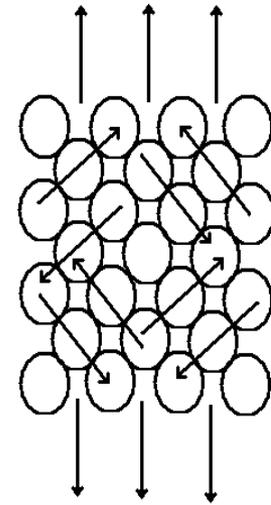




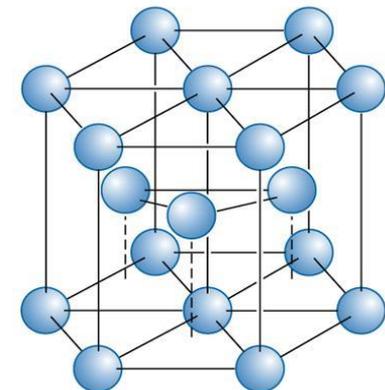
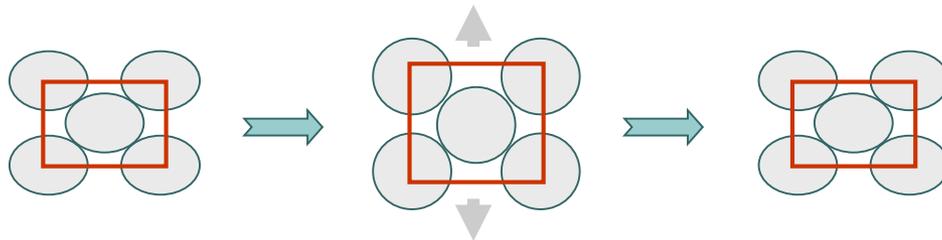
Universidade de São Paulo

Escola de Engenharia de São Carlos

Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística



CURVAS TTT, TRC E MEIOS DE RESFRIAMENTO



Engenharia e Ciência dos Materiais I

Prof. Dr. José Benedito Marcomini



TRANSFORMAÇÕES MULTIFÁSICAS

As condições de equilíbrio caracterizadas pelo diagrama de fases ocorrem apenas quando o resfriamento é dado em taxas **extremamente** lentas, o que para fins práticos é inviável ou mesmo indesejável.

Um resfriamento fora do equilíbrio pode ocasionar:

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

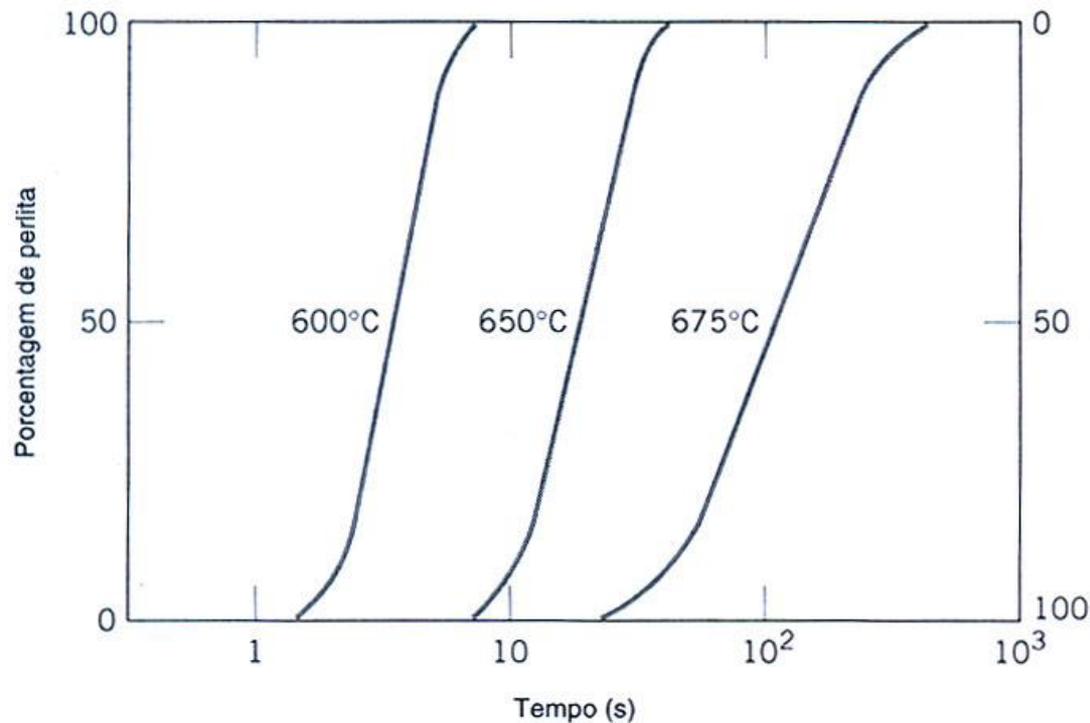


CURVAS TTT (Tempo-Temperatura-Transformação)

- As curvas TTT estabelecem relações entre a temperatura em que ocorre a transformação da austenita e a estrutura e propriedades das fases produzidas com o tempo.
- Existe ainda transformações se processam à temperatura constante (**ISOTERMICAS**).
- 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].



Dependência em relação à temperatura para uma liga Fe-C (eutetóide/0,76%p C)



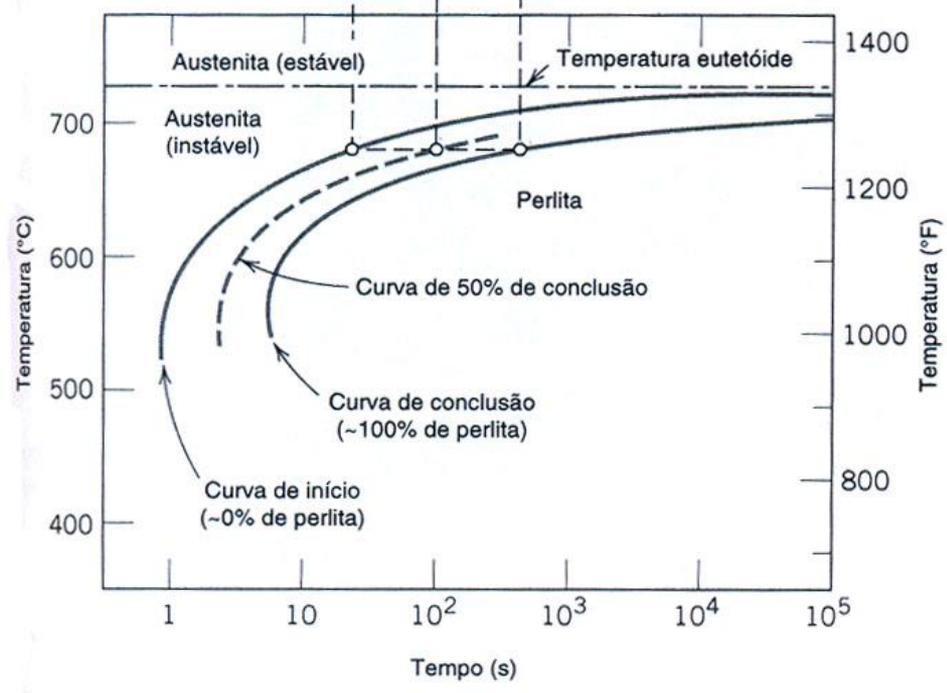
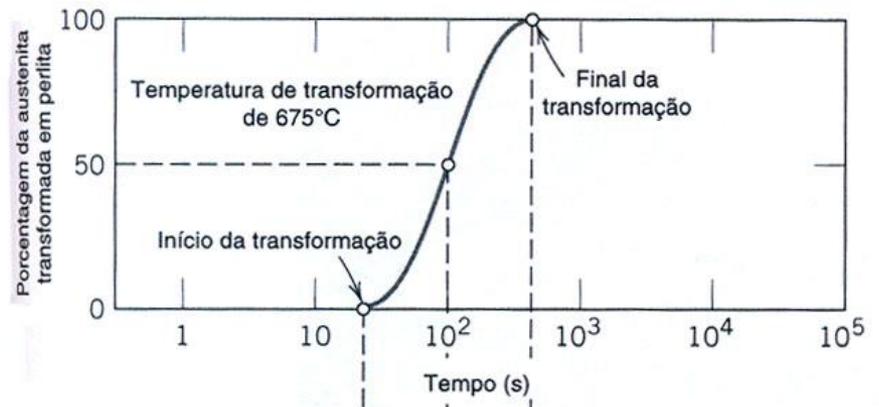
A temperatura desempenha um papel importante na taxa de transformação da austenita em perlita.

Para uma liga ferro-carbono com composição eutetóide (0,76%p C). Fração que reagiu isotermicamente em função do logaritmo do tempo para a transformação da austenita em perlita.



Técnica de Construção da Curva TTT.

- Demonstração de como um diagrama para uma transformação isotérmica (parte inferior) é gerado a partir de medições da porcentagem da transformação em função do logaritmo do tempo (parte superior).
- A transformação da austenita em perlita ocorre apenas se a liga for super resfriada até abaixo da temperatura do eutetóide
- À esquerda da curva do início de transformação apenas austenita estará presente, enquanto que a direita da curva do término de transformação apenas existirá perlita. Entre as duas curvas ambos estão presentes.



(Fe-C Eutetóide)



Curva de Tratamento Isotérmico

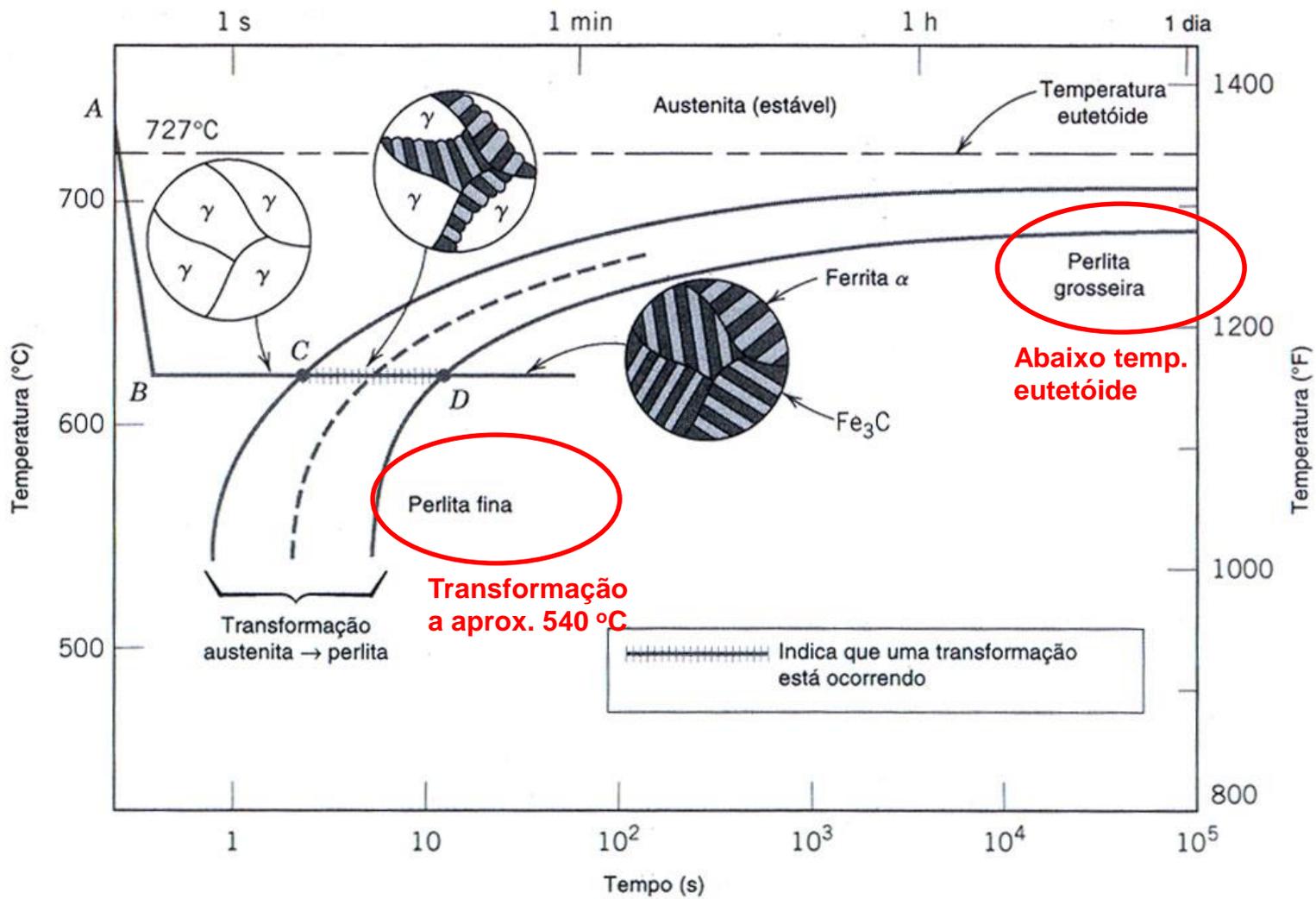


Diagrama de transformação isotérmica para uma liga Fe-C com composição eutetóide, mostrando a superposição da curva para um tratamento térmico isotérmico (ABCD). As microestruturas antes e depois da transformação da austenita em perlita estão mostradas.

PERLITA FINA E GROSSEIRA

- Fotomicrografias de
(a) perlita grosseira
(b) perlita fina

- À temperatura em torno de 540 °C é produzido uma perlita mais fina, pois com a diminuição da temperatura, a taxa de difusão do carbono diminui, e as camadas se tornam progressivamente mais finas

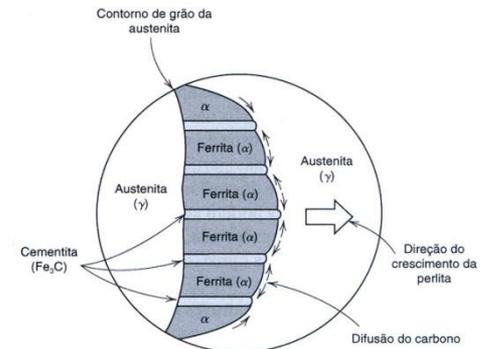
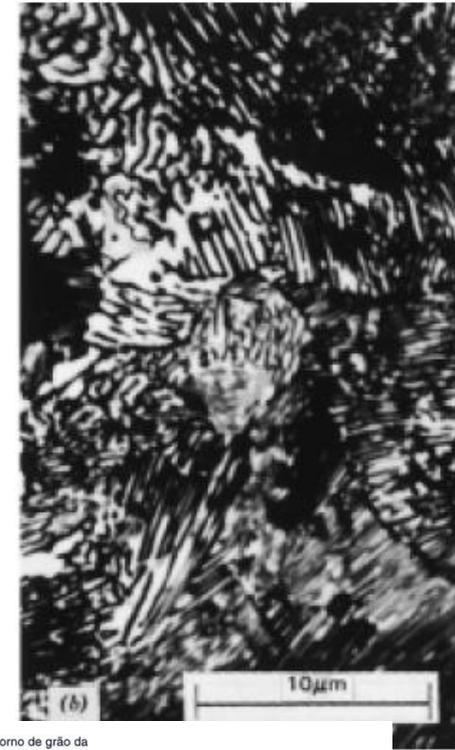
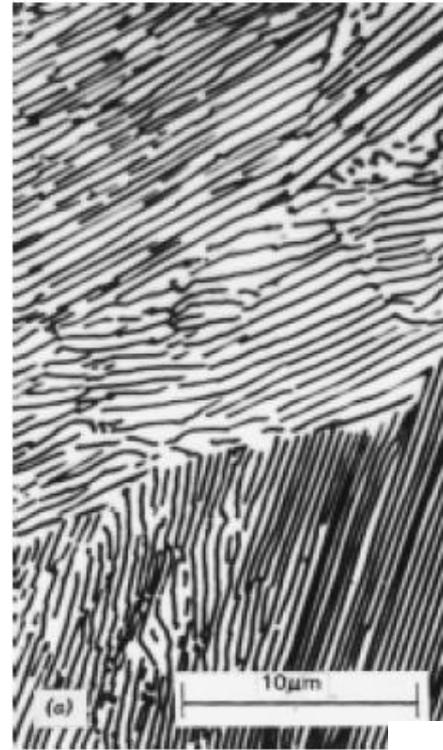
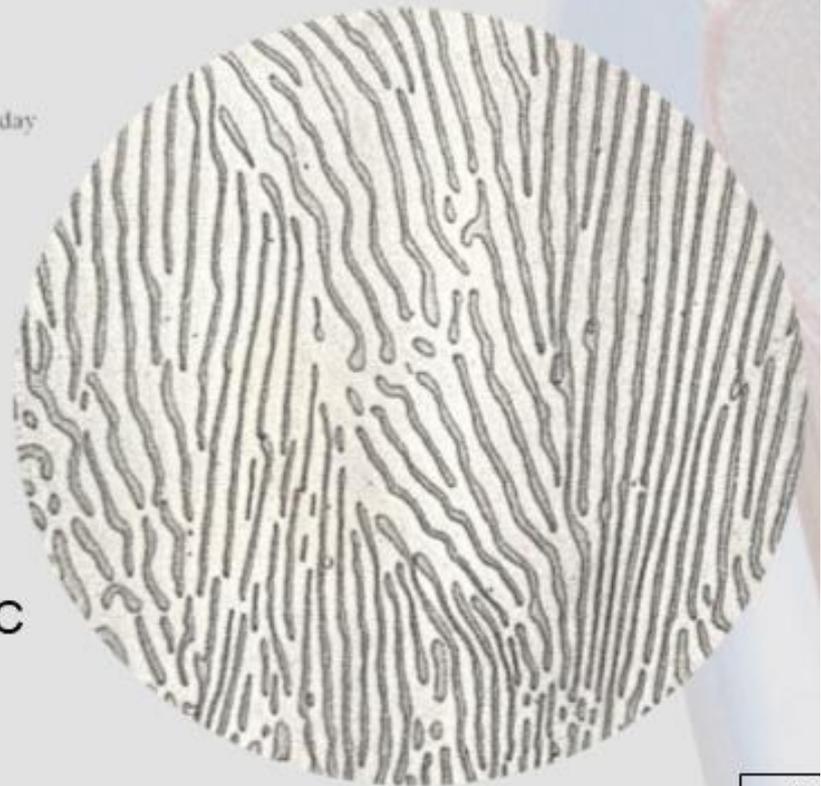
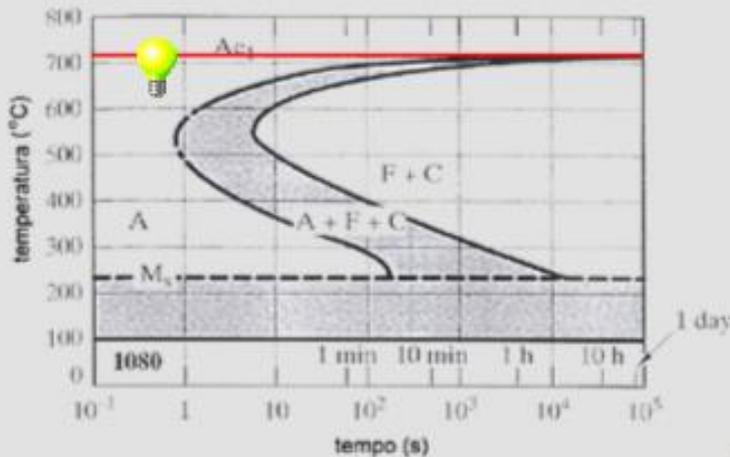


Figura 10.30 Representação esquemática da formação da perlita a partir da austenita; a direção da difusão do carbono está indicada pelas setas.

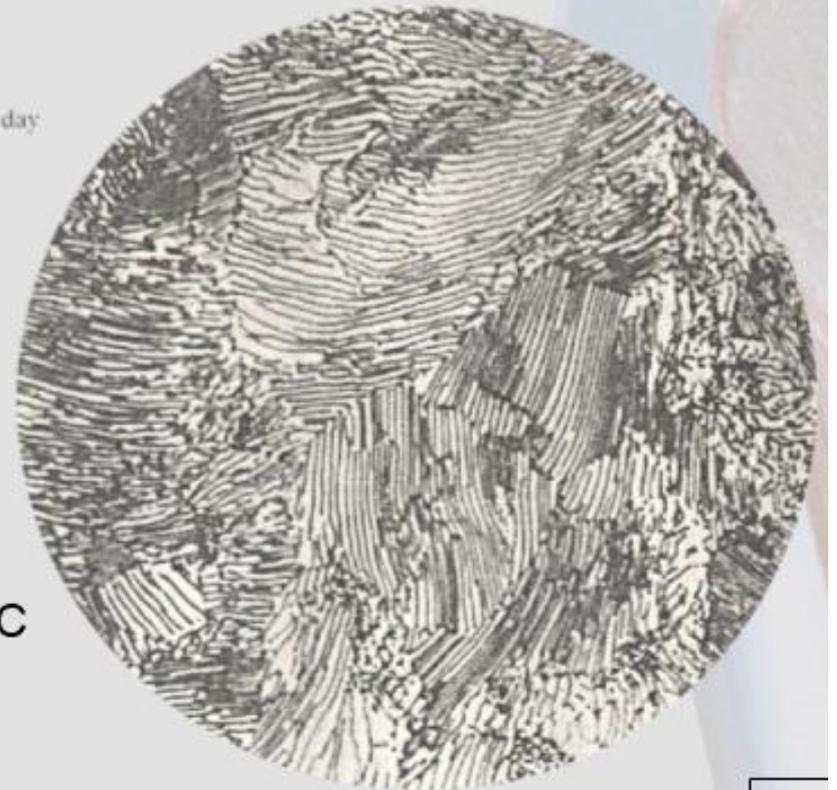
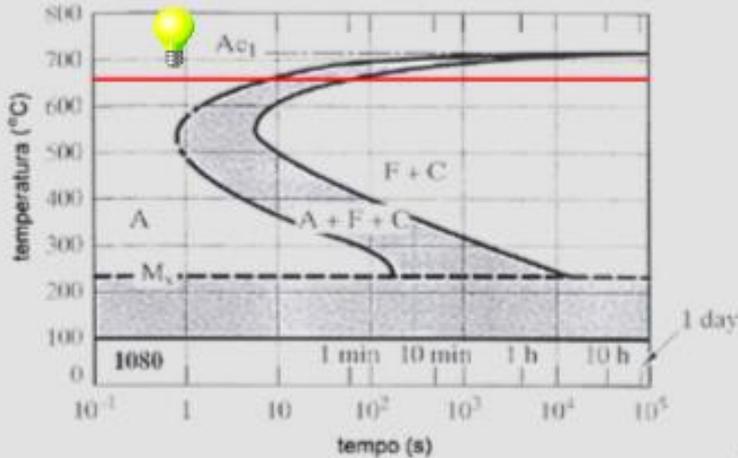


TRANSFORMAÇÃO ISOTÉRMICA DE LIGA FE-C



Transformação isotérmica a 720 °C
Estrutura: perlita grossa
Dureza: 170 HB

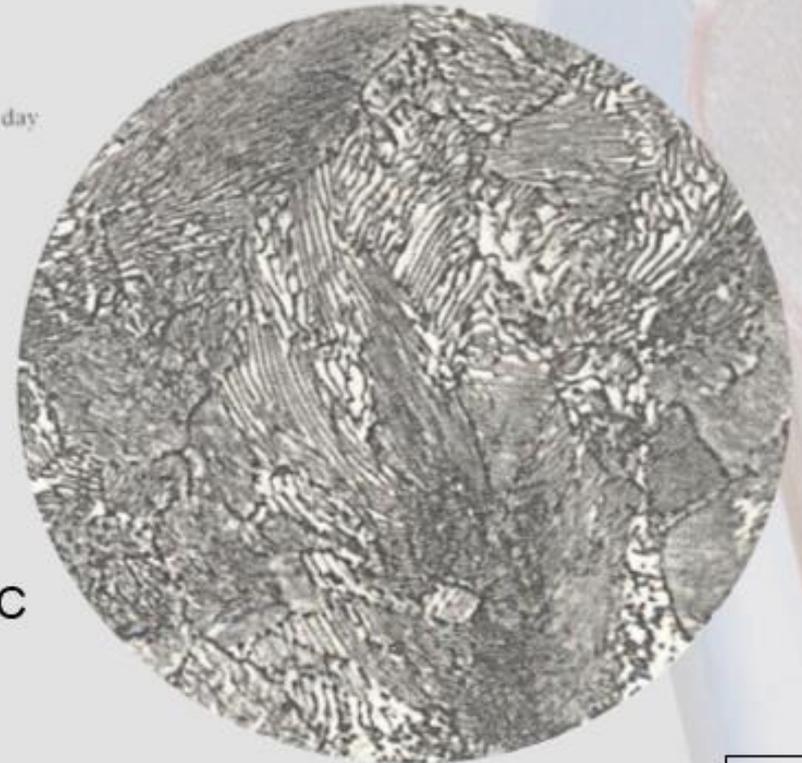
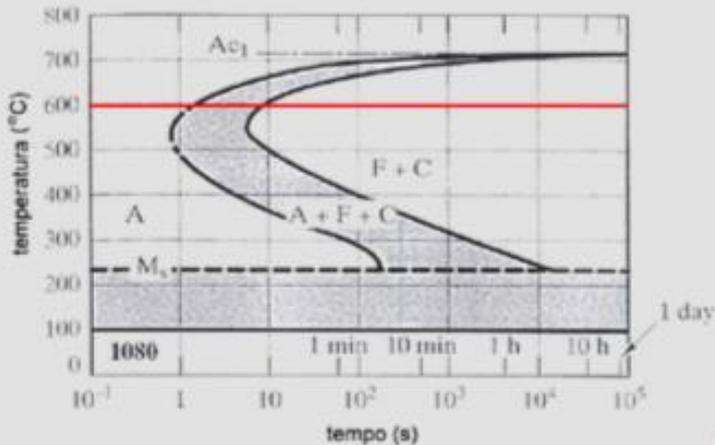
TRANSFORMAÇÃO ISOTÉRMICA DE LIGA FE-C



Transformação isotérmica a 660 °C
Estrutura: perlita média
Dureza: 296 HB

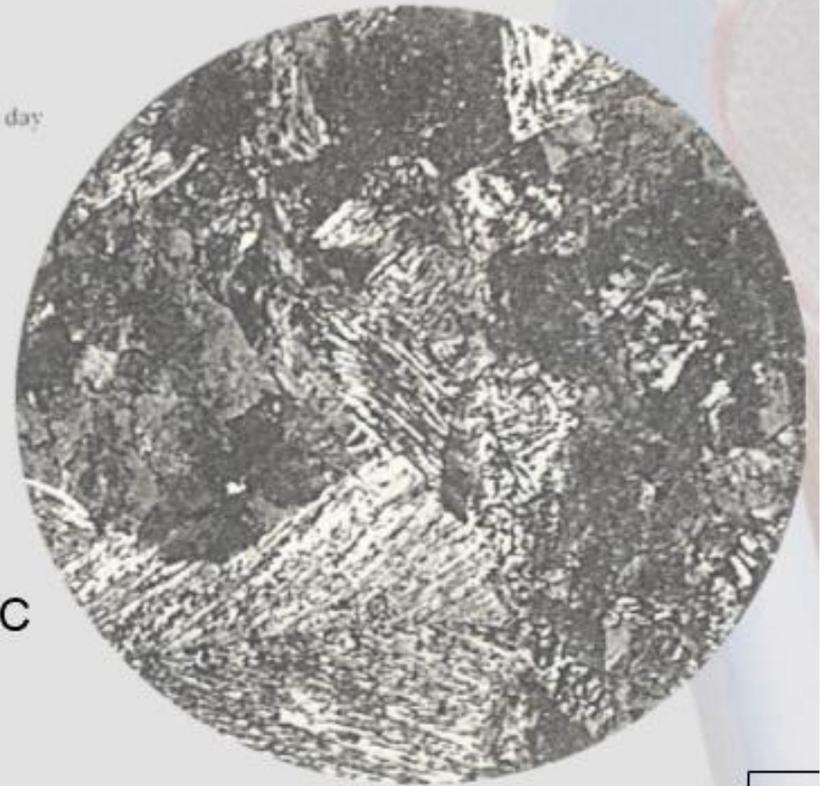
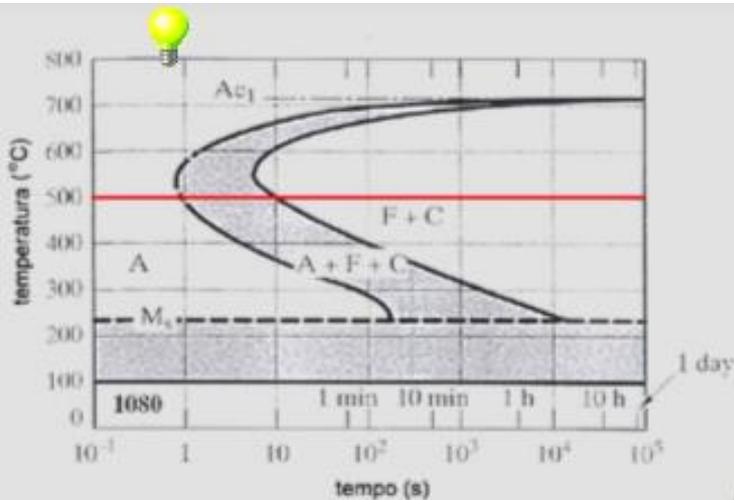


TRANSFORMAÇÃO ISOTÉRMICA DE LIGA FE-C



Transformação isotérmica a 600 °C
Estrutura: perlita fina
Dureza: 377 HB

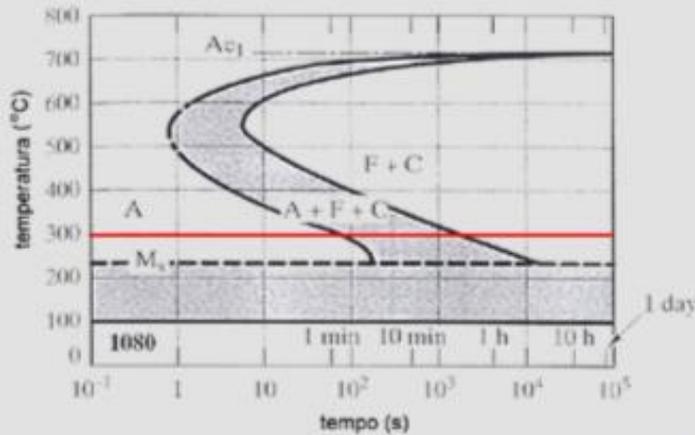
TRANSFORMAÇÃO ISOTÉRMICA DE LIGA FE-C



Transformação isotérmica a 480 °C
Estrutura: bainítica (**superior**)



TRANSFORMAÇÃO ISOTÉRMICA DE LIGA FE-C

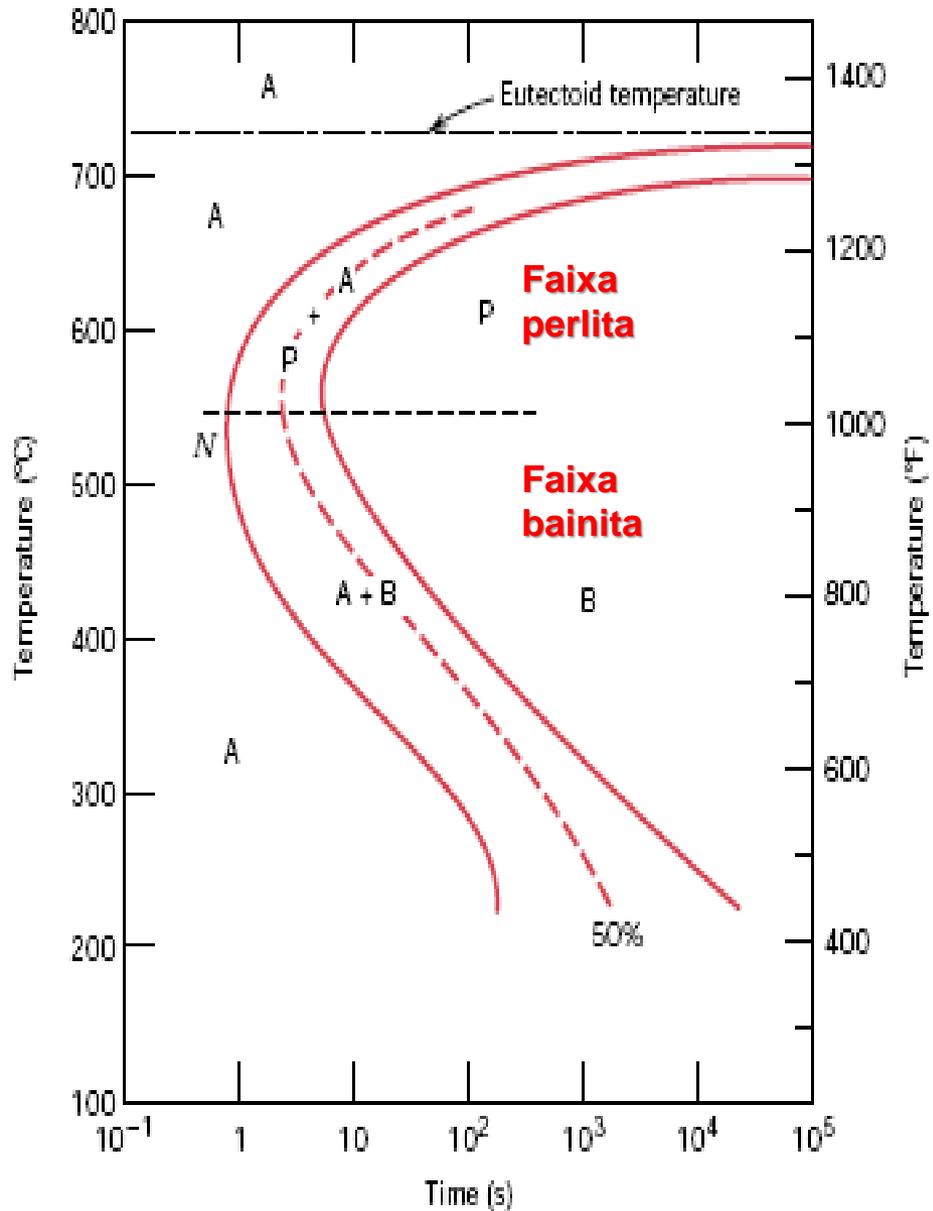


Transformação isotérmica a 300 °C
Estrutura: bainítica (**inferior**)



BAINITA

- À medida que a temperatura de transformação é reduzida (aumento taxa) após a formação de perlita fina, um novo microconstituente é formado: a bainita.
- Como ocorre na perlita (**lamelas**) a microestrutura da bainita consiste nas fases ferrita e cementita, mas os arranjos são diferentes (**agulhas ou placas**)
- No diagrama de transformação isotérmica a bainita se forma abaixo do “joelho” enquanto a perlita se forma acima.





BAINITA

- Para temperaturas entre 300 °C e 540 °C a bainita se forma como uma série de 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 dessas placas (**bainita inferior**)

BAINITA: AGREGADO NÃO LAMELAR DE FERRITA E CARBONETOS

BAINITA INFERIOR E BAINITA SUPERIOR

CURIOSIDADE

MECANISMO DE FORMAÇÃO: CONTROVERSO AINDA HOJE

Duas correntes principais :

- **Harry Bhadeshia (Cambridge-UK):** nucleação por difusão e crescimento por cisalhamento (displaciva como a martensita) por causa da velocidade de crescimento, formada por subunidades e formação de relevo (Zener, 1946);
- **Mats Hillert (Royal Institute of Technology – Suécia):** Difusão

Bainita inferior: difusão de curto alcance do carbono - carbonetos em 60°.

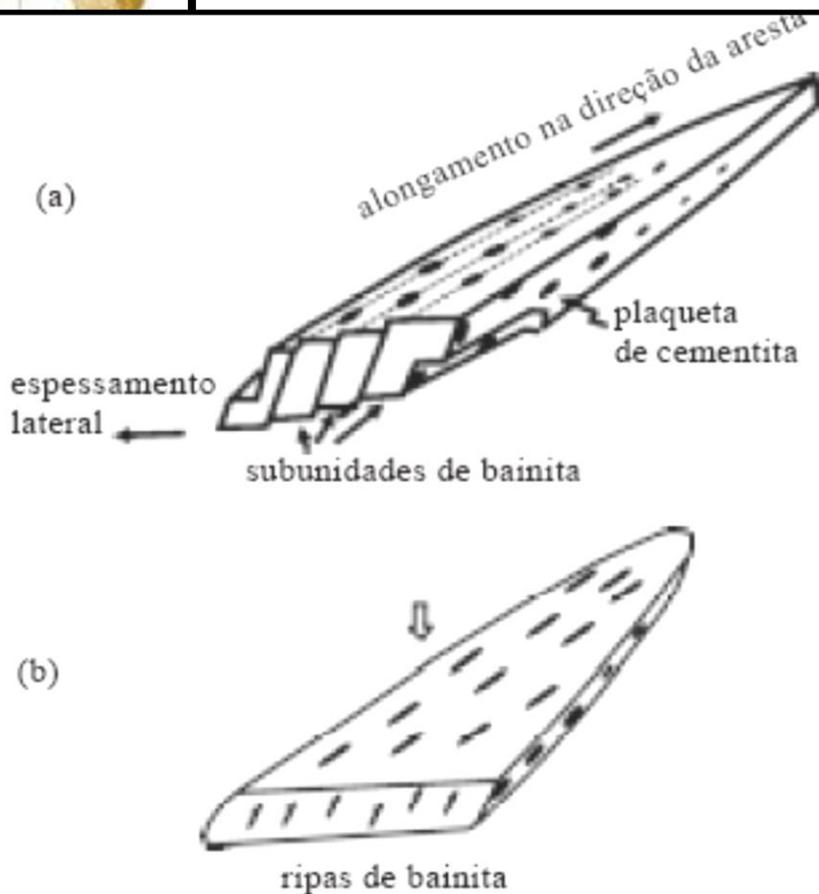


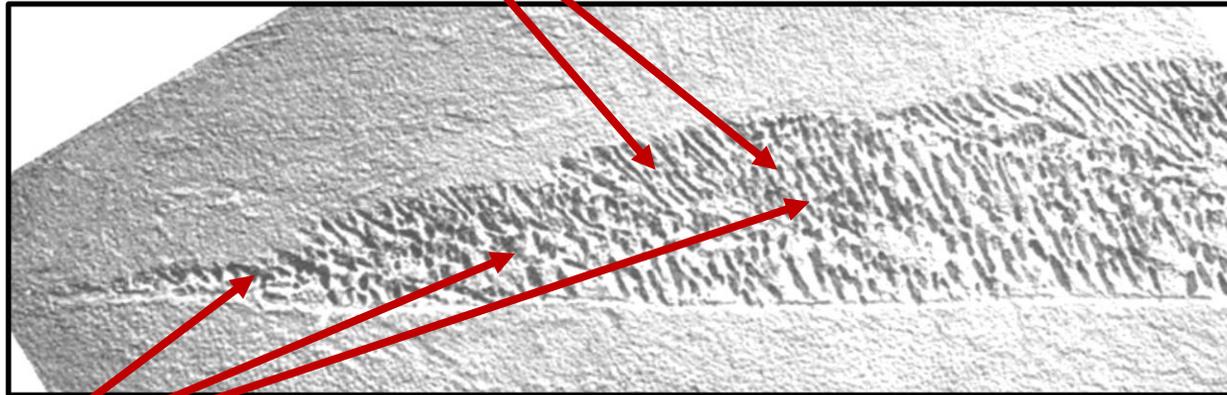
Figura 2 Esquema da precipitação de carbonetos na interface ferrita/austenita na bainita inferior, segundo Ohmori [56]

(Goldenstein, 2002)



BAINITA INFERIOR: IMAGEM DE MET

Carbonetos em 60°.

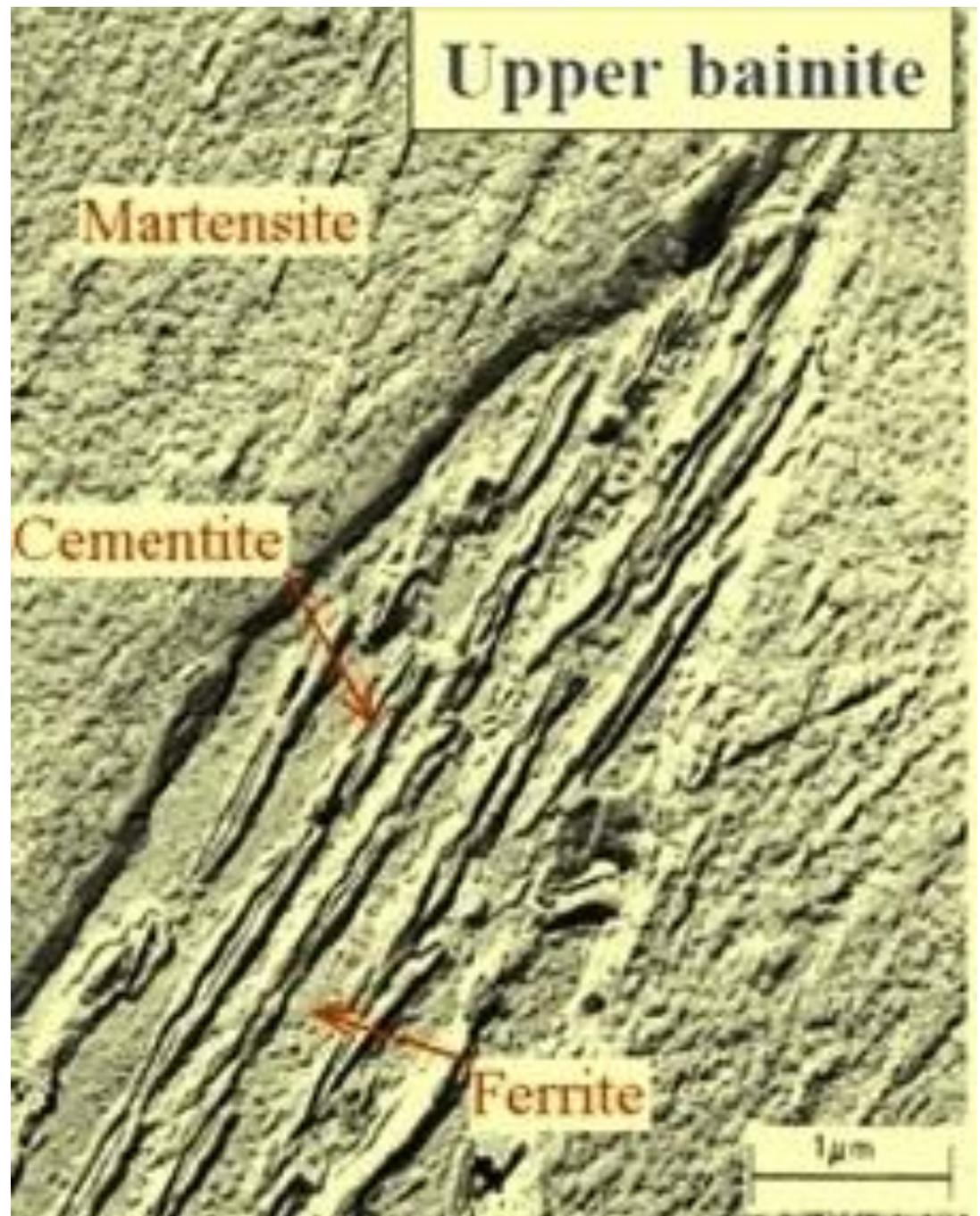


Subunidades

Bainita inferior: difusão de curto alcance do carbono - carbonetos em 60° (MET).



**BAINITA SUPERIOR:
IMAGEM DE MET**

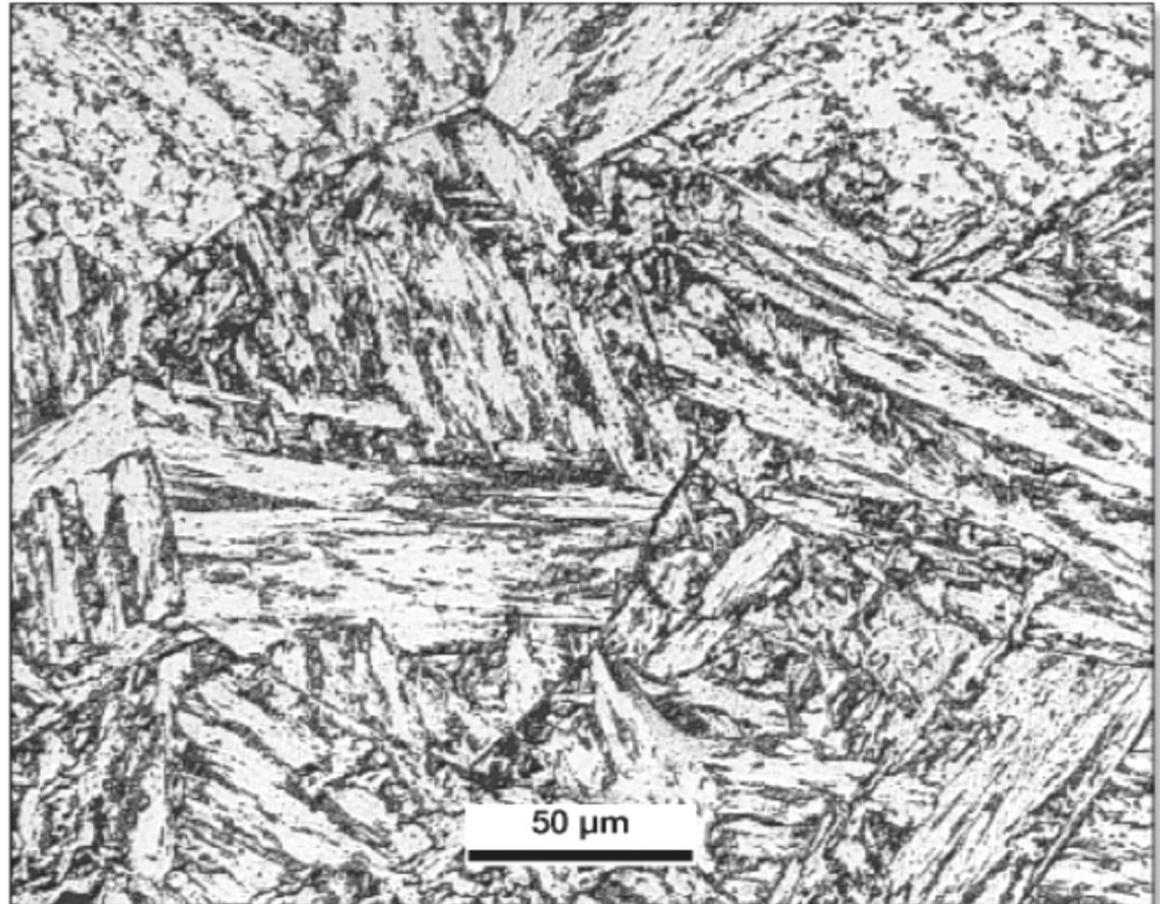




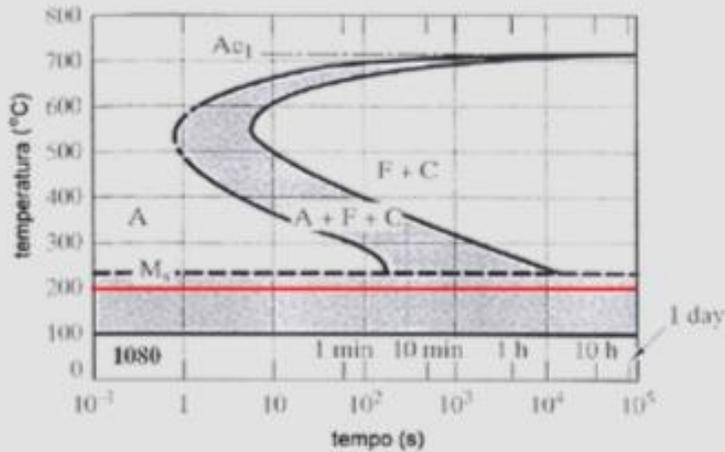
BAINITA EM MO-MUITO PARECIDA COM A MARTENSITA.
Não é possível saber se é superior ou inferior, sem saber qual o tratamento, temperatura, tempo, composição do aço, etc.

Figura 9.26

Bainita em aço baixa liga ASTM A 533 Cl.1 com C = 0,2%, Mn = 1,38%, Si = 0,25%, Ni = 0,83%, Mo = 0,49% (mesmo aço da Figura 9.15) resfriado continuamente a $0,1^{\circ}\text{C/s}$. Início da transformação: 590°C . Ataque: Nital 2%. Os contornos de grão austeníticos anteriores são visíveis. Cortesia B. Marini, CEA, França [19].



TRANSFORMAÇÃO ISOTÉRMICA DE LIGA FE-C (Estrut. Martensita)

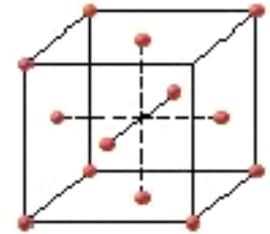


Transformação isotérmica a 200 °C
Estrutura: martensítica

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. Como consequência disso, ocorre a transformação polimórfica mostrada ao lado.
- Como a martensita não envolve difusão, a sua formação ocorre instantaneamente (independente do tempo).

AUSTENITA



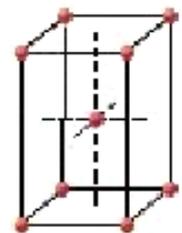
Cúbico
de face centrada

**TRANSFORMAÇÃO
ALOTRÓPICA COM
AUMENTO DE VOLUME,**

**que leva à concentração de
tensões**



MARTENSITA



tetragonal
de corpo
centrado



MARTENSITA

- Sendo uma fase fora de equilíbrio, a martensita não aparece no diagrama de fases ferro – carboneto de ferro
- 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
- Duas microestruturas são encontradas; em ripas e lenticular (placas)

MARTENSITA EM FORMA DE RIPAS

- Para ligas que contêm menos do que cerca de 0,6% de C, a fase martensita se forma como ripas.
- São placas longas e finas, tais como as lâminas de uma folha
- Os detalhes microestruturais são muito finos e técnicas de micrografia eletrônica devem ser aplicadas para a análise dessa microestrutura





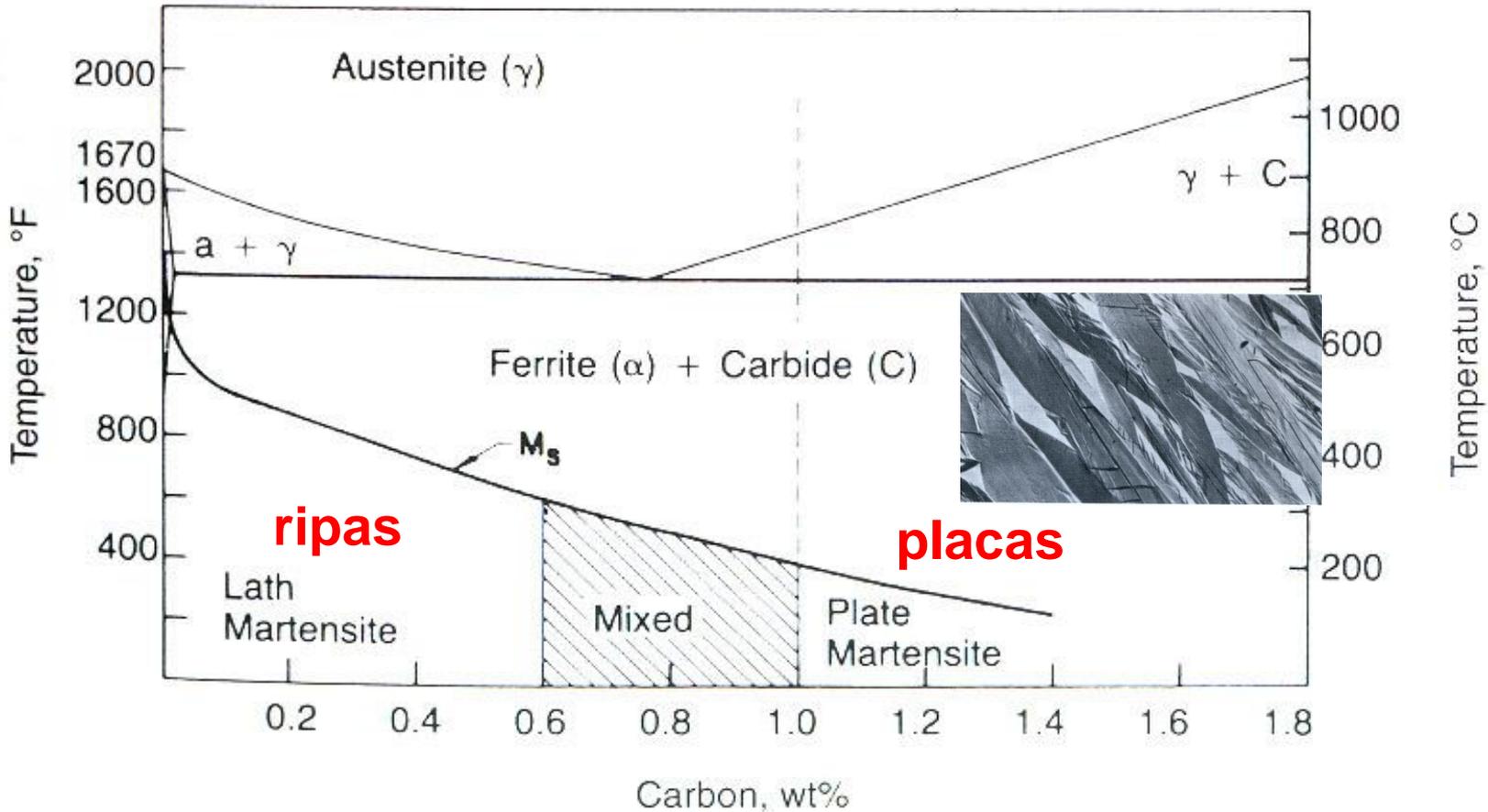
MARTENSITA EM FORMA LENTICULAR (PLACAS)

- A martensita lenticular (ou em placas) é encontrada em ligas ferro-carbono com concentrações maiores que 0,6% de C
- Na fotomicrografia pode-se observar a martensita em forma de agulhas (regiões escuras) e austenita que não se transformou durante o resfriamento (regiões claras) denominada austenita retida, pois esta presente a temp. ambiente.





Temperatura de Transformação Martensítica

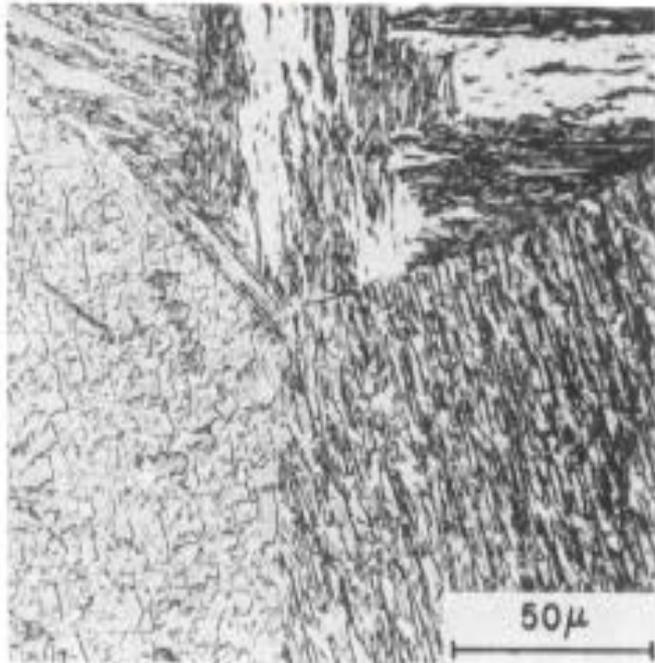


Formas de martensita (ripas e placas) em função do teor de carbono.



Microestrutura da Transformação Martensítica em Aços Carbono

~0.6%C



(a)

~0.2%C



(b)

~1.2%C



(c)



Diferença Microestrutural – Martensita Placa (Lenticular) X Ripa

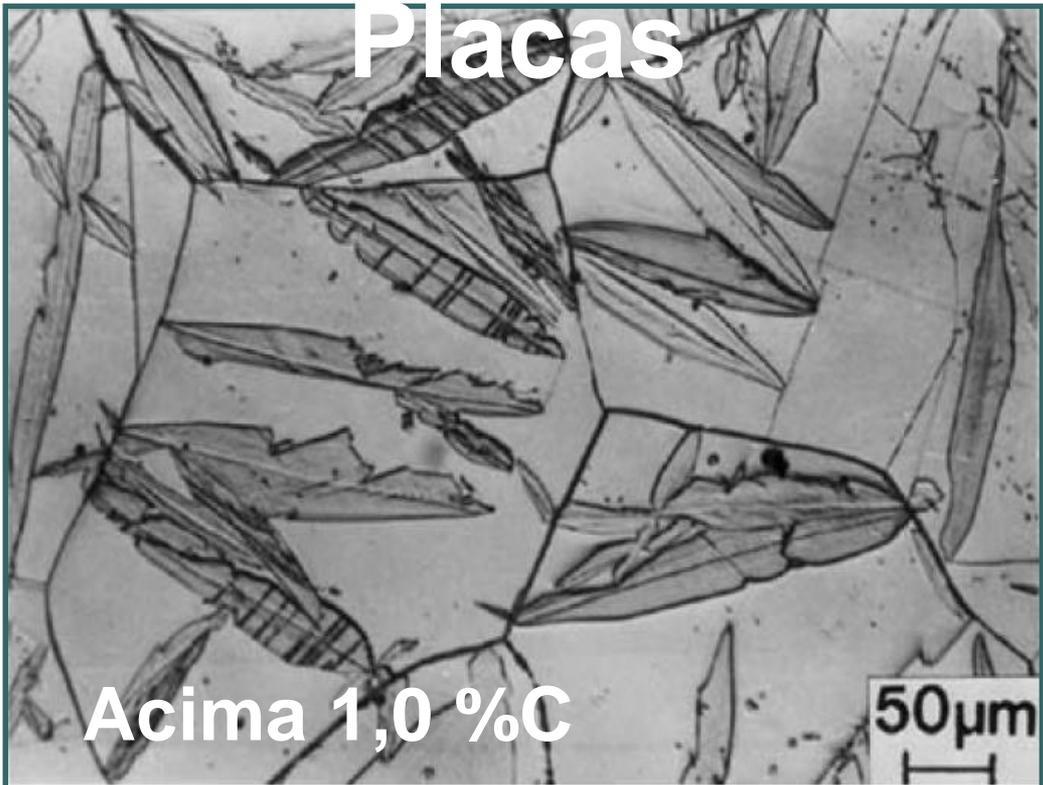
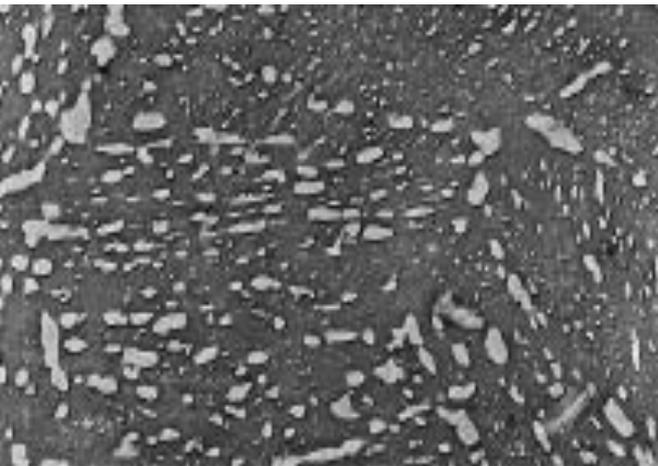


Fig. 5.25 Lath martensite in an Fe-0.2C alloy. Two packets, each with two variants of laths, are shown. Transmission electron micrograph.
Source: Ref 5.49

MARTENSITA REVENIDA



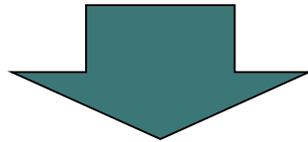
- No estado temperado, a martensita, além de ser mais dura, é tão frágil que não pode ser utilizada para a maioria das aplicações
- As tensões internas que possam ter sido introduzidas durante a têmpera tem um efeito de enfraquecimento
- A ductilidade e a tenacidade podem ser aprimoradas e as tensões internas aliviadas por meio de um tratamento de revenimento
- O revenido é conseguido através do aquecimento de um aço martensítico até uma temperatura abaixo do eutetóide durante um intervalo de tempo específico



MARTENSITA REVENIDA

Revenimento: o carbono difunde para fora dos interstícios da rede do ferro e de combina com ele para formar carbonetos

Martensita (TCC,monofásica)



Martensita Revenida (Fases
Ferrita + Fe_3C)

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 TTT, TRC E TRATAMENTO TÉRMICOS

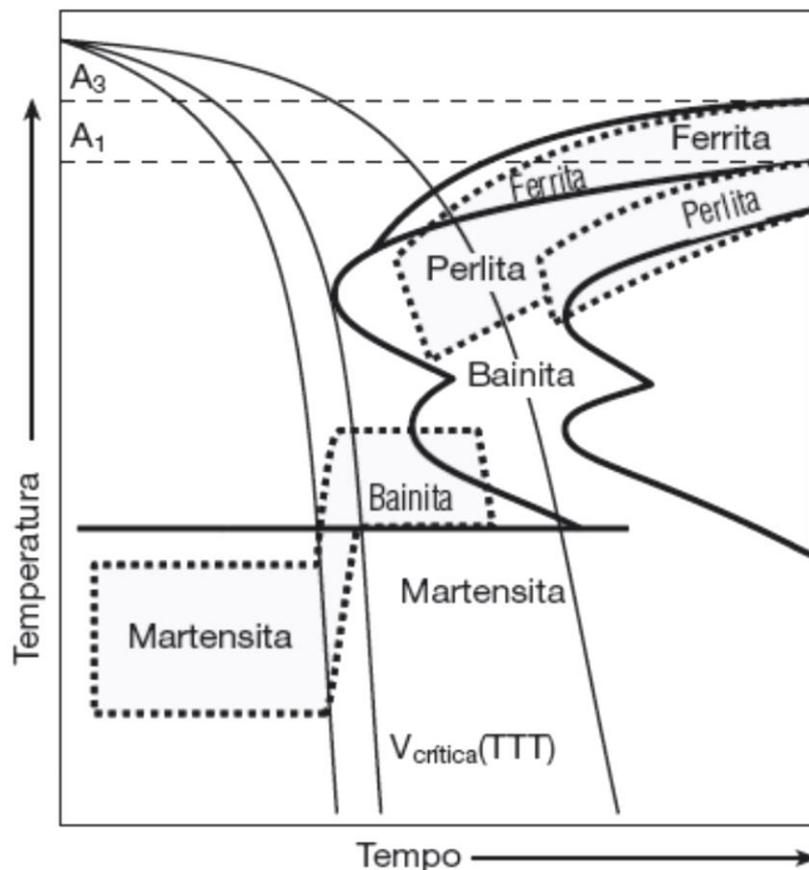


Figura 9.36

Apresentação esquemática de uma curva CCT (tracejada) superposta à curva TTT do mesmo aço (linhas sólidas). A velocidade necessária para evitar o “nariz” da curva TTT não é, exatamente, a velocidade crítica para garantir a formação de martensita. Alguns pontos do diagrama TTT seriam inacessíveis através de resfriamento contínuo. Adaptado de [12].

(Colpaert)

**EM RESFRIAMENTO CONTÍNUO: CURVAS TTT ≠ TRC –
CINÉTICA É DIFERENTE!**

CURVAS TTT, TRC E TRATAMENTO TÉRMICOS

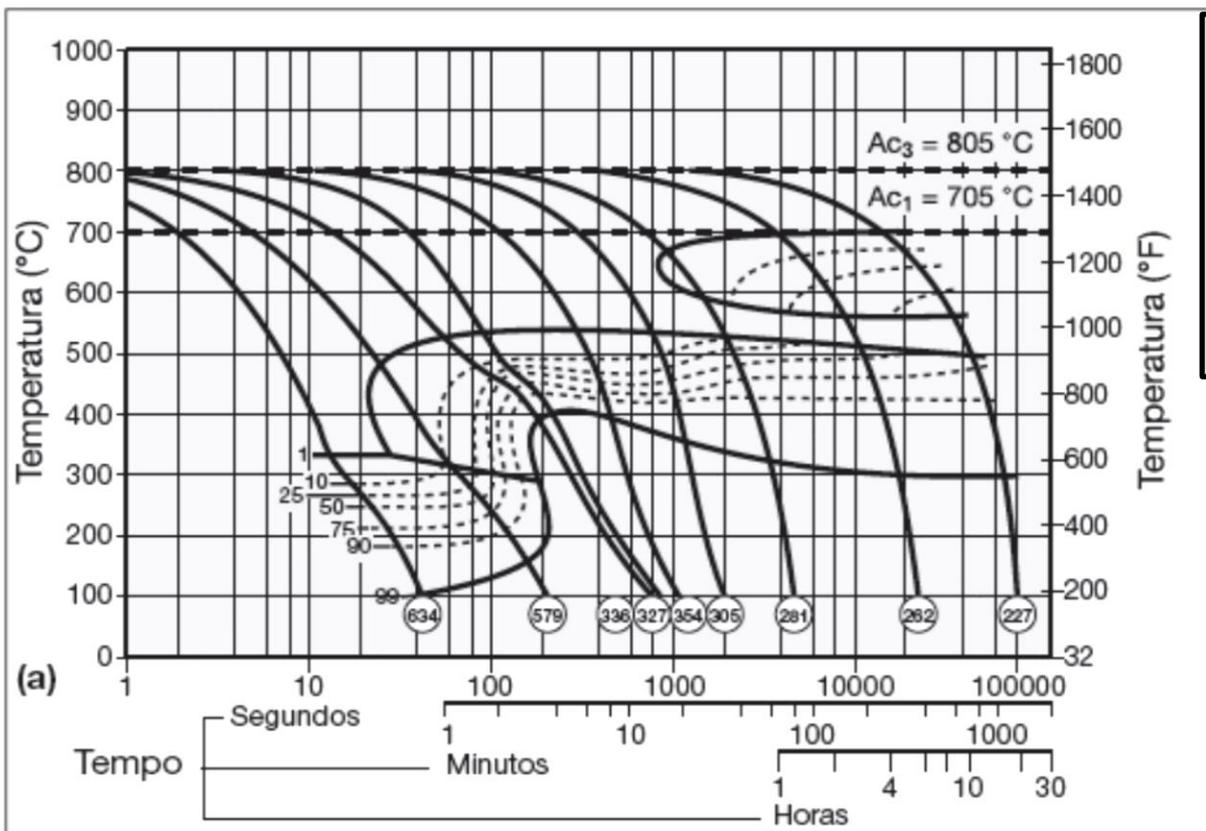


Figura 9.35

(a) Diagrama CCT tempo versus temperatura para um aço com C = 0,39%, Mn = 1,45% e Mo = 0,49% (adaptado de [36]). Cada velocidade de resfriamento é representada por uma curva sobre o gráfico T vs t. Os valores de dureza final obtidos são, freqüentemente, indicados para cada taxa de resfriamento.

(Colpaert)

EIXO HORIZONTAL :TEMPO

CURVAS TTT, TRC E TRATAMENTO TÉRMICOS

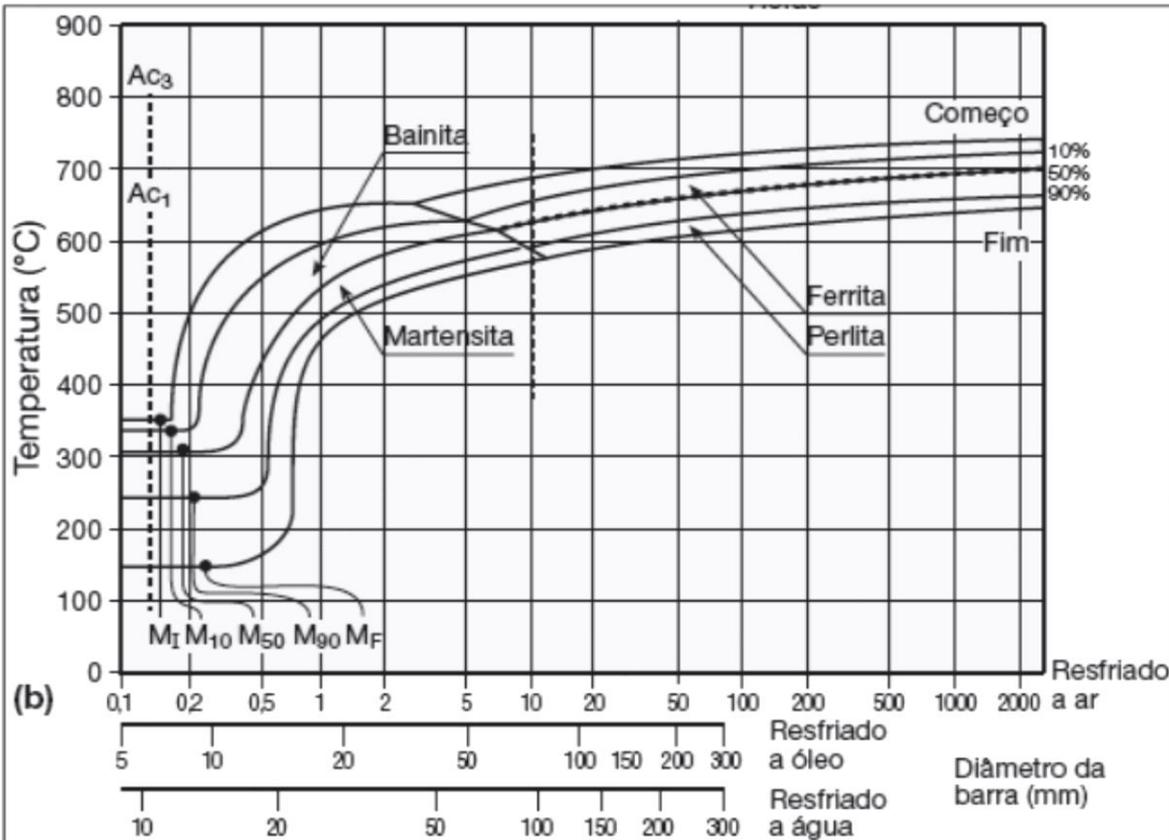


Figura 9.35 (Continuação)

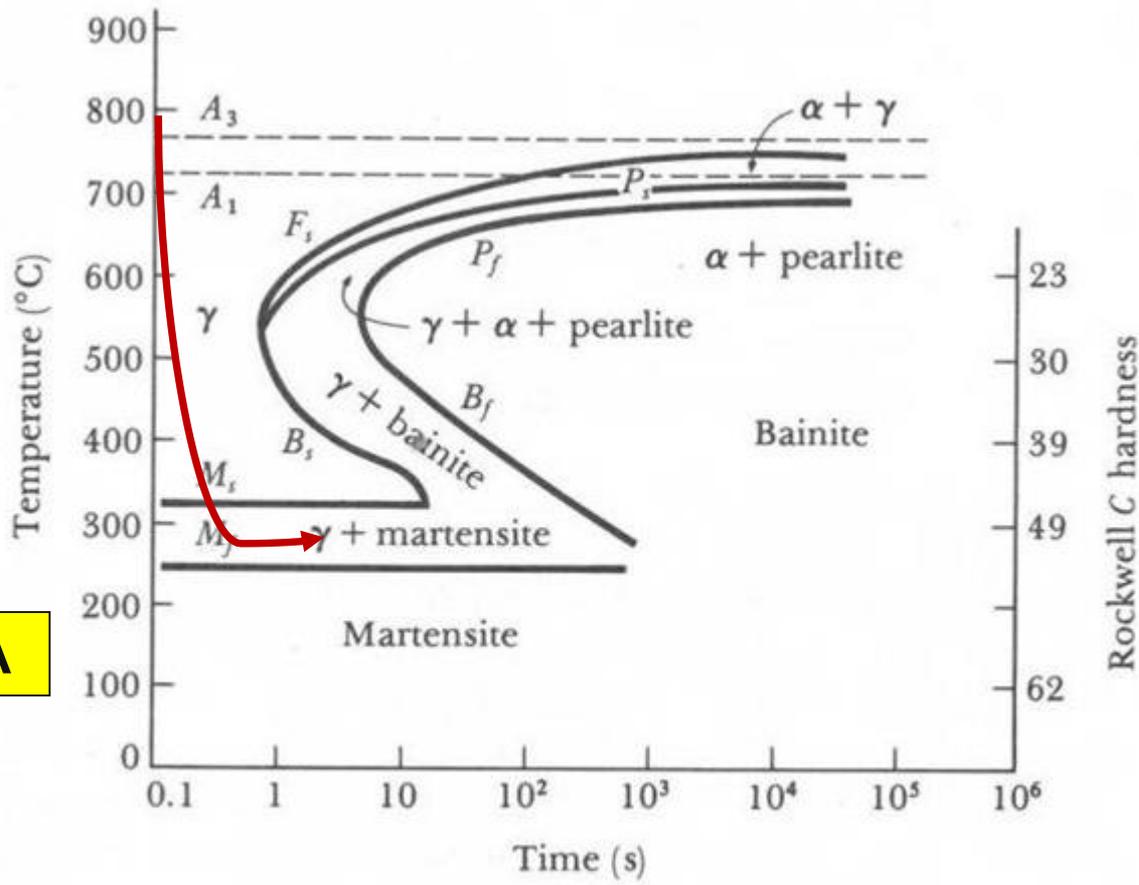
(b) Diagrama CCT taxa de resfriamento versus temperatura para um aço com C = 0,38%, Mn = 0,6% (adaptado de [37]). Cada velocidade de resfriamento é representada por uma linha vertical sobre o gráfico T vs dT/dt.

(Colpaert)

EIXO HORIZONTAL : TAXA DE RESFRIAMENTO



Aço Hipoeutetóide

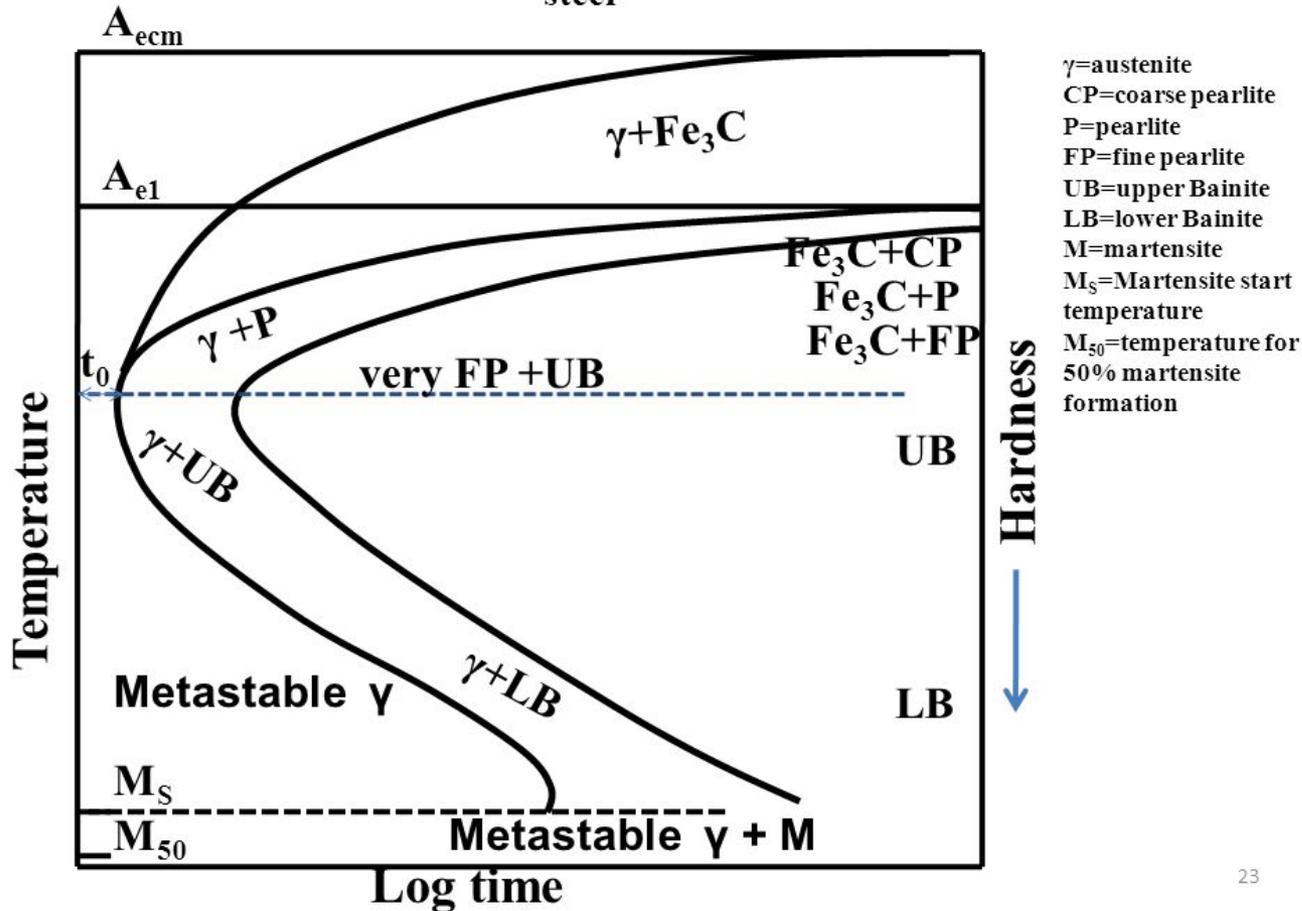


TÊMPERA

TTT curve for carbon steel AISI 1050

Aço Hipereutetóide

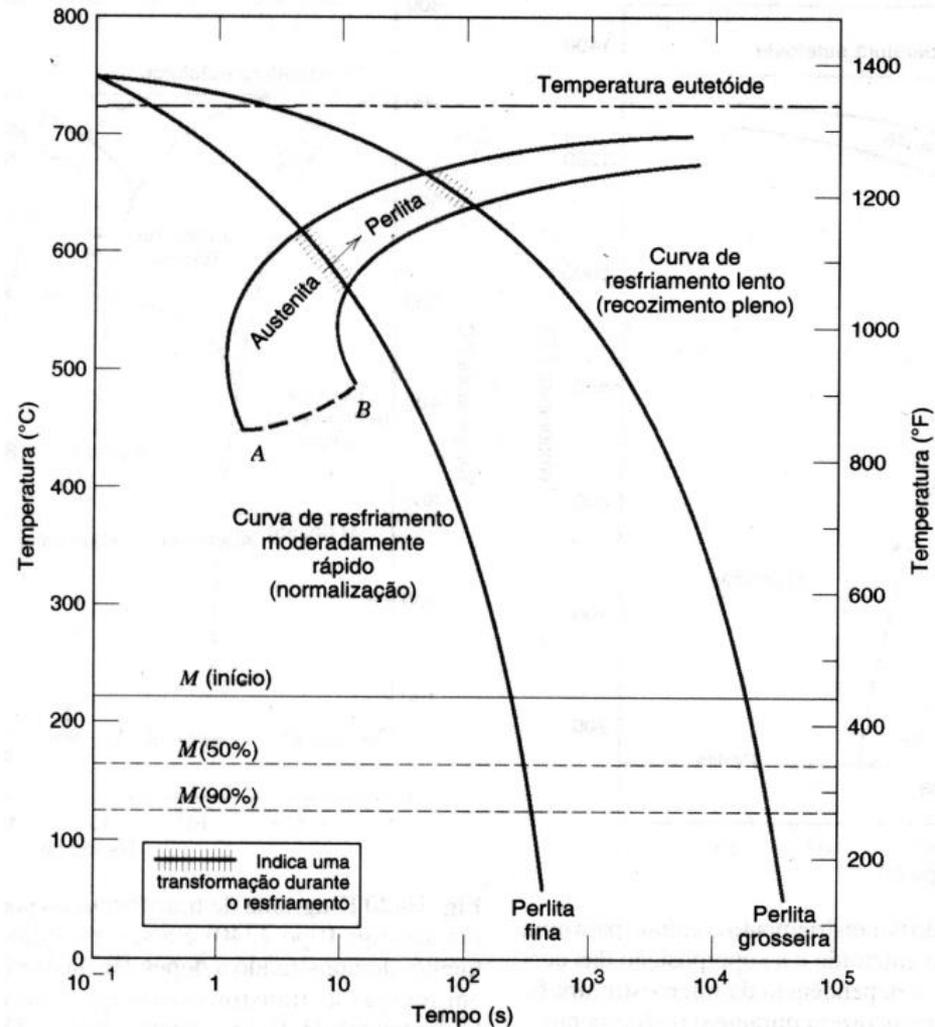
Fig. 7(b): Schematic TTT diagram for plain carbon hypereutectoid steel





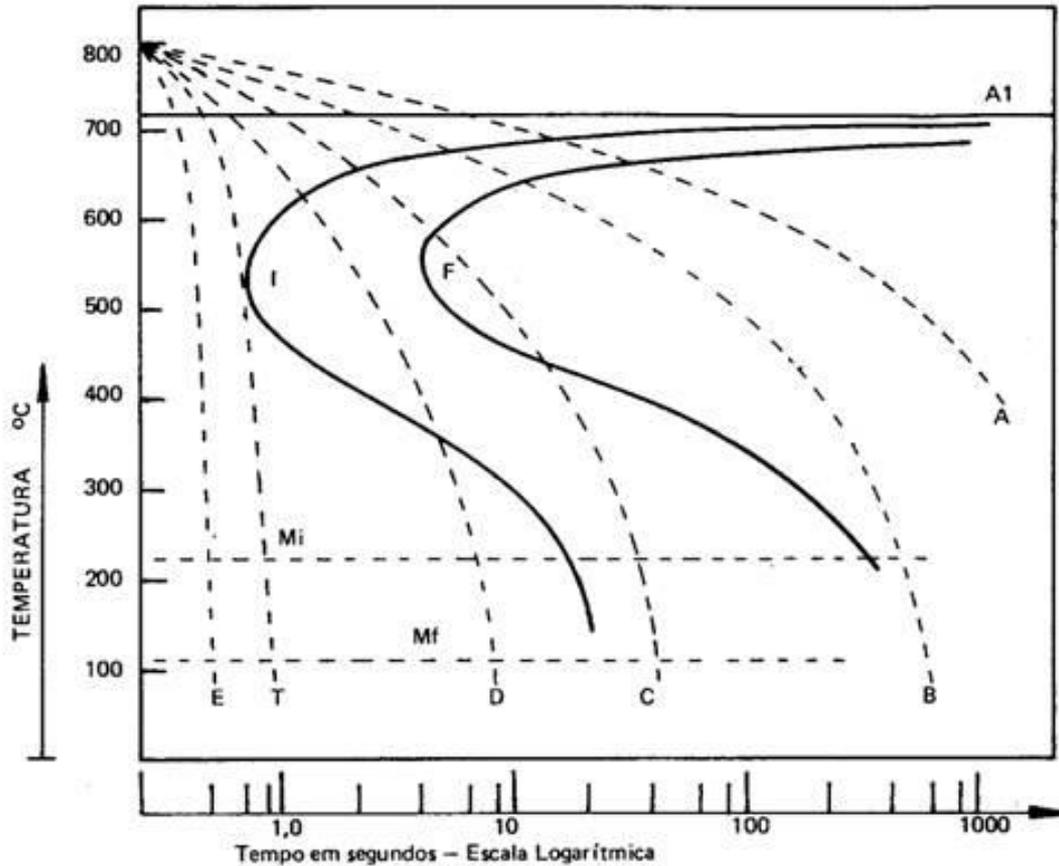
RESFRIAMENTO CONTÍNUO

- A transformação tem início após um período de tempo que corresponde à intersecção da curva de resfriamento com a curva de início da reação, e termina com o cruzamento da curva com o término da transformação
- Normalmente, não irá se formar bainita para aços ferro-carbono resfriados continuamente, pois toda a austenita se transformará em perlita
- Para qualquer curva de resfriamento que passe por AB a austenita não reagida transforma-se em martensita





RESFRIAMENTO CONTÍNUO



- 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

TÊMPERA E REVENIMENTO

(Costa e Silva & Mei)

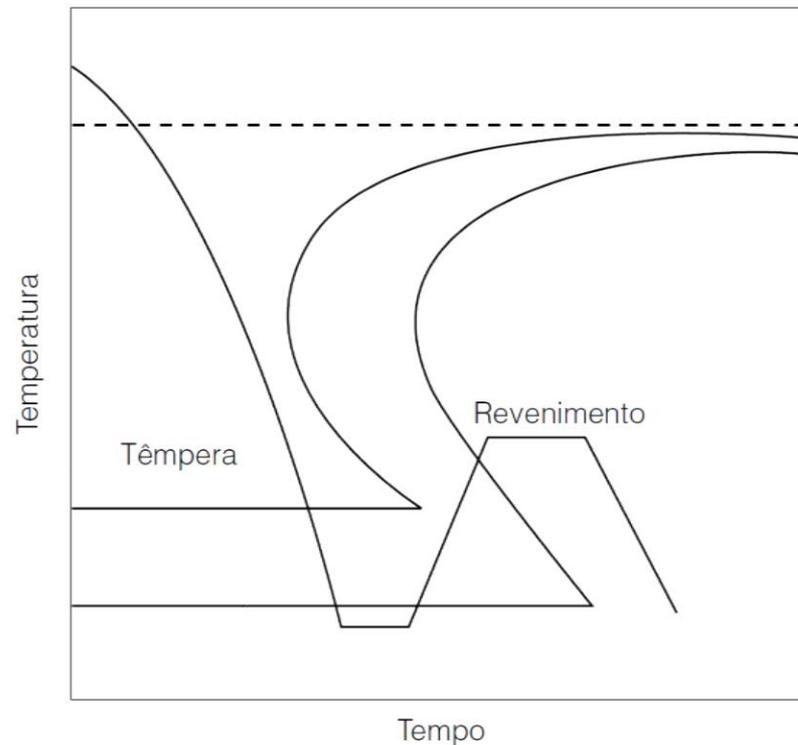


Figura 3.34 Ciclo de têmpera + revenimento.

TÊMPERA E REVENIMENTO

TÊMPERA

MARTÊMPERA

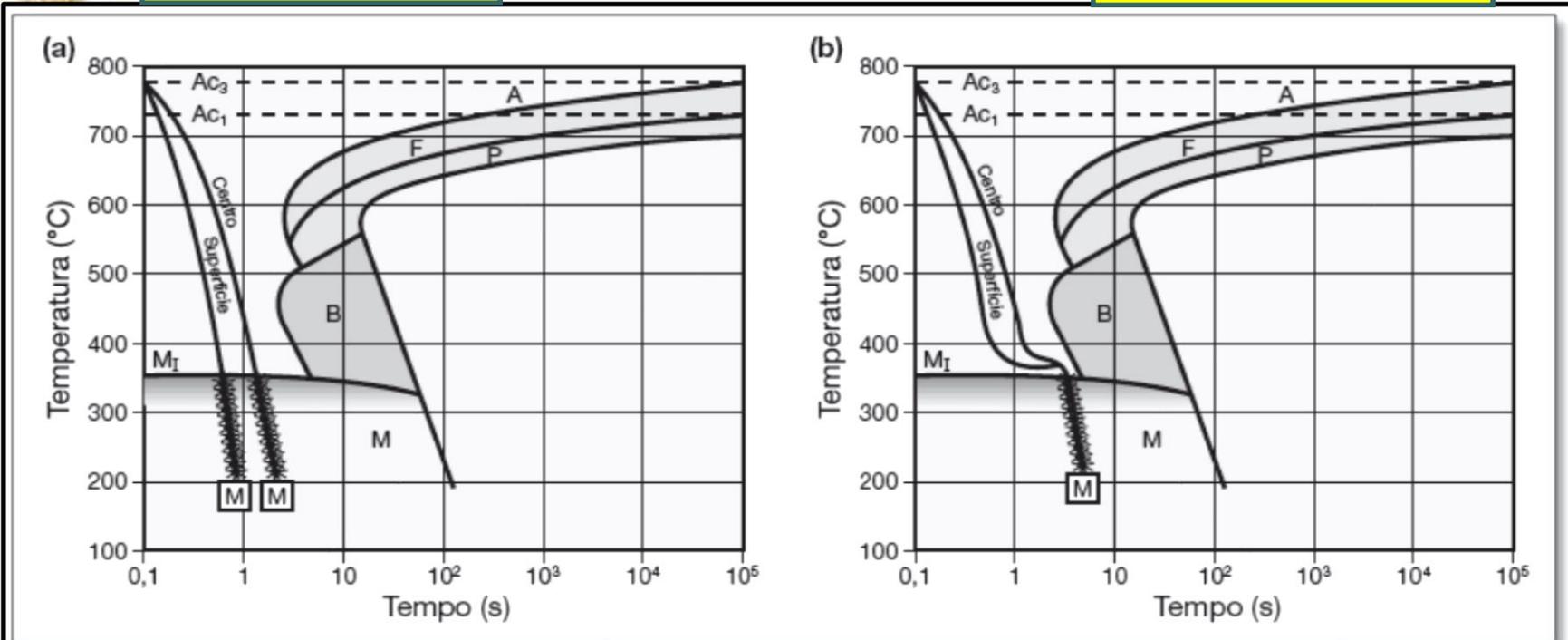


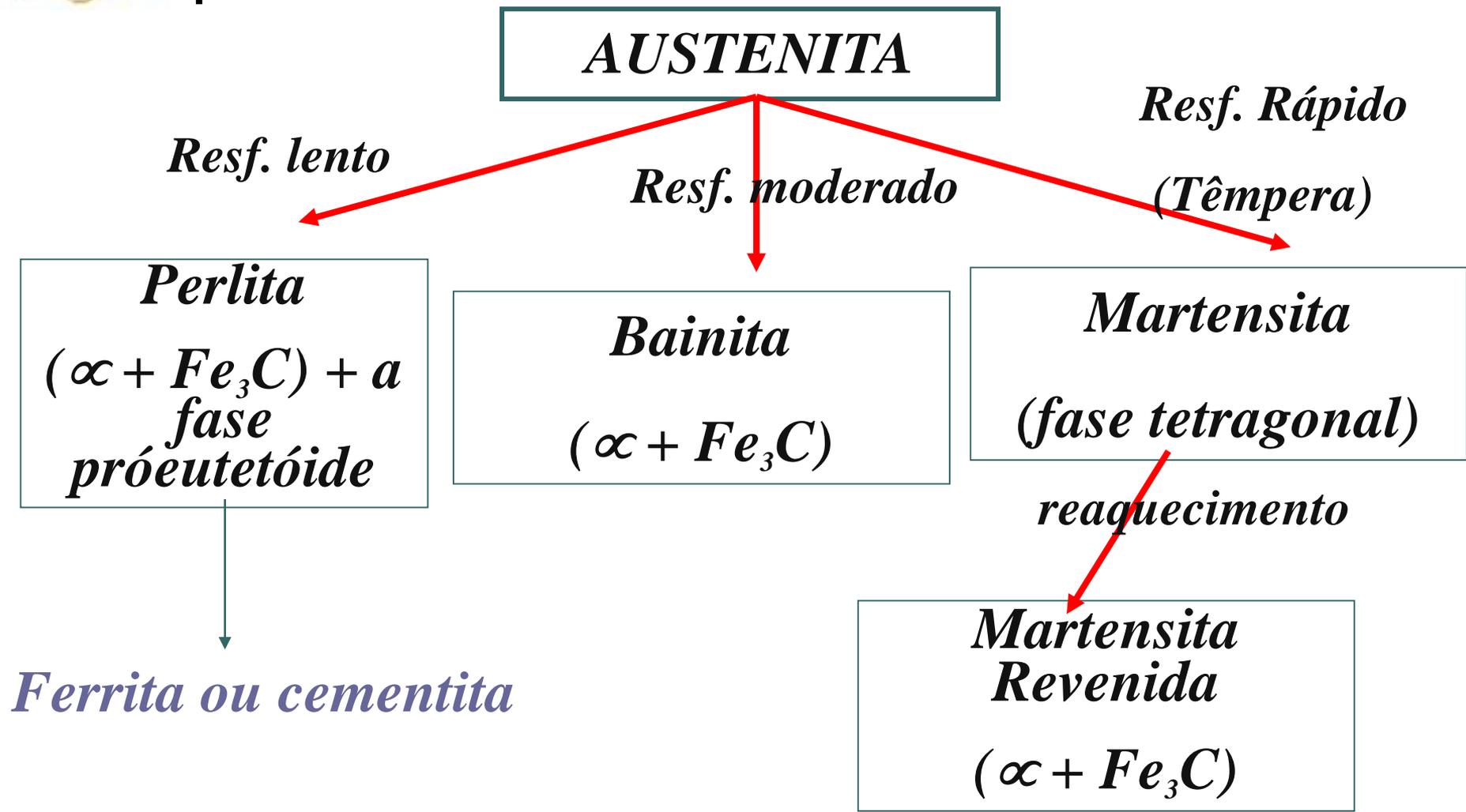
Figura 10.79

Em uma têmpera (a), a superfície e o núcleo da peça atingem a temperatura M_I em momentos diferentes, aumentando as tensões de têmpera. Na martêmpera (b), um breve tratamento isotérmico intermediário permite homogeneizar a temperatura da peça antes de atingir a temperatura M_I , reduzindo sensivelmente as tensões de têmpera.

(Colpaert)

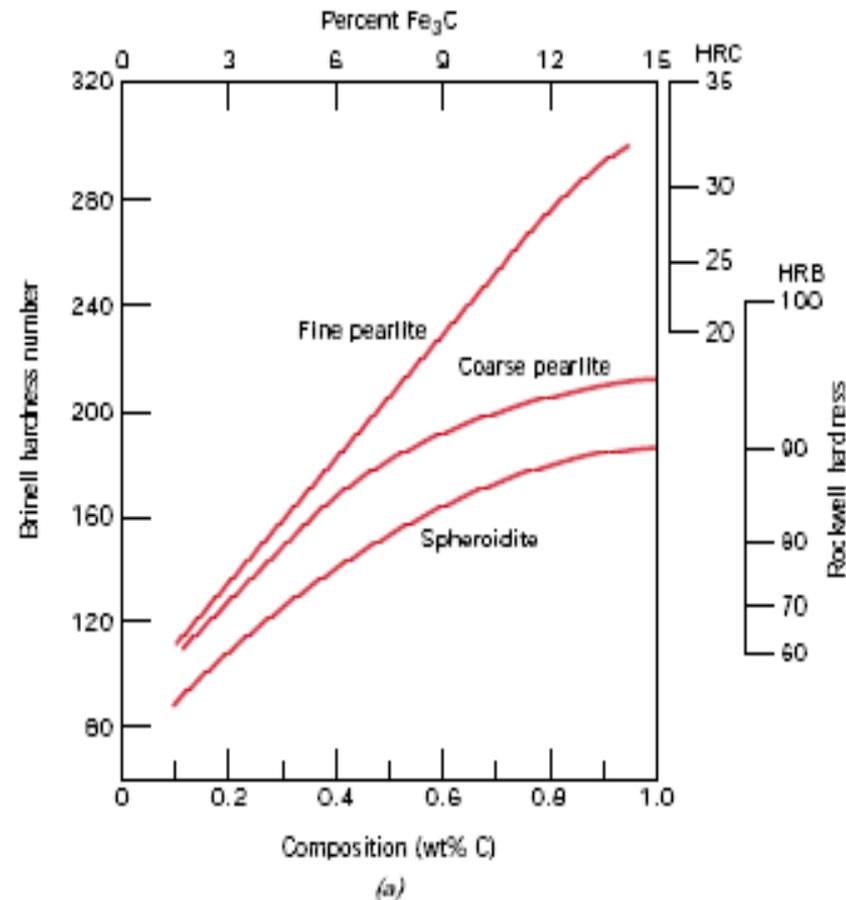


Resumo Transformações



PROPRIEDADES MECÂNICAS

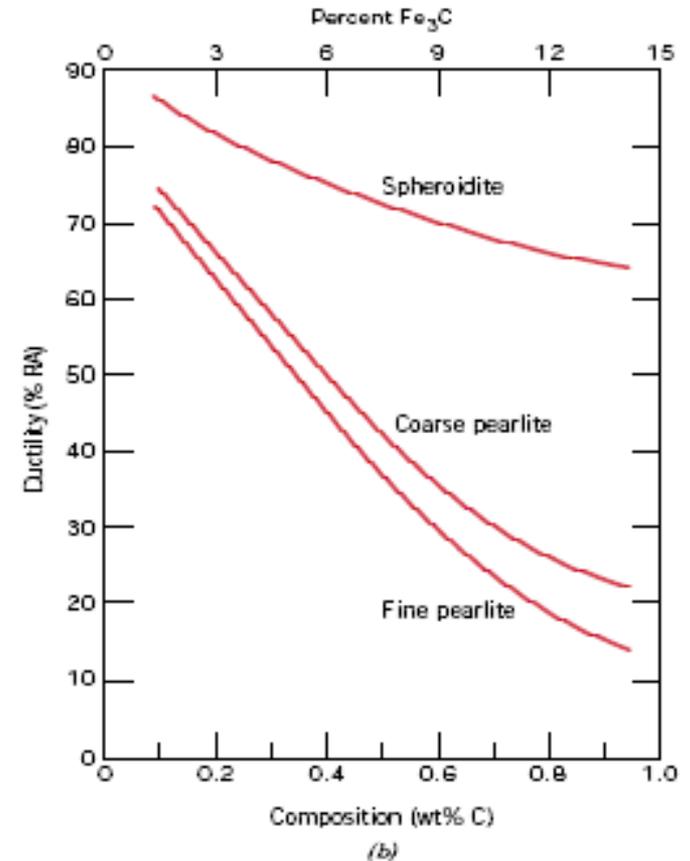
- A cementita é mais dura, porém mais frágil do que a ferrita. Dessa forma aumentando a fração de Fe_3C irá resultar em um material mais duro e mais resistente.
- A espessura da camada de cada fase também influencia. A perlita fina é mais dura e mais resistente que a perlita grosseira. A perlita fina possui maior restrição ao movimento de discordâncias e um maior reforço de cementita na perlita, devido à maior área de contornos de fases
- Na esferoidita existe uma menor área de contornos e menor restrição de discordâncias, portanto é menos dura e menos resistente





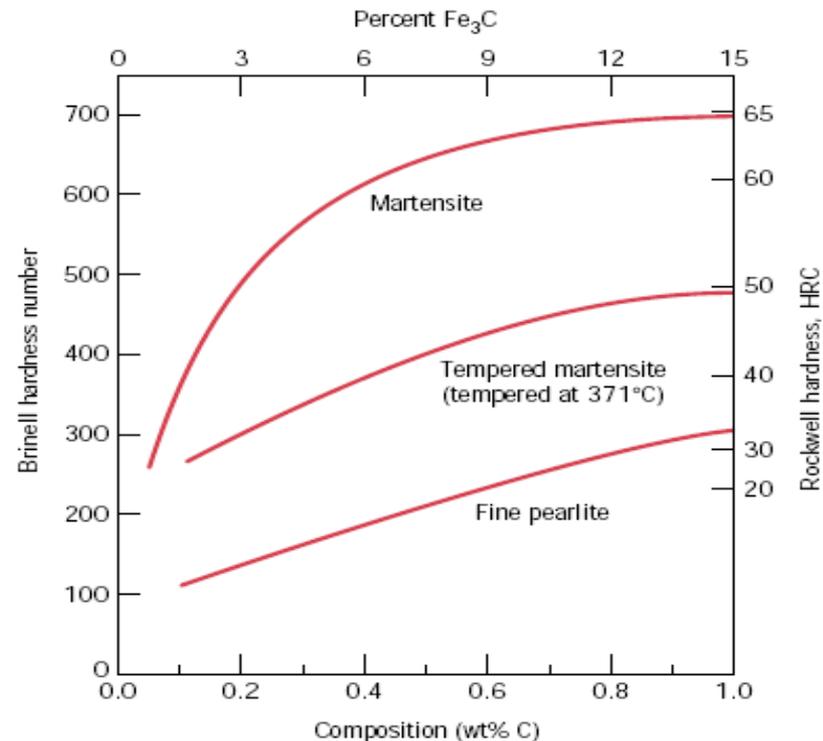
PROPRIEDADES MECÂNICAS

- Uma vez que a cementita é mais frágil, o aumento do seu teor resultará em uma diminuição de ductilidade nos aços;
- Os aços com perlita grosseira são mais dúcteis do que os com perlita fina, pois na perlita fina existe uma maior restrição à deformação plástica;
- O aço esferoidizado é extremamente dúctil, muito mais do que aqueles que apresentam perlita fina e perlita grosseira. Além disso são extremamente tenazes, pois a forma de esfera tem menor caráter concentrador de tensão.



PROPRIEDADES MECÂNICAS

- A martensita é mais dura, mais resistente e mais frágil. A sua dureza depende do teor de carbono para aços com até aproximadamente 0,6% de C
- Essas propriedades são atribuídas aos átomos de carbono intersticiais que restringem o movimento de discordâncias
- A martensita revenida (Ferrita+Fe₃C) possui partículas de cementita extremamente pequenas, o que lhe dá uma melhor ductilidade e tenacidade



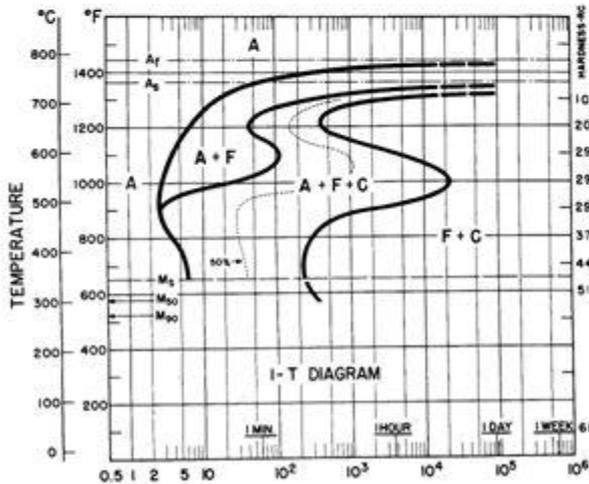
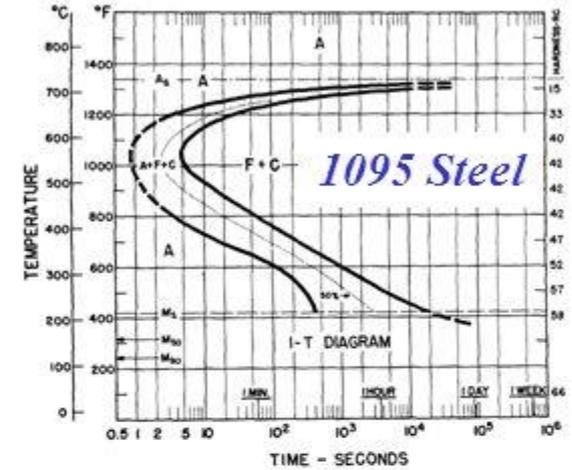
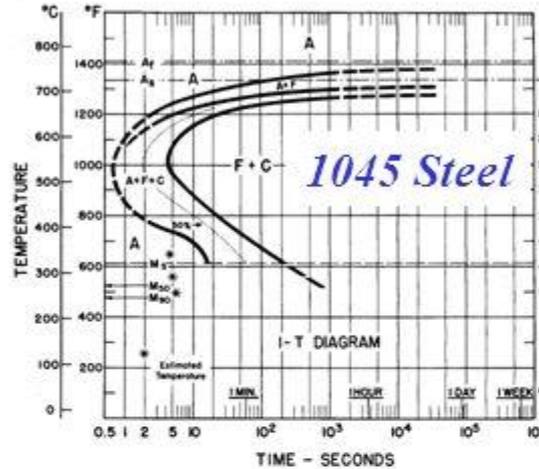
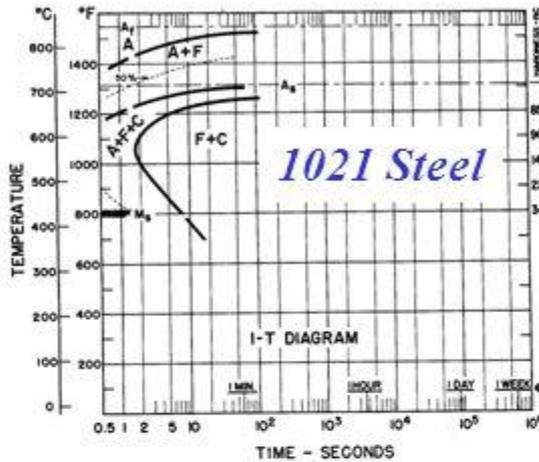


FATORES QUE AFETAM A POSIÇÃO DAS CURVAS TTT NOS AÇOS

- Teor de carbono
- Tamanho do grão da austenita
- Composição química (elementos de liga)

Representative TTT Diagrams

Presence of other alloying elements



4140 Steel

Mn 0.77

Cr 0.98

Mo 0.21

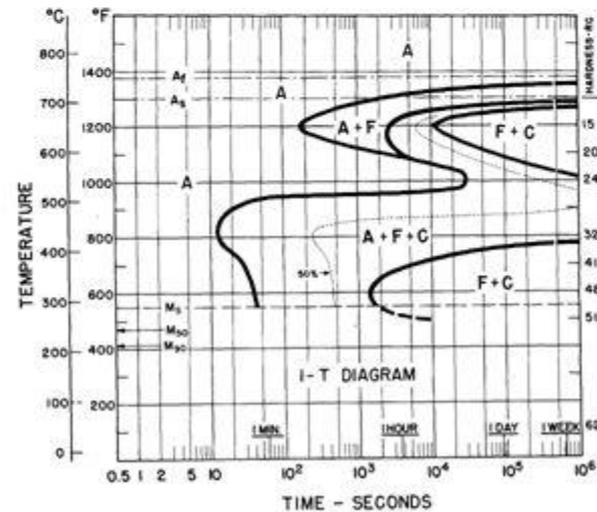
4340 Steel

Mn 0.78

Cr 0.80

Mo 0.33

Ni 1.79





TAMANHO DE GRÃO DA AUSTENITA

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



Tamanho de grão grande dificulta a formação da perlita, já que a mesma inicia-se no contorno de grão



Então, tamanho de grão grande favorece a formação da martensita



TAMANHO DE GRÃO DA AUSTENITA

No entanto deve-se evitar tamanho de grão da austenita muito grande porque:

- Diminui a tenacidade
- Gera tensões residuais
- É mais fácil de empenar
- É mais fácil de ocorrer fissuras



HOMOGENEIDADE DA AUSTENITA

Quanto mais homogênea a austenita mais para a direita deslocam-se as curvas TTT

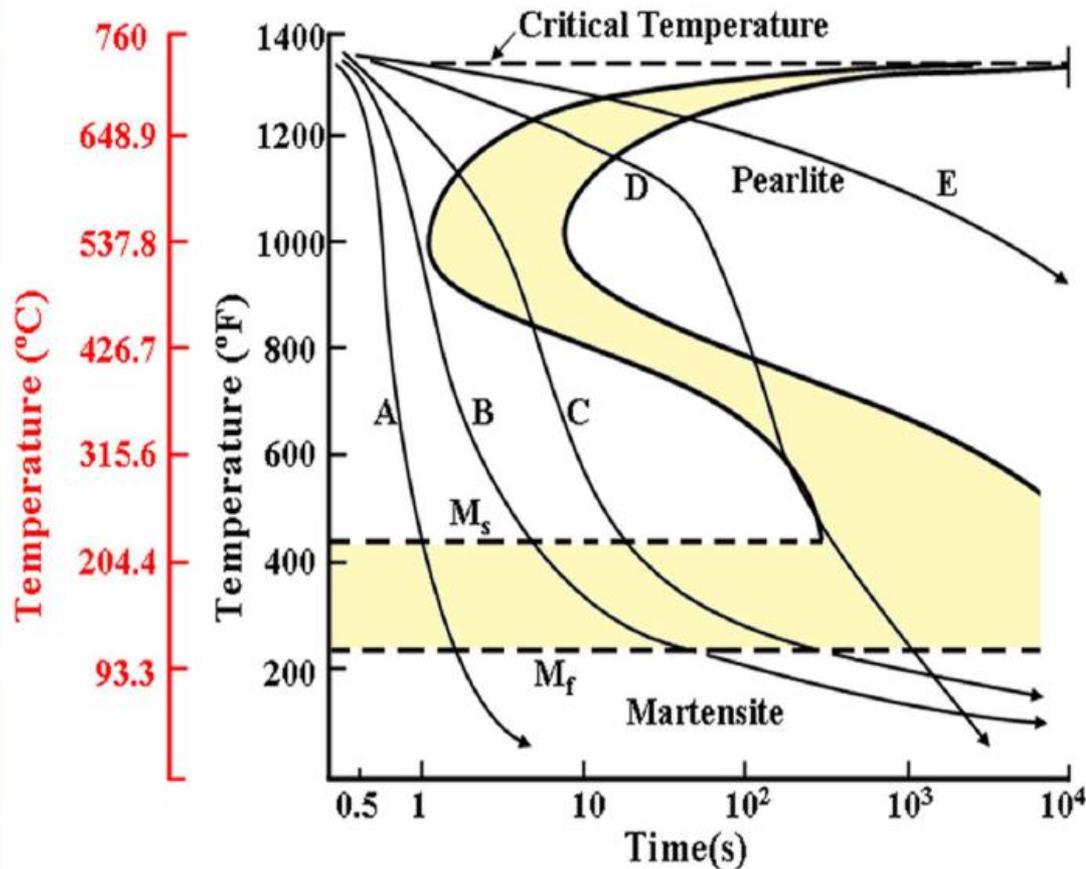


Os carbonetos residuais ou regiões ricas em C atuam como núcleos para a formação da perlita



Então, uma maior homogeneidade favorece a formação da martensita

Principais objetivos do meio de resfriamento



- *Produzir as transformações metalúrgicas desejadas;*
- *Evitar a formação de trincas;*
- *Minimizar distorções devido a não-uniformidade da transferência de calor.*

Meios de Têmpera mais empregados

Os meios de têmpera mais utilizados são

- Água
- Salmoura
- Óleo
- Ar
- Solução de polímeros
- Soda cáustica

Canale, L. C. F.; Crnkovic, O. R.; Canale, A.C.; Groessles, J. B. (1996). **Características de resfriamento de soluções de polímeros para têmpera**. M&M – Metalurgia e Materiais, 52 (455), 4p.

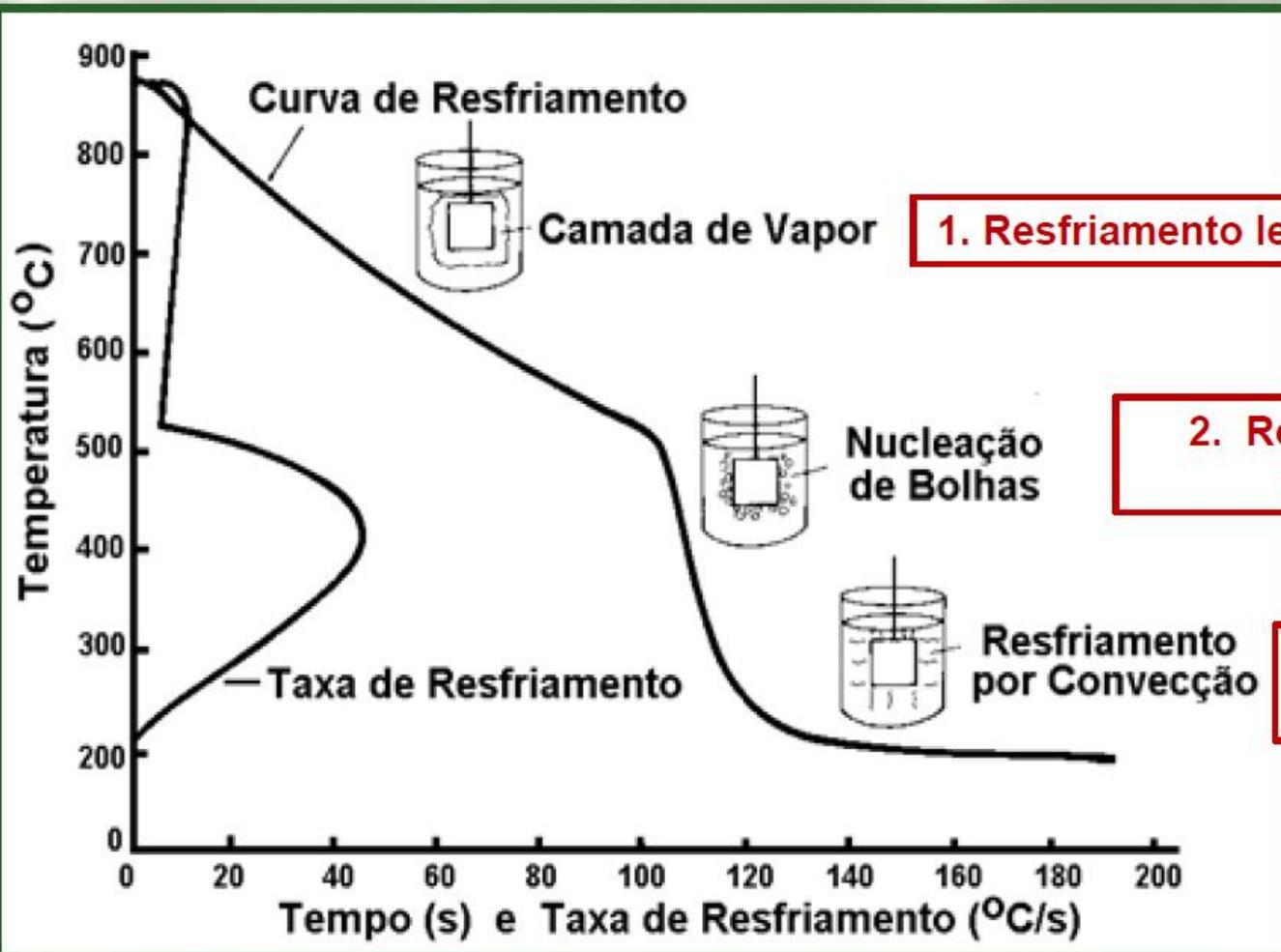
Canale, L. C. F.; Ruggieri, J. E.; Crnkovic, O. R.; Totten, G. E. (2002). **Quenching oils: classification of quench severity**. Heat Treatment of Metals, China, 27(2), 4p.

Canale, L. C. F.; Totten, G. E. (2005). **Quenching technology: a selected overview of the current state-of-art**. Materials Research, 8 (4), 5p.

Estágios de Resfriamento

- A têmpera em um meio líquido pode ocorrer em três estágios:
- 1º Estágio: quando o aço é introduzido forma-se uma camada de vapor que rodeia o metal e o resfriamento se faz por condução e radiação através da camada gasosa
- 2º Estágio: A película de vapor vai desaparecendo e dando lugar à formação e desprendimento de bolhas
- 3º Estágio: resfriamento se dá por condução e convecção. Durante este estágio ocorre a transformação martensítica

Estágios de Resfriamento



1. Resfriamento lento

2. Resfriamento rápido

3. Taxas lentas de resfriamento

Têmpera em água

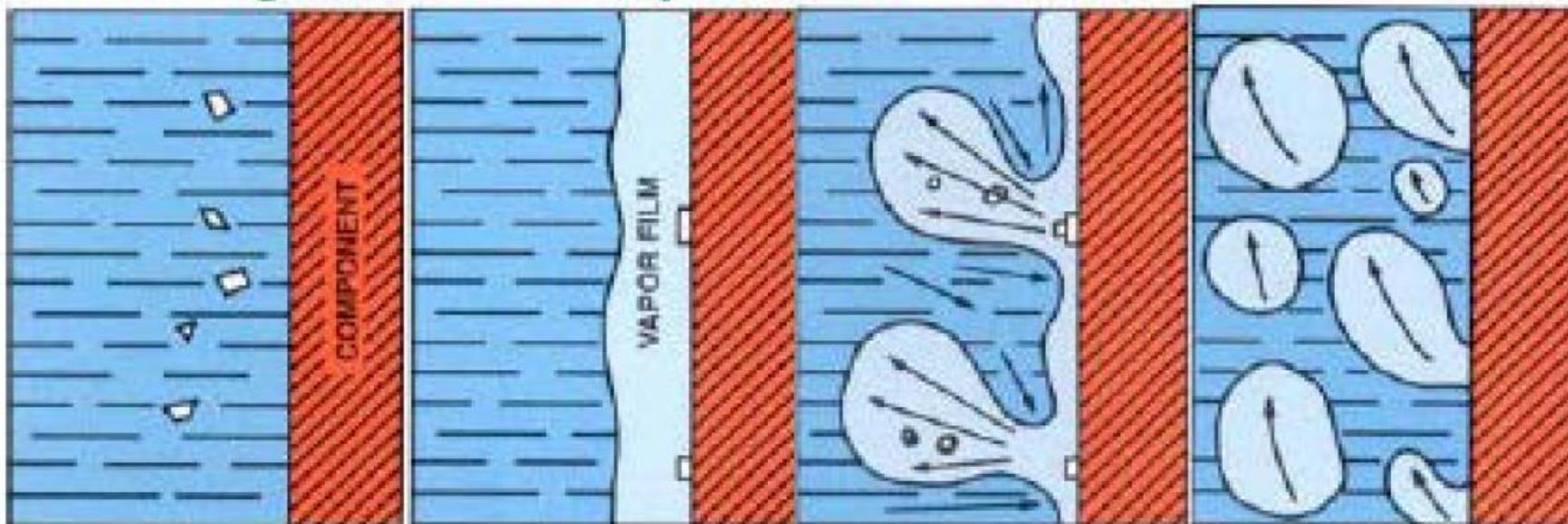
- A água atinge a máxima taxa de resfriamento e é usada quando não resulta em excessiva distorção ou trinca da peça
- Utilizada para o resfriamento de metais não ferrosos, aços inoxidáveis austeníticos
- Os valores mais elevados de dureza são obtidos com temperatura de 15° C a 25°C, pois acima dessa temperatura há o favorecimento de formação de estruturas mais moles pelo prolongamento do 1º estágio

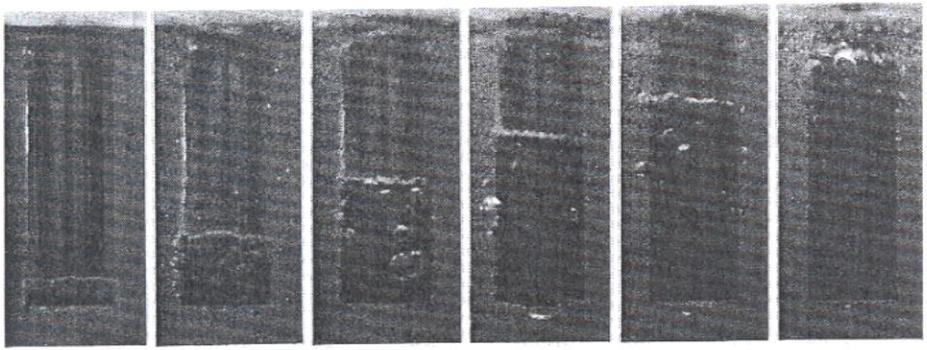
Têmpera em salmoura

- O termo salmoura refere-se à solução aquosa contendo diferentes quantidades de cloreto de sódio (NaCl) ou cloreto de cálcio (CaCl). As concentrações de NaCl variam entre 2 á 25%, entretanto, utiliza-se como referência a solução contendo 10% de NaCl.
- As taxas de resfriamento da salmoura são superiores às obtidas em água pura para a mesma agitação. A justificativa é que, durante os primeiros instantes da têmpera, a água evapora com contato com a superfície metálica e pequenos cristais de NaCl depositam-se nesta. Com o aumento da temperatura, ocorre a fragmentação destes cristais, gerando turbulência e destruindo a camada de vapor

Têmpera em salmoura

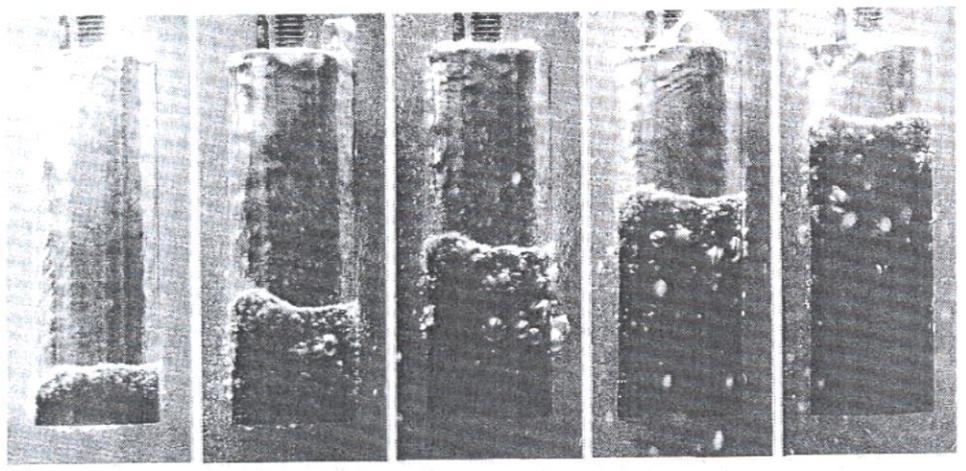
Evolução da têmpera em salmoura





2.42 s 3.48 s 4.65 s 5.89 s 6.78 s 7.96 s

(a)



0.89 s 1.58 s 2.35 s 2.89 s 3.88 s

(b)

Figure 11 Wetting process on the surface of a 1040 steel (15 mm diameter \times 45 mm) quenched from 850°C in water at 50°C (a) without forced convection and (b) with an agitation rate of 1 m/s.

Têmpera em salmoura

Principais vantagens:

- Taxa de resfriamento maior que da água
- Temperatura de têmpera menos crítica
- Resfriamento mais uniforme, ocasionando menor distorção das peças

Desvantagens:

- Controle das soluções
- Custo mais alto
- Natureza corrosiva da solução

Têmpera em óleo

- Os óleos de têmpera podem ser divididos em vários grupos baseado na composição, efeito de resfriamento e temperatura
- Óleos convencionais – sem adição de aditivos
- Óleos rápidos – mistura de óleos minerais, contém aditivos que fornecem efeitos de têmpera mais rápidos
- Óleos de martêmpera – altos efeitos de têmpera devido à aditivos aceleradores de velocidade
- Óleos solúveis – normalmente utilizados como fluidos refrigerantes, mas em concentrações de 3 a 15 % são utilizados em têmpera com efeitos similares à água

Têmpera em óleo - Considerações

- A maior parte dos óleos de têmpera apresentam taxas de resfriamento menores que as obtidas em água ou em salmoura, entretanto, nestes meios o calor é removido de modo mais uniforme, diminuindo as distorções dimensionais e a ocorrência de trincas
- Os óleos são normalmente usados na faixa de temperatura de 40 a 95° C
- Temperaturas mais altas causam envelhecimento
- Temperaturas mais baixas causam distorção na peça pelo efeito de tempera mais rápido e perigo de fogo pela alta viscosidade



Têmpera em solução de polímeros

- Essas soluções são utilizadas como meio intermediário entre água e óleo
- Isto porque a água se torna inadequada algumas vezes devido à formação de trincas enquanto que o óleo possui capacidade de extração de calor relativamente baixa
- Com a seleção de um polímero básico, através do controle de sua concentração e do procedimento de têmpera é possível cobrir toda uma faixa intermediária entre óleo e água com tão pequenos incrementos quanto se queira

Tipos de meios de resfriamento

Seleção do meio:

Distorções

X

Taxa de transferência de calor

A técnica que gera mínimas distorções não gera altas taxas de transferência de calor e vice-versa

Problemas relacionados a não uniformidade

Distorções e trincas

Tensões residuais

- Expansão – Contração
- Resistência – Temperatura
- Volume da fase transformada
- Severidade – Secção

Canale, L.C.F.; Totten, G.E. (2005). **Overview of distortion and residual stress due to quenching process part I: factors affecting quench distortion**. International Journal of Materials and Product Technology, 24 (1-4) 48p.



FIM