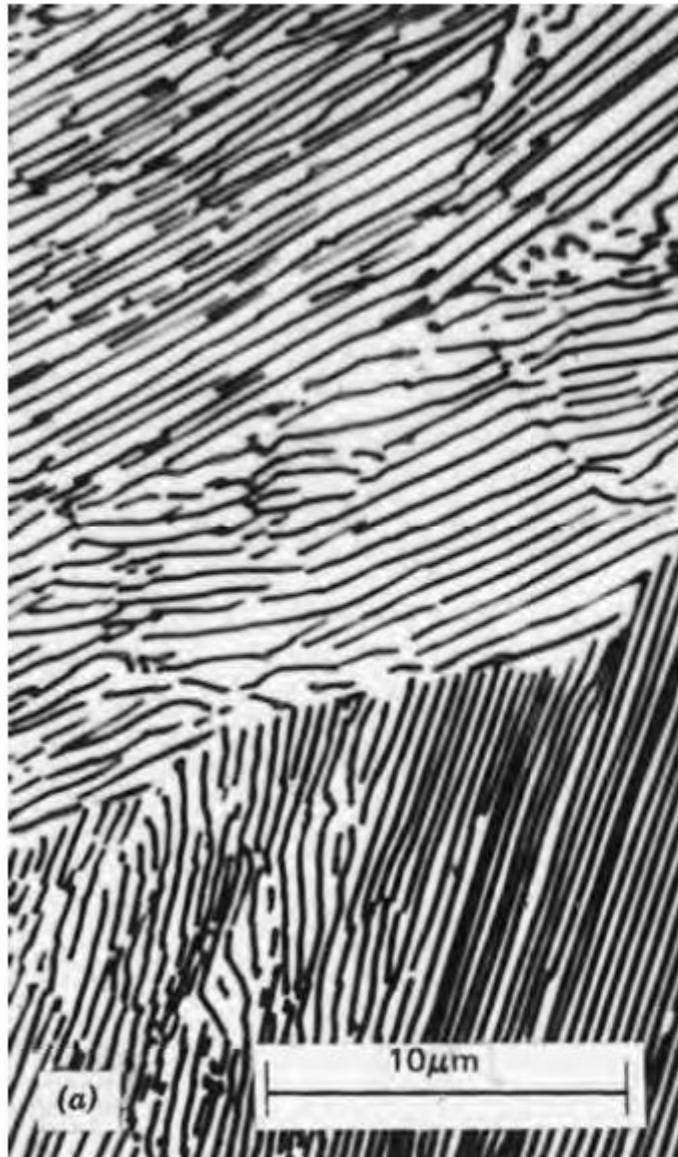


Transformação Perlítica - Aço Eutetóide





Perlita Grossa



Perlita Fina



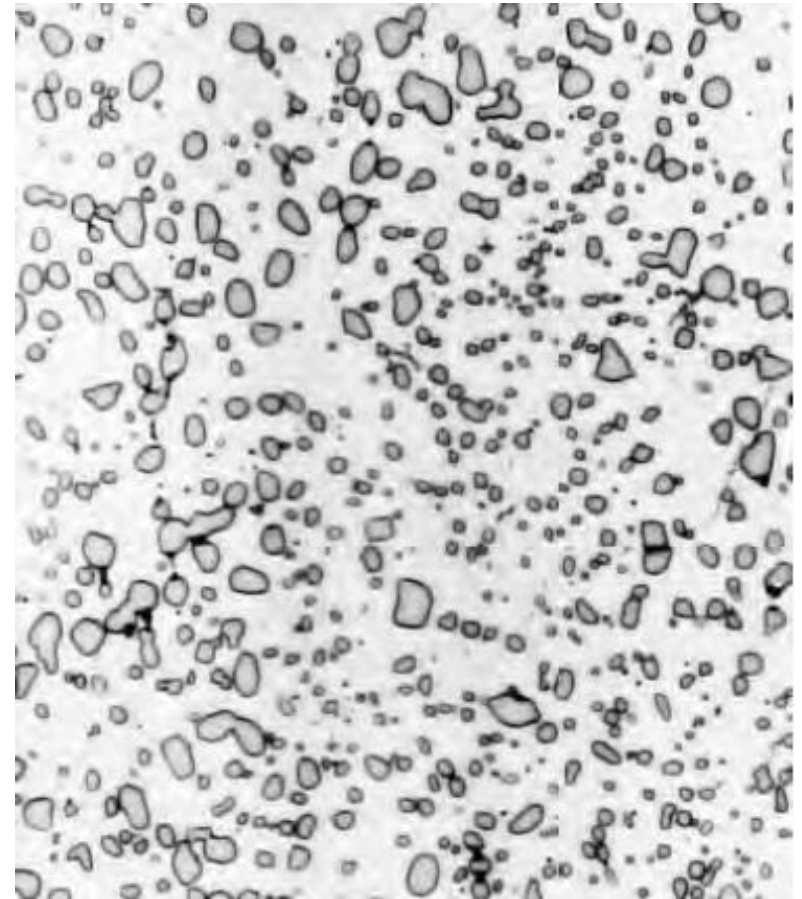


Esferoidização da Cementita

Quando o aço é aquecido em temperatura logo abaixo de 723°C e mantido por longo tempo (várias horas), a cementita da perlita é coalescida.

A força motriz deste processo é a redução da área de contorno de fases ferrita e cementita (originalmente lamelares).

É um tratamento usado para permitir a usinagem de aços alto carbono e alta liga (aços ferramenta).





Transformação Bainítica

Bainita: Microestrutura formada na faixa de 250 a 450°C e consiste de Agulhas ou Placas de ferrita com carbonetos incrustados.

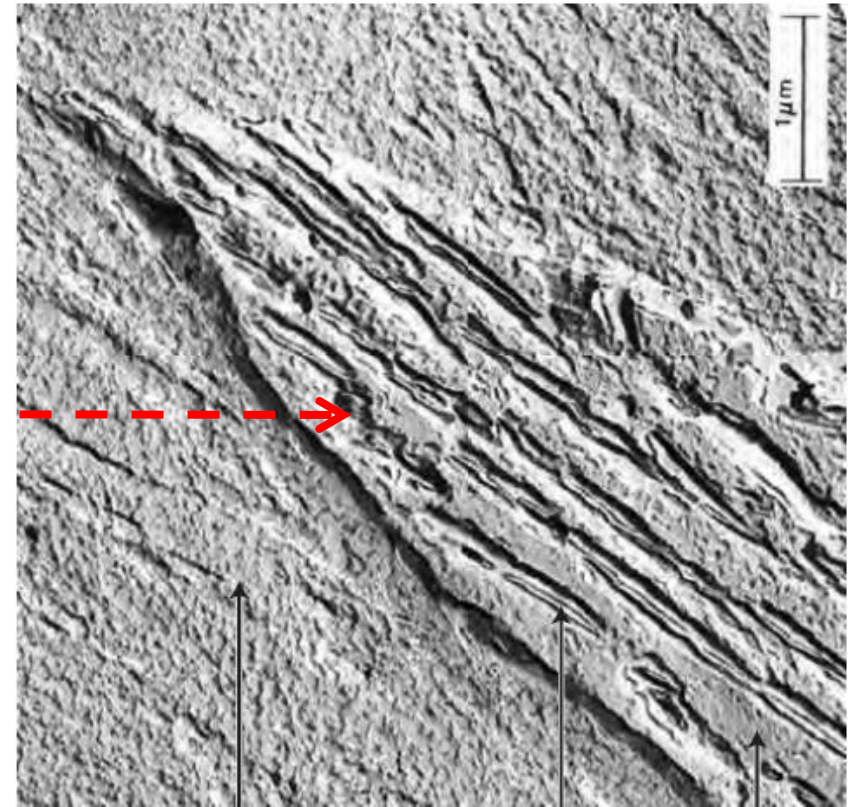
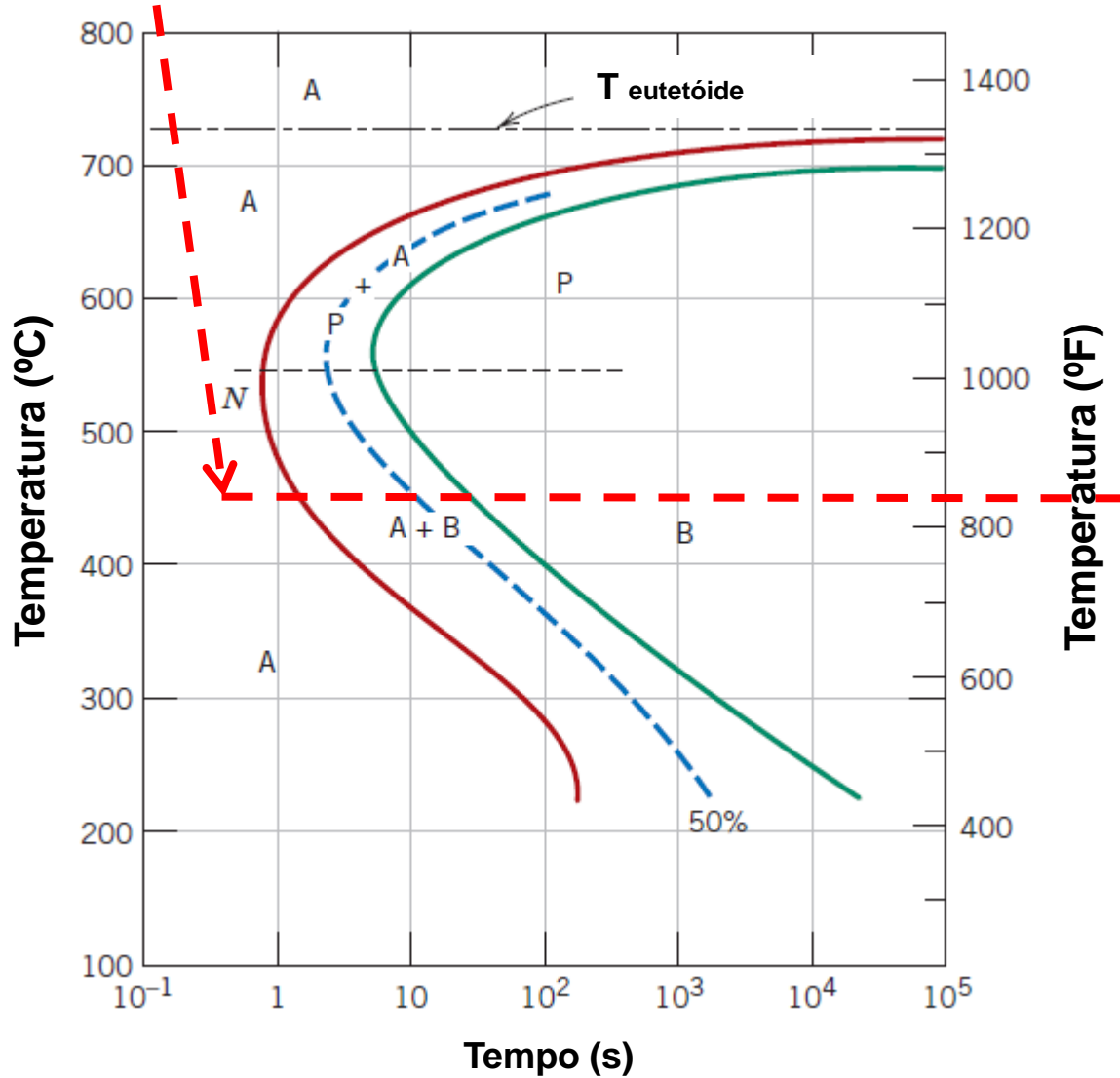
- 450°C - Bainita Superior: Formada por placas irregulares com carbonetos grosseiros e alinhados com a direção preferencial da placa. O Carboneto de Ferro (Fe_3C) é formado.

- 250°C - Bainita Inferior: Placas regulares com carbonetos finamente dispersos, formando um ângulo com a direção de orientação da placa de ferrita. O carboneto de ferro épsilon é formado, com estrutura hexagonal e 8,4% em peso de Carbono.

A transformação bainítica está associada a temperaturas mais baixas (em relação à transformação perlítica), o que resulta em elevada taxa de nucleação e crescimento da nova fase limitado pela difusão atômica.



Microestrutura da Bainita



Martensita

Fe_3C Ferrita

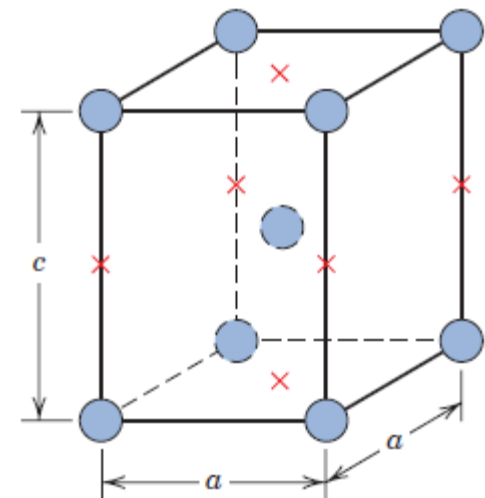


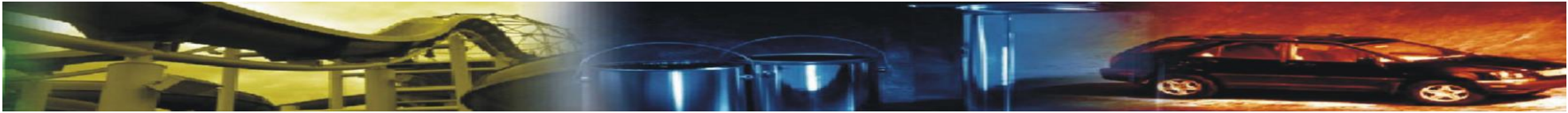
Transformação Martensítica

Martensita: Solução sólida supersaturada em Carbono em Ferro com estrutura cristalina Tetragonal de Corpo Centrado (TCC), formada pelo resfriamento em taxa maior que a tangente ao “nariz” da curva de início de transformação em “C” (para Perlita e Bainita).

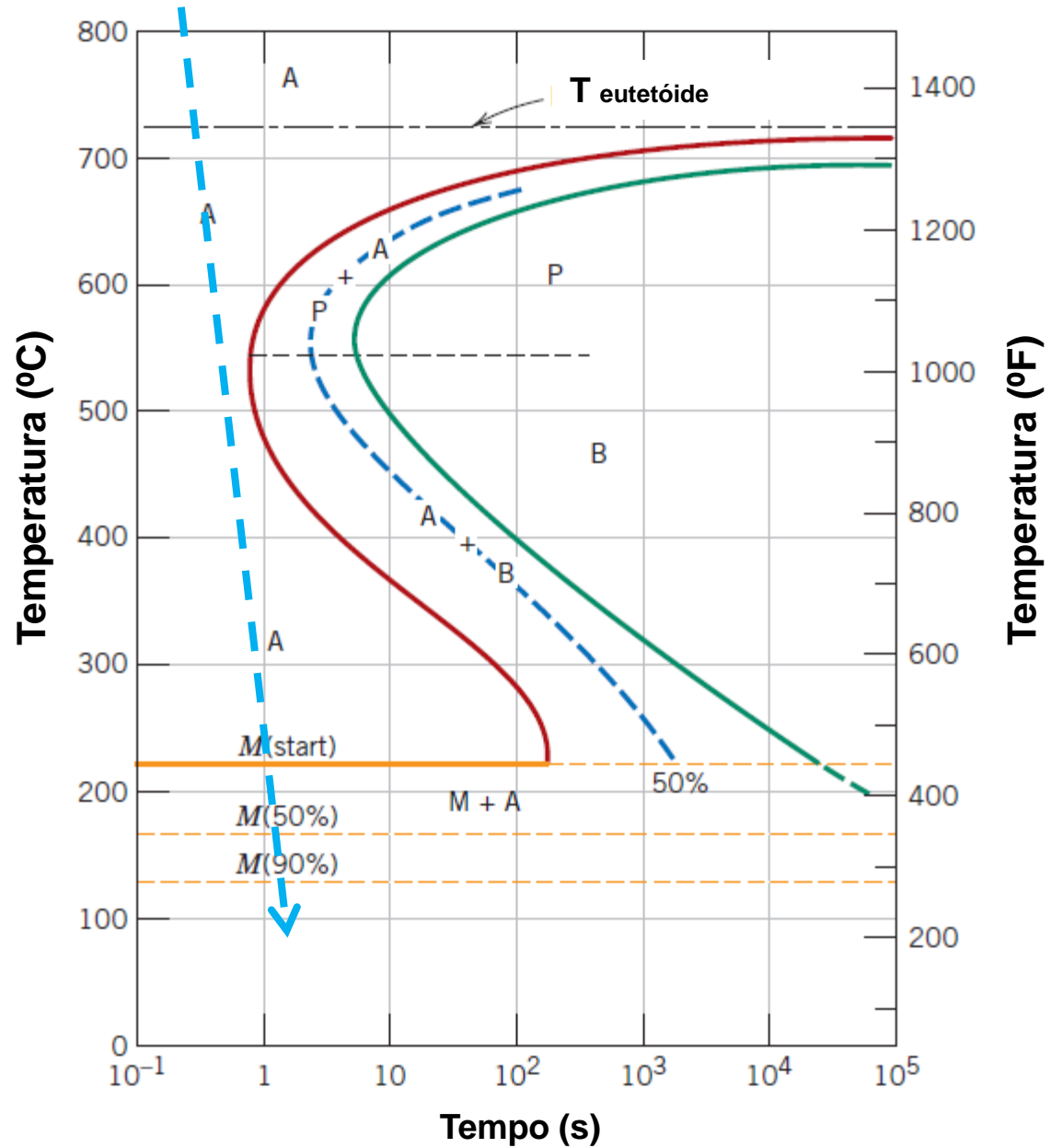
É uma microestrutura metaestável, resultante da transformação não-difusional da Austenita. O Carbono, mantido em solução sólida intersticial, promove o cisalhamento da estrutura cristalina, o que leva ao surgimento da estrutura TCC.

A nova fase Martensita nucleia e cresce rapidamente (velocidade do som), uma vez que não há difusão atômica envolvida. A taxa de transformação é independente do tempo!!!





Martensita





Resfriamento Contínuo

Representam as transformações estudadas em condições próximas às da realidade do resfriamento dos aços a partir da austenita (tratamentos térmicos).

