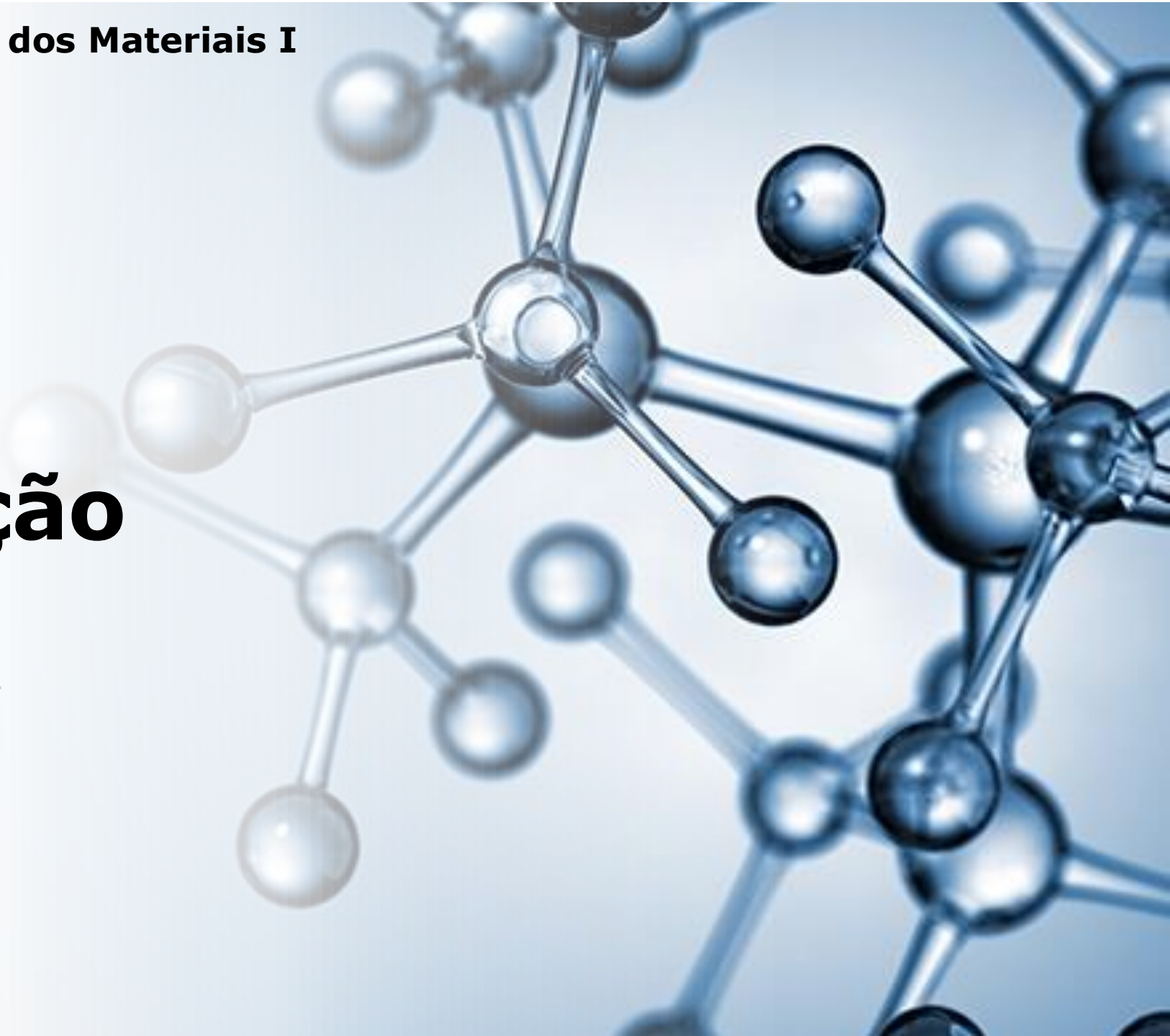


Aula 7: Transformação de fases

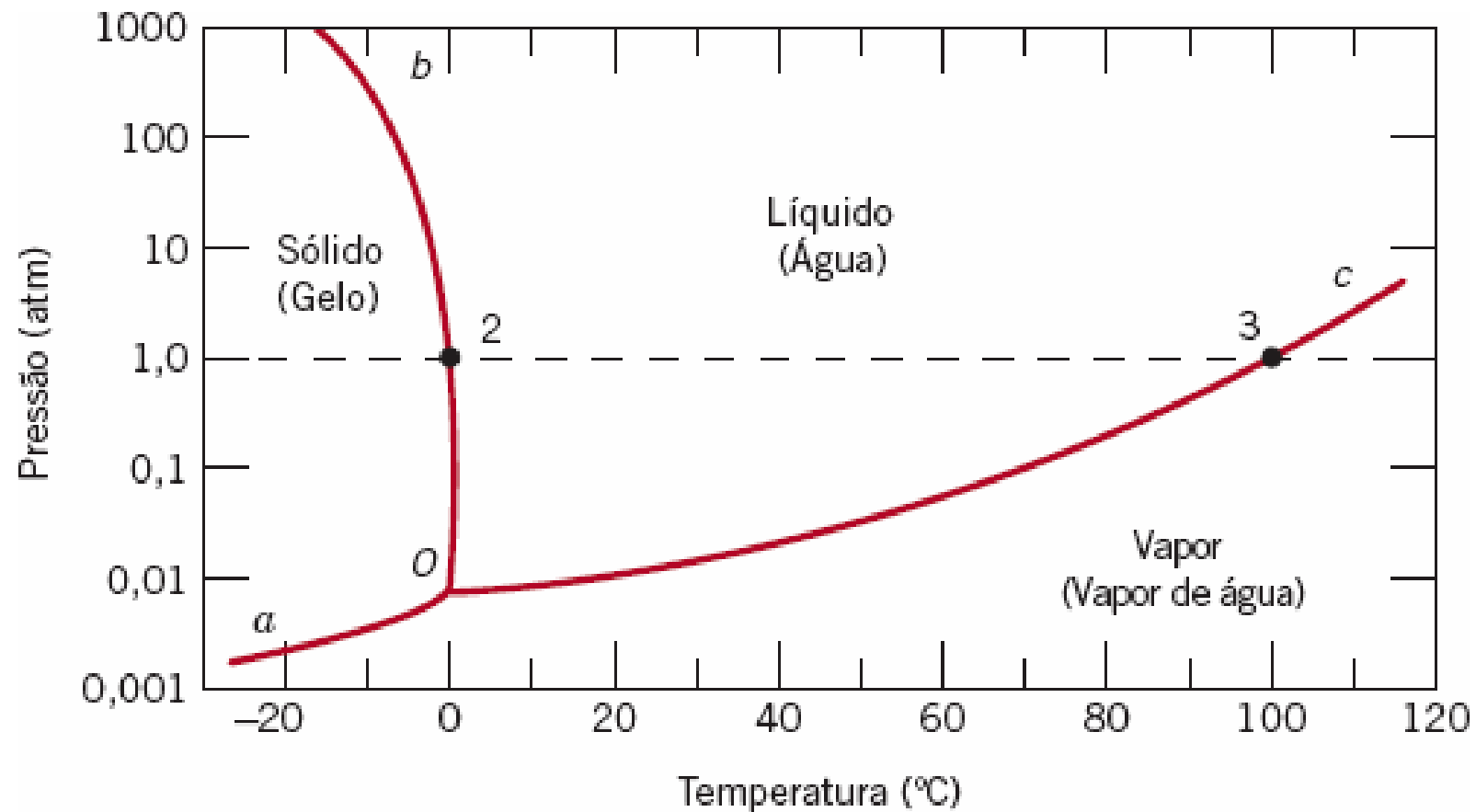
Prof. Fernando Sabino

Email: fpsabino@usp.br



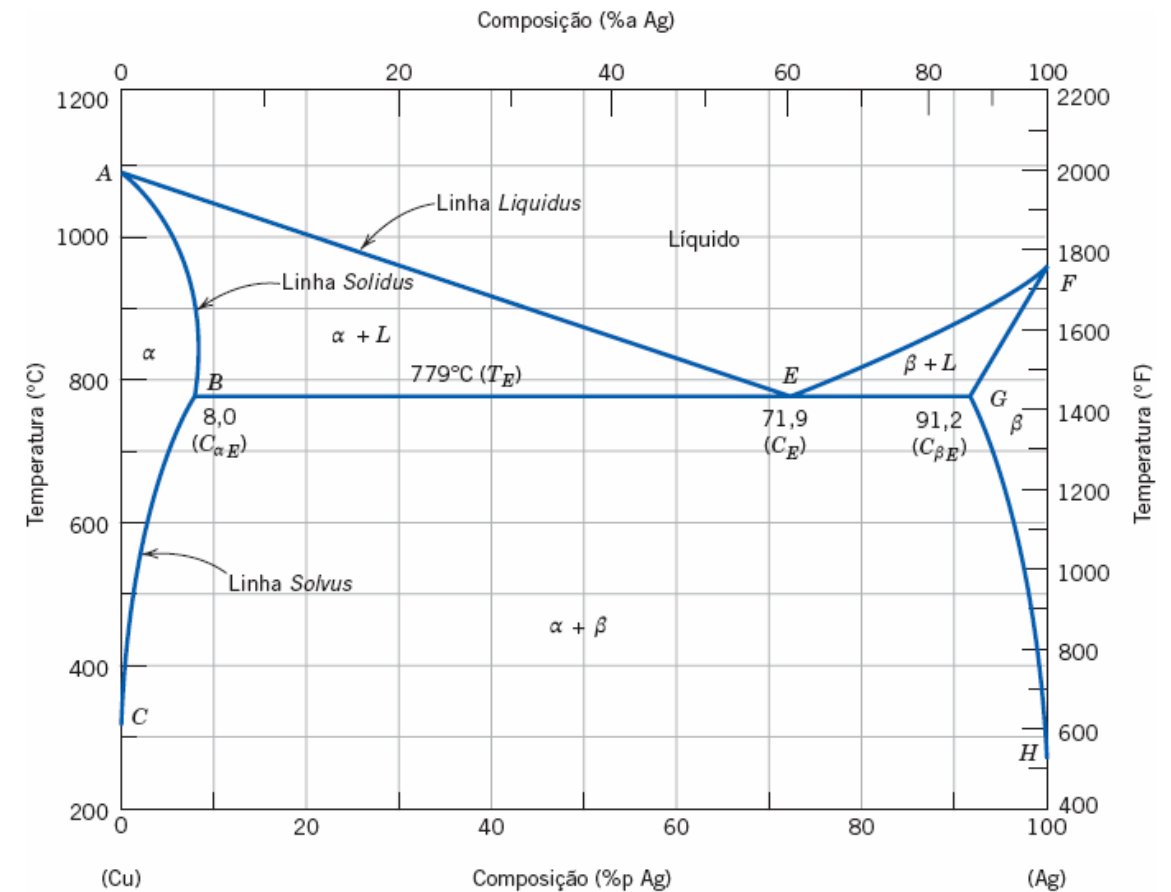
Última aula...

1. Diagrama de fase (unário).



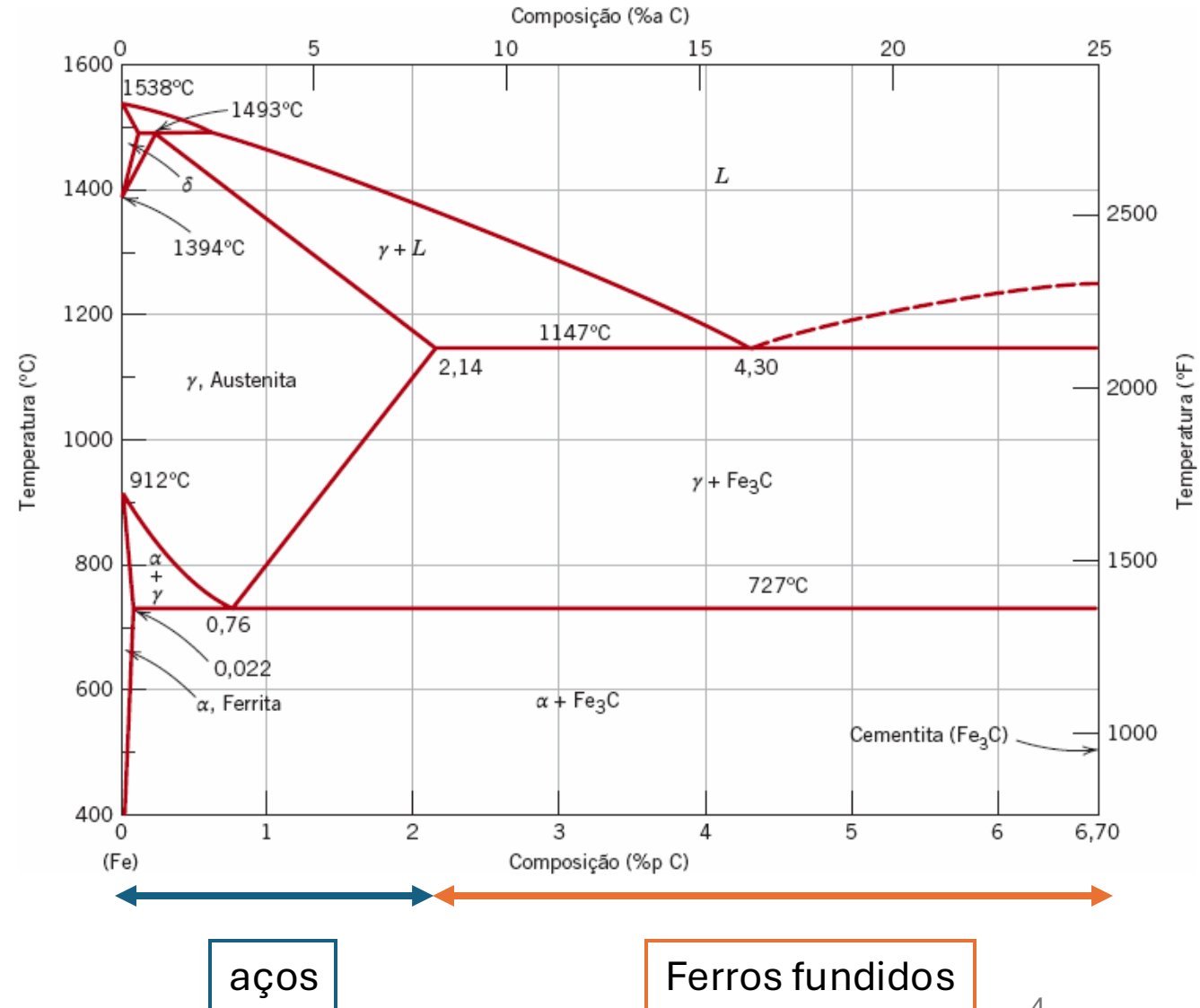
Última aula...

1. Diagrama de fase (unário).
2. Diagrama de fase (binários).

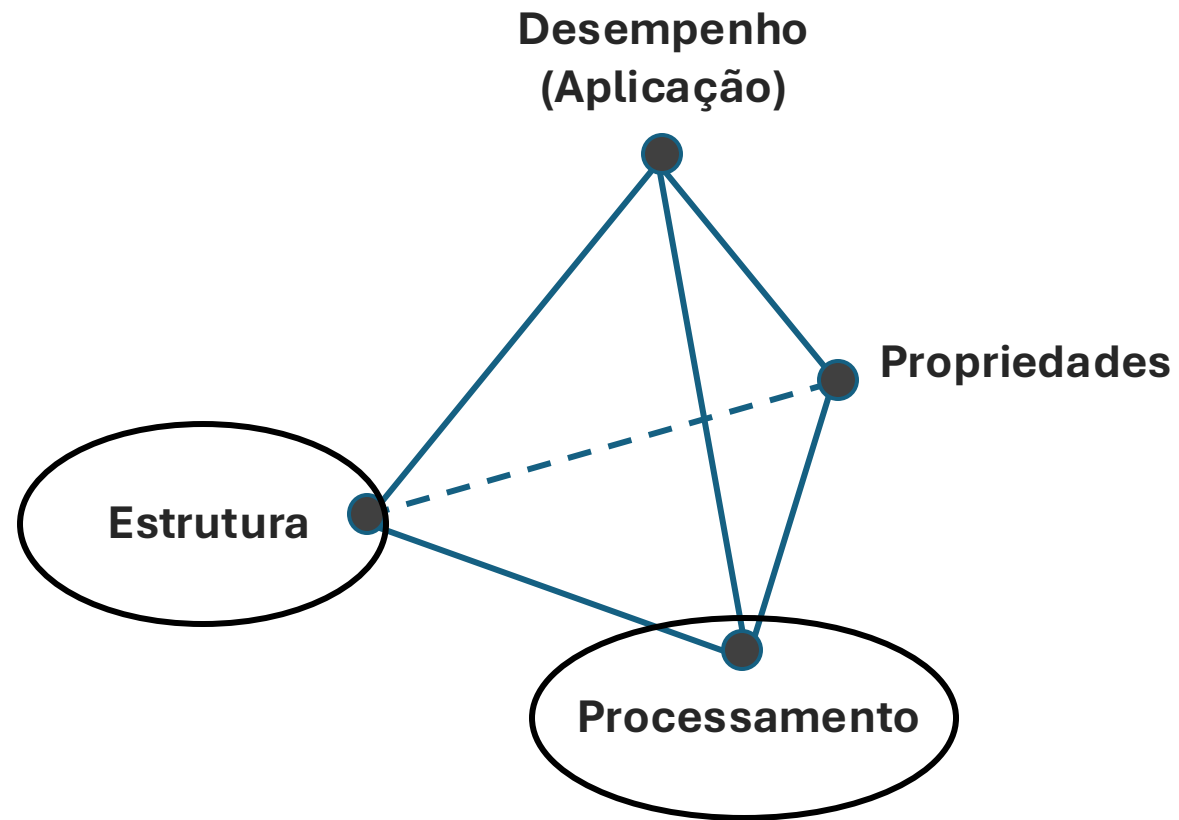


Última aula...

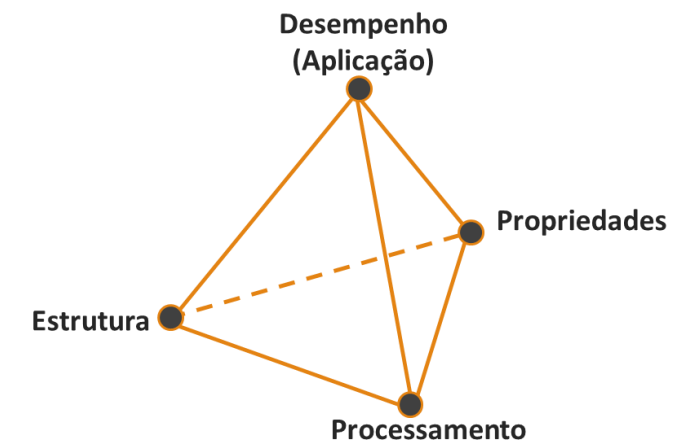
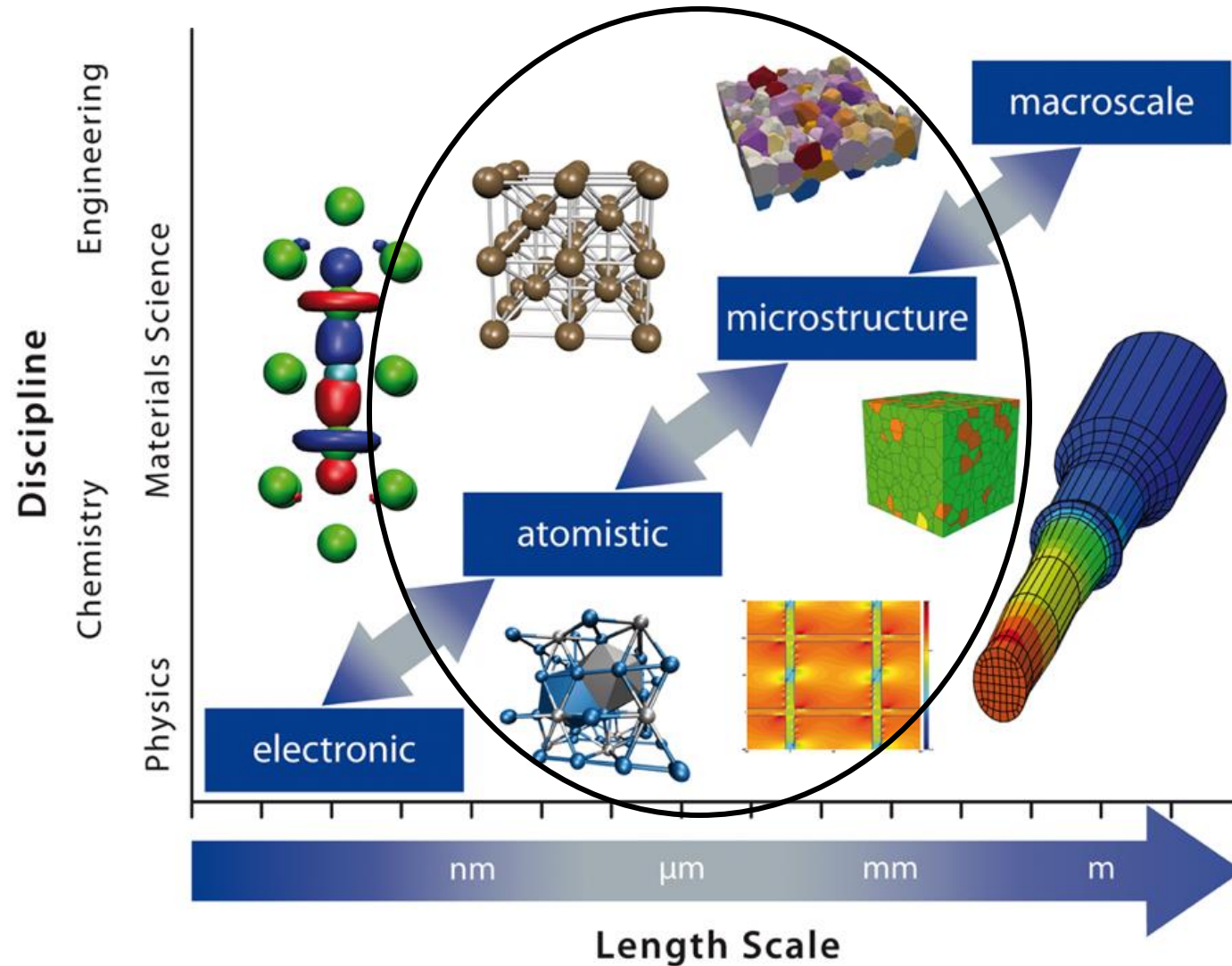
1. Diagrama de fase (unário).
2. Diagrama de fase (binários).
3. Diagrama Fe-C.



Ciência dos materiais



Escalas em um Material



Aula de hoje

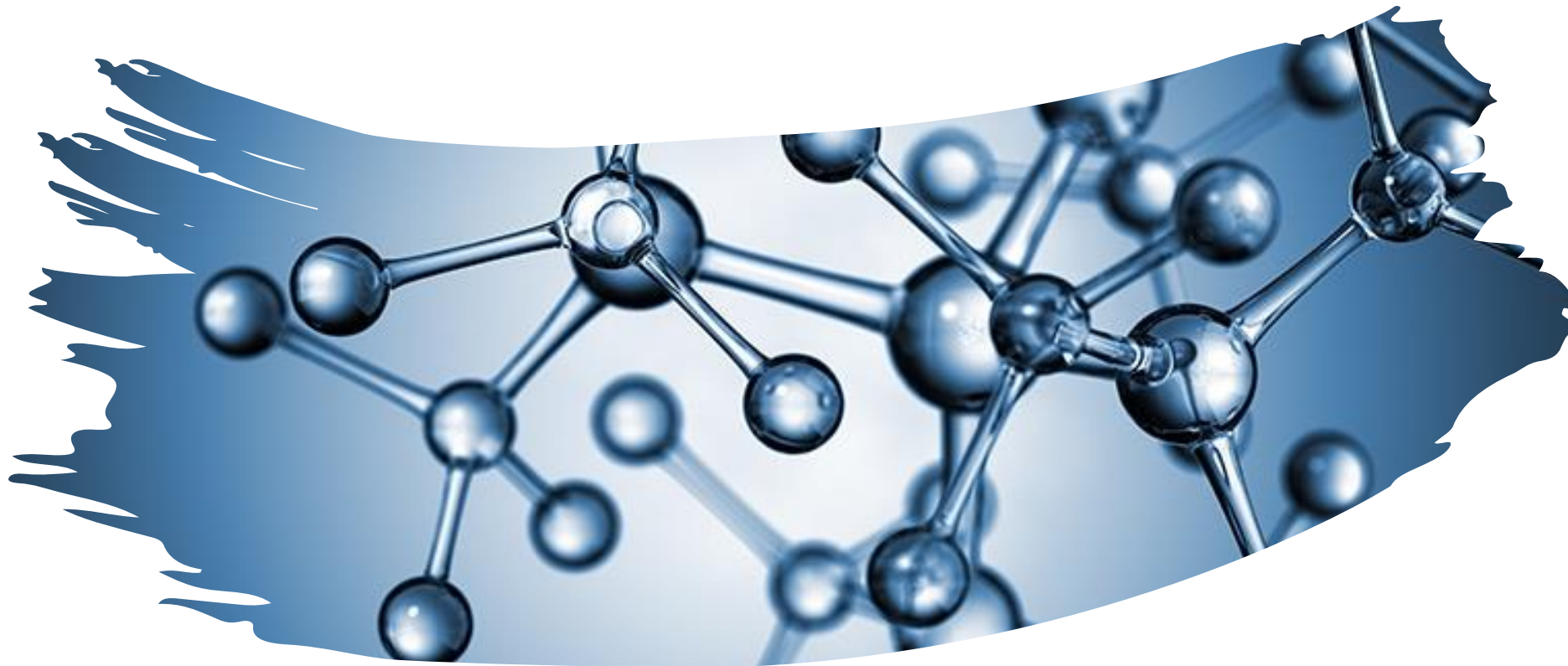
1. Transformação de fase

- Nucleação
- Cinética de transformações no estado sólido

2. Alteração microestrutural em Fe-C

- Diagrama de transformação isotérmica

3. Comportamento mecânico de ligas Fe-C



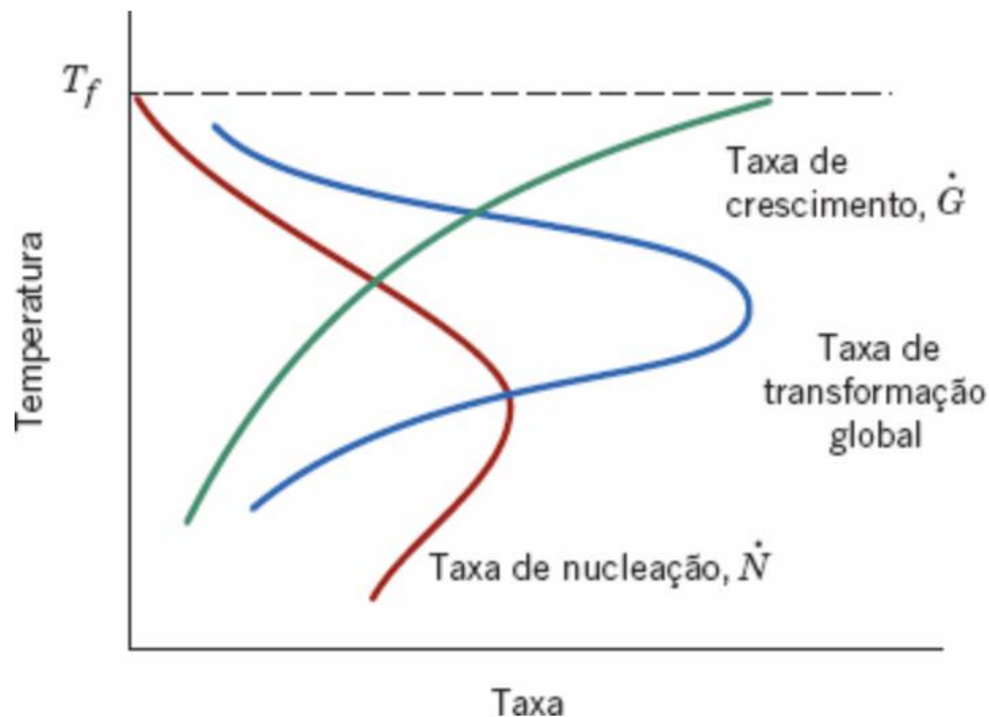
1. Transformação de Fases

Crescimento

- A etapa de crescimento em uma transformação de fases começa assim que um embrião tenha excedido o tamanho crítico.
- O crescimento das partículas ocorre por difusão atômica de longa distância.
- Taxa de crescimento

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

Q - Energia de ativação
 C - Constante



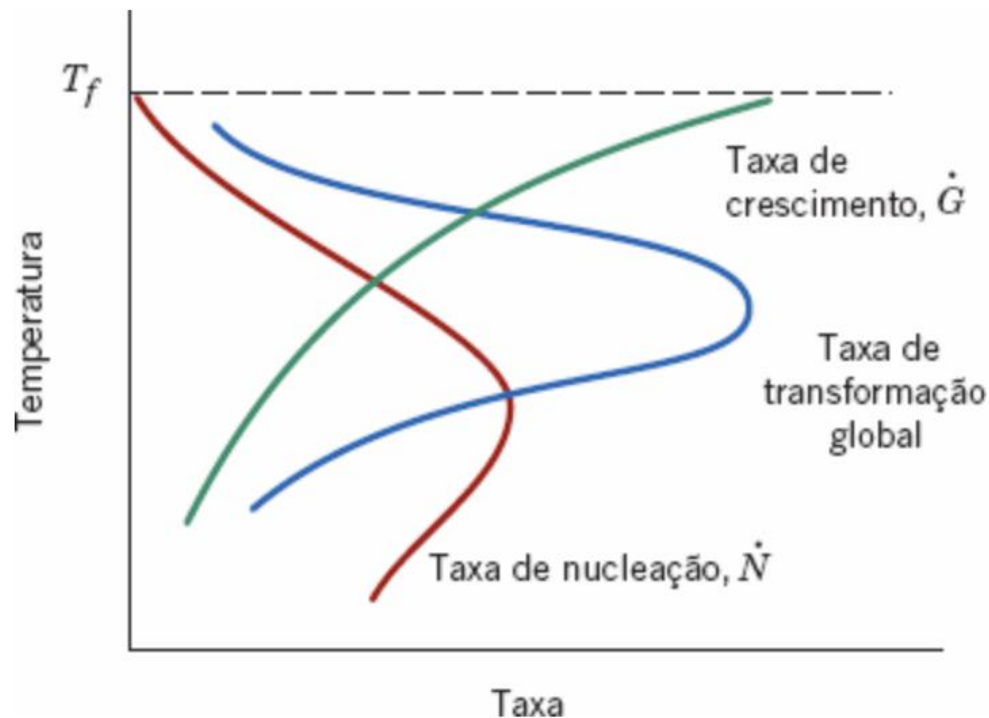
- O tamanho das partículas da fase resultante depende da temperatura da transformação.
- Transformações que ocorrem em temperaturas próximas a T_f , que correspondem a baixas taxas de nucleação e altas taxas de crescimento, há a formação de poucos núcleos, os quais crescem rapidamente.
- Temperatura alta: poucos grão, mas grãos grandes
- Temperatura baixa: Muitos grãos, mas grão pequenos

Crescimento

- A etapa de crescimento em uma transformação de fases começa assim que um embrião tenha excedido o tamanho crítico.
- O crescimento das partículas ocorre por difusão atômica de longa distância.
- Taxa de crescimento

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

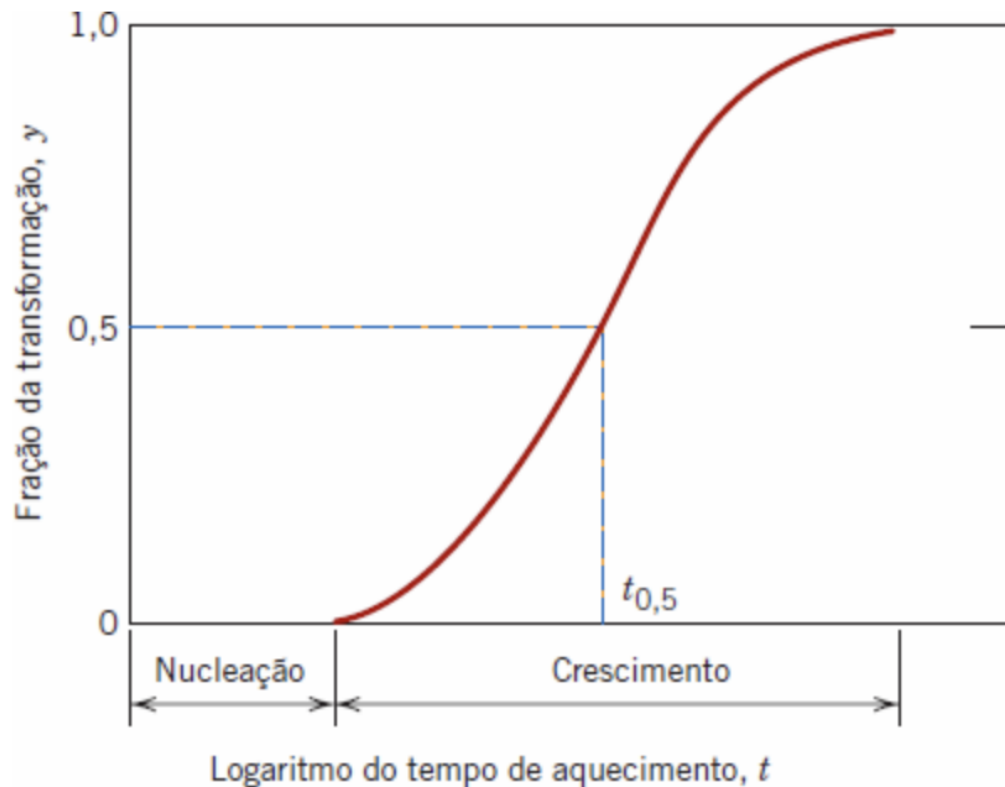
Q - Energia de ativação
 C - Constante



- Quando um material é resfriado muito rapidamente até uma temperatura relativamente baixa na qual a taxa é extremamente pequena, é possível produzir estruturas de fase fora de equilíbrio (estruturas metaestáveis)

Cinética de transformação de sólidos

- Dependência da taxa em relação ao tempo (cinética).
- A fração da reação que ocorreu é medida como uma função do tempo, enquanto a temperatura é mantida constante.



Equação de Avrami

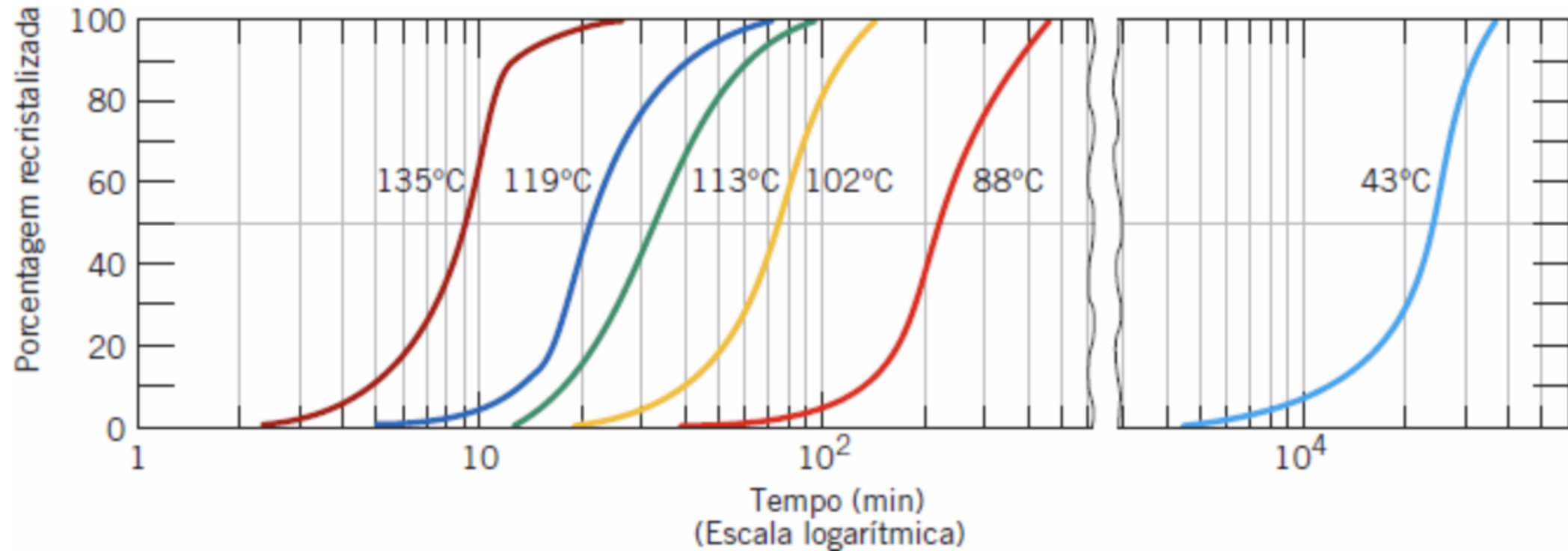
$$y = 1 - \exp(-kt^n)$$

- Por convenção, a taxa de uma transformação é tomada como o inverso do tempo necessário para que a transformação prossiga até a metade da sua conclusão

$$\text{taxa} = \frac{1}{t_{0,5}}$$

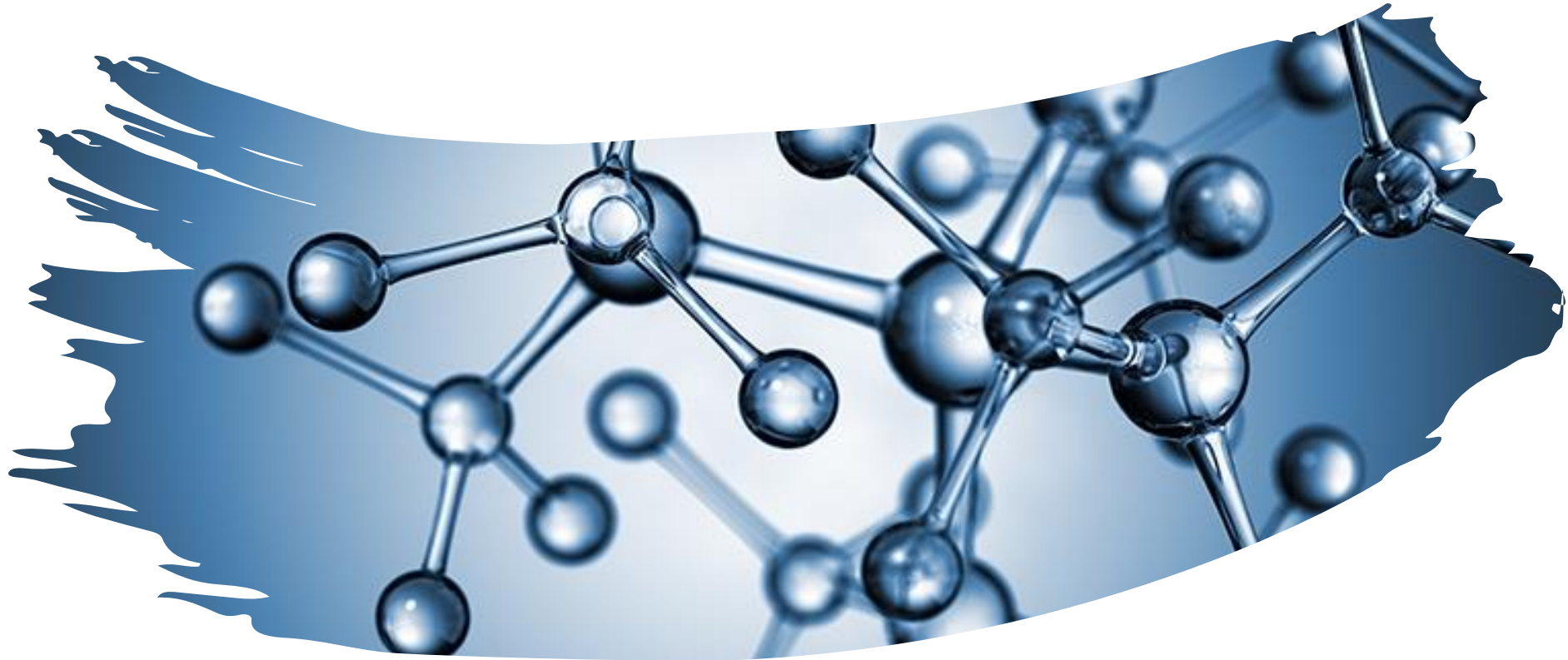
Cinética de transformação de sólidos

- Efeito da temperatura na cinética de recristalização do cobre



Estados metaestáveis vs. Estados de equilíbrio

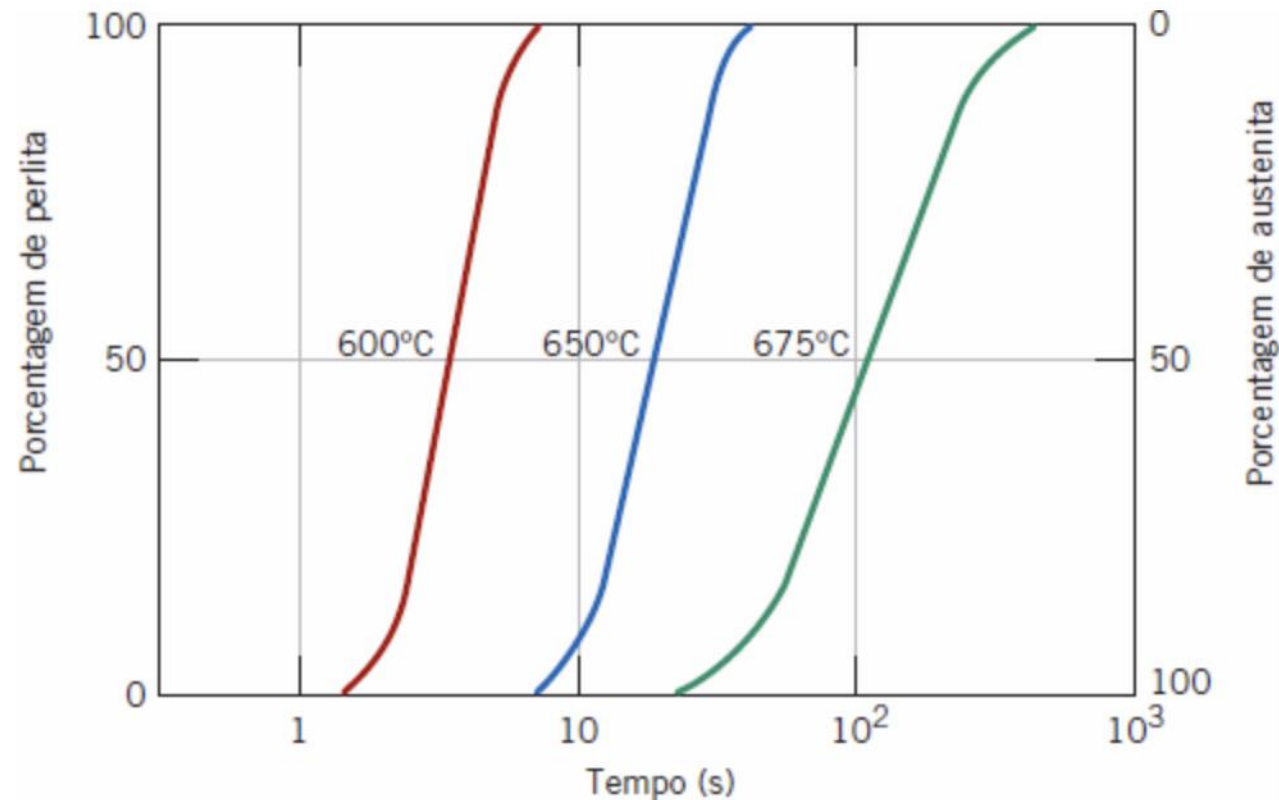
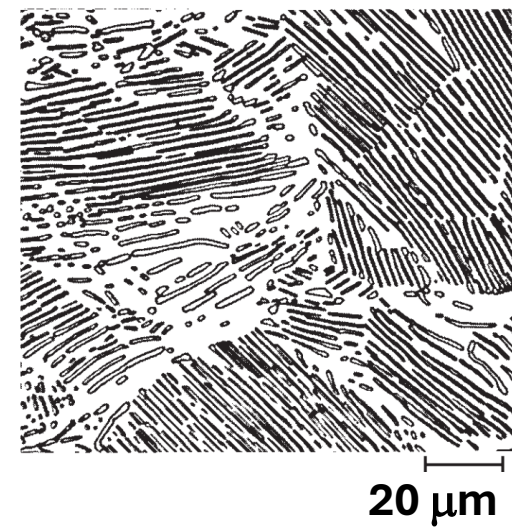
- Na transformação de fases, uma liga prossegue em direção a um **estado de equilíbrio**, que é caracterizado pelo diagrama de fases.
- Transformações de fases exige um tempo finito para ser concluída.
- Em um resfriamento que não seja o de equilíbrio, as transformações são deslocadas para temperaturas mais baixas que aquelas indicadas no diagrama de fases; no aquecimento, o deslocamento se dá para temperaturas mais elevadas.
- Para muitas ligas tecnologicamente importantes, o estado ou microestrutura preferido é uma microestrutura **metaestável**, intermediária entre os estados inicial e de equilíbrio.
- Torna-se fundamental investigar a influência do tempo sobre as transformações de fases.



2. Alteração microestrutural em Fe-C

Perlita

- Reação eutetoide Fe-C
- Formação de Perlita.
- Importância da temperatura.

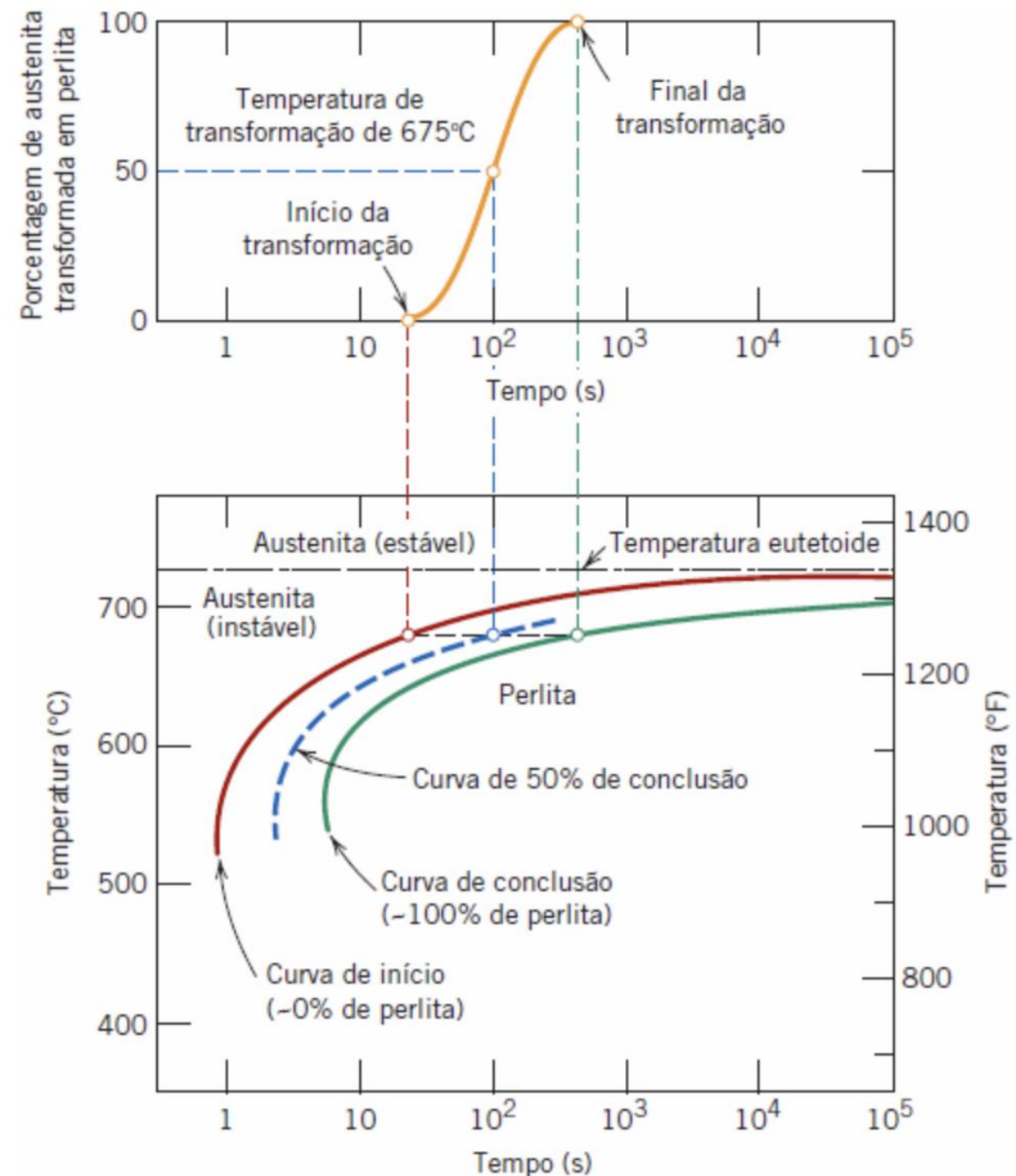


Perlita

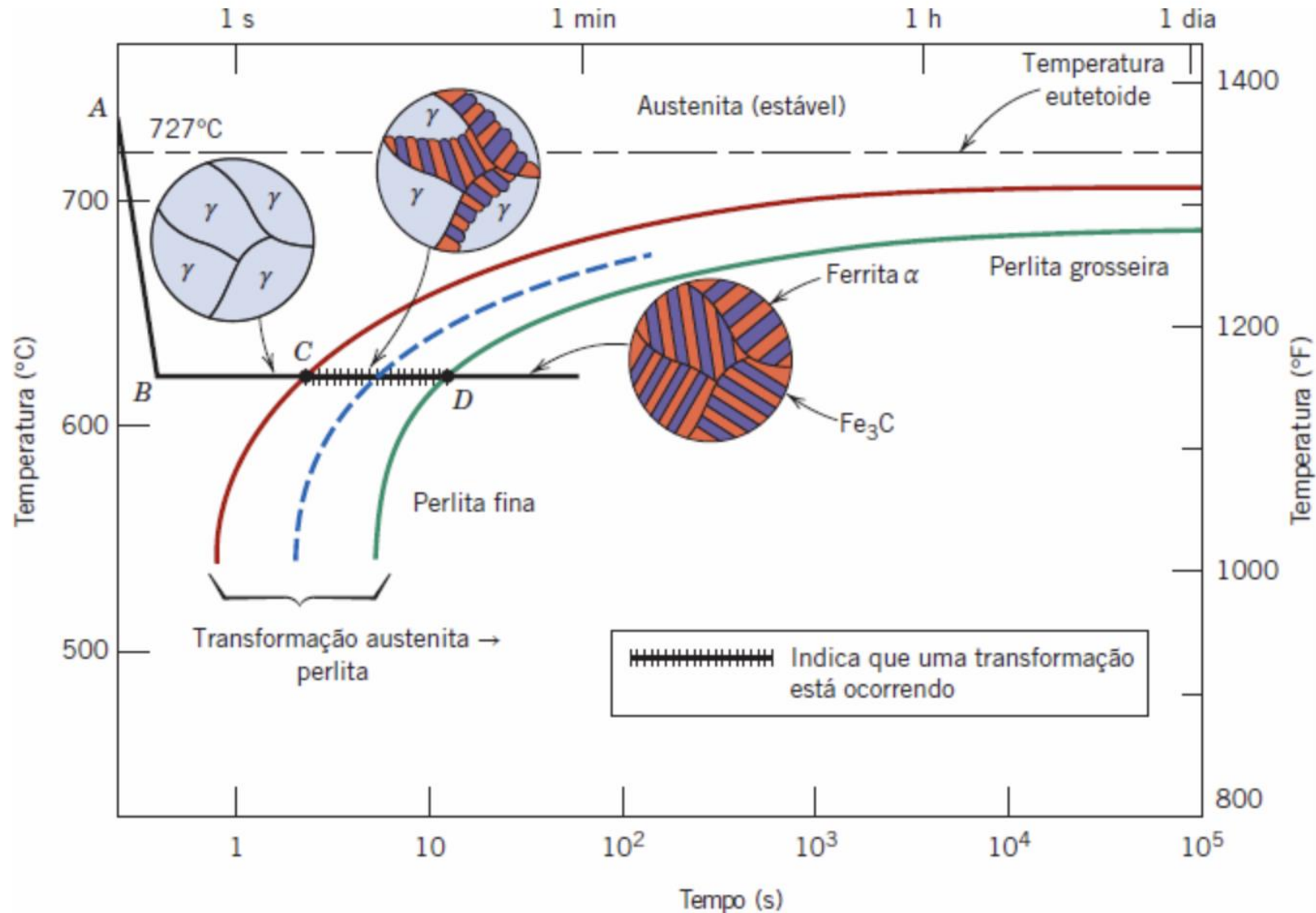
- Reação eutetoide Fe-C
- Formação de Perlita.
- Importância da temperatura.

$$\text{taxa} = \frac{1}{t_{0,5}}$$

- Menor tempo, maior taxa de transformação.
- Válido apenas para uma Fe-C com composição eutetoide.
- Temperatura da liga é mantida constante ao longo de toda duração da reação.
- **Diagramas de transformações isotérmicas**

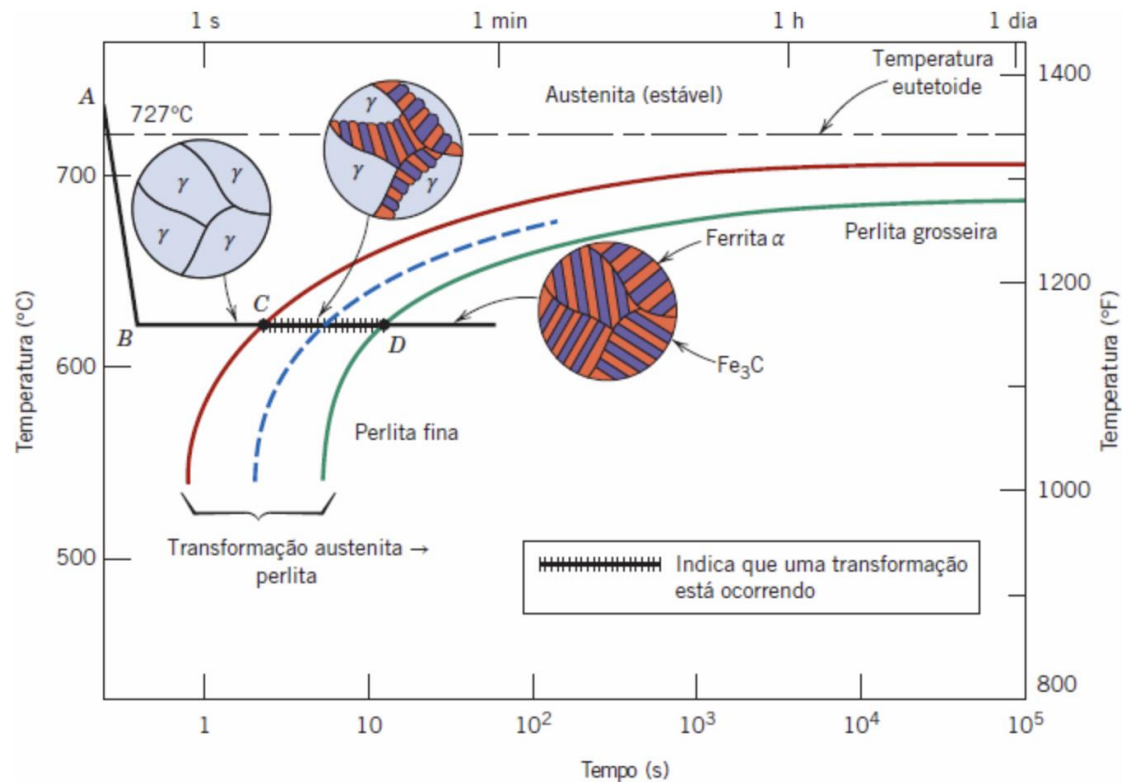


Microestrutura no diagrama de transformação isotérmica

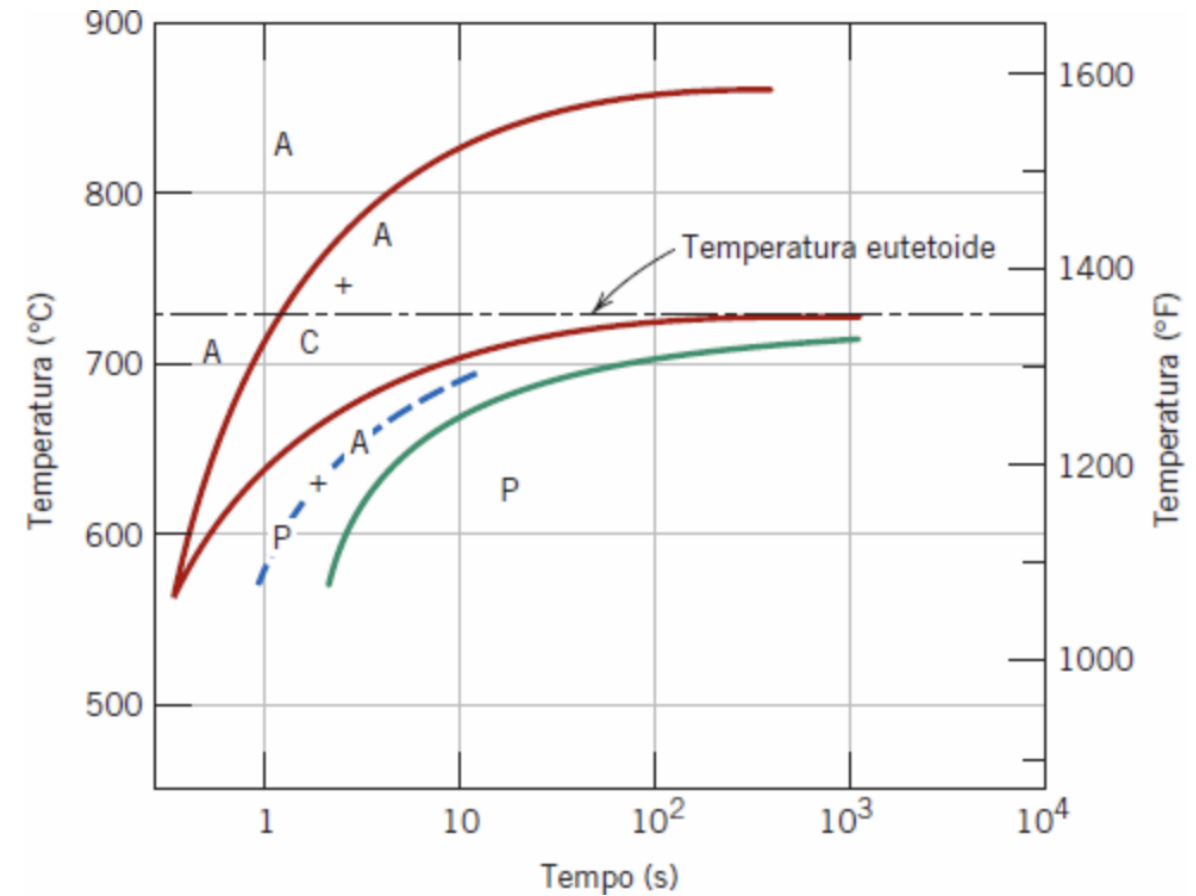
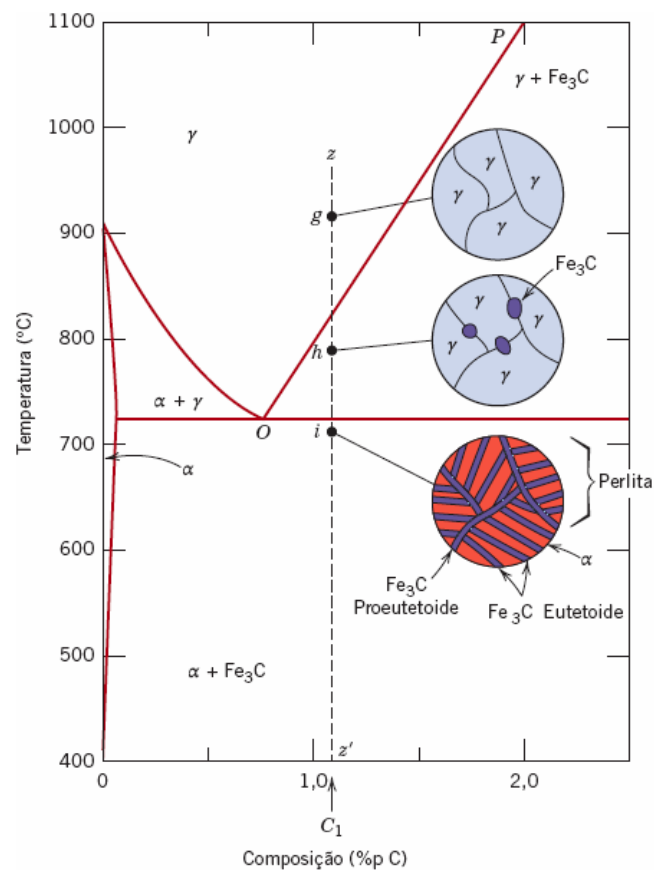
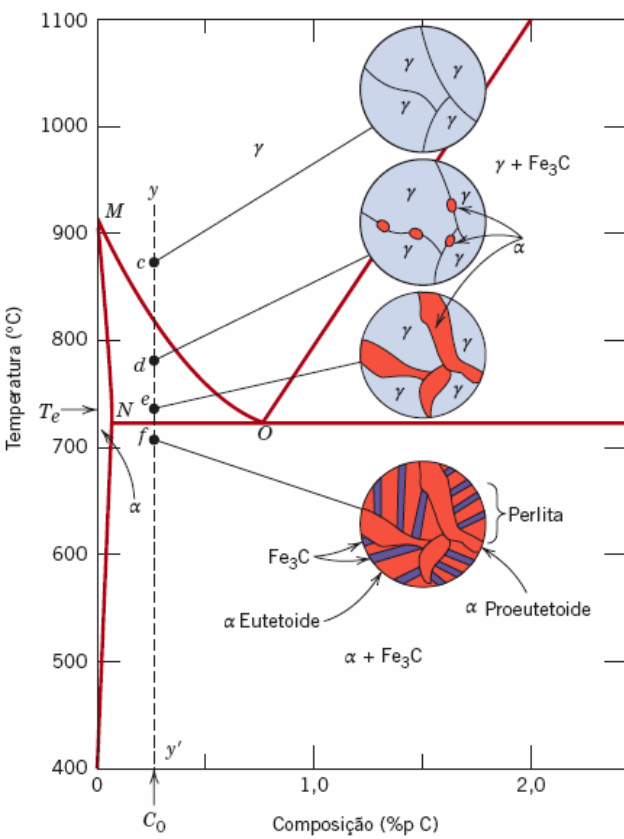


Espessura de cementita na perlita

- **Perlita Grosseira:** Temperaturas próximas a eutetoide. Maior taxa de alta difusão de C.
- **Perlita Fina:** Temperaturas mais baixas ($\sim 540^\circ\text{C}$). Menor taxa de difusão de C



Ligas com outras composições



Bainita

- Microconstituente Bainita: ferrita + Cementita.
- A bainita se forma como agulhas ou placas, dependendo da temperatura da transformação.
- A fase que envolve a agulha é martensita (próximo tópico).
- Nenhuma fase proeutetoide se forma com a bainita

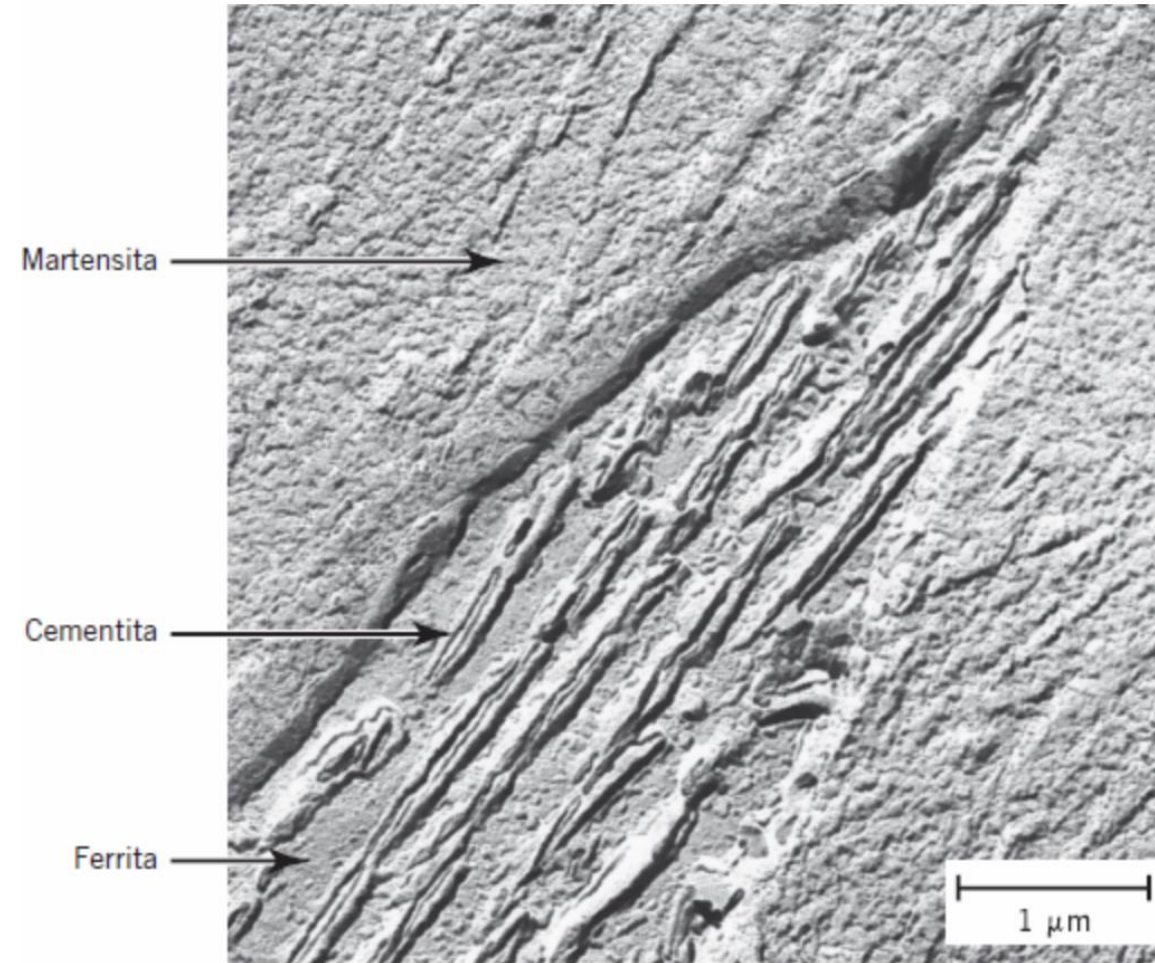


Diagrama transformação isotérmica

- A bainita ocorre em temperaturas abaixo daquelas nas quais a perlita se forma.
- Todas as três curvas têm um formato em “C” e um “nariz” no ponto N, em que a taxa de transformação é máxima.
- A perlita se forma acima do ponto de inflexão [isto é, ao longo da faixa de temperaturas entre aproximadamente 540°C e 727°C (1000°F a 1341°F)],
- Em temperaturas entre cerca de 215°C e 540°C (420°F e 1000°F), o produto da transformação é a bainita.

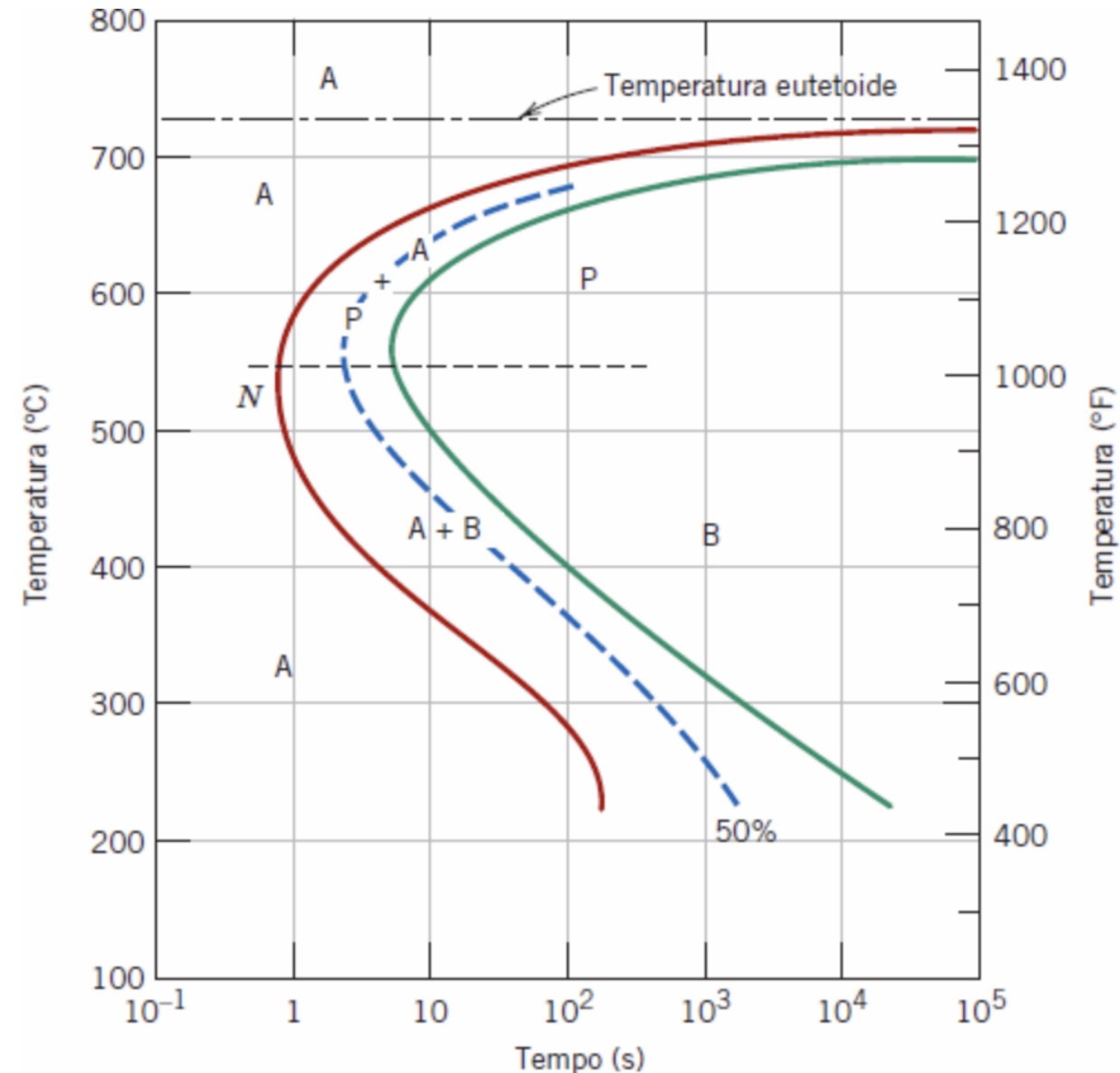
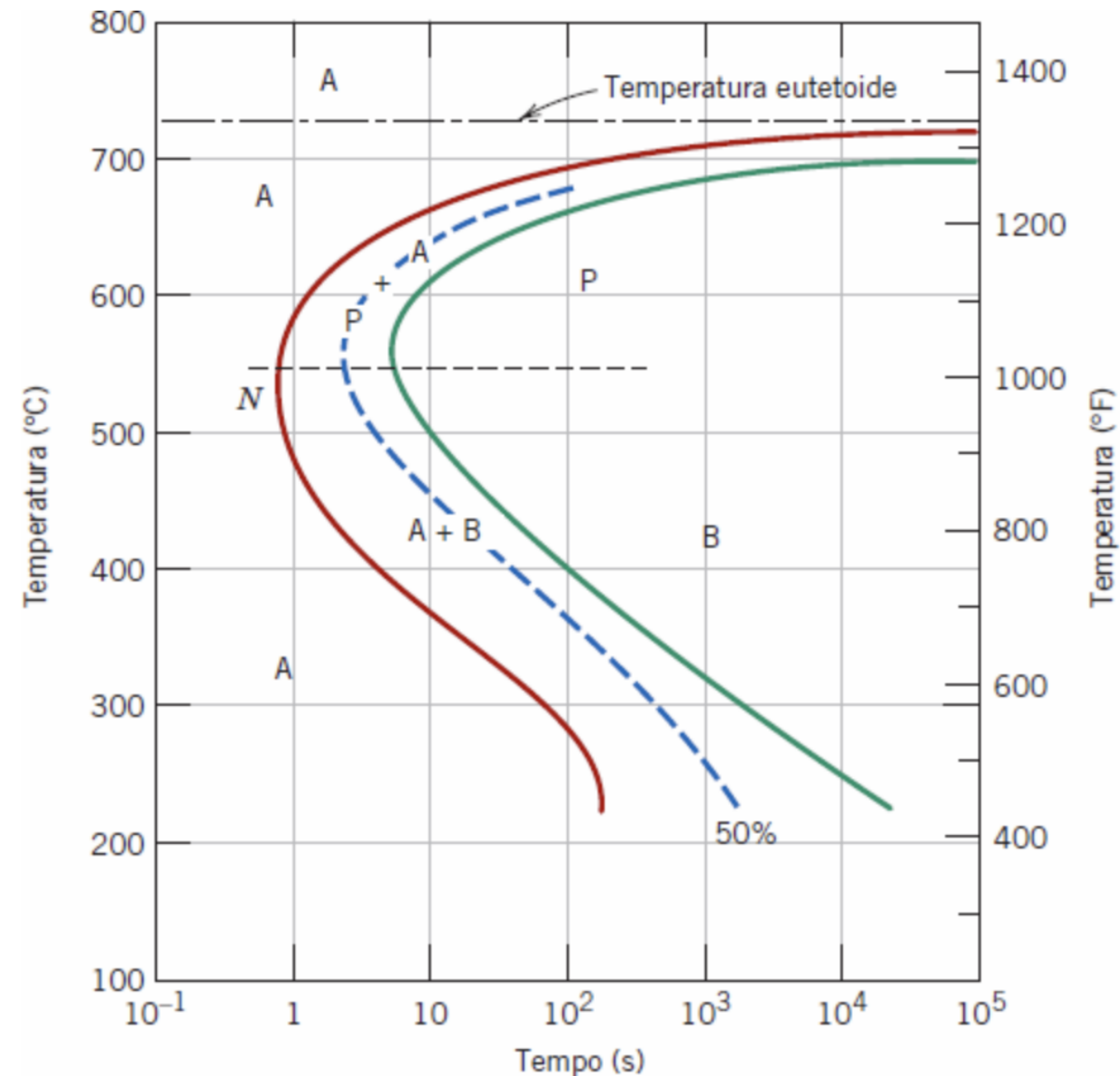


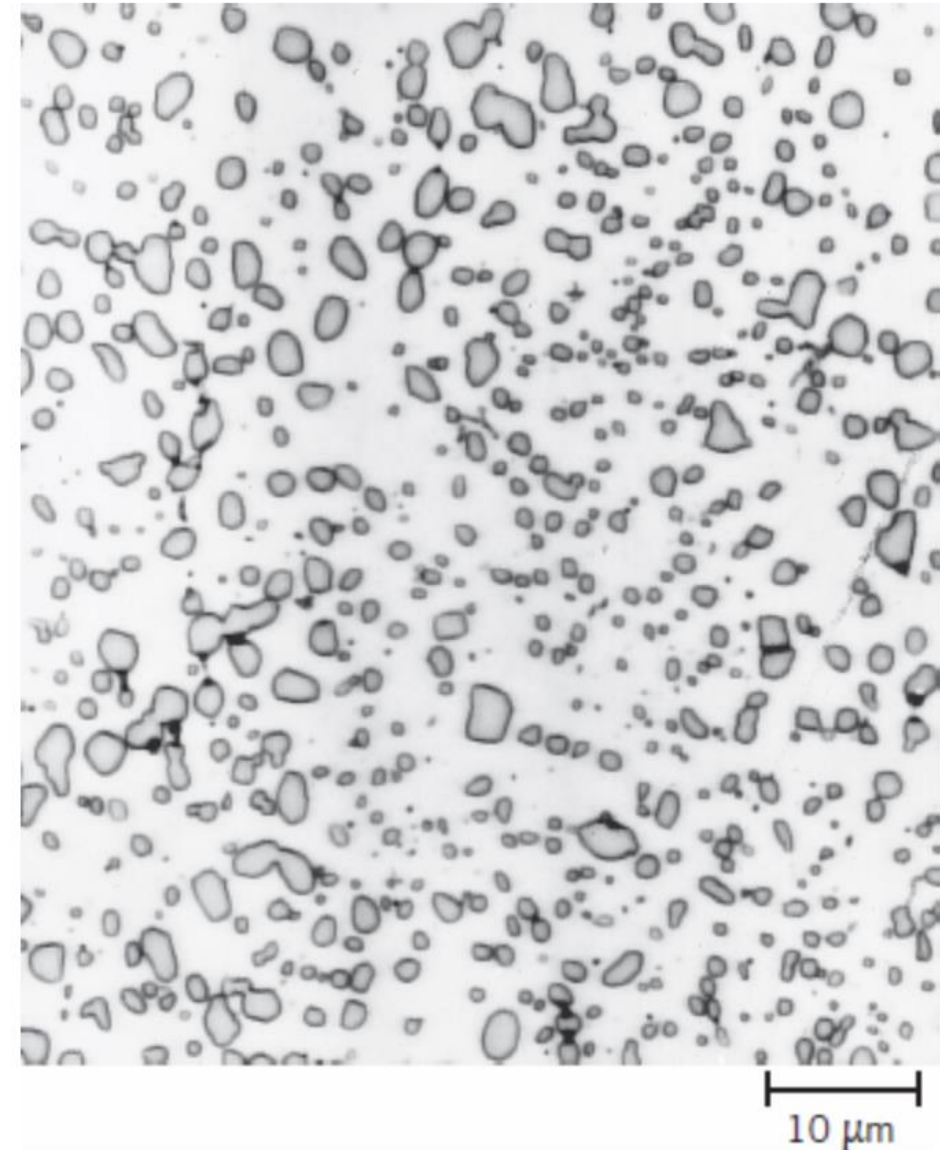
Diagrama transformação isotérmica

- Uma vez que uma dada porção de uma liga tenha se transformado em perlita ou em bainita, a transformação no outro microconstituente não é possível sem um reaquecimento para formar austenita.

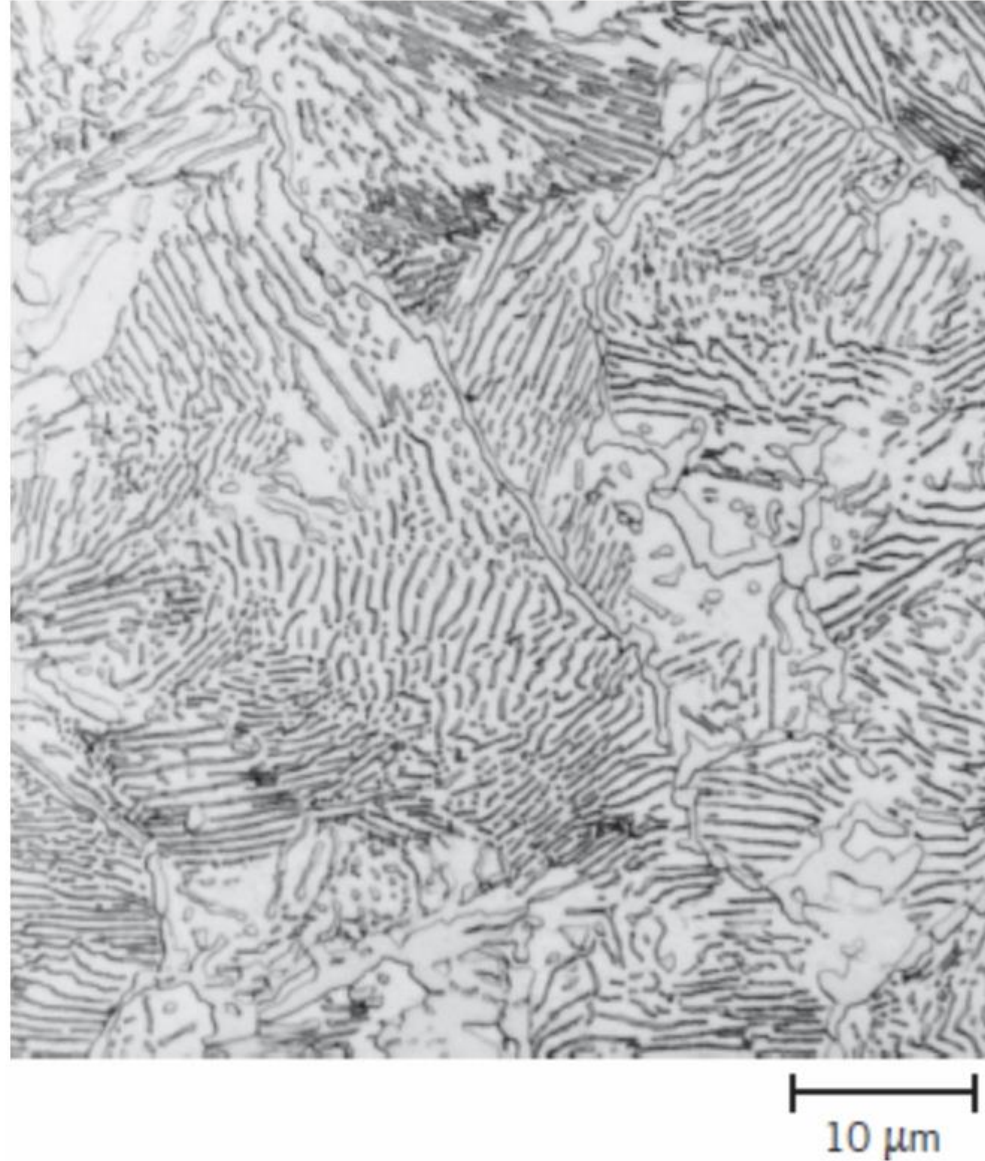


Esferoidita

- Se um aço tendo uma microestrutura perlítica ou bainítica for aquecido e deixado em uma temperatura abaixo da eutetoide durante um período de tempo suficientemente longo — em aproximadamente 700°C (1300°F) durante 18 a 24 horas —, vai se formar outra microestrutura, chamada de **esferoidita** ou **cementita globulizada**.
- Essa transformação ocorre mediante uma difusão adicional do carbono.



Esferoidita parcial



Martensita

- **Martensita** se forma quando as ligas Fe-C austenitizadas são resfriadas rapidamente (ou **temperadas**) até uma temperatura relativamente baixa (na vizinhança da temperatura ambiente).
- A transformação martensítica ocorre quando a taxa de resfriamento brusco é rápida o suficiente para prevenir a difusão do C.
- Austenita CFC sofre uma transformação polimórfica para uma martensita tetragonal de corpo centrado (TCC).
- Não envolve difusão de C, ela ocorre quase instantaneamente; os grãos de martensita nucleiam e crescem na velocidade do som.

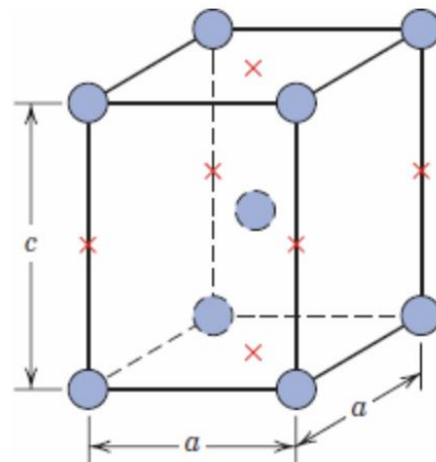


Diagrama transformação isotérmica

- Transformação é representado por uma linha horizontal designada por M (instantânea).
- Transformação martensítica é independente do tempo; ela é função exclusivamente da temperatura (**transformação atérmica**).

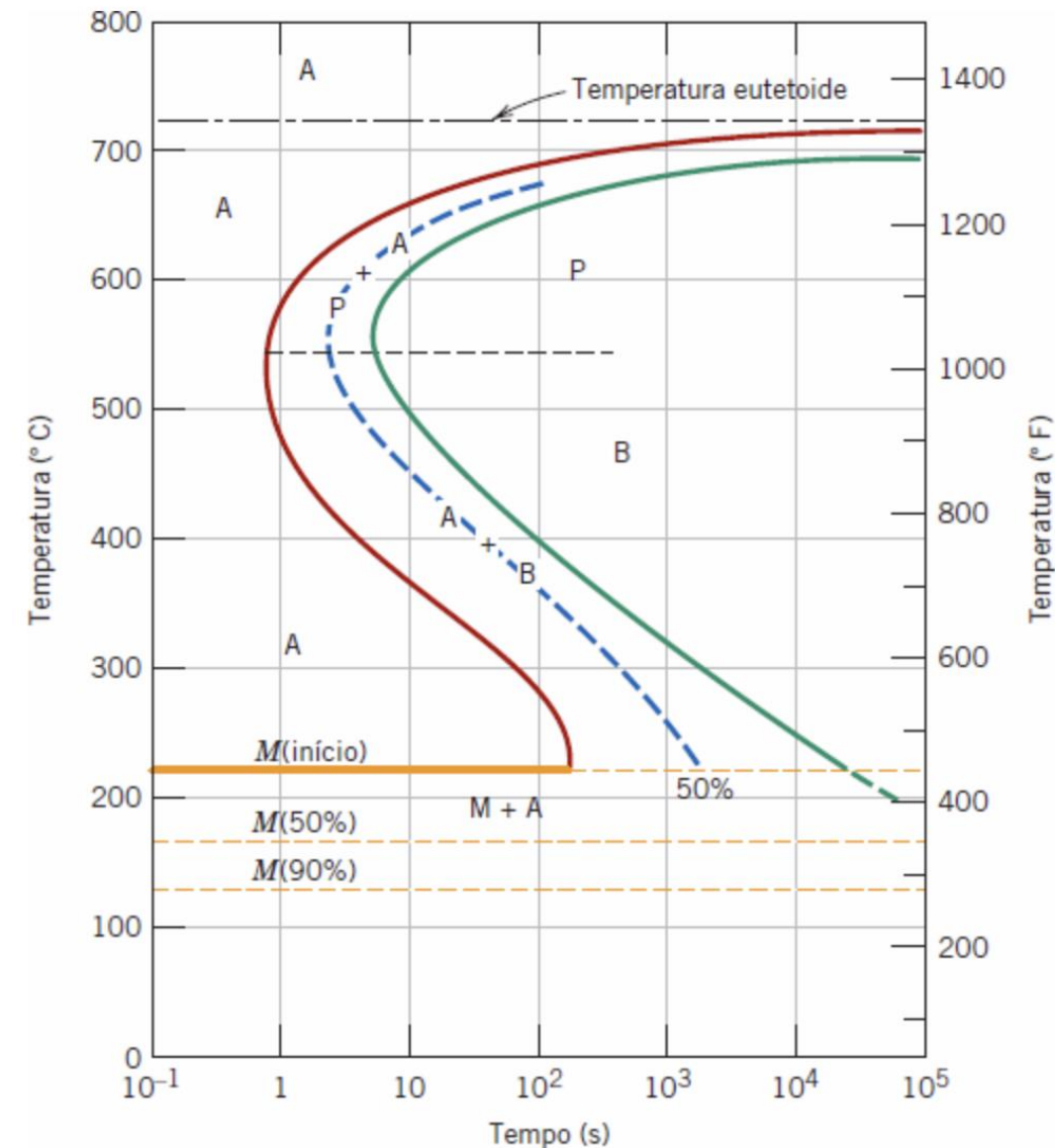


Diagrama transformação isotérmica aço-liga

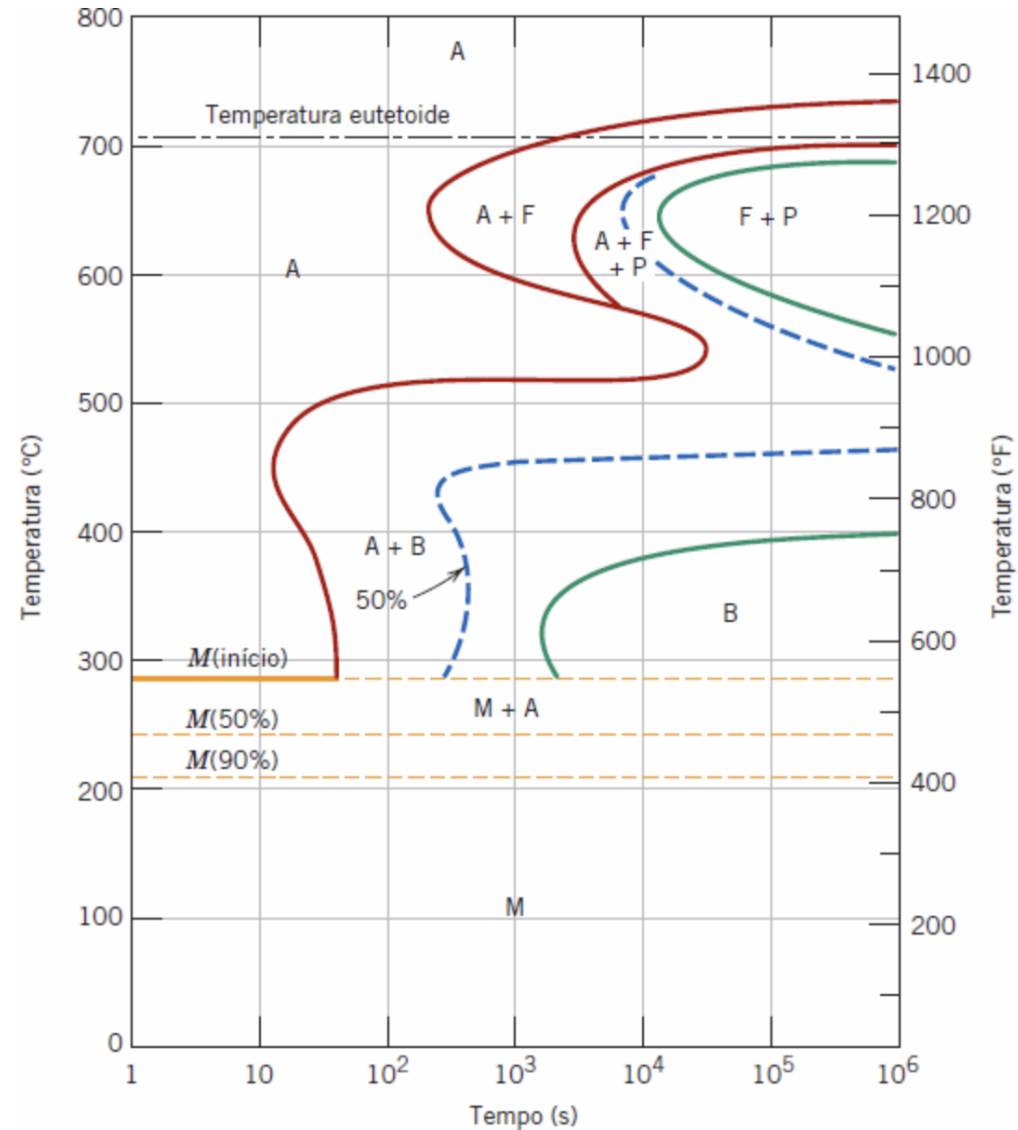
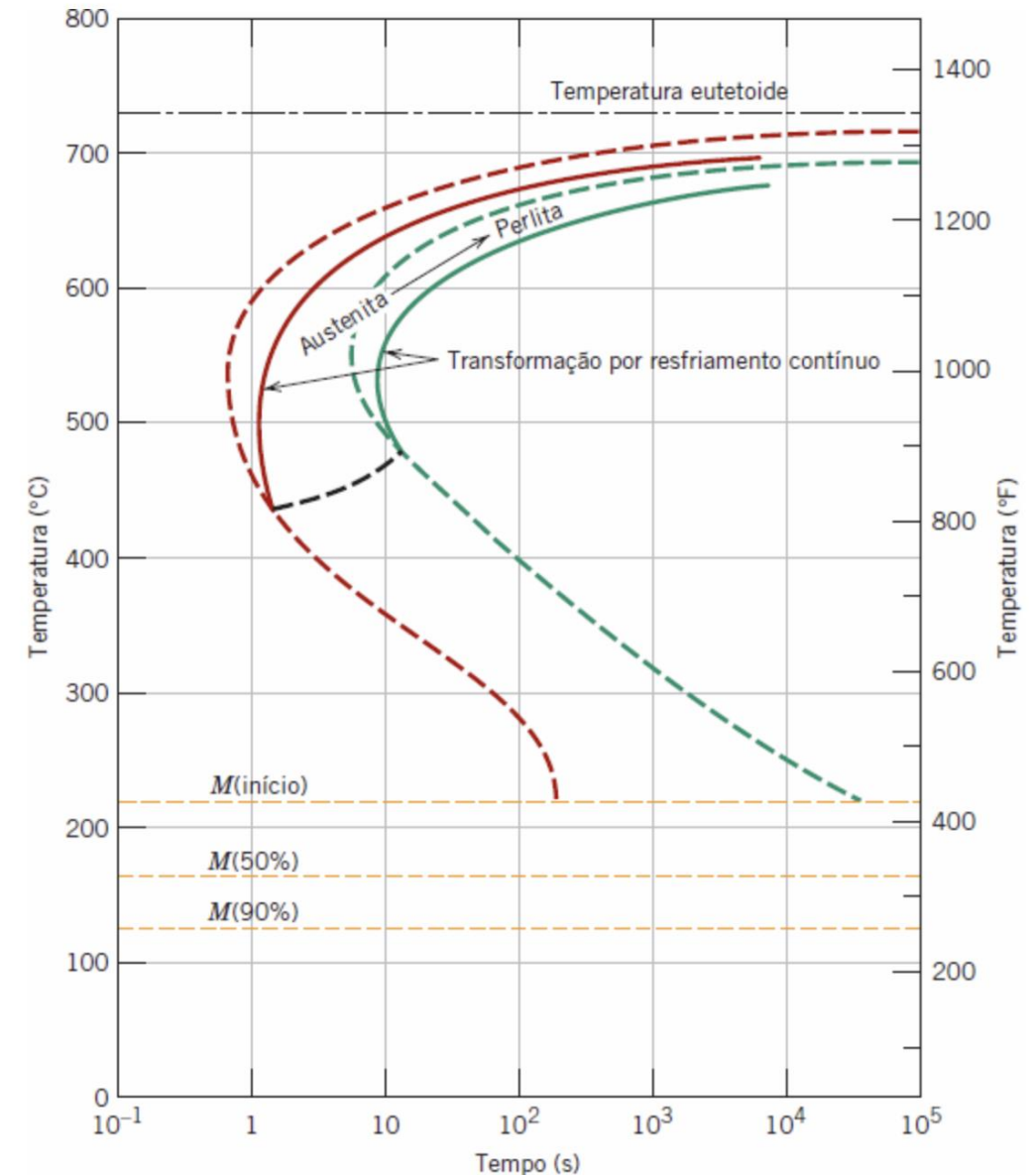
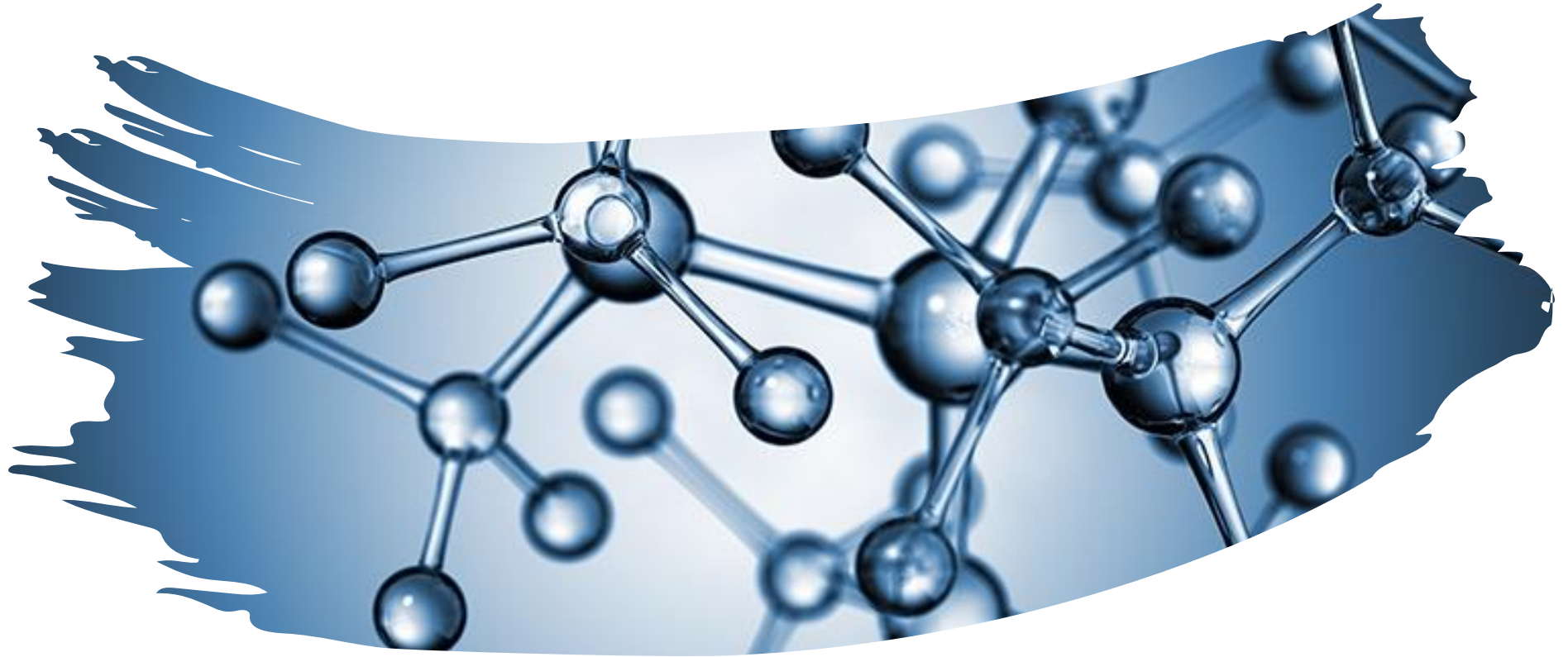


Diagrama transformação por resfriamento contínuo

- A maioria dos tratamentos térmicos para os aços envolve o resfriamento contínuo de uma amostra até a temperatura ambiente.
- No resfriamento contínuo, os tempos necessários para o início e o término da reação são retardados.

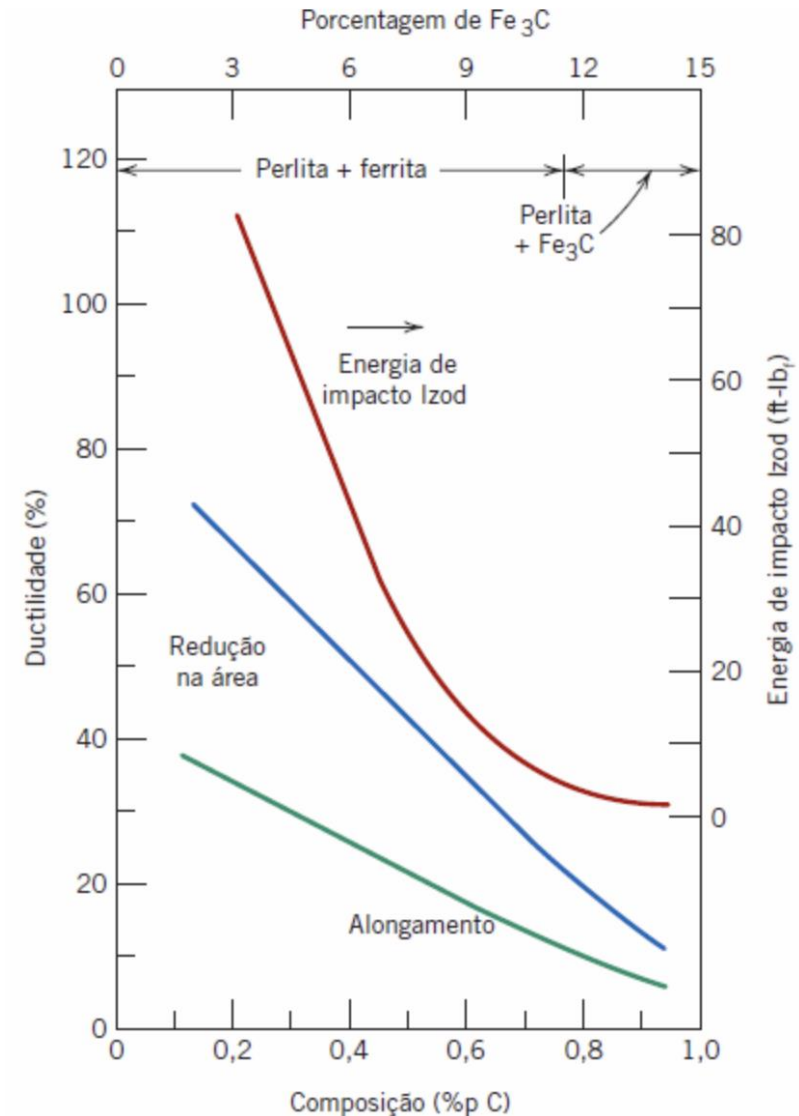
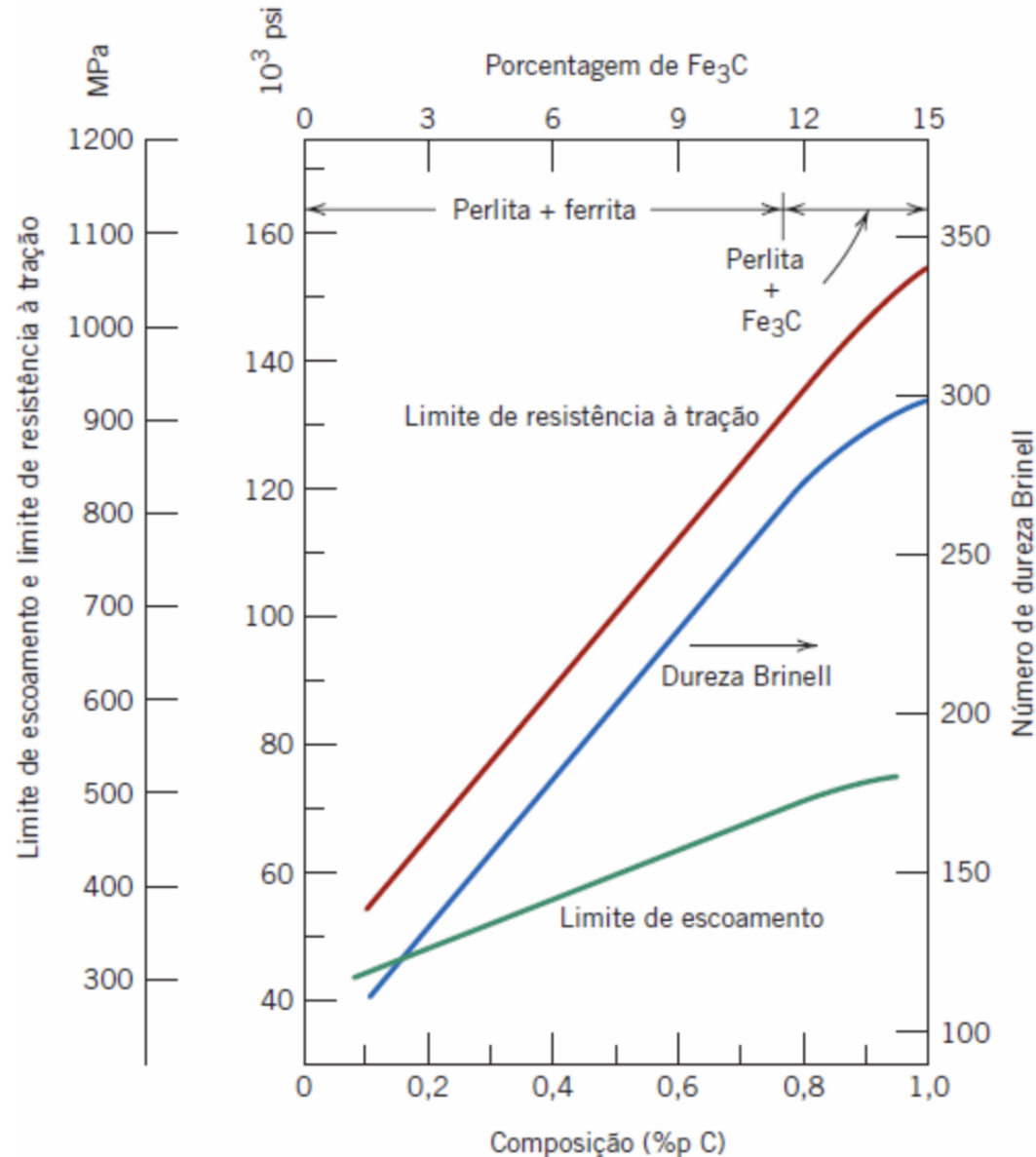




3. Comportamento mecânico de ligas Fe-C

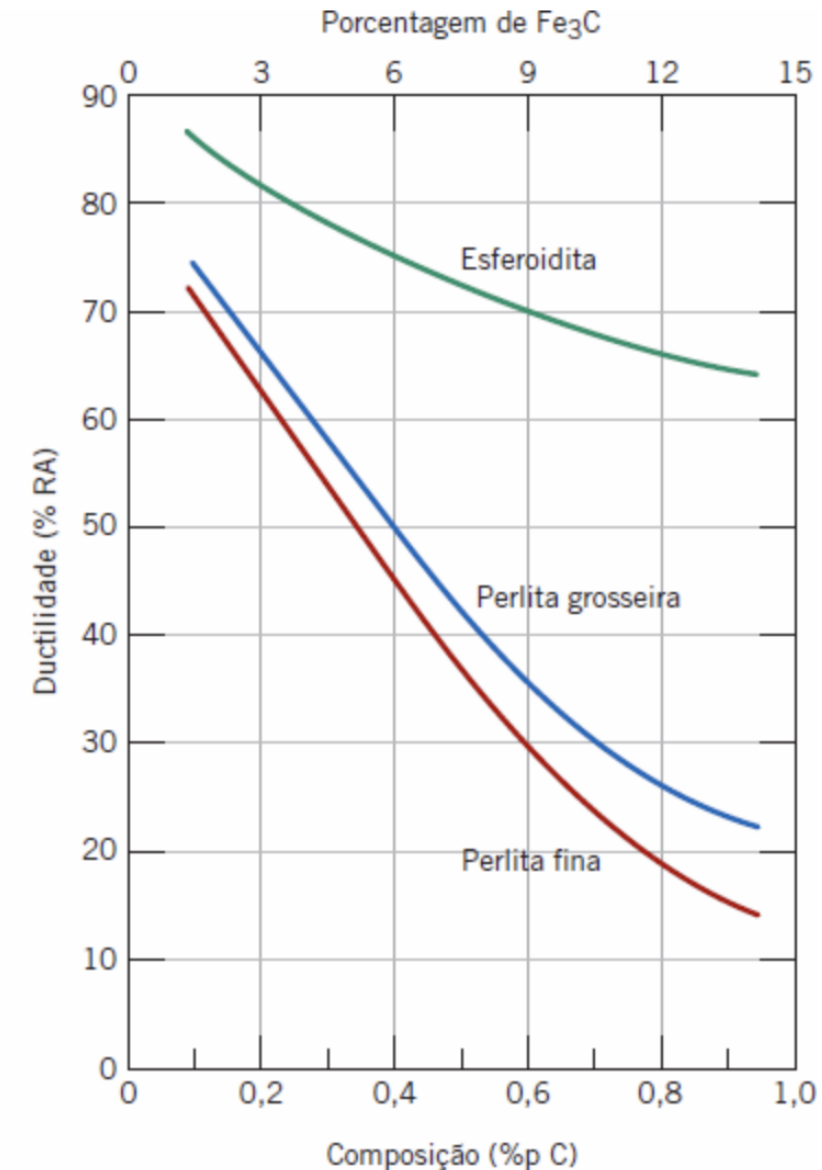
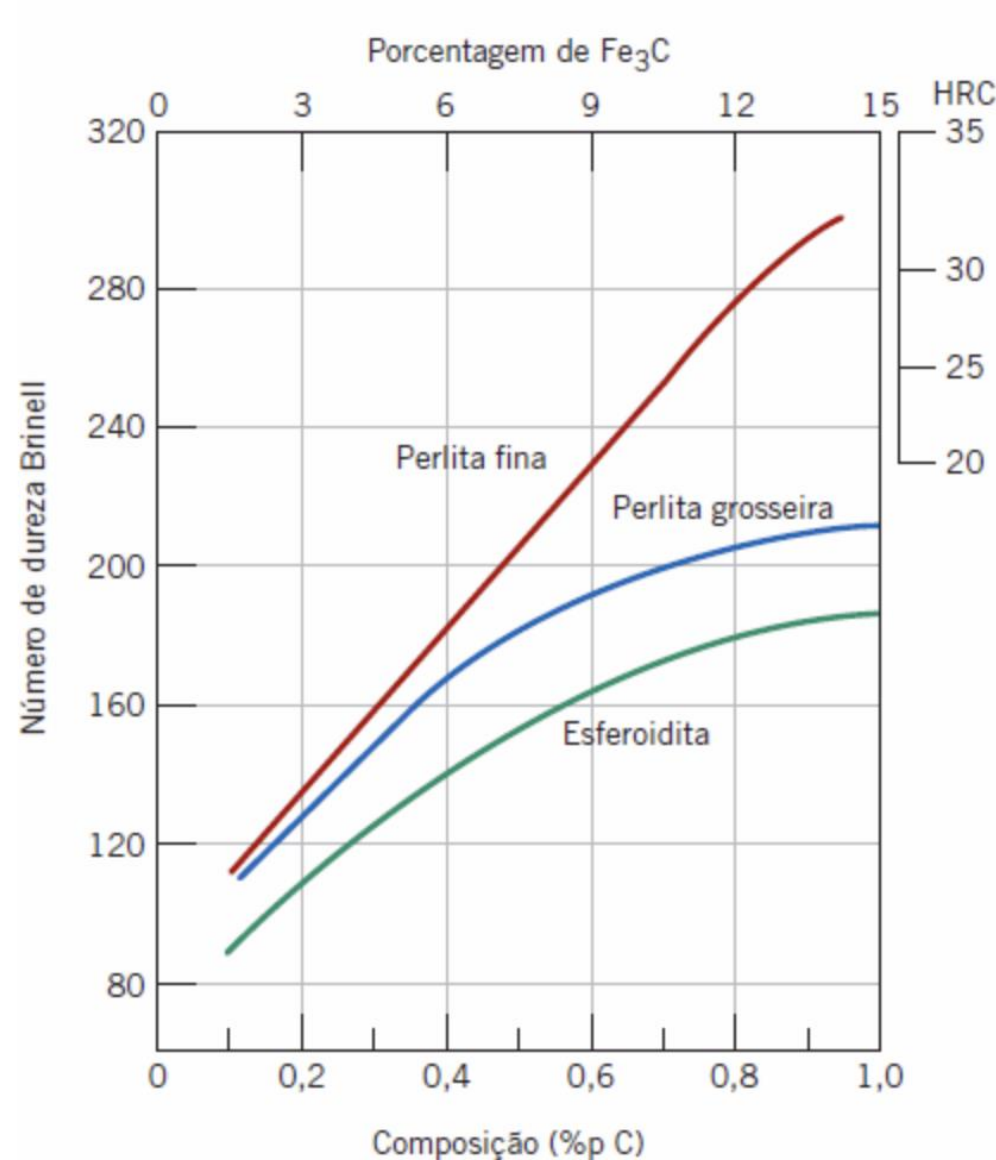
Perlita

- A cementita é muito mais dura, porém muito mais frágil, que a ferrita.
- Aumento da fração de Fe_3C em um aço resultará em um material mais duro e mais resistente.



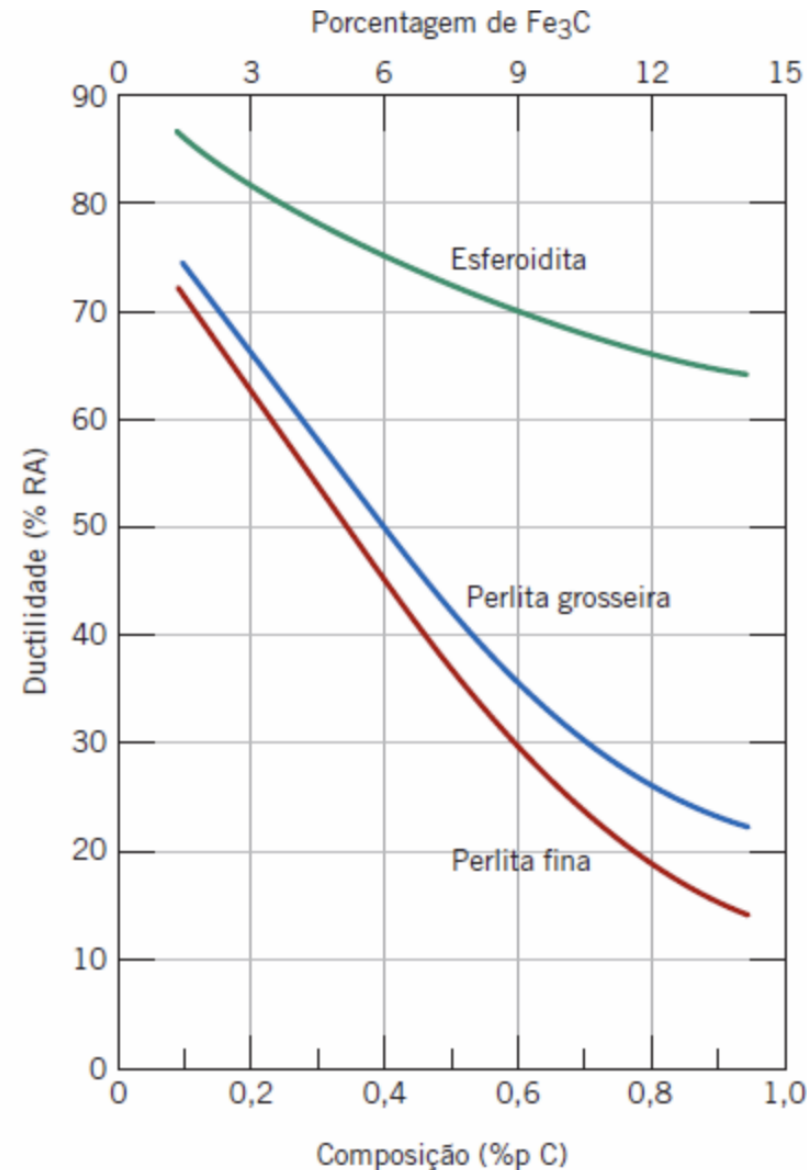
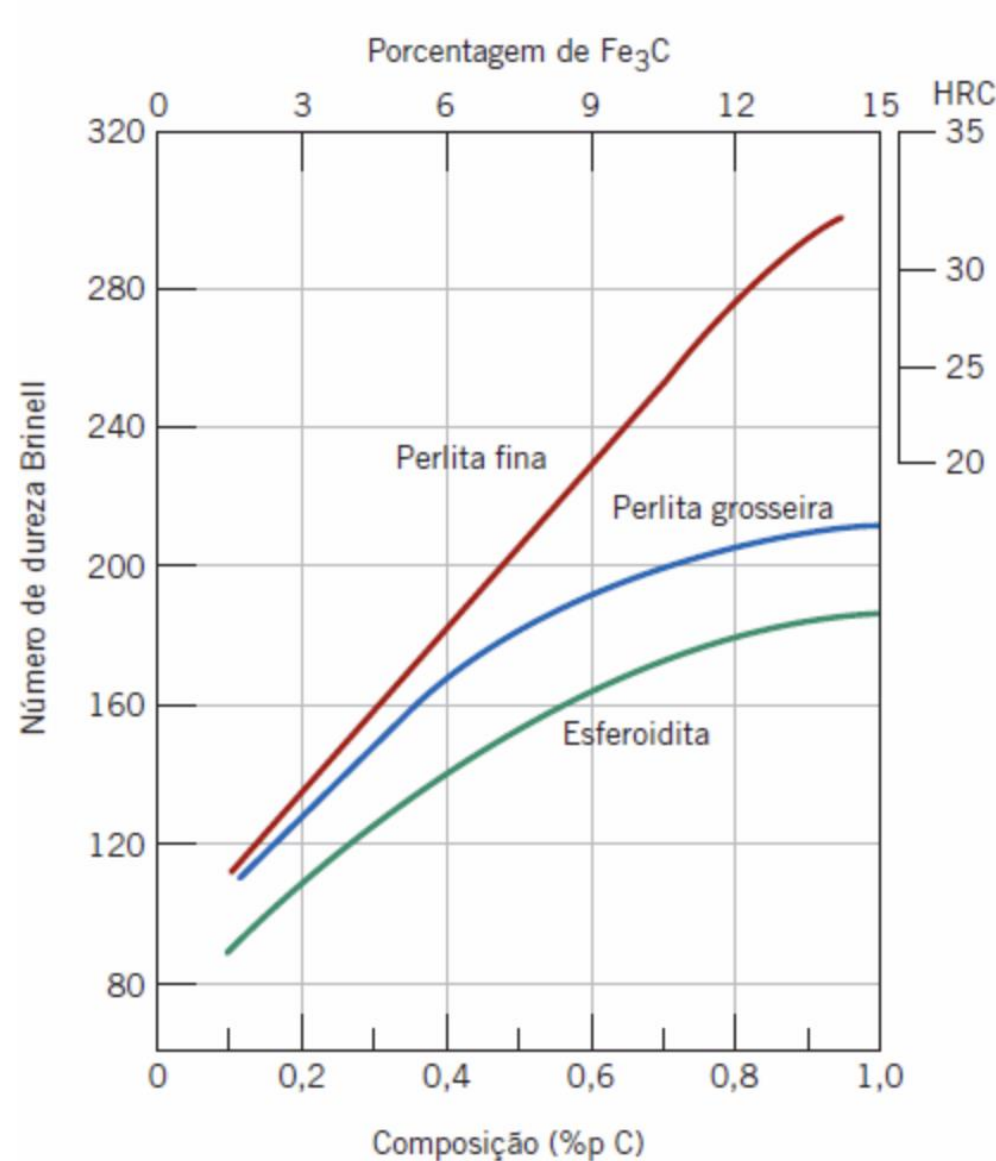
Perlita

- A espessura da camada de cada fase, ferrita e cementita, na microestrutura também influencia o comportamento mecânico do material.
- A perlita fina é mais dura e mais resistente que a perlita grosseira.

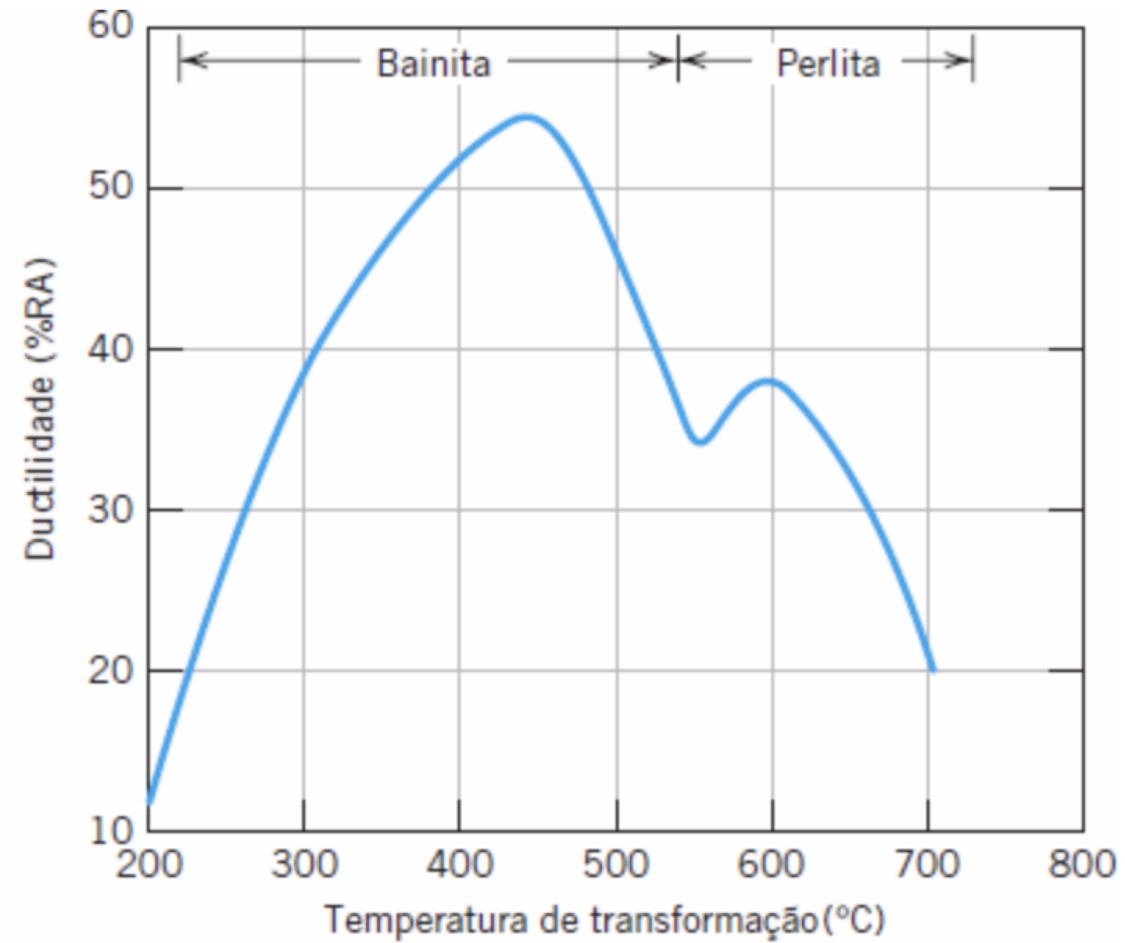
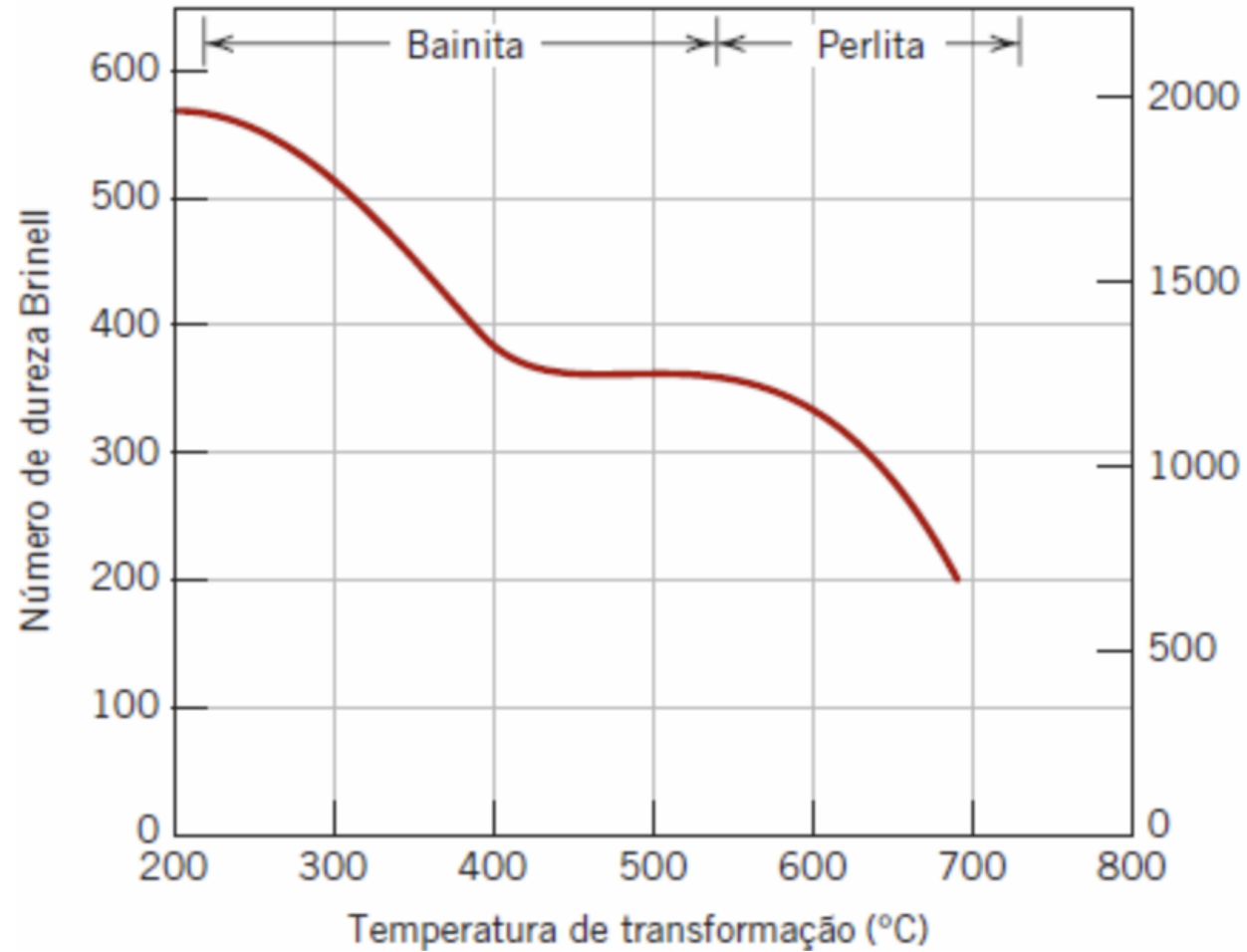


Esferoidita

- Aços esferoidizados são extremamente dúcteis, muito mais que aqueles com perlita fina ou grosseira.
- São notavelmente tenazes.

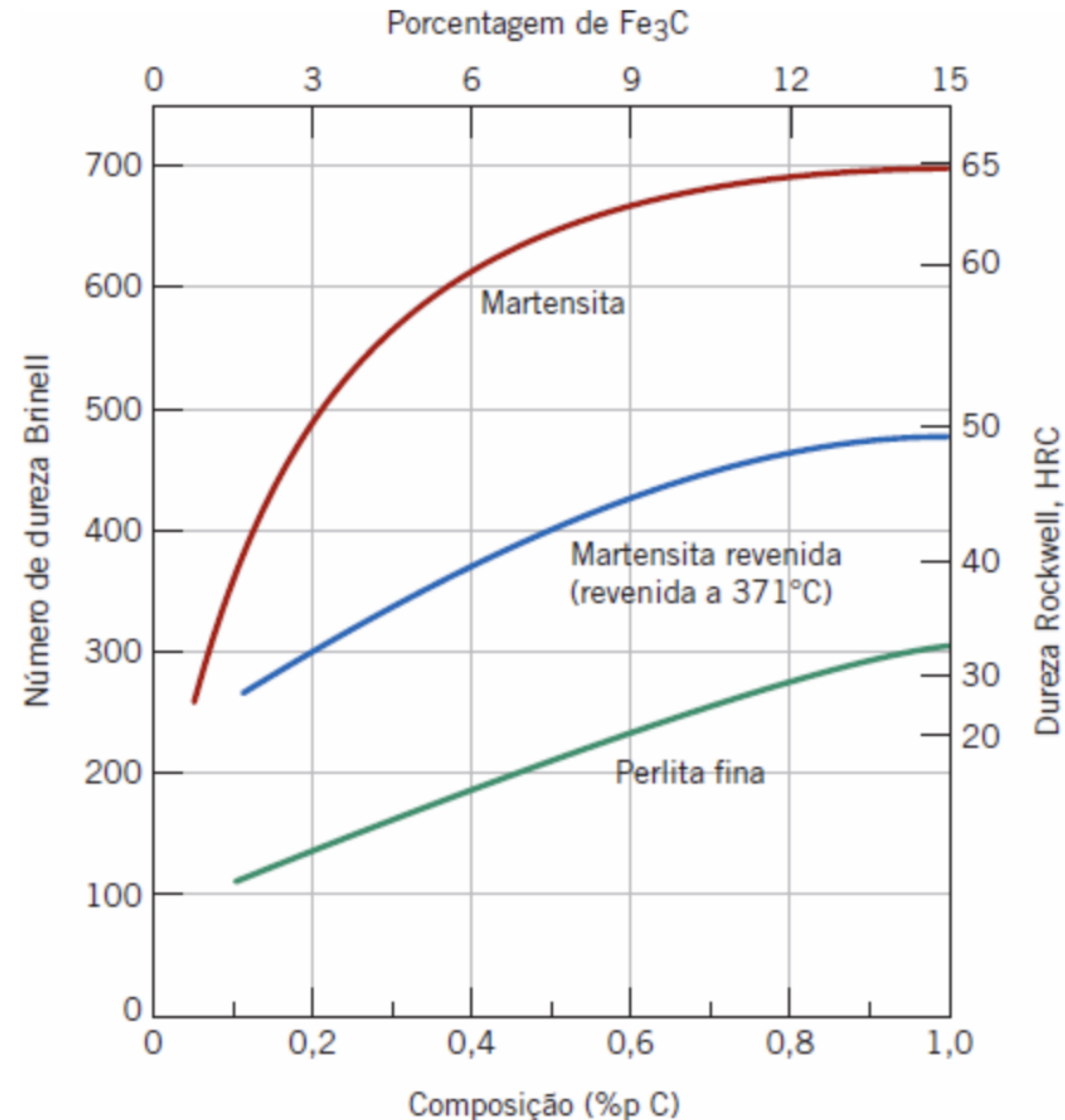


Bainita



Martensita

- Martensita é a mais dura e mais resistente e, além disso, a mais frágil.
- A austenita é ligeiramente mais densa que a martensita e, portanto, na transformação de fases durante a têmpera, ocorre um aumento de volume.
- Peças grandes temperadas, podem trincar como resultado de tensões internas.

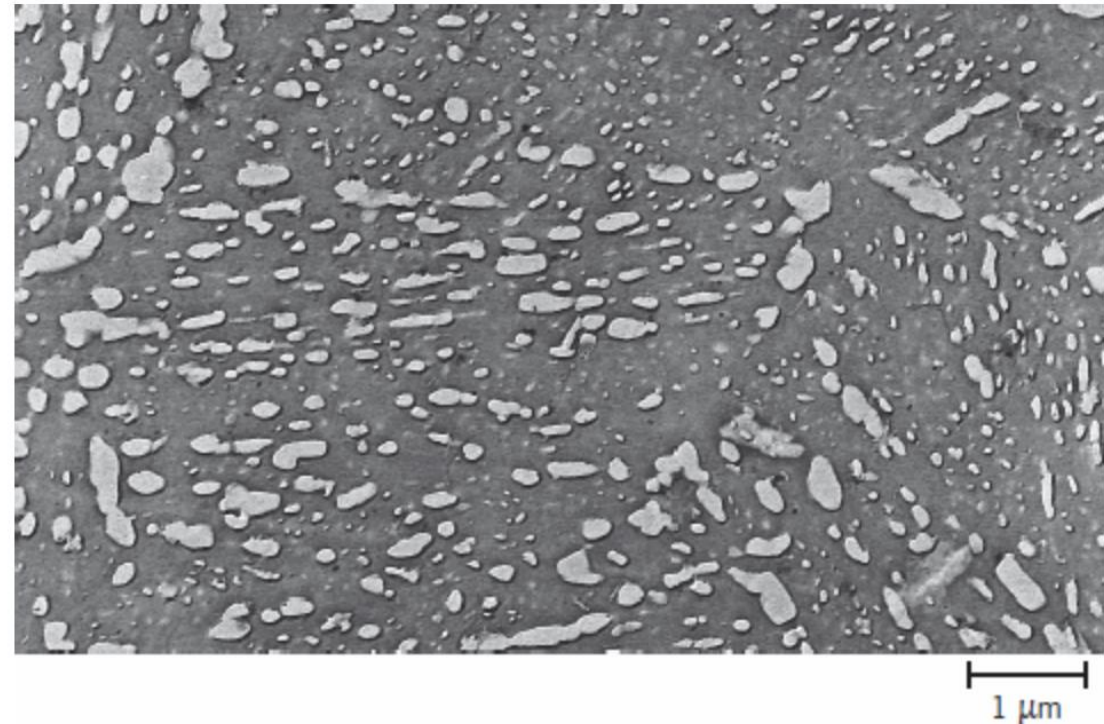


Martensita revenida

- A ductilidade e a tenacidade da martensita podem ser aprimoradas, e essas tensões internas podem ser aliviadas por meio de um tratamento térmico conhecido como **revenido**.
- o revenido é conduzido em temperaturas entre 250°C e 650°C.

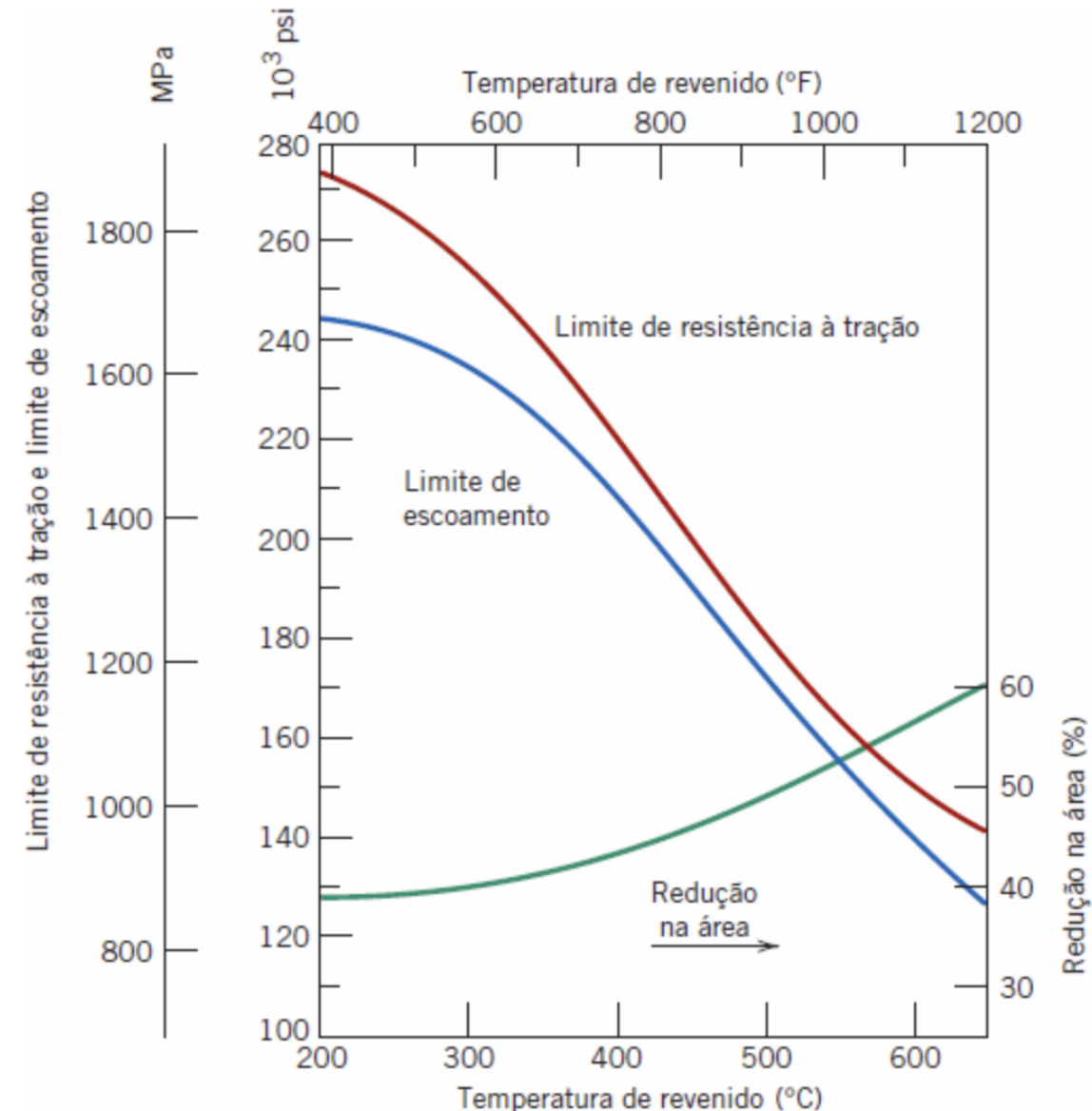
martensita (TCC, monofásica) → martensita revenida (fases α + Fe_3C)

- Martensita revenida consiste em partículas de cementita extremamente pequenas e uniformemente dispersas em uma matriz contínua de ferrite.
- A martensita revenida pode ser quase tão dura e resistente quanto a martensita, porém com uma ductilidade e uma tenacidade substancialmente aumentadas

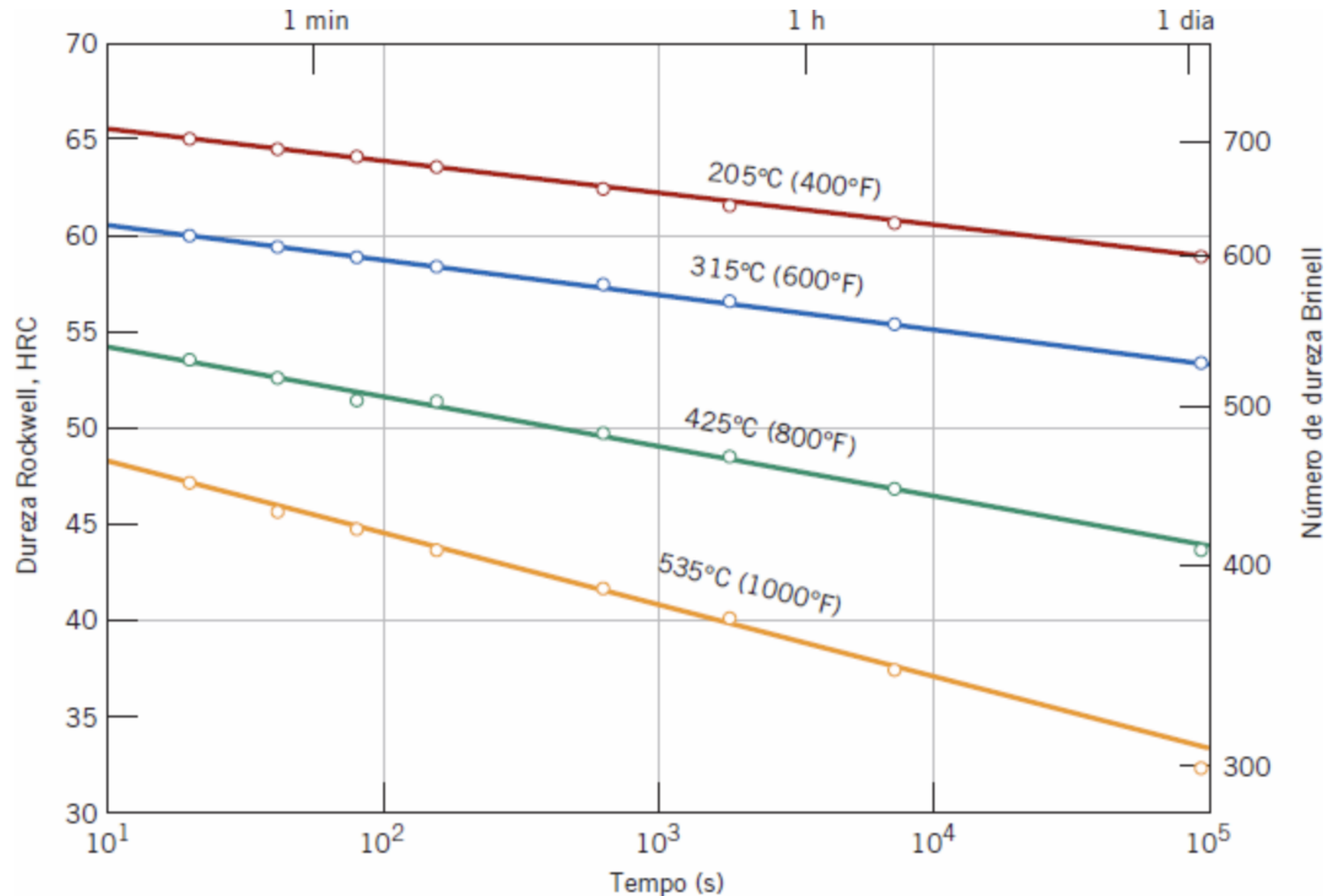


Martensita revenida

- O aumento no tamanho das partículas diminui a área de contornos entre as fases ferrita e cementita e, conseqüentemente, resulta em um material com menor dureza e menos resistente, embora mais tenaz e mais dúctil.
- As variáveis do tratamento térmico são a temperatura e o tempo, e a maioria dos tratamentos térmicos são processos realizados a temperatura constante.

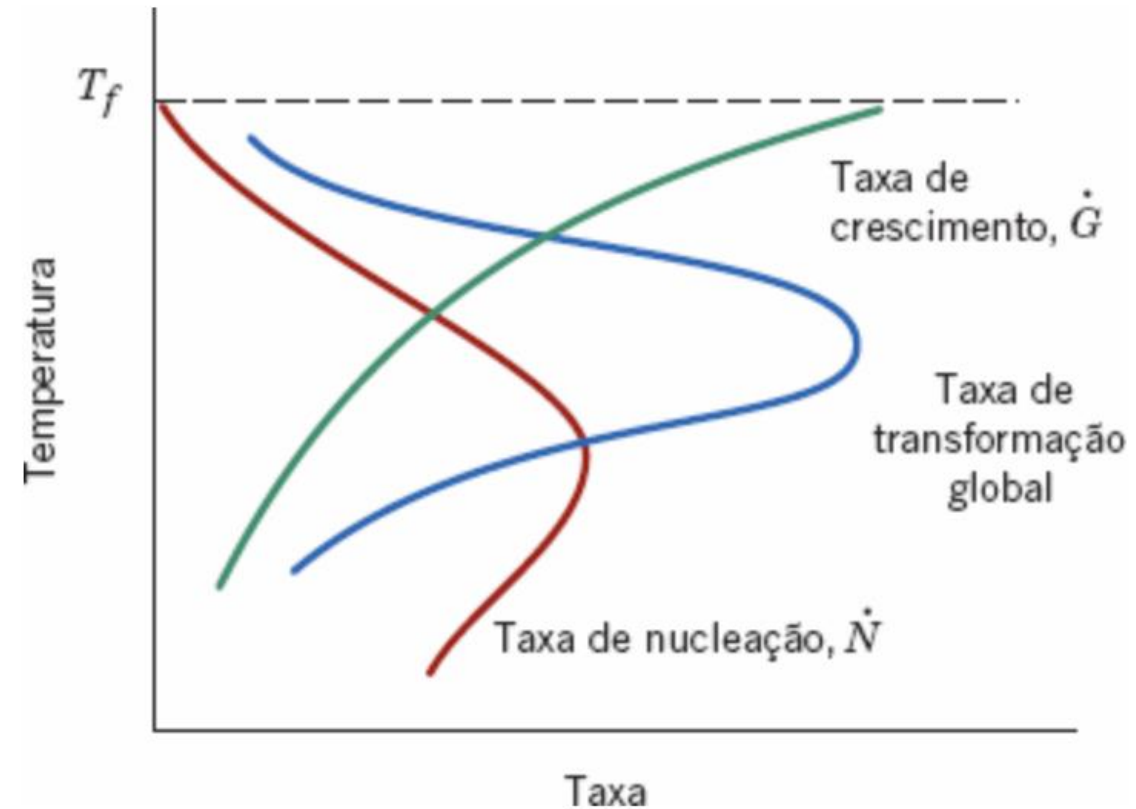
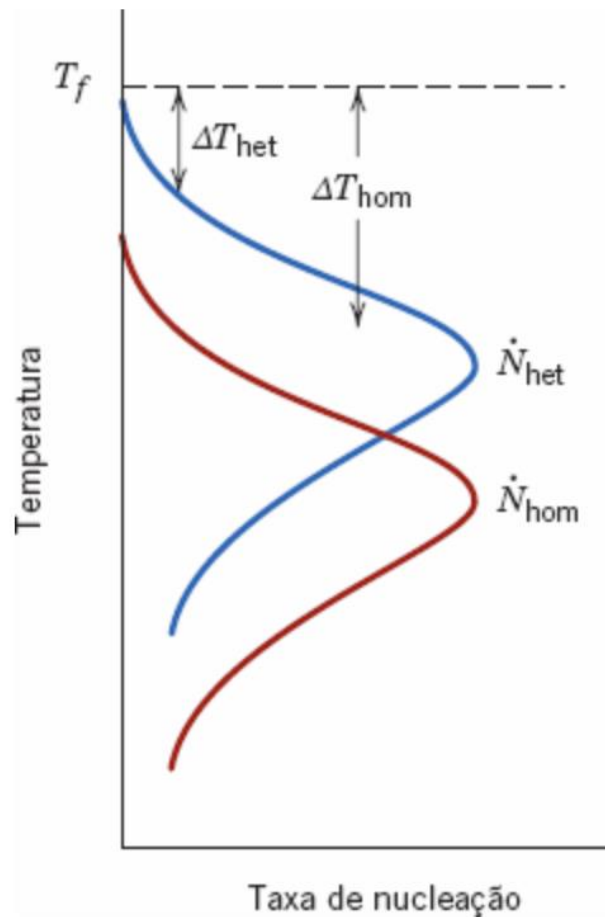


Martensita revenida tratamento térmico (tempo)



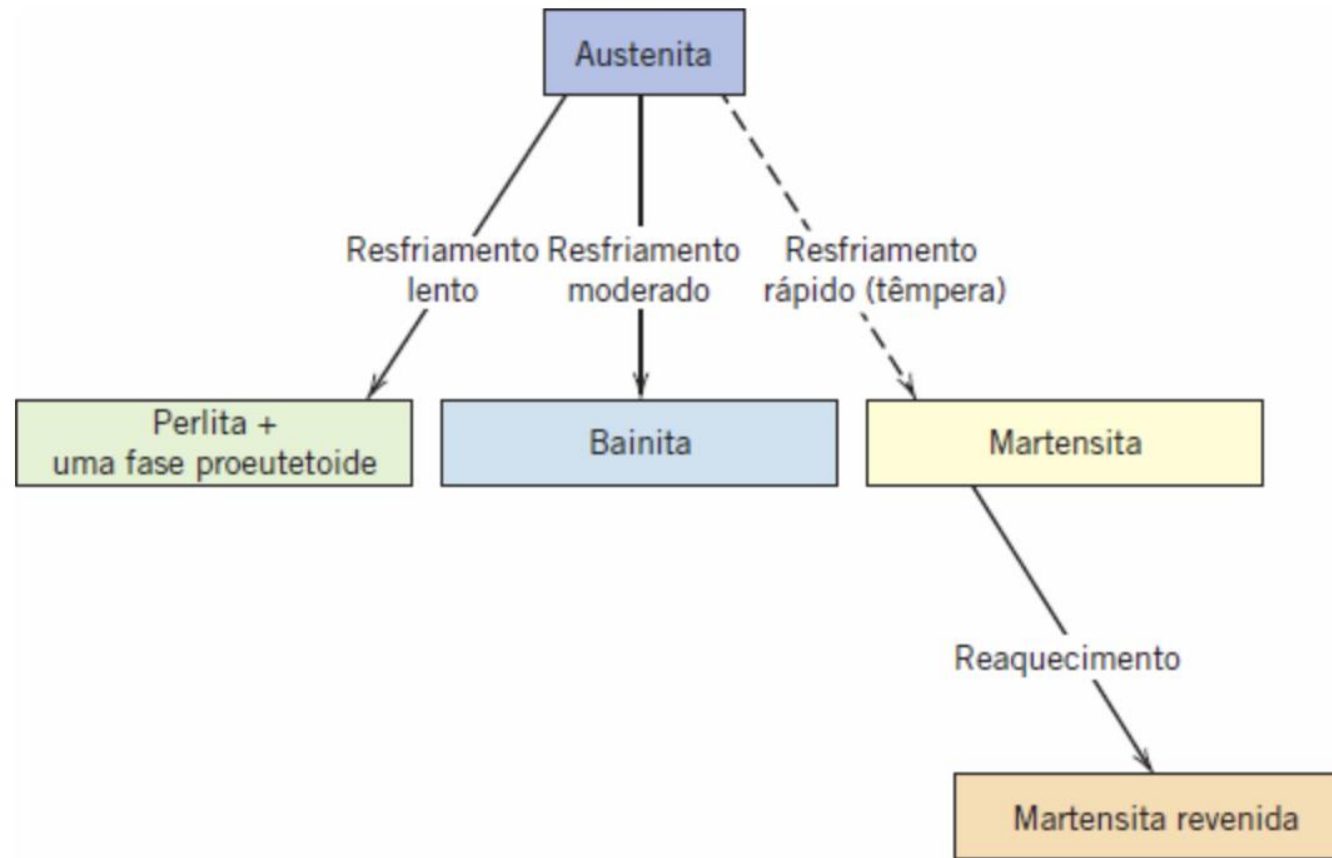
Take-home message...

1. Taxa de nucleação, crescimento e transformação



Take-home message...

1. Taxa de nucleação, crescimento e transformação.
2. Alteração microestrutural Fe-C.



Take-home message...

- 1. Taxa de nucleação, crescimento e transformação.**
- 2. Alteração microestrutural Fe-C.**
- 3. Propriedades mecânicas**

Microconstituente	Fases Presentes	Arranjo das Fases	Propriedades Mecânicas (Relativas)
Esferoidita	Ferrita α + Fe ₃ C	Partículas relativamente pequenas de Fe ₃ C com formato próximo ao esférico em uma matriz de ferrita α	De baixa dureza e dúctil
Perlita grosseira	Ferrita α + Fe ₃ C	Camadas alternadas de ferrita α e Fe ₃ C que são relativamente grossas	Mais dura e mais resistente que a esferoidita, mas não tão dúctil quanto a esferoidita
Perlita fina	Ferrita α + Fe ₃ C	Camadas alternadas de ferrita α e Fe ₃ C que são relativamente finas	Mais dura e mais resistente que a perlita grosseira, mas não tão dúctil quanto a perlita grosseira
Bainita	Ferrita α + Fe ₃ C	Partículas muito finas e alongadas de Fe ₃ C em uma matriz de ferrita α	A dureza e a resistência são maiores que as da perlita fina; dureza menor que a da martensita; a ductilidade é maior que a da martensita
Martensita revenida	Ferrita α + Fe ₃ C	Partículas muito pequenas de Fe ₃ C com formato próximo ao esférico em uma matriz de ferrita α	Resistente; não é tão dura quanto a martensita, mas é muito mais dúctil que a martensita
Martensita	Tetragonal de corpo centrado, monofásica	Grãos com forma de agulha	Muito dura e muito frágil

Próxima aula...

- Aplicações e processamento de ligas
- Ligas não ferrosas.

