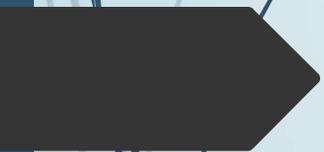


SMM 0193 – Engenharia e Ciência de Materiais

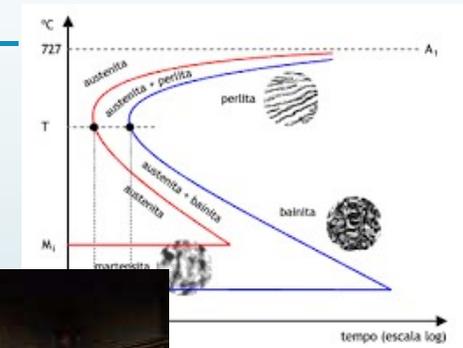


Prof. Dr. Marcelo Paes

► Programa da disciplina

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

Curvas T.T.T (temperatura-tempo-transformação)



Curvas T.T.T (temperatura-tempo-transformação)

CONSIDERAÇÕES INICIAIS/PREMISSAS

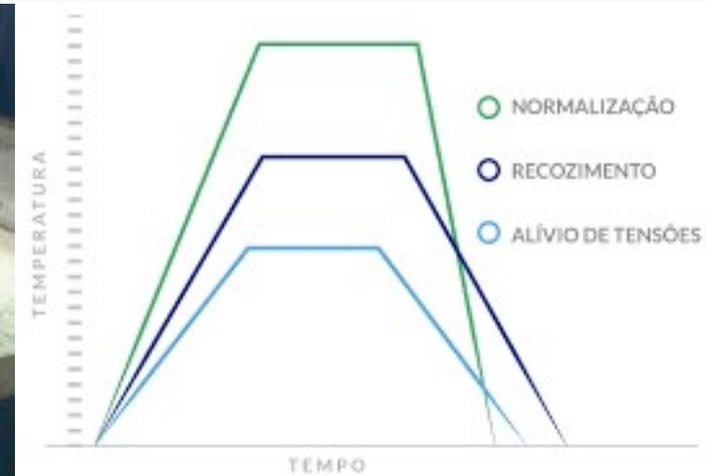


- DESAFIO: Controle do processo em função da propriedade mecânica desejada.
- OBJETIVOS: ao final desta aula você será capaz de:
 - Relacionar microestrutura com propriedades mecânicas;
 - Compreender a influência da taxa de resfriamento na estrutura do aço;
 - Conhecer as principais variáveis metalúrgicas que influenciam o resfriamento da austenita.

Curvas T.T.T (temperatura-tempo-transformação)

Por que estudar?

- Estudar a influência da taxa de resfriamento e temperatura na microestrutura e propriedades mecânicas dos aços.
- Definir o tratamento térmico mais adequado para determinada aplicação.



• Aplicações



Curvas T.T.T

Conceitos

Transformações multifásicas

DIAGRAMA DE FASES

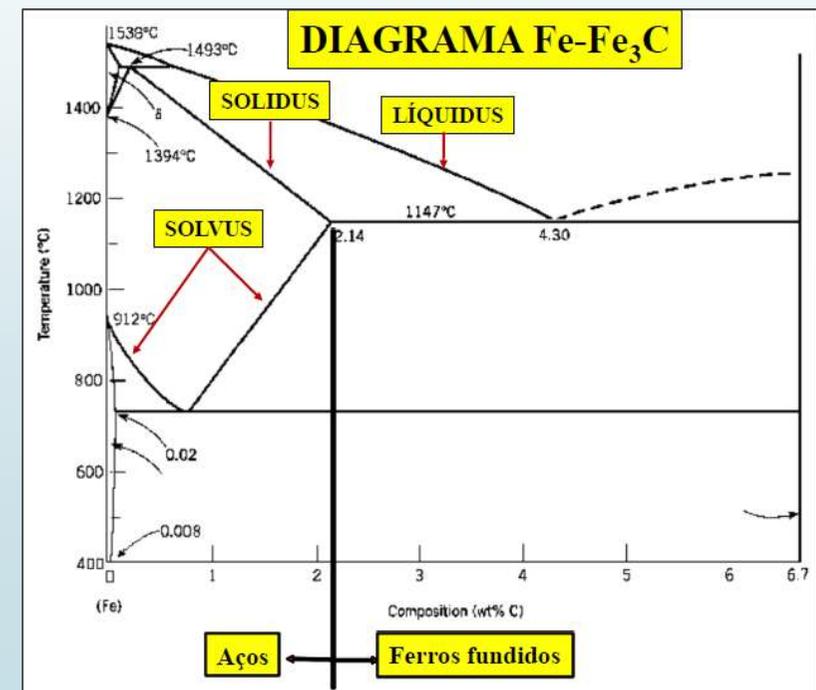
Resfriamento Lento. Considera condições de equilíbrio termodinâmico. Nos processos reais, especialmente industriais, é inviável ou mesmo indesejável.



CURVAS T.T.T

Resfriamento fora do equilíbrio pode ocasionar:

- Fases ou transformações em temperaturas diferentes daquela prevista no diagrama de fases
- Existência à temperatura ambiente de fases que não aparecem no diagrama



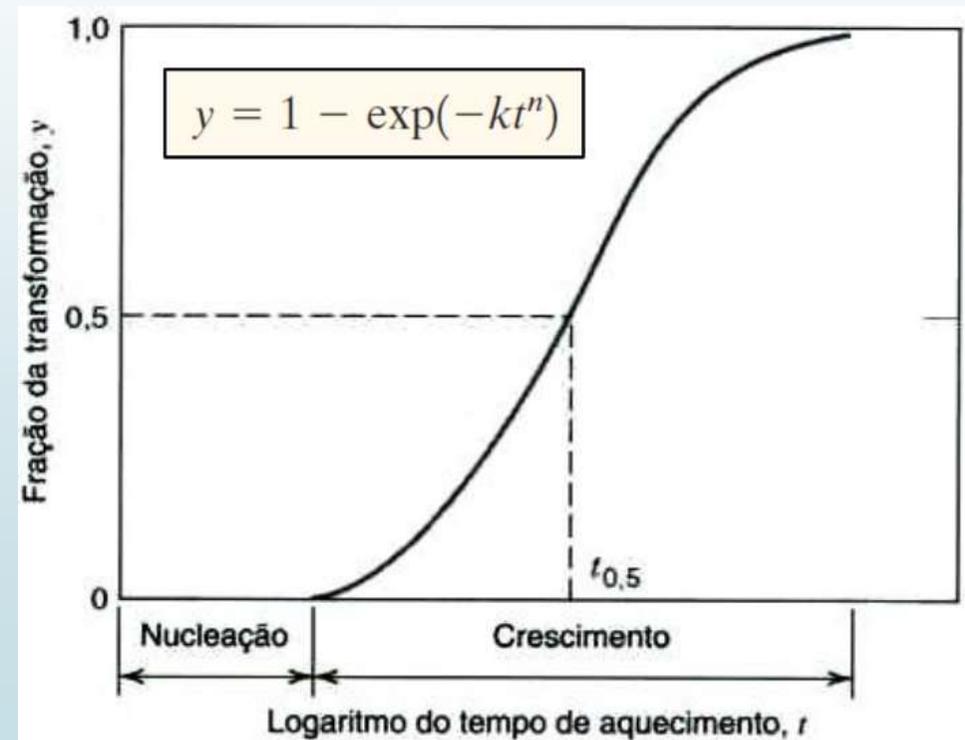
Curvas T.T.T

Conceitos

Transformações da austenita (γ)

- As curvas TTT estabelecem relações entre a temperatura em que ocorre a transformação da austenita (γ) e propriedades das fases produzidas.
- Existe ainda transformações se processam à temperatura constante ISOTÉRMICAS.
- Trabalho pioneiro de Bain e Davenport em 1930:

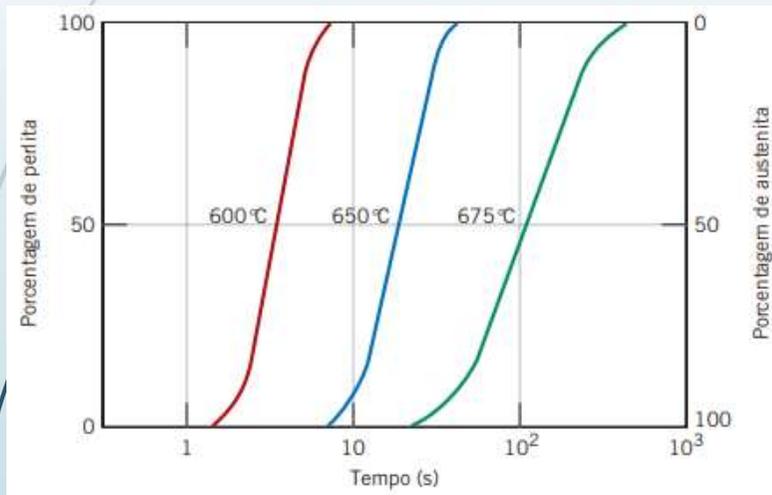
Transformation of Austenite at Constant Subcritical "Temperatures" [E S Davenport and E. C. Bain, Trans AIME, 1930 vol 90 pp 117 154]



Curvas T.T.T

Conceitos

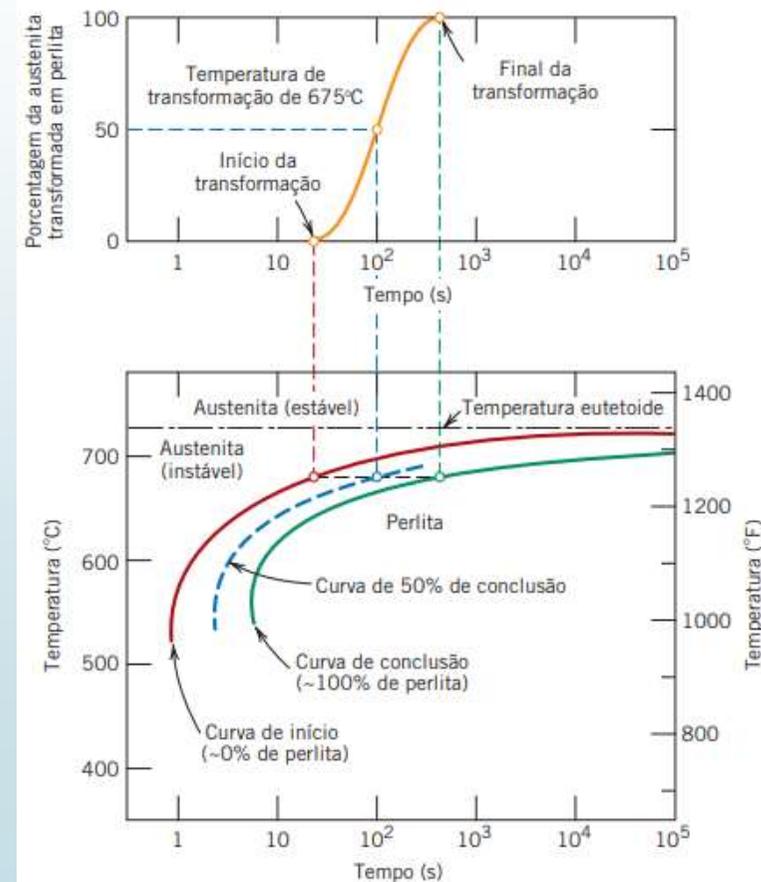
Influência da temperatura



Callister, W.D.

A temperatura desempenha um papel importante na velocidade de transformação da austenita em perlita.

Construção de curvas TTT

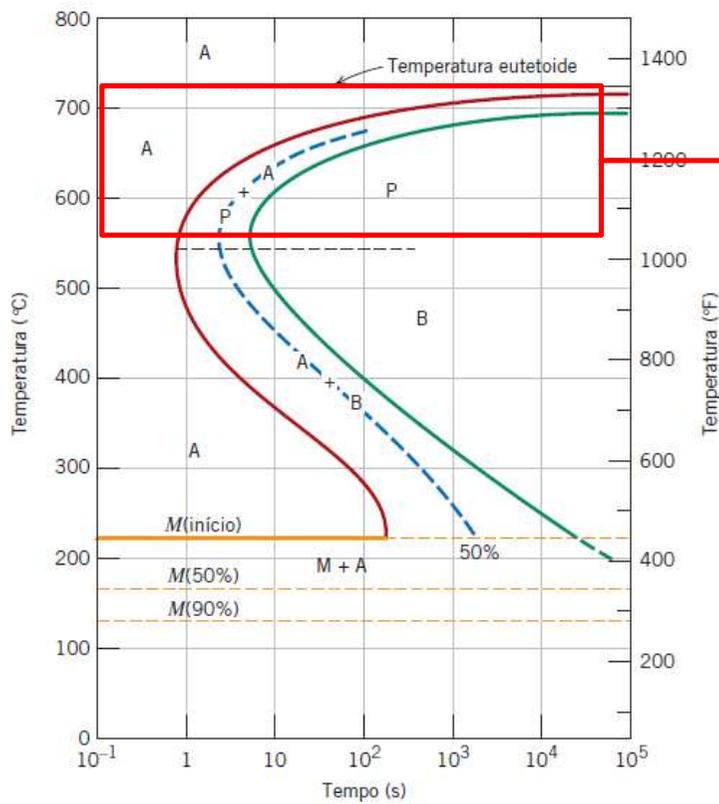


Callister, W.D.

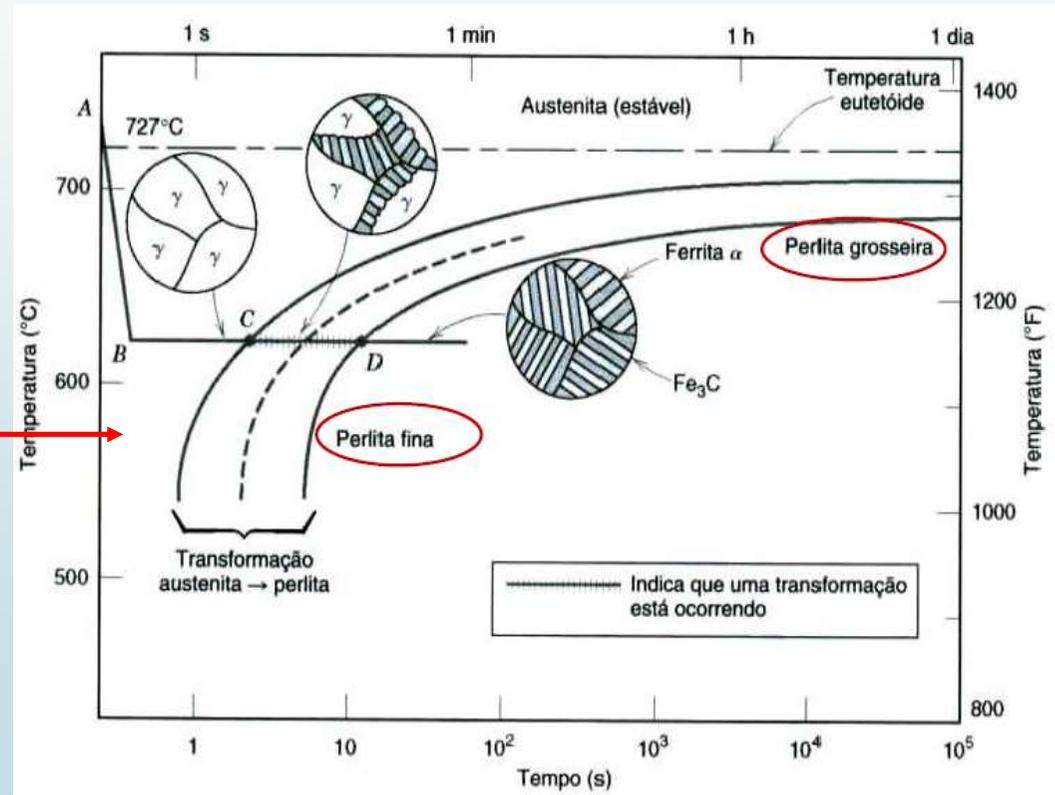
Curvas T.T.T

Conceitos

A curva TTT-Aço eutetóide



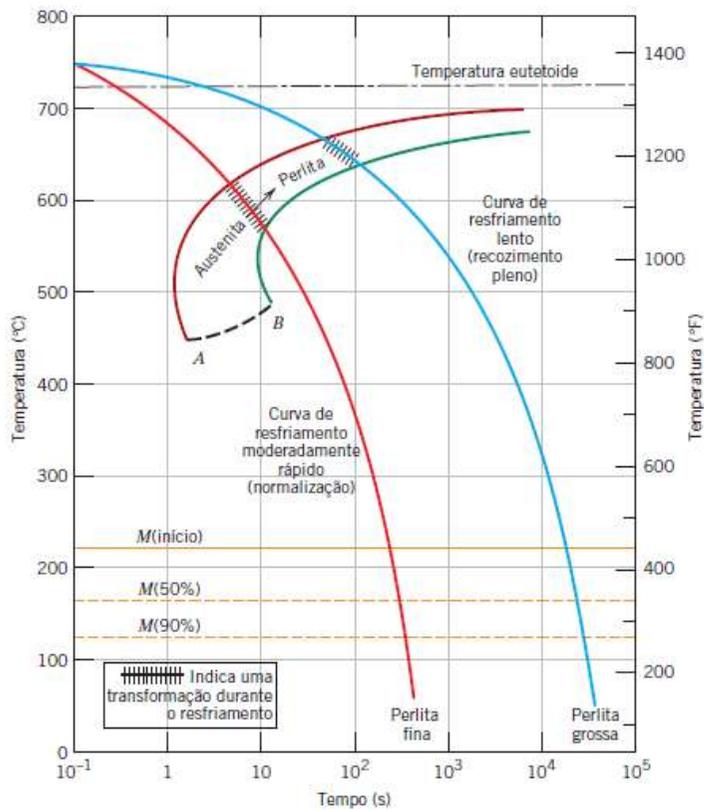
Callister, W.D.



Curvas T.T.T

Transformações por resfriamento contínuo (TRC)

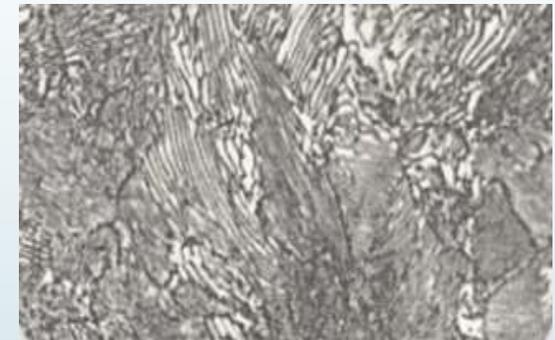
Perlita fina e Perlita grossa



Callister, W.D.

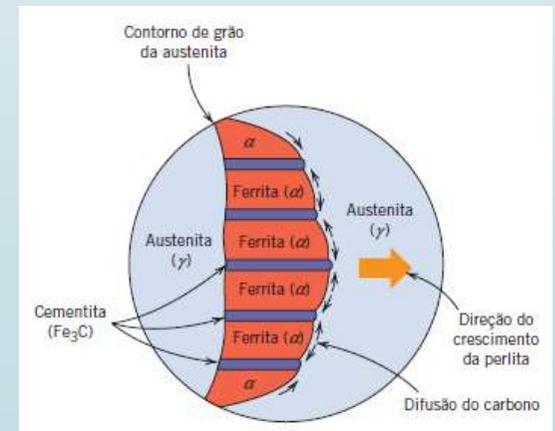


Perlita grossa (170 HB)



Perlita fina (377HB)

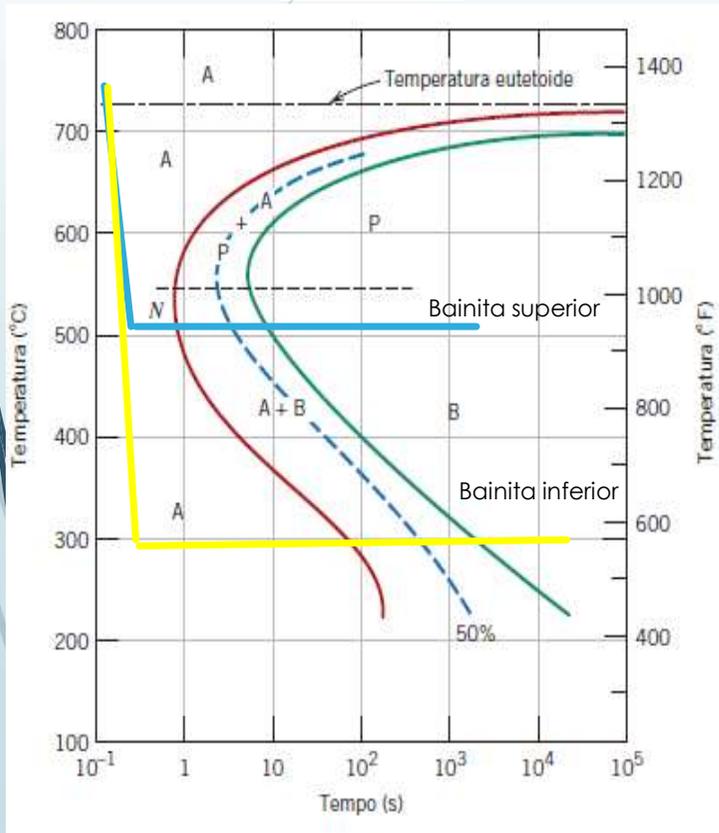
Em **540°C** começa a formação da **perlita fina**, com a diminuição da temperatura, a taxa de **difusão do carbono diminui**, e o espaçamento interlamelar fica menor.



Curvas T.T.T

Transformações isotérmicas

Bainita



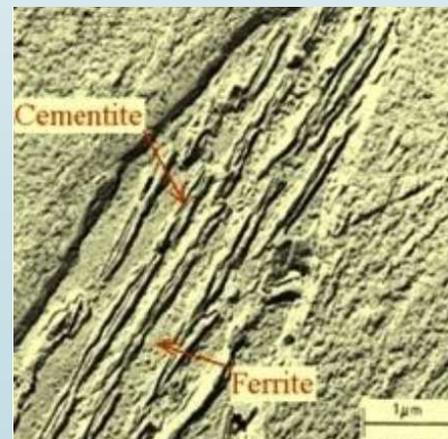
Adaptado de Callister, W.D.



Bainita superior



Bainita inferior



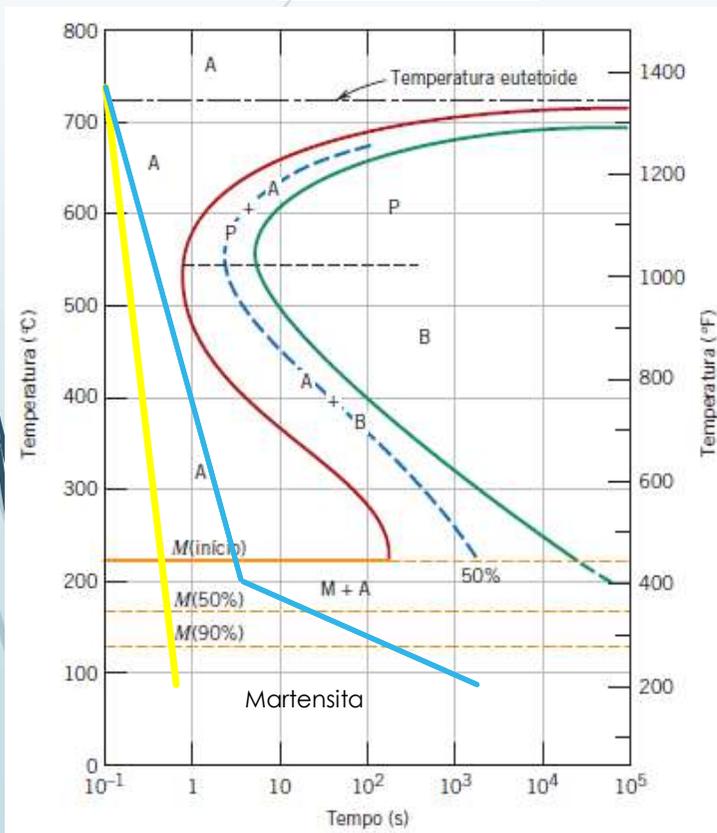
- Para temperaturas entre **300°C e 540°C** a bainita se forma como agulhas de ferrita separadas por partículas alongadas de cementita (**bainita superior**);

- Para temperaturas entre **200°C e 300°C** a ferrita encontra-se em placas e partículas finas de cementita se formam no interior (**bainita inferior**).

Curvas T.T.T

Transformações isotérmicas

Martensita



Adaptado de Callister, W.D.



Martensita em ripas

- Para ligas que contêm menos de 0,6% de C, a martensita se forma como pacote de ripas.
- São placas longas e finas, tais como as lâminas de uma Folha.



Martensita lenticular

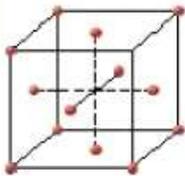
- A martensita lenticular (ou em placas) é encontrada em ligas Fe-C com concentrações maiores que 0,6% de C
- Pode-se observar a martensita em forma de agulhas (regiões escuras) e austenita que não se transformou (regiões claras). A austenita retida.

Curvas T.T.T

Transformações isotérmicas

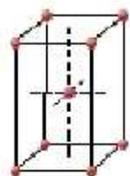
Martensita

AUSTENITA



Cúbico
de face centrada

**TRANSFORMAÇÃO
ALOTRÓPICA COM
AUMENTO DE
VOLUME,
que leva à concentração
de tensões**



tetragonal
de corpo
centrado

MARTENSITA

-A martensita se forma quando o resfriamento for rápido o suficiente de forma a evitar a difusão do carbono, ficando o mesmo retido em solução (interstícios).

-Na transformação martensítica não ocorre difusão. Ocorre instantaneamente (independente do tempo), por cisalhamento (deformação plástica).

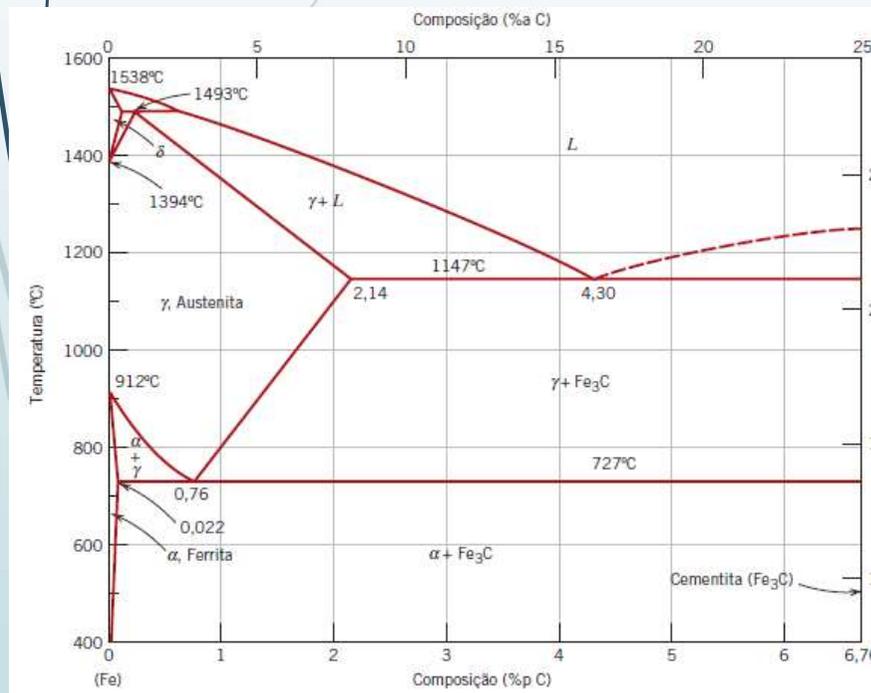
-É uma solução sólida supersaturada de carbono (não se forma por difusão), todo o carbono permanece intersticial podendo transformar-se em outras estruturas por difusão quando aquecida.

-É dura e frágil por isso é sempre necessário um tratamento de revenimento após a formação de martensita (Tempera).

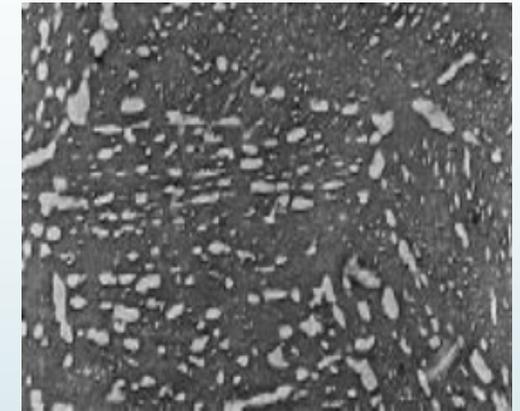
Curvas T.T.T

Transformações isotérmicas

Martensita Revenida



Martensita



Martensita Revenida

- No estado temperado a martensita é tão frágil que não pode ser utilizada para a maioria das aplicações.

- Excesso de tensões internas e deformação da rede carbono nos interstícios.

- A ductilidade pode ser aprimorada e as tensões internas aliviadas por meio do revenimento.

- **Revenimento:** aquecimento de um aço martensítico até uma temperatura abaixo da linha solvus durante um intervalo de tempo.

Curvas T.T.T

Transformações isotérmicas

Martensita Revenida

Revenimento:

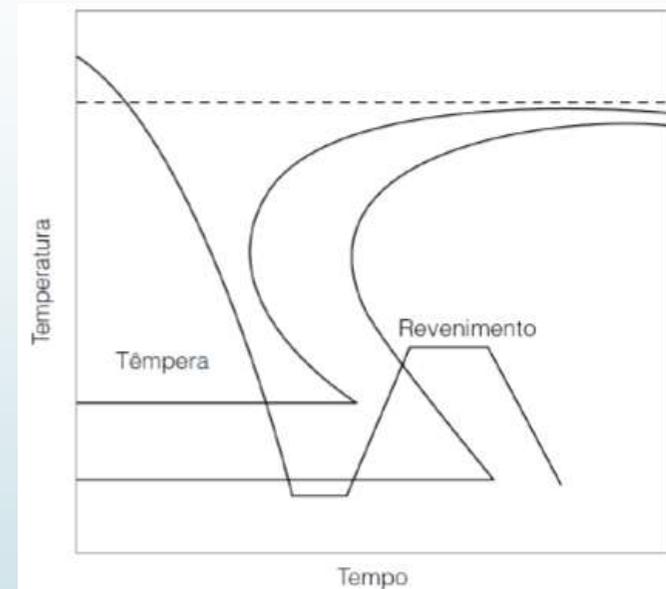
O carbono difunde para fora dos interstícios da rede do ferro e combina com ele para formar carbonetos.

Martensita

- Monofásica
- TCC

Martensita revenida

- Bifásica
- Ferrita + Cementita



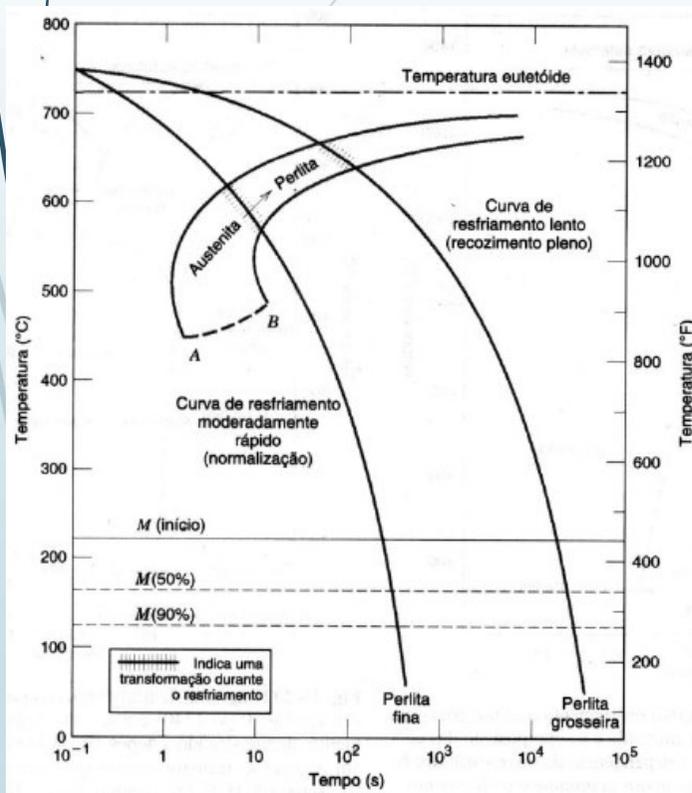
Costa e Silva & Mei

A dureza e a resistência da MR pode ser explicada pela grande área de contornos entre as fases por unidade de volume para as numerosas partículas de Fe_3C .

Curvas T.T.T

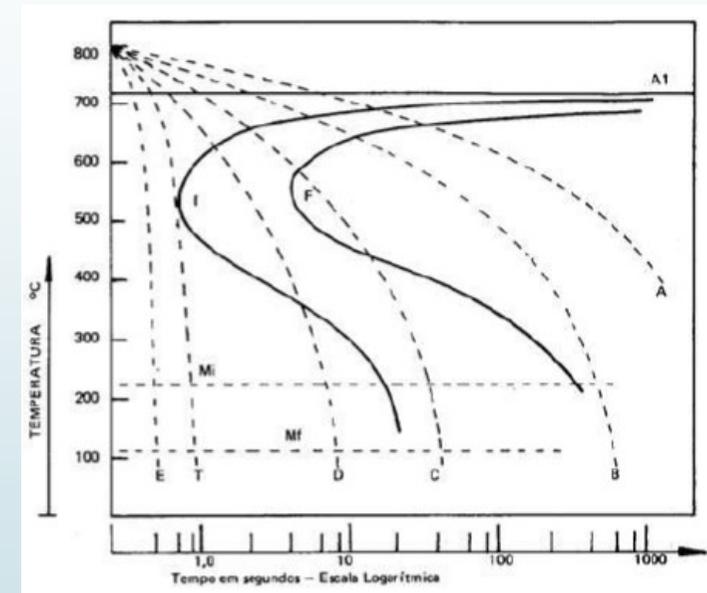
Análise curvas TTT

Resfriamento Contínuo



- A transformação tem início na intersecção da curva de resfriamento com a curva de início da reação, e termina com o cruzamento da curva com o término da transformação.

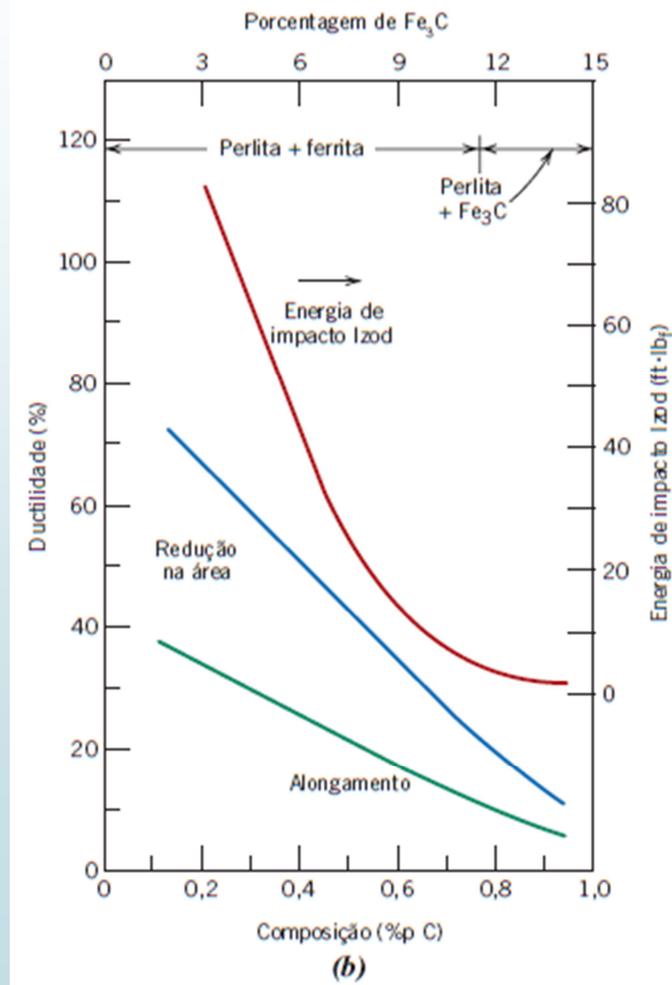
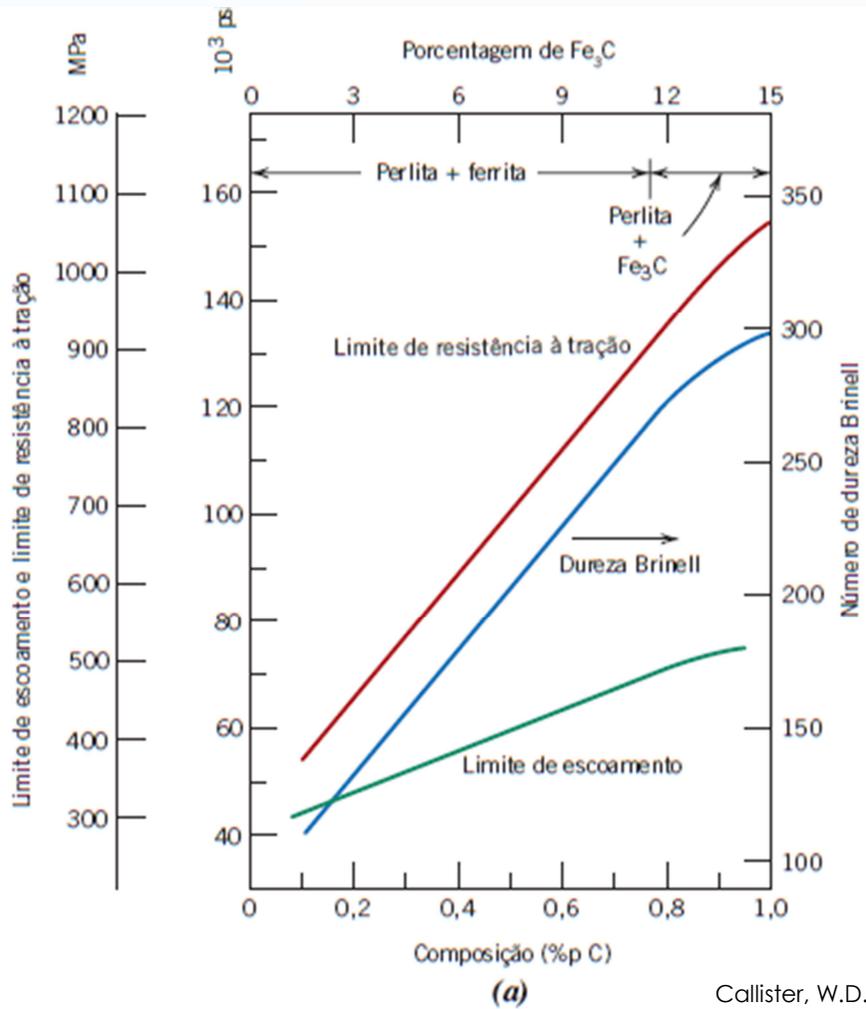
- Para qualquer curva de resfriamento que passe por **AB** a austenita não reagida transforma se em Martensita.



- A. FORNO Perlita grossa
- B. AR Perlita fina (+ dura que a anterior)
- C. AR SOPRADO Perlita+ fina que a anterior
- D. ÓLEO Perlita + Martensita
- E. ÁGUA)= Martensita

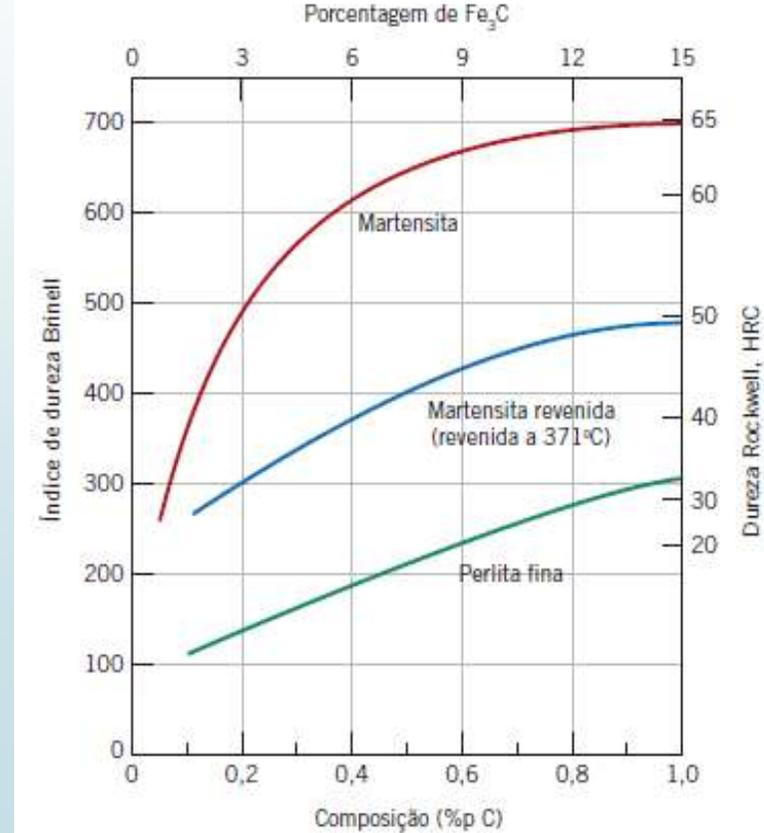
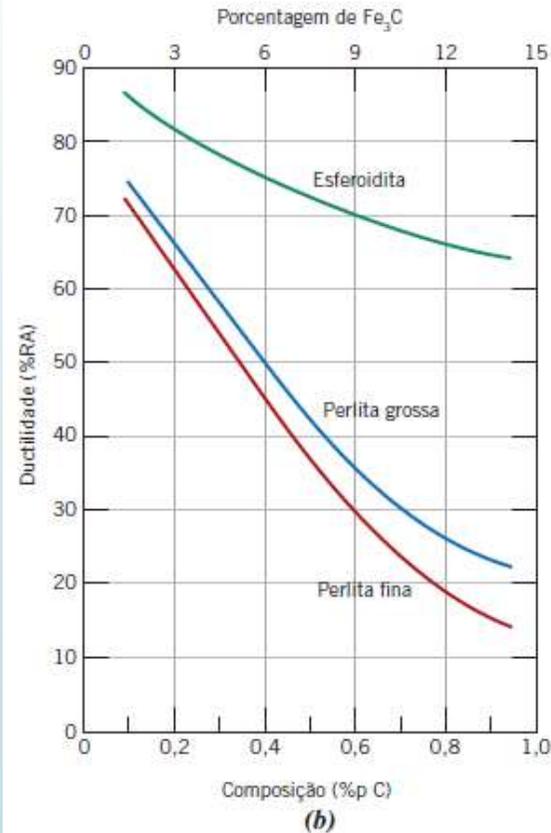
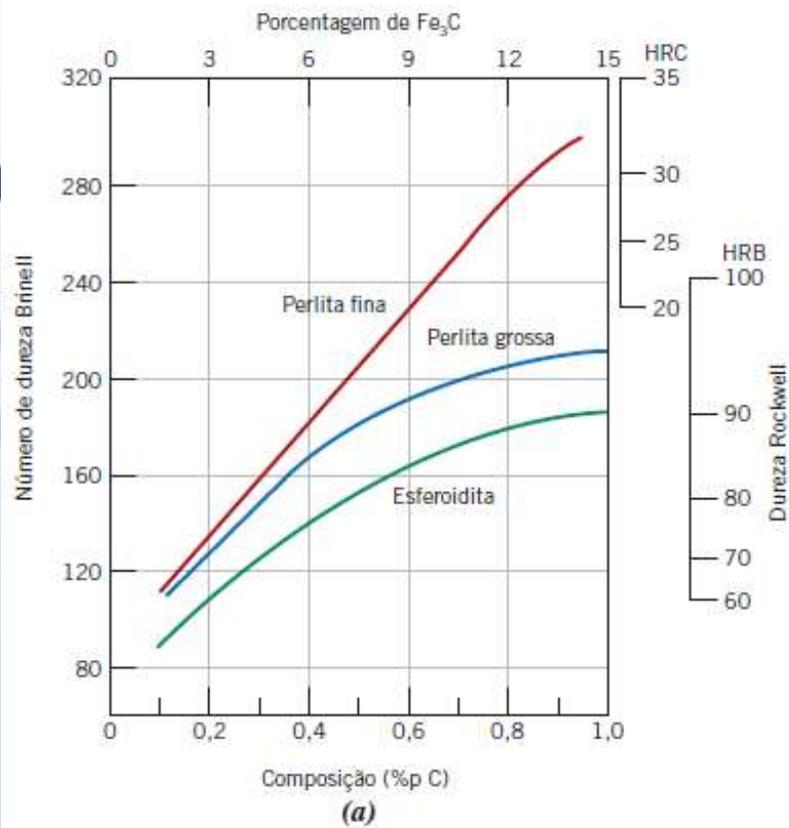
Curvas T.T.T

Propriedades Mecânicas



Curvas T.T.T

Propriedades Mecânicas



Curvas T.T.T

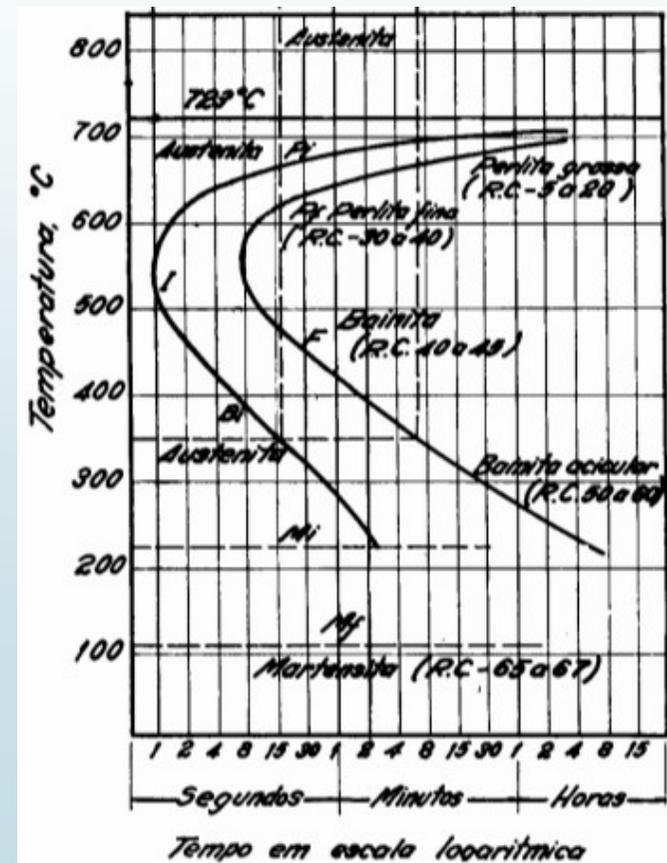
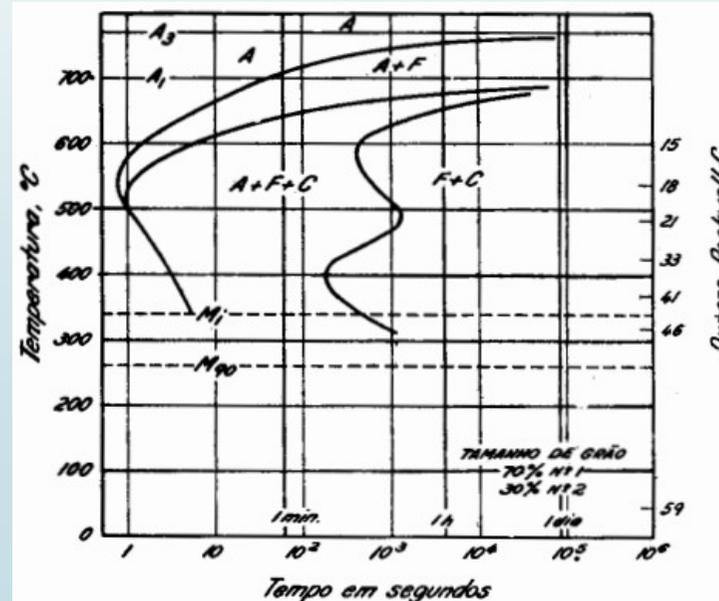
FATORES QUE AFETAM A POSIÇÃO DAS CURVAS TTT NOS AÇOS

- a) Composição química;
- b) Tamanho do grão da austenita;
- c) Homogeneidade da austenita.

a) Composição química:

A adição de elementos de liga no aço, deslocam a curva em "C" para a direita retardando a transformação.

Motivo: tempo dissolução dos elementos na ferrita ou formando carbonetos



Curvas T.T.T

FATORES QUE AFETAM A POSIÇÃO DAS CURVAS TTT NOS AÇOS

- a) Composição química;
- b) Tamanho do grão da austenita;
- c) Homogeneidade da austenita.

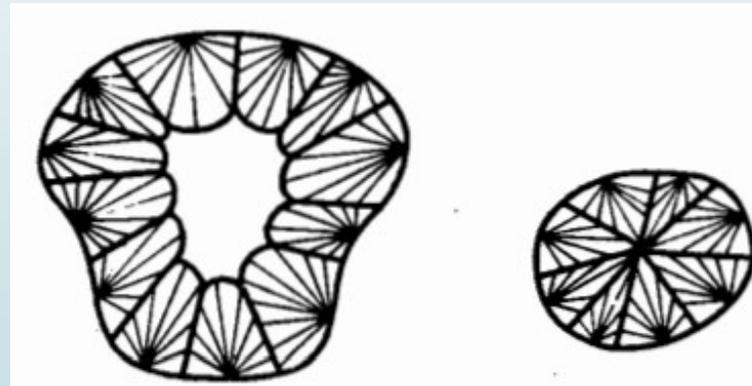
b) Tamanho do grão (Ferro- γ):

Quanto maior o tamanho de grão mais para a direita deslocam-se as curvas TTT.

Motivo: Dificulta a formação da perlita que se inicia no contorno de grão.

Riscos tamanho de grão muito grande:

- Reduz tenacidade;
- Tensões residuais;
- Empenamentos;
- Fissuras.



Austenita se transformado em perlita com diferentes tamanhos de grão.

Curvas T.T.T

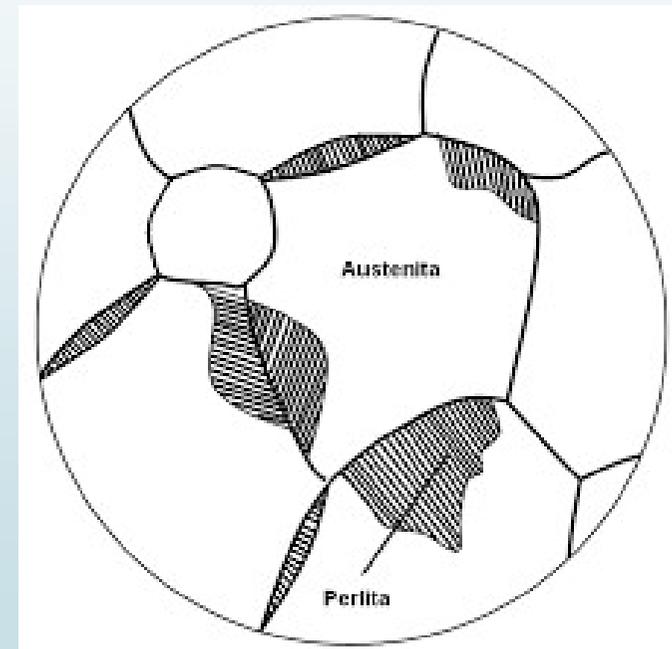
FATORES QUE AFETAM A POSIÇÃO DAS CURVAS TTT NOS AÇOS

- a) Composição química;
- b) Tamanho do grão da austenita;
- c) Homogeneidade da austenita.

c) Homogeneidade (γ):

Quanto mais homogênea (poucos carbonetos e áreas ricas em \underline{C}) desloca-se as curvas TTT para a direita.

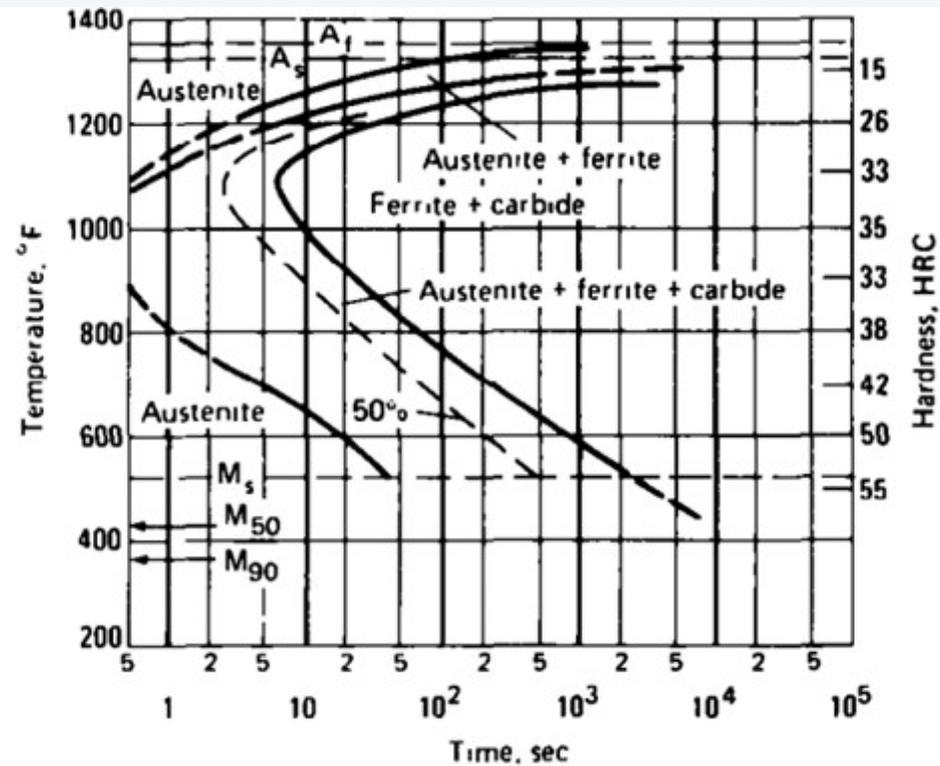
Motivo: Carbonetos atuam como núcleos formação perlita .



Curvas T.T.T

FATORES QUE AFETAM A POSIÇÃO DAS CURVAS TTT NOS AÇOS

Curvas TTT x Dureza



Chandler, 1995

FIM