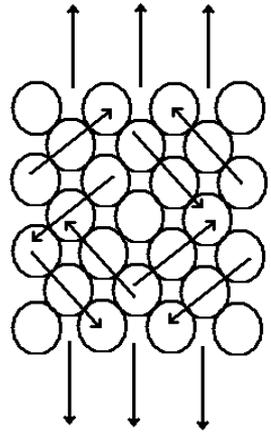
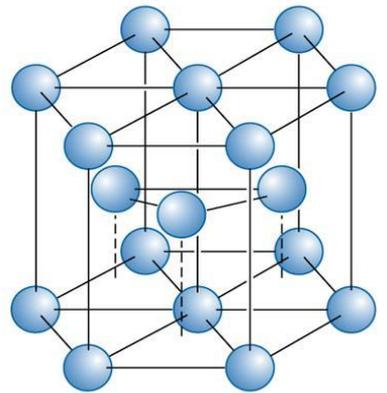
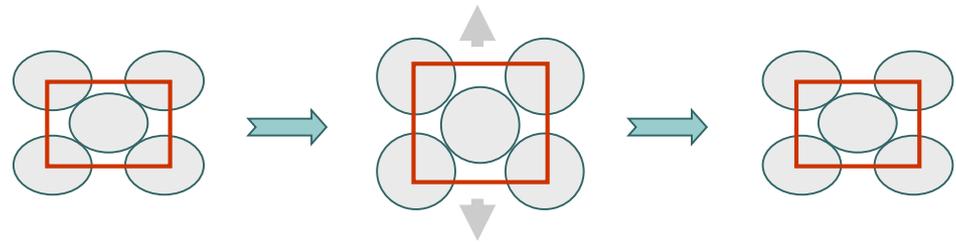




Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de Lorena
Departamento de Engenharia de Materiais



TRANSFORMAÇÕES DE FASES EM METAIS E MICROESTRUTURAS



Introdução à Ciência dos Materiais

Prof. Dr. Cassius O.F.T. Ruchert, Professor Associado



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

Um resfriamento fora do equilíbrio pode ocasionar:

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

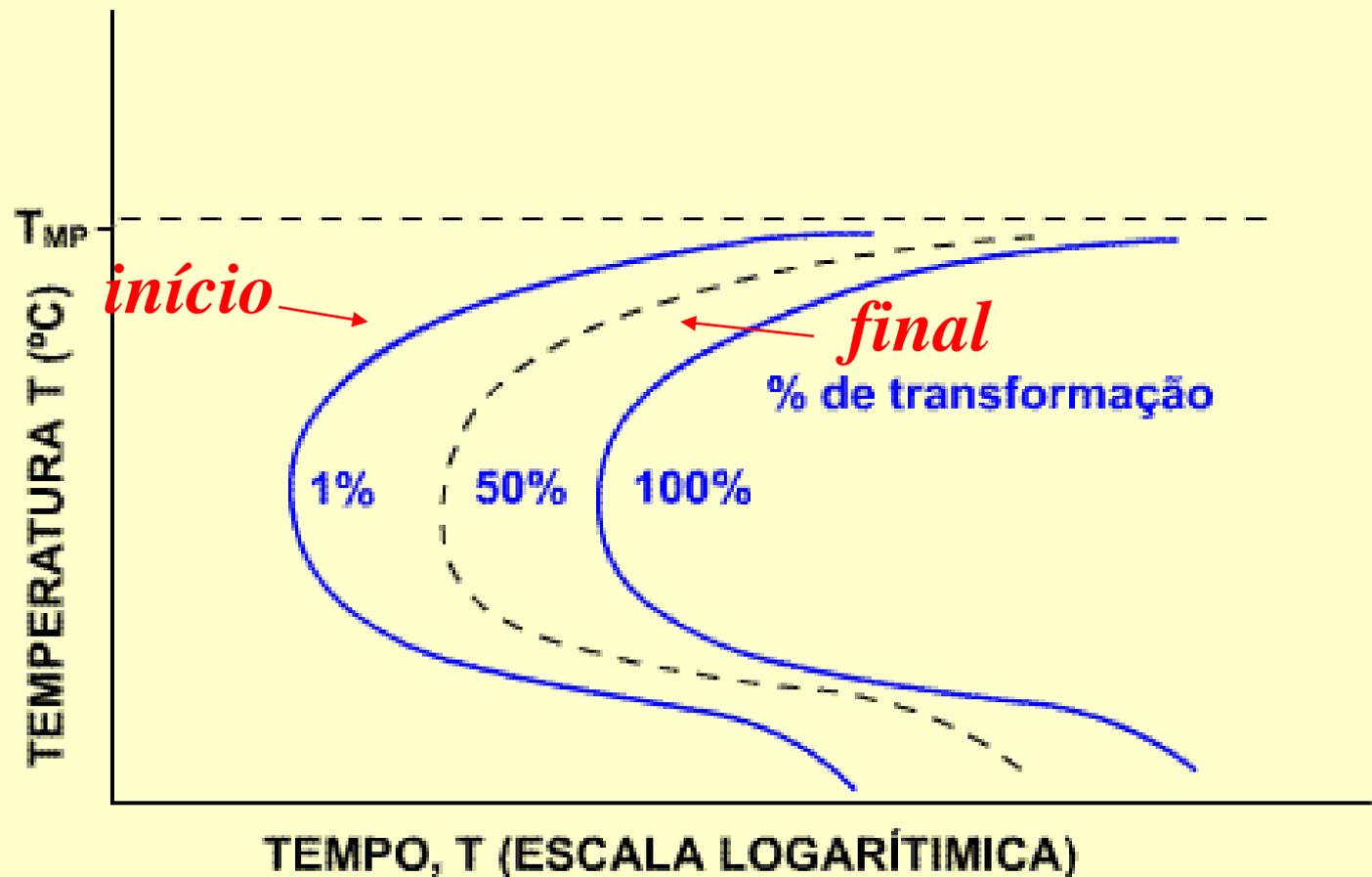


CURVAS TTT (Transformação-Tempo-Temperatura)

- 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.
- As transformações se processam à temperatura constante (**ISOTERMICAS**).

CURVAS TTT

Diagrama de transformação tempo-temperatura para a reação de solidificação, ilustrando curvas com vários percentuais de finalização



Curva Real de um Tratamento Isotérmico

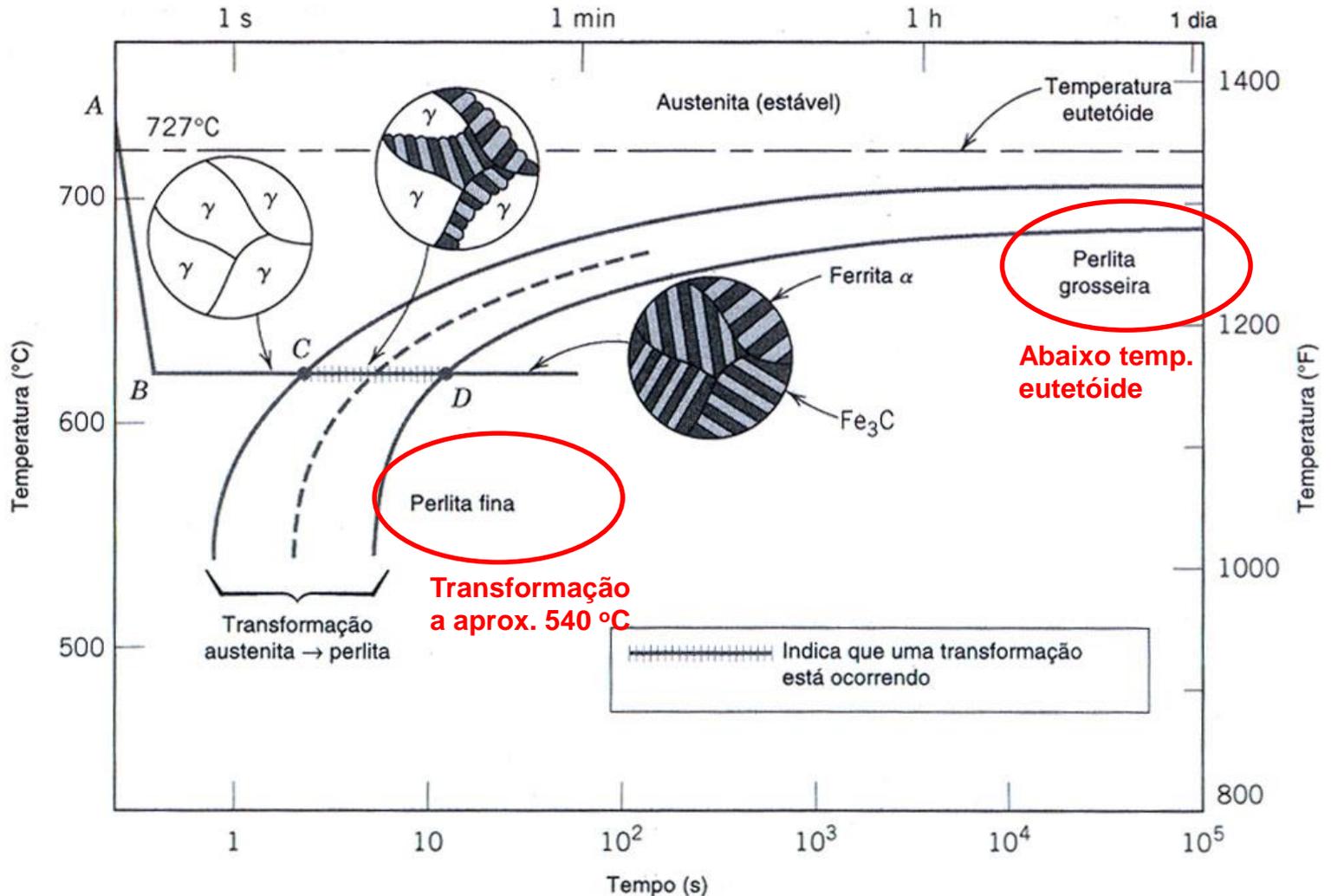


Diagrama de transformação isotérmica para uma liga Fe-C com composição eutetóide, mostrando a superposição da curva para um tratamento térmico isotérmico (ABCD). As microestruturas antes e depois da transformação da austenita em perlitina estão mostradas.

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

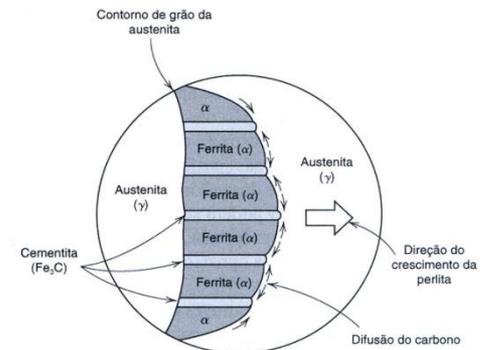
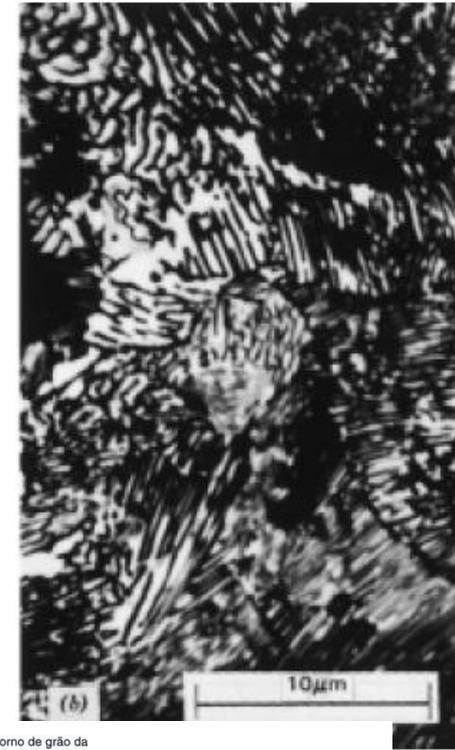
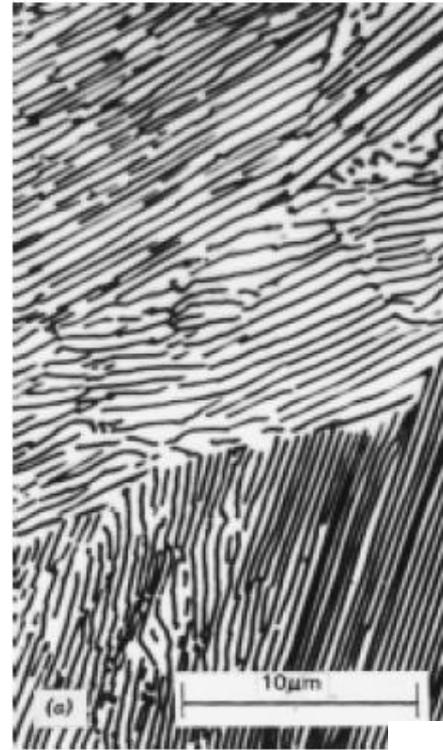
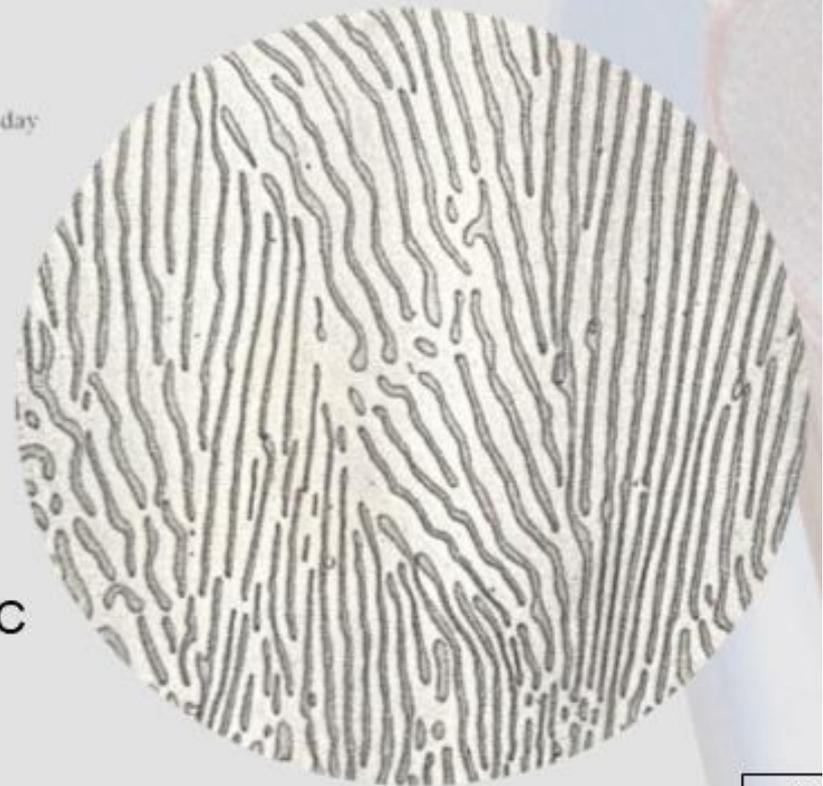
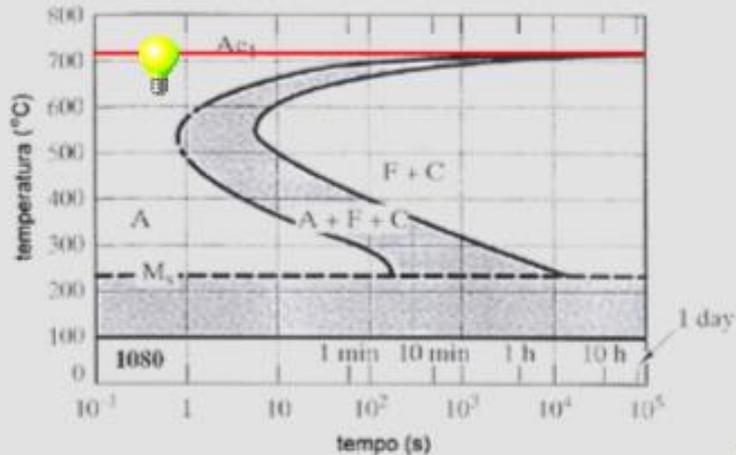


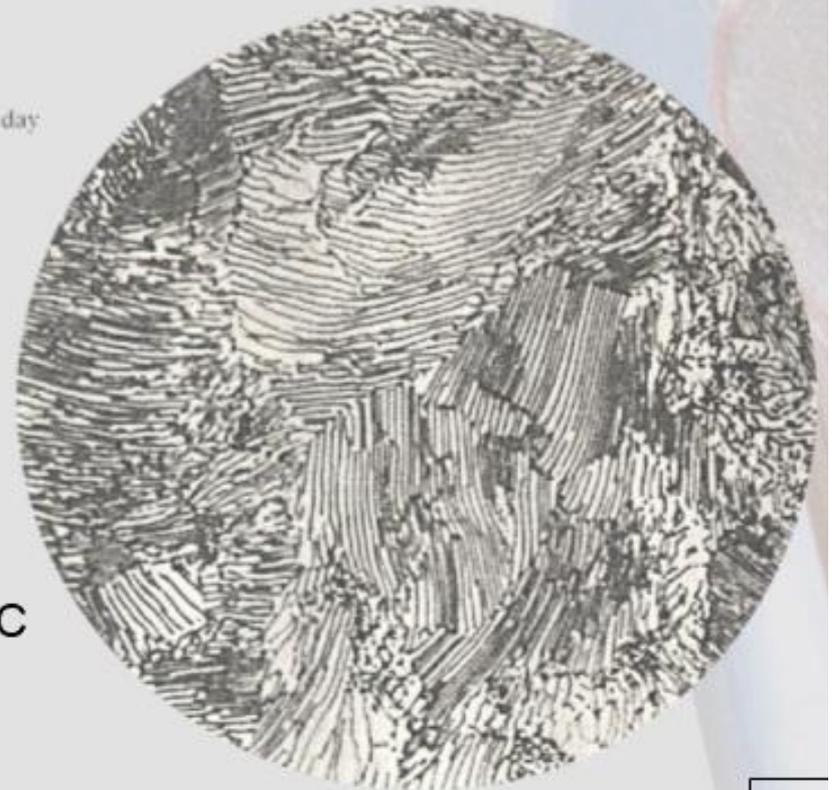
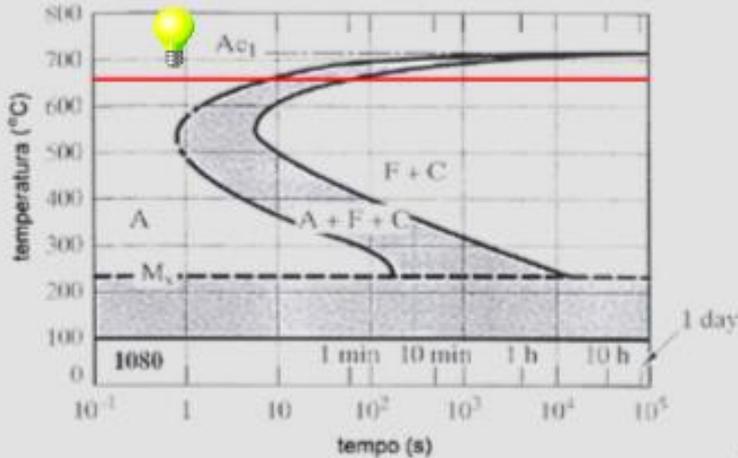
Figura 10.30 Representação esquemática da formação da perlita a partir da austenita; a direção da difusão do carbono está indicada pelas setas.

TRANSFORMAÇÃO ISOTÉRMICA DE LIGA FE-C



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

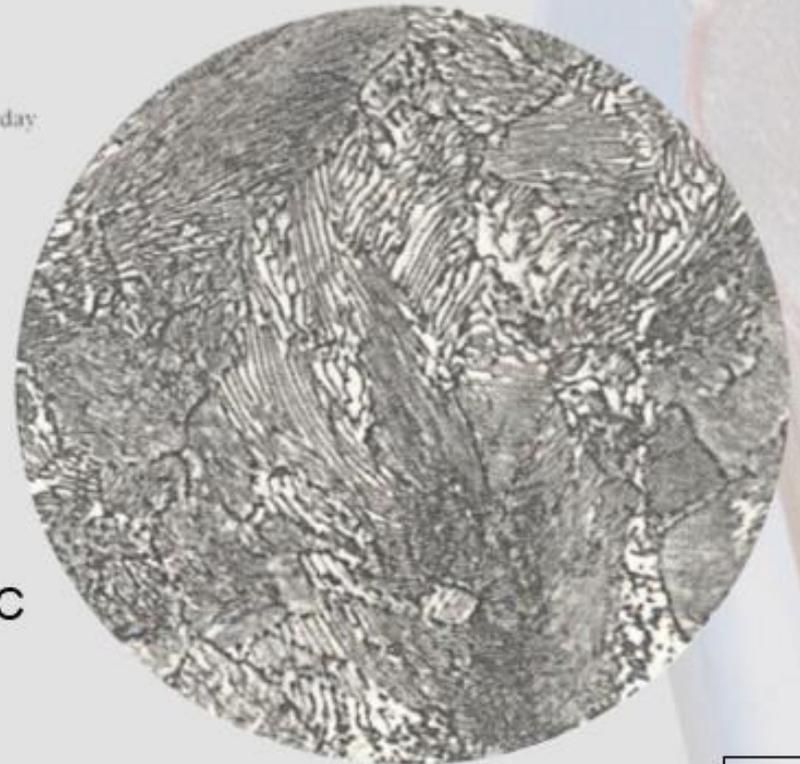
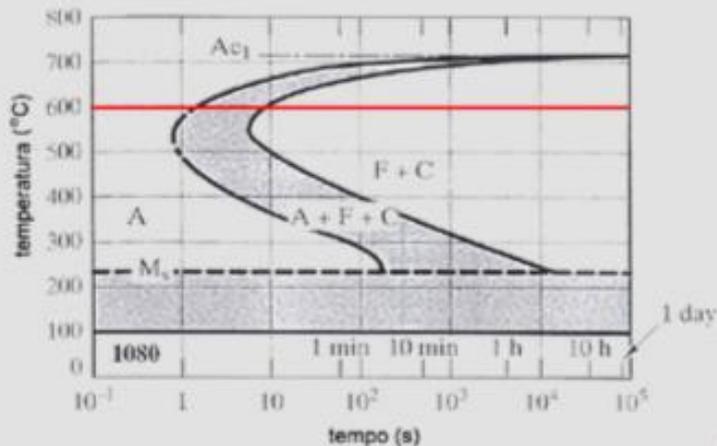
TRANSFORMAÇÃO ISOTÉRMICA DE LIGA FE-C



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

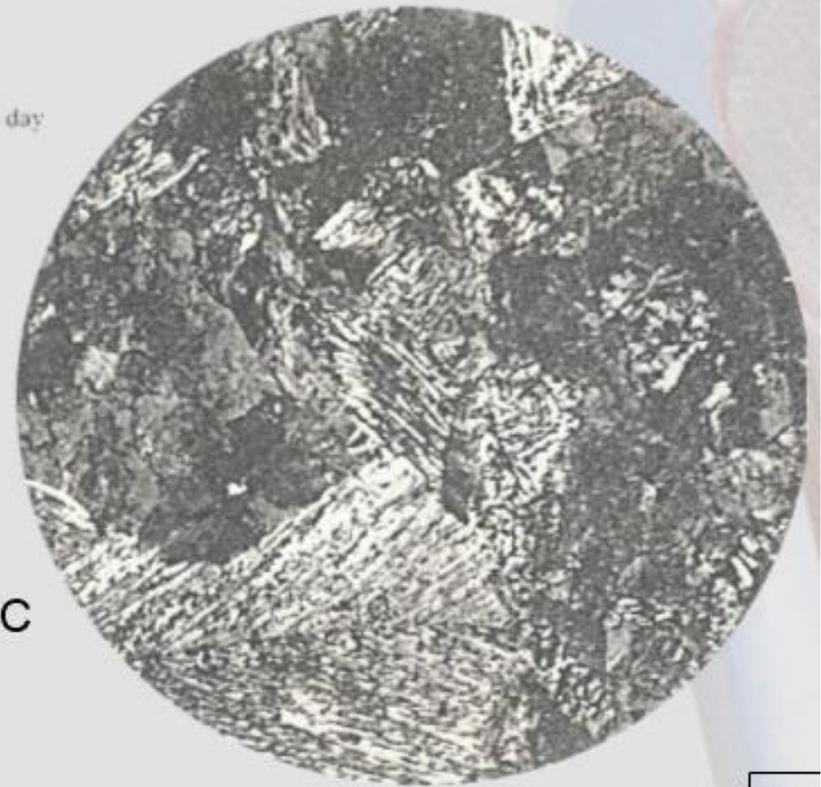
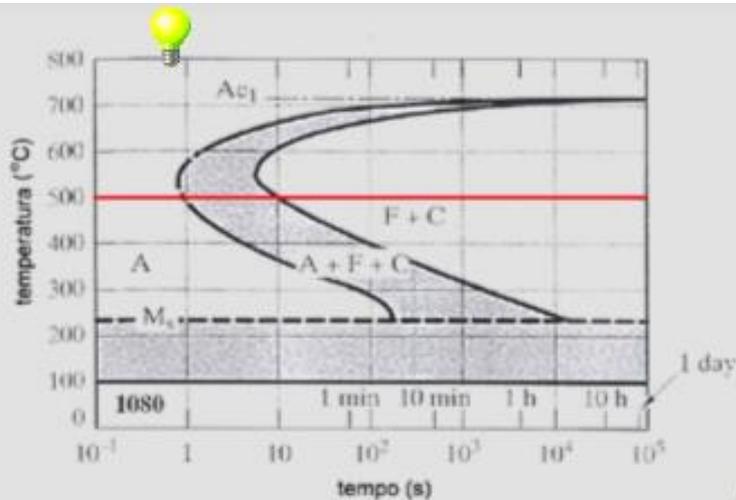


TRANSFORMAÇÃO ISOTÉRMICA DE LIGA FE-C



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

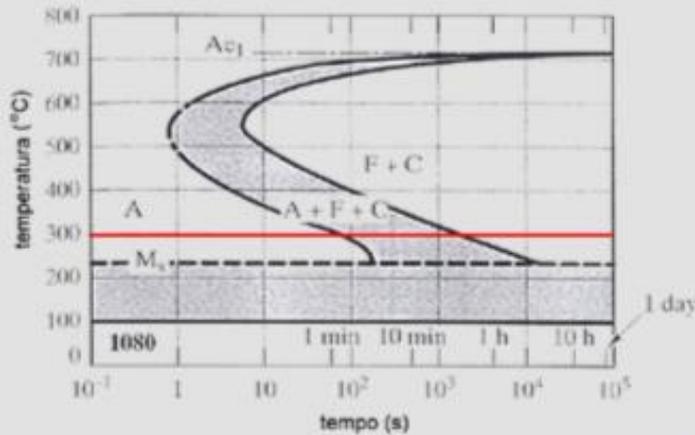
TRANSFORMAÇÃO ISOTÉRMICA DE LIGA FE-C



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



TRANSFORMAÇÃO ISOTÉRMICA DE LIGA FE-C

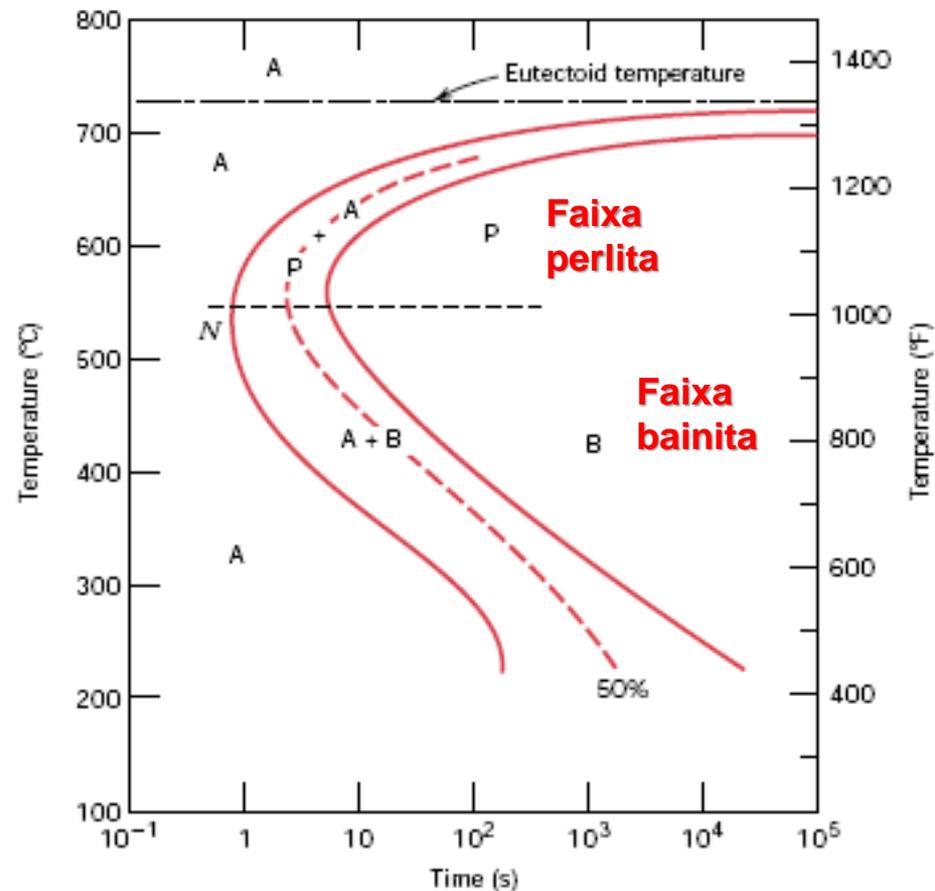
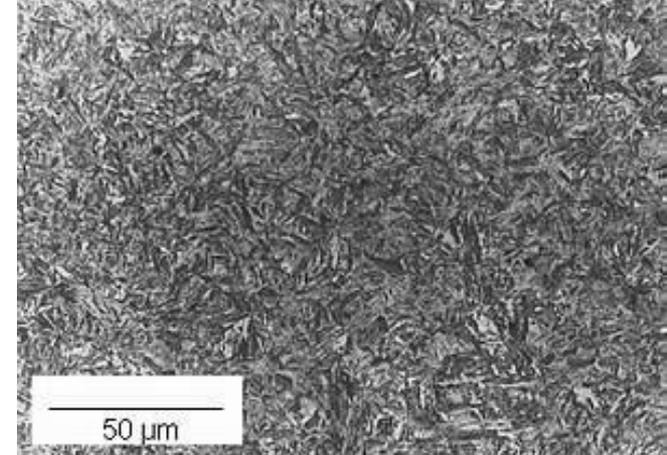


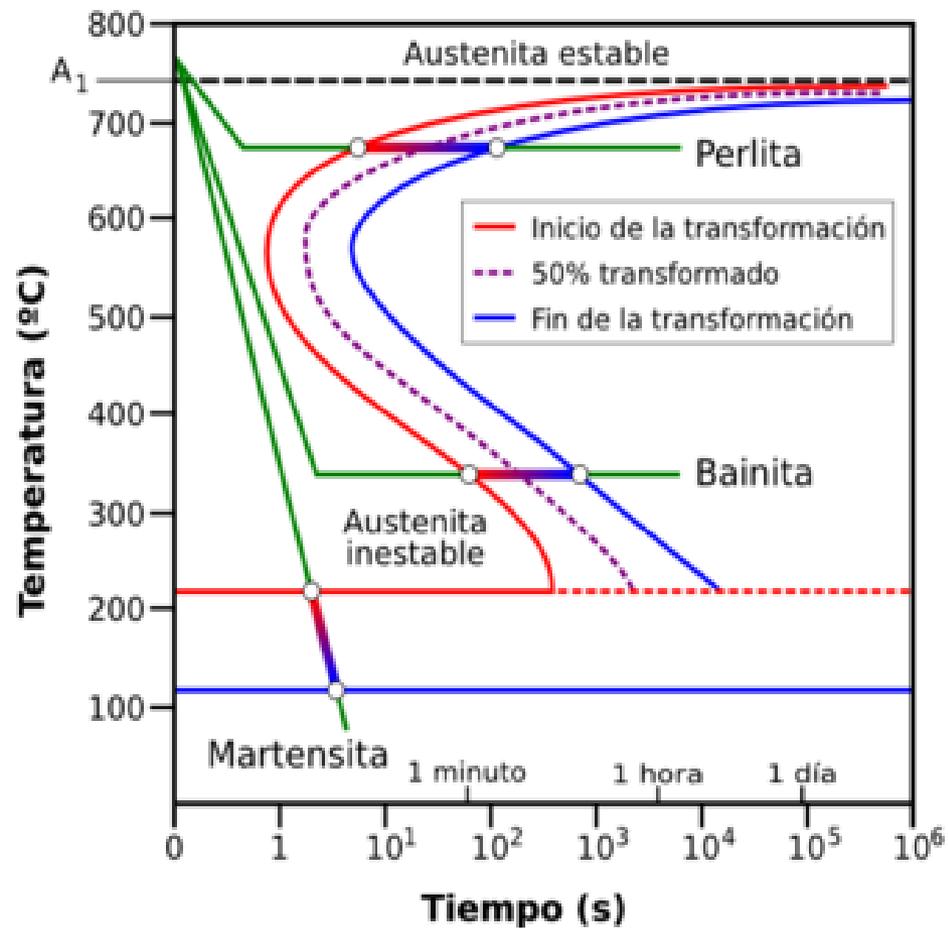
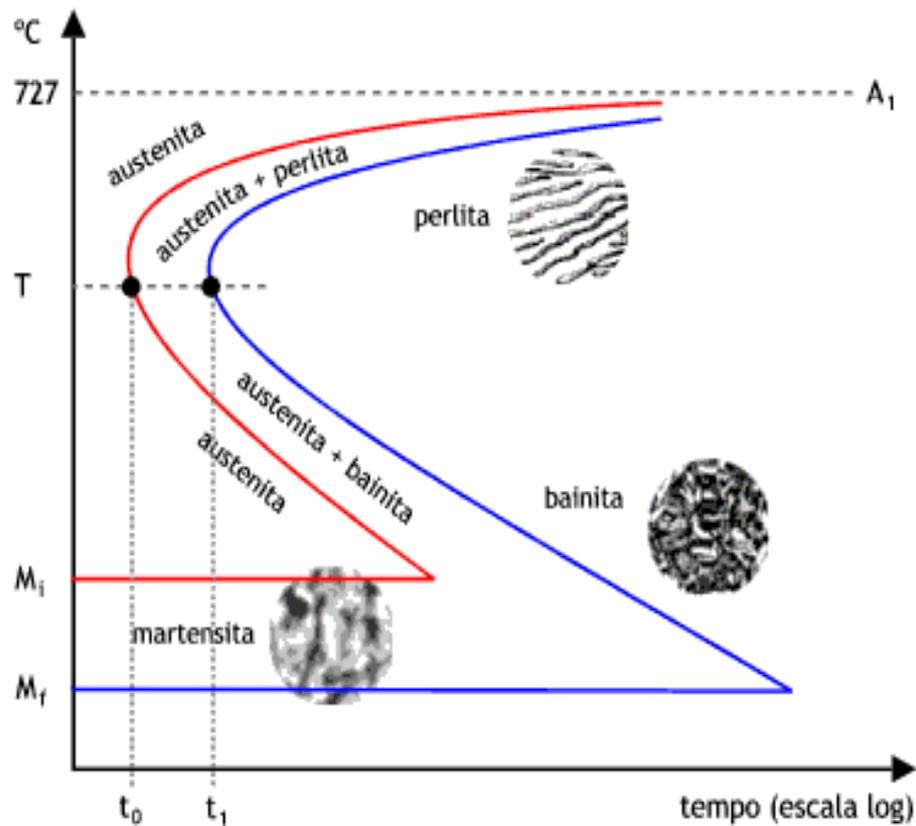
Transformação isotérmica a 300 °C
Estrutura: bainítica (**inferior**)



BAINITA

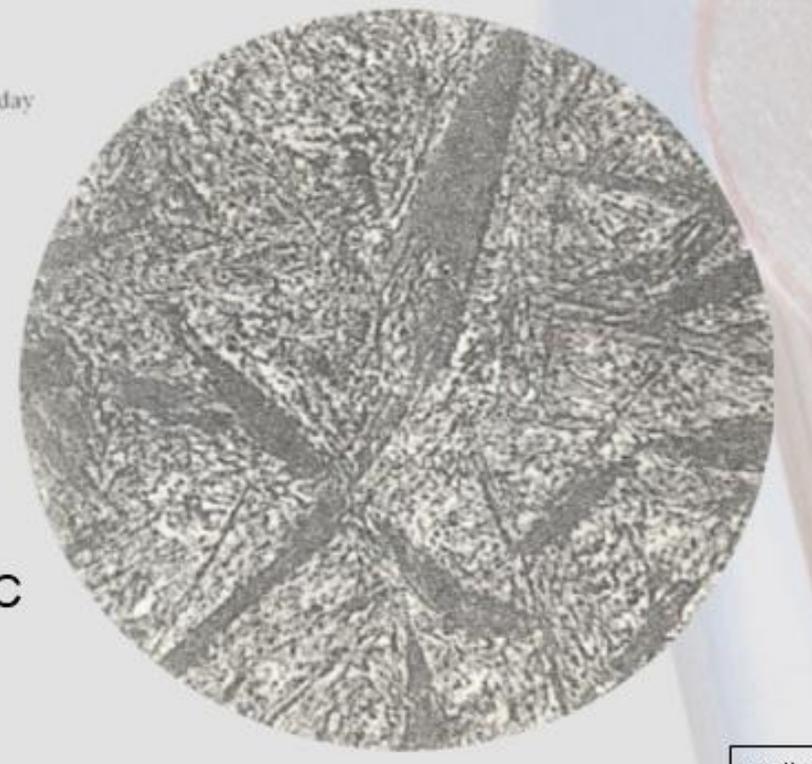
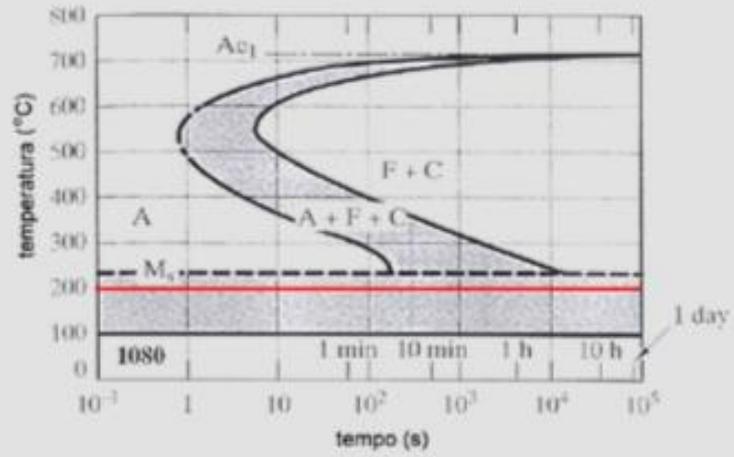
- À medida que a temperatura de transformação é reduzida (aumento taxa) após a formação de perlita fina, um novo microconstituente é formado: a bainita.
- Como ocorre na perlita (**lamelas**) a microestrutura da bainita consiste nas fases ferrita e cementita, mas os arranjos são diferentes (**agulhas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







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

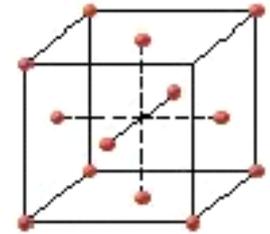


Transformação isotérmica a 200 °C
Estrutura: martensítica

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).

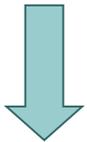
AUSTENITA



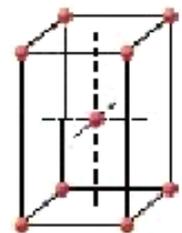
Cúbico
de face centrada

**TRANSFORMAÇÃO
ALOTRÓPICA COM
AUMENTO DE VOLUME,**

**que leva à concentração de
tensões**



MARTENSITA



tetragonal
de corpo
centrado

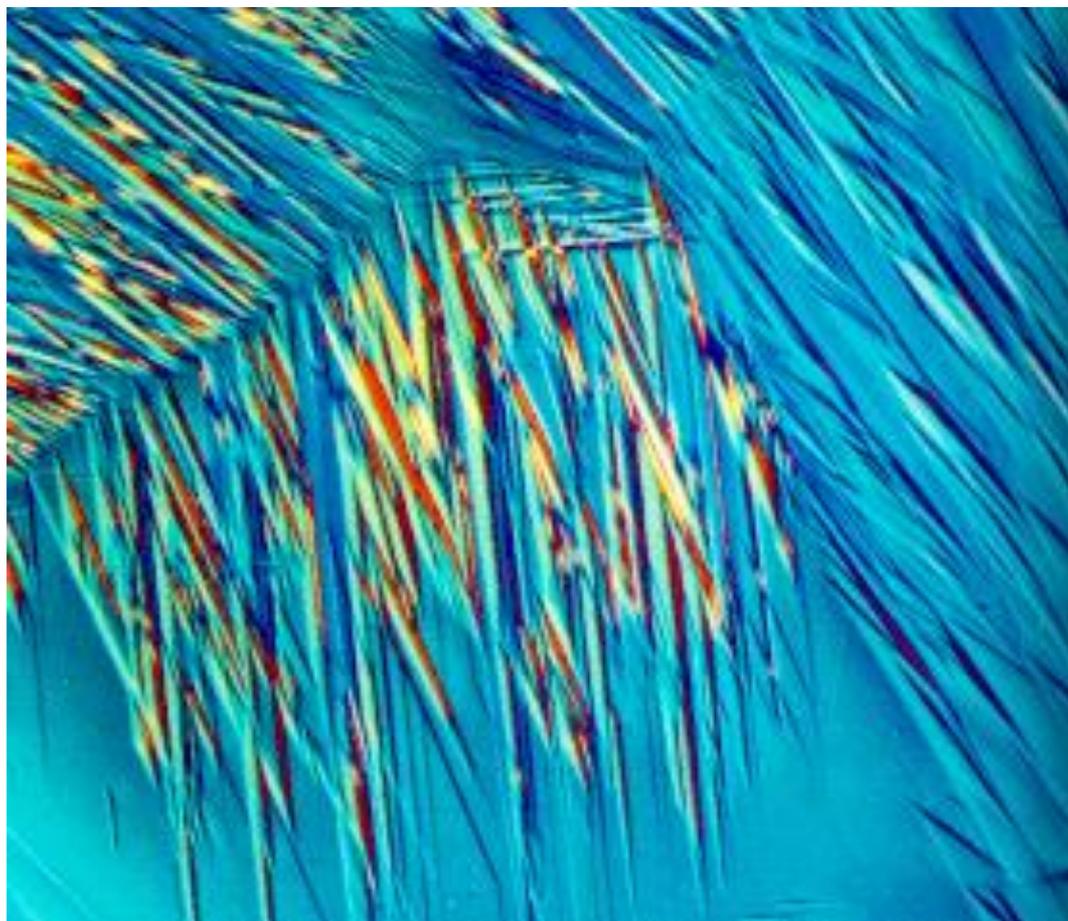


MARTENSITA

- Sendo uma fase fora de equilíbrio, a martensita não aparece no diagrama de fases ferro – carbeto 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)



Fotomicrografia de uma liga de memória de forma (69%Cu-26%Zn-5%Al), mostrando as agulhas de martensita numa matriz de austenita



MARTENSITA EM FORMA DE RIPAS

- Para ligas que contêm menos do que cerca de 0,6% de C, os grãos de martensita se formam 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)

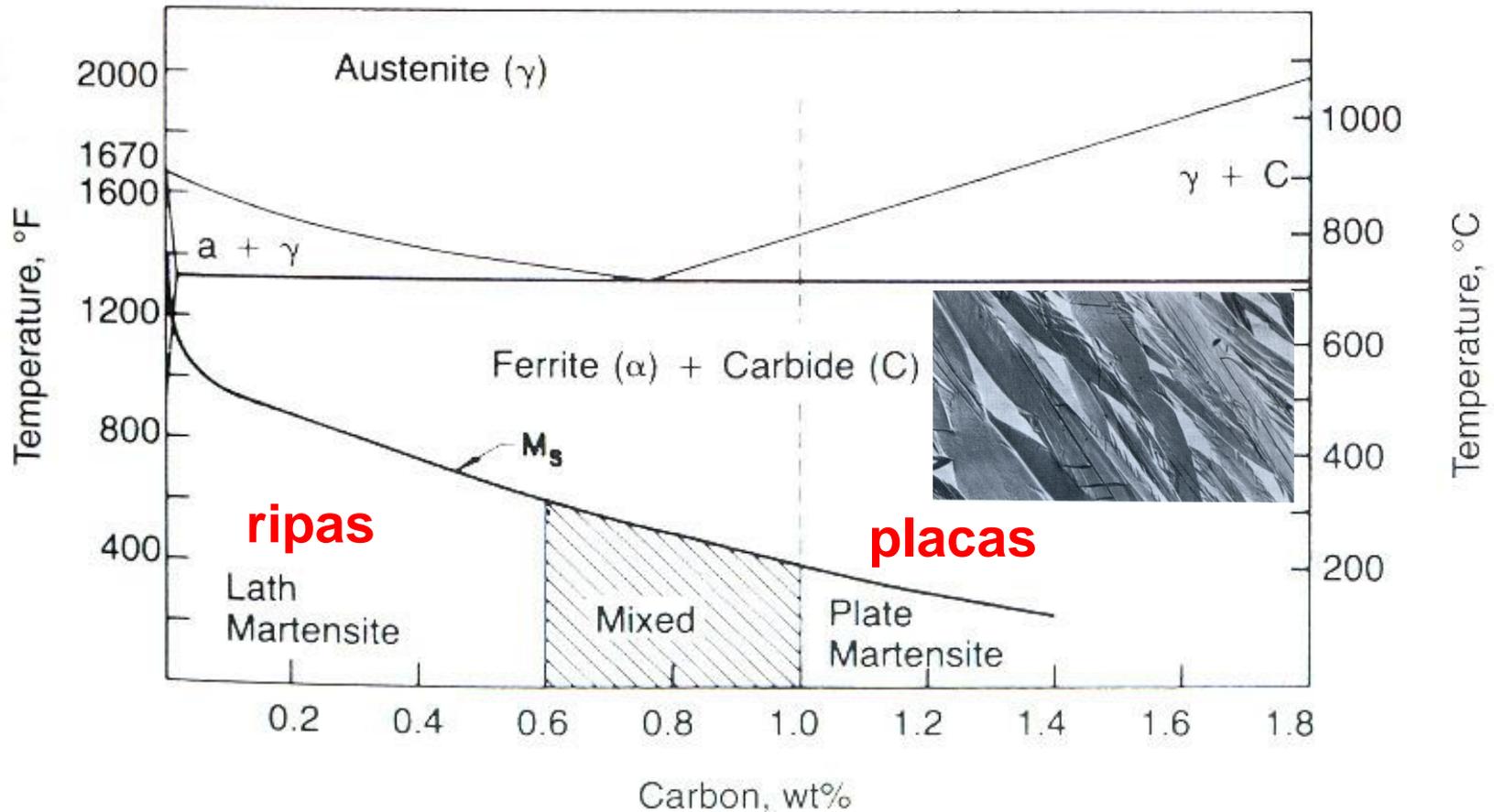
- A martensita lenticular (ou em placas) é encontrada em ligas ferro-carbono com concentrações maiores que 1,0% de C

- Na fotomicrografia pode-se observar os grãos de 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

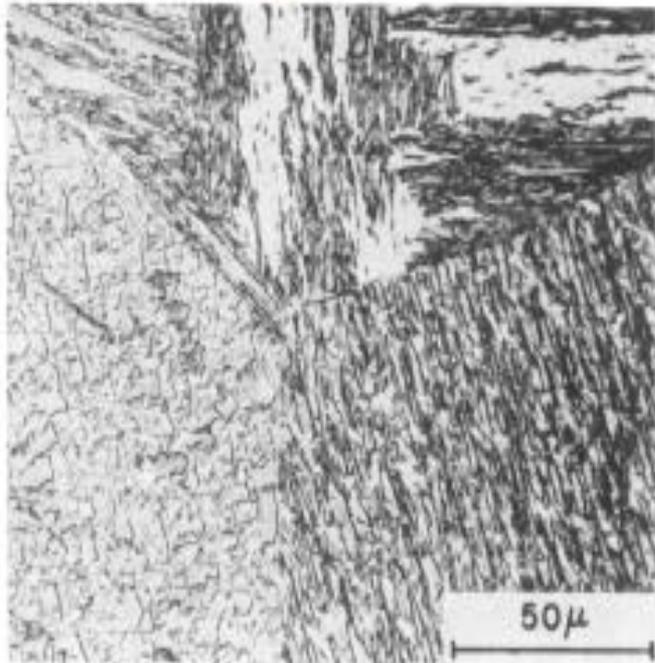


Ranges de formação de martensita em ripas e placas em uma liga de Fe-C.



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



2 μm

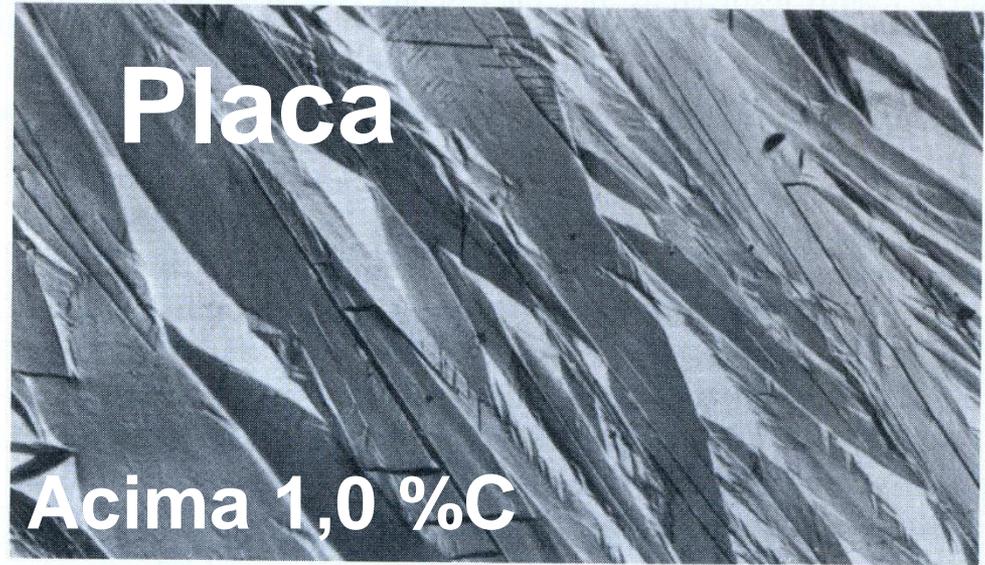
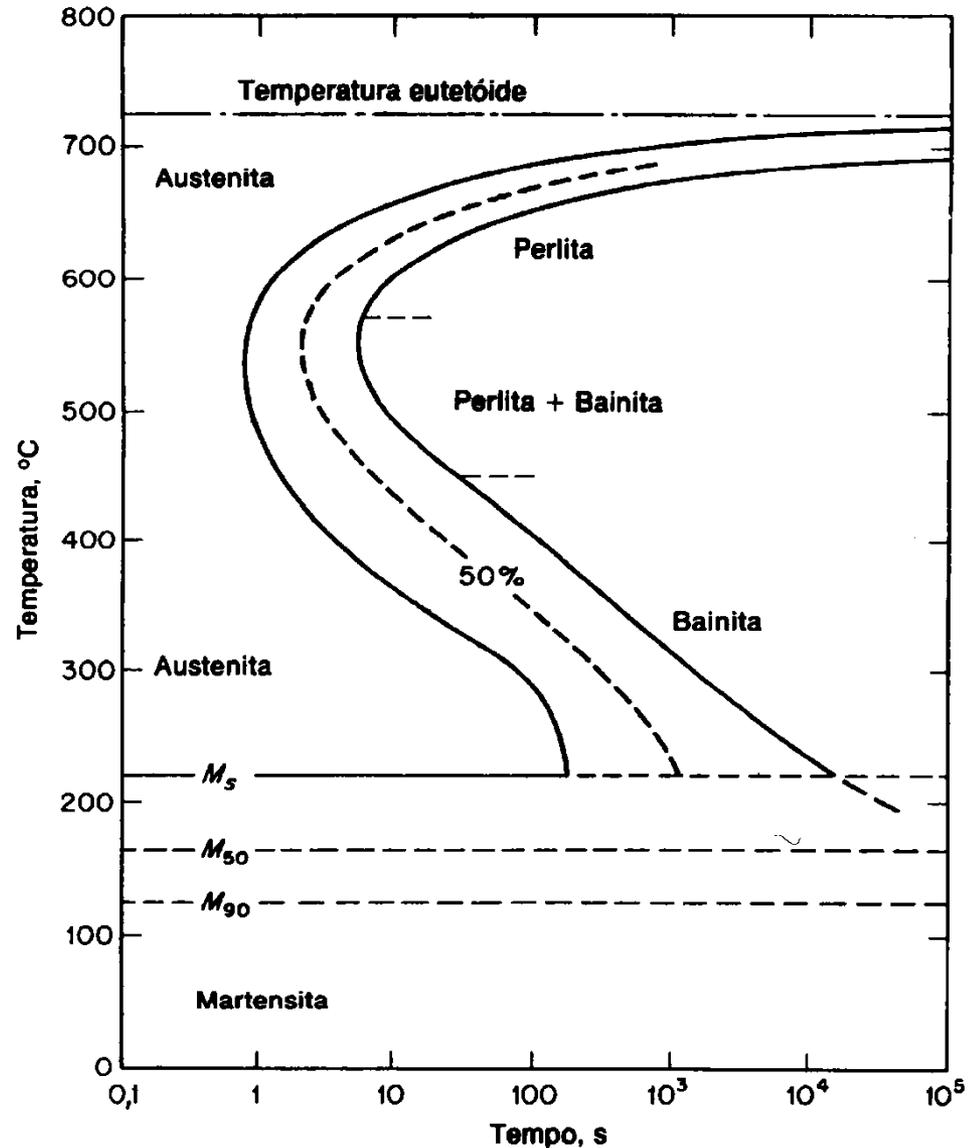


Fig. 5.15 Plate martensite formed in an austenitic single crystal of an Fe-33.5Ni alloy by cooling to $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-321\text{ }^{\circ}\text{F}$). Plates are visible only because of surface relief generated by martensitic transformation, original magnification $200\times$. Source: Ref 5.41

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

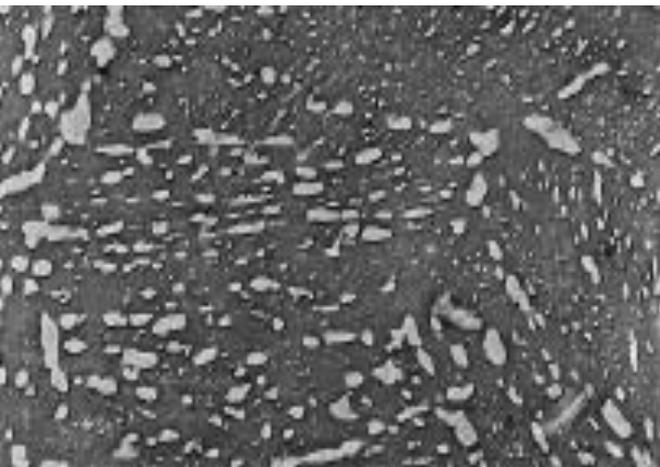
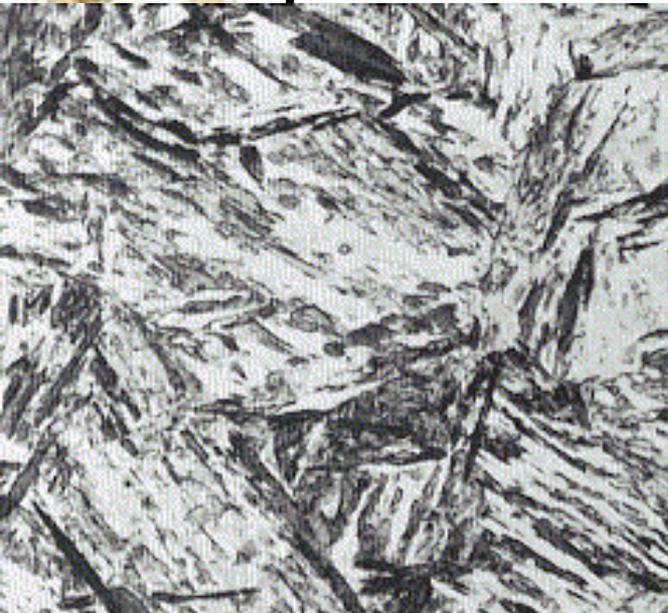
CURVA TTT PARA AÇO EUTETÓIDE

- O início da transformação martensítica está representado por uma linha horizontal designada por M_s . Duas outras linhas horizontais e tracejadas representadas por $M(50\%)$ e $M(90\%)$ indicam os percentuais da transformação de austenita em martensita
- As temperaturas nas quais estão localizadas variam de acordo com o material, mas são relativamente baixas, pois a difusão de carbono deve ser inexistente (adifusional).





MARTENSITA REVENIDA

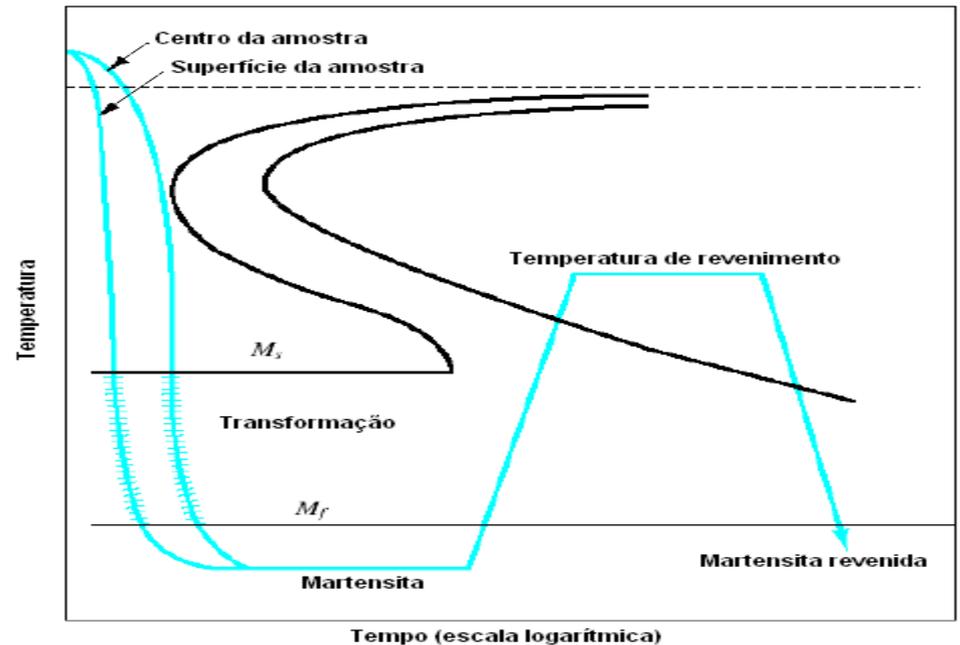


- No estado temperado, a martensita, além de ser mais dura, é tão frágil que não pode ser utilizada para a maioria das aplicações
- As tensões internas que possam ter sido introduzidas durante a têmpera tem um efeito de enfraquecimento
- A ductilidade e a tenacidade podem ser aprimoradas e as tensões 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



Revenido

- O revenido é conseguido através do aquecimento de um aço martensítico até uma temperatura abaixo do eutetóide durante um intervalo de tempo específico

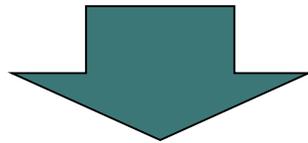




MARTENSITA REVENIDA

- Esse tratamento, permite através de processos de difusão a formação de martensita revenida segundo a equação:

Martensita (TCC,monofásica)



Martensita Revenida (Fases
Ferrita + Fe_3C)

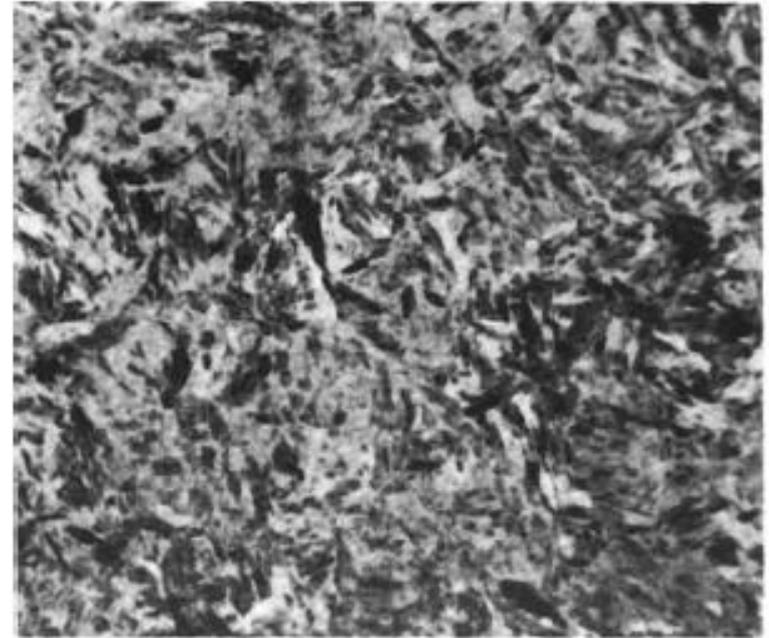
A dureza e a resistência da MR pode ser explicada pela grande área de contornos entre as fases por unidade de volume para as numerosas partículas de Fe_3C



Martensita X Martensita Revenida



(a)



(b)

(a) Martensita obtida após o processo de têmpera de aço; (b) Martensita revenida de um aço com 0,5% de C, em peso [Shackelford, 2000].



Exercício

Usando o diagrama de transformação isotérmica para uma liga Fe-C em composição eutetóide, especificar a natureza da microestrutura final de uma pequena amostra que foi submetida aos seguintes tratamentos térmicos tempo-temperatura:

(a) Resfriamento rápido até 350 °C, manutenção nessa temp. durante 10^4 s, e a seguir resfriamento rápido até a temperatura ambiente;

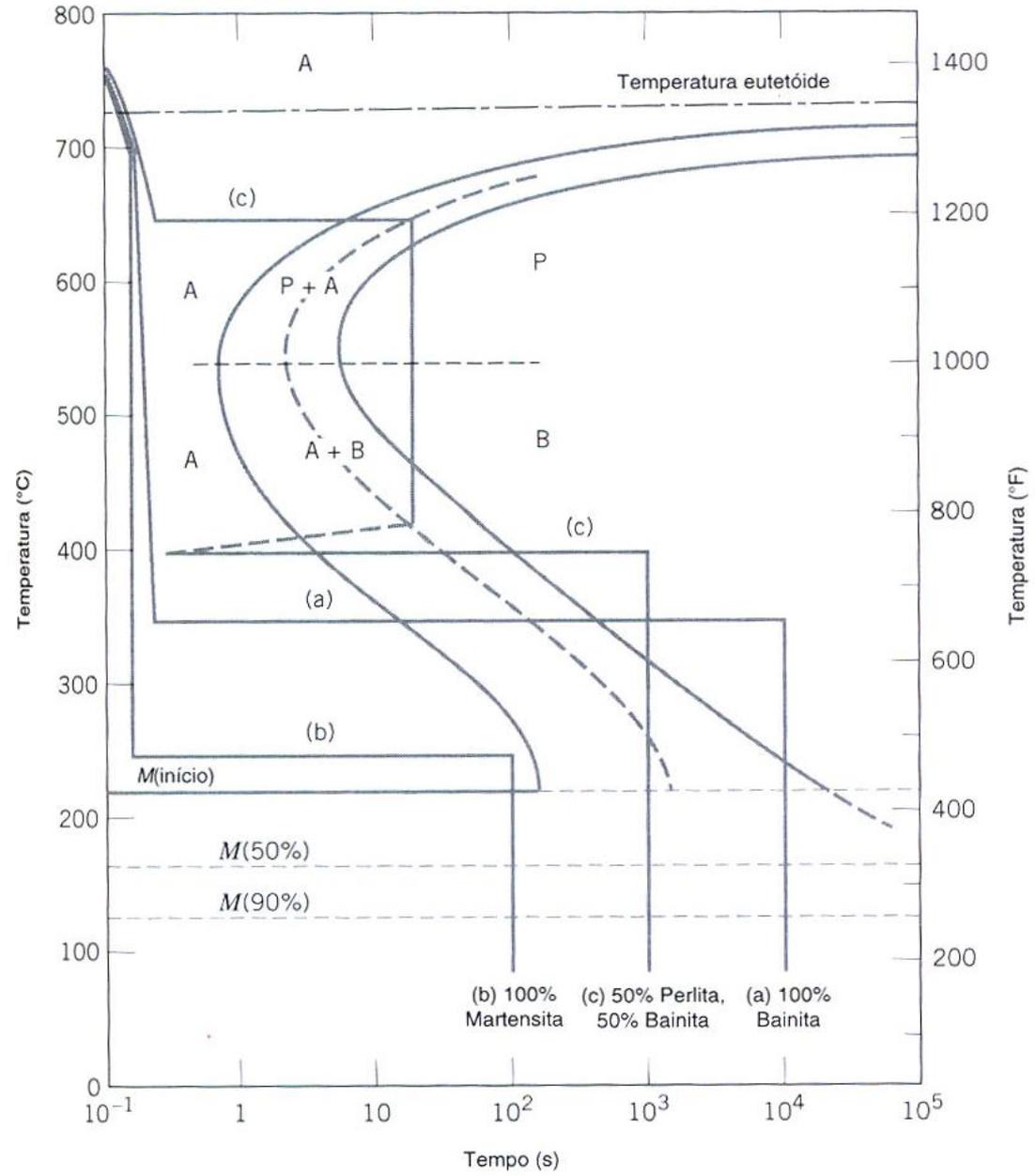
(b) Resfriamento rápido até 250 °C, manutenção nessa temp. durante 100 s, e a seguir resfriamento rápido até a temperatura ambiente;

(c) Resfriamento rápido até 650°C, manutenção nessa temp. durante 20 s, e a seguir resfriamento rápido até 400°C, manutenção nesta temp. durante 990 s, a seguir resfr. temp. amb;



Exercício (Continuação)

Diagrama de transformação isotérmica p/ uma liga Fe-C com composição eutetóide e os tratamentos térmicos isotérmicos (a) , (b) e (c)





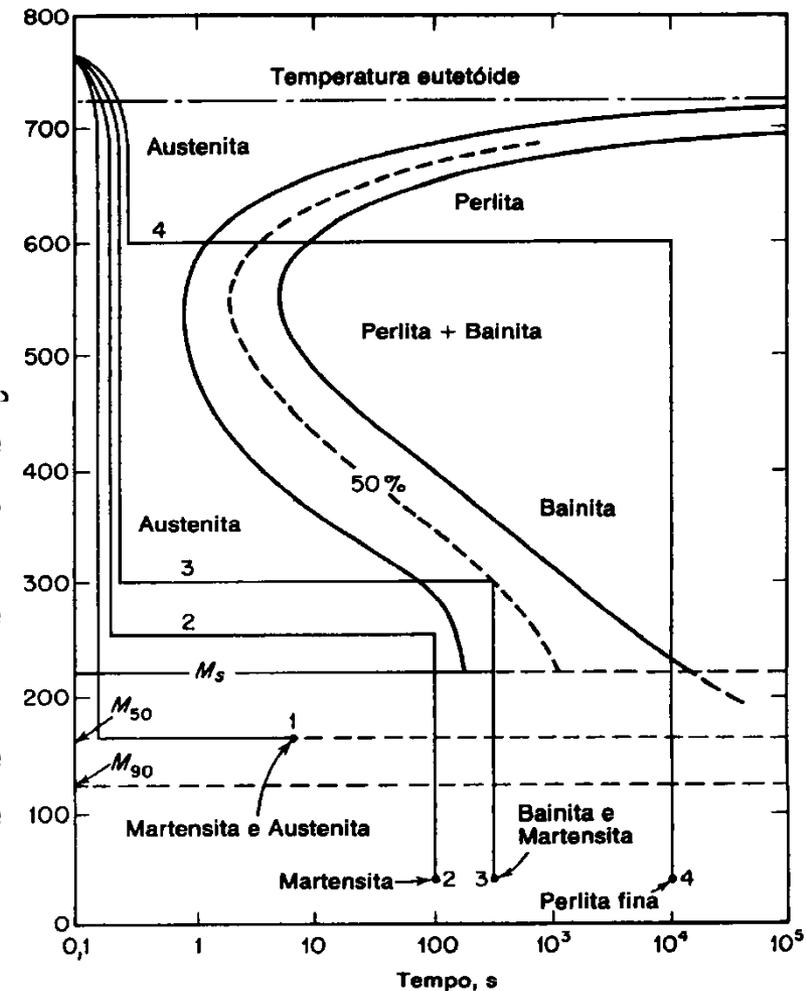
Exercício 2

Curva 1 → Rápido resfriamento até 160°C e manutenção da T por 10s. Nesta T, apenas metade da austenita transforma-se em martensita. Microestrutura final é composta por 50% de martensita e 50% de austenita.

Curva 2 → Resfriamento rápido até 250°C e manutenção da T por 100s, com subsequente resfriamento até a T ambiente. Microestrutura final é composta por 100% de martensita.

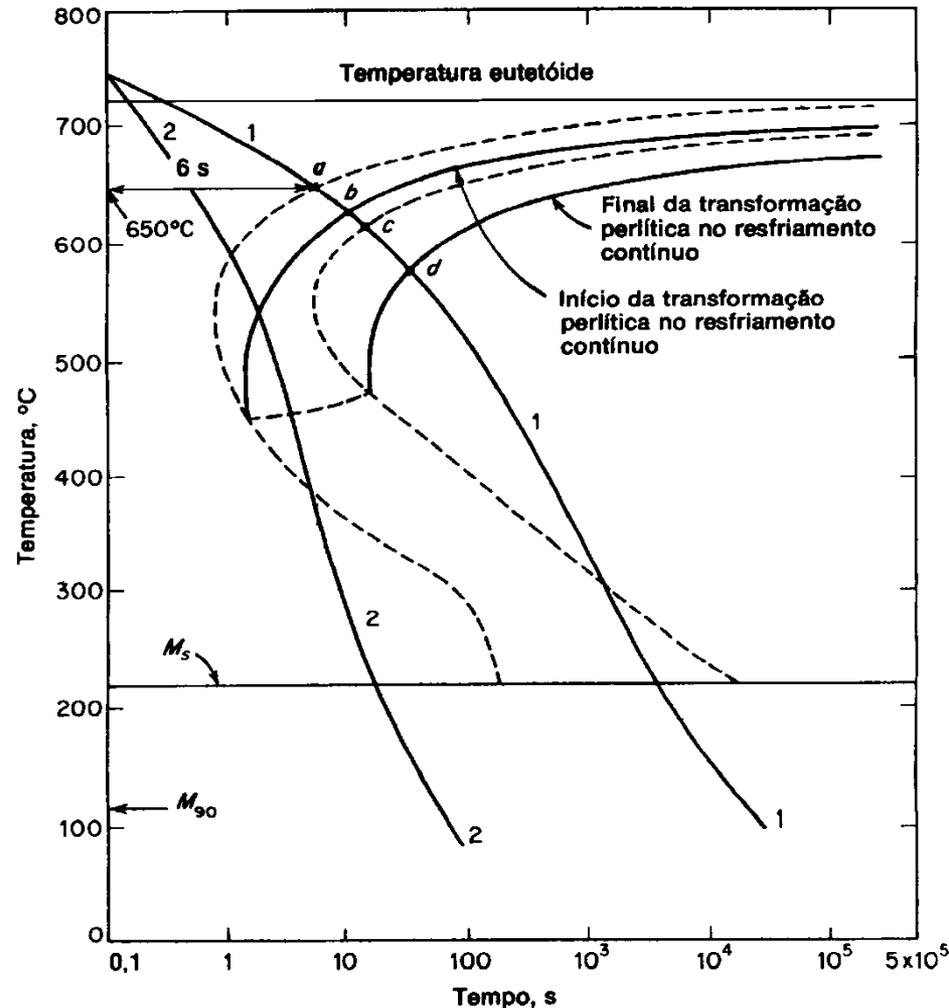
Curva 3 → Resfriamento rápido até 300°C e manutenção da T por 500s, com subsequente resfriamento até a T ambiente. Microestrutura final é composta por 50% de bainita e 50% de martensita.

Curva 4 → Resfriamento rápido até 600°C e manutenção da T por 10.000s, com subsequente resfriamento até a T ambiente. Microestrutura final é composta por perlita. O resfriamento subsequente não mudará nada, independente da velocidade de resfriamento adotada.



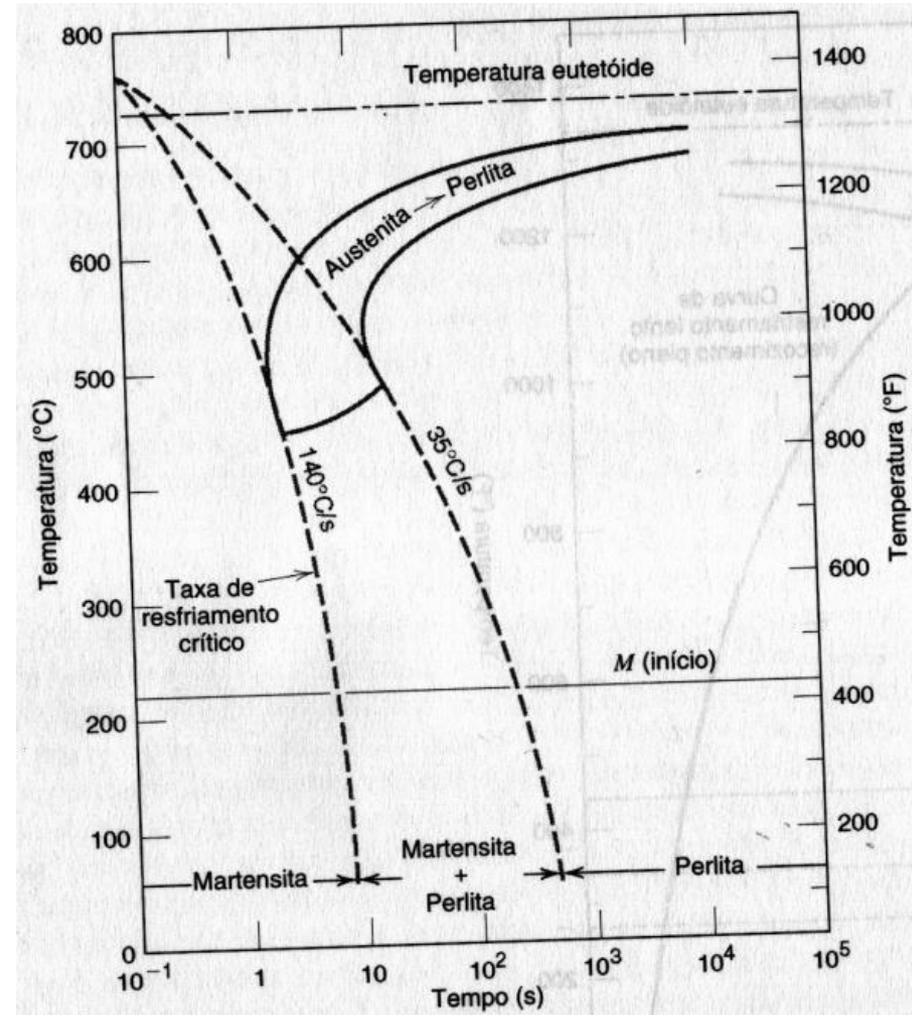
RESFRIAMENTO CONTÍNUO (CCT)

- A maioria dos tratamentos térmicos para os aços envolve o resfriamento contínuo de uma amostra até a temperatura ambiente
- Um diagrama de transformação isotérmica só é válido para temperatura constante e tal diagrama deve ser modificado para transformações com mudanças constantes de temperaturas
- No resfriamento contínuo o tempo exigido para que uma reação tenha seu início e o seu término é retardado e as curvas são deslocadas para tempos mais longos e temperaturas menores



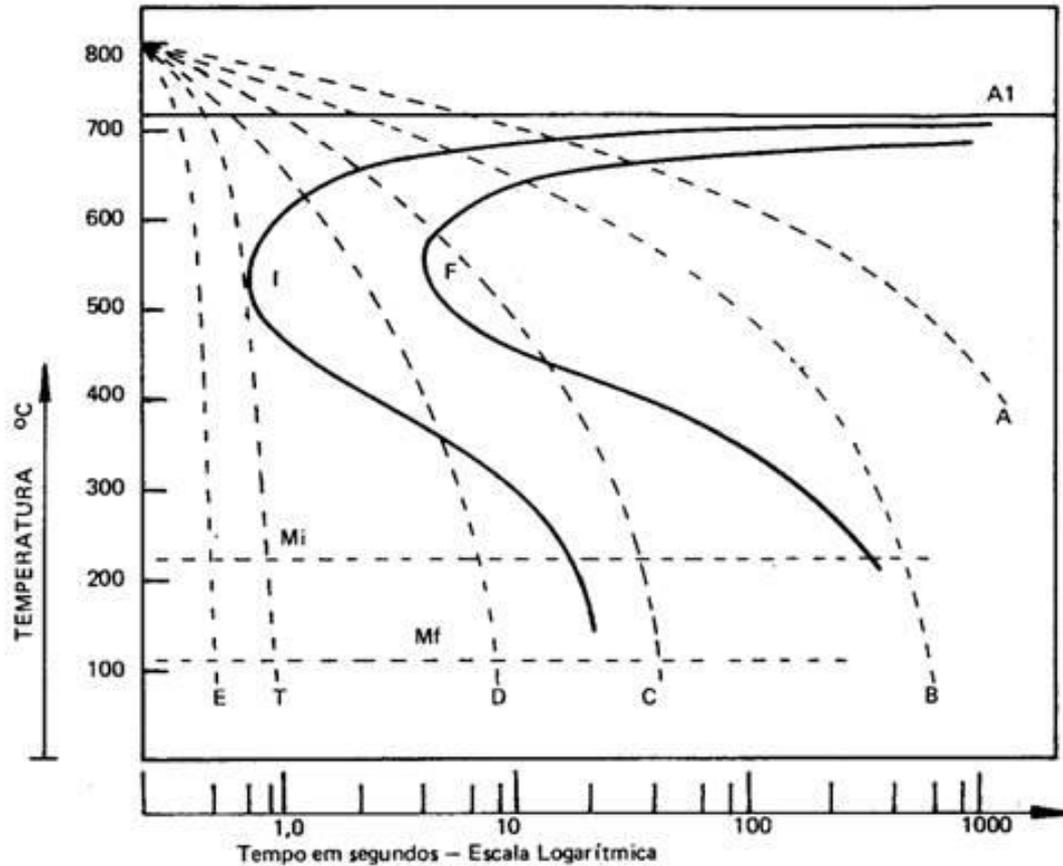
RESFRIAMENTO CONTÍNUO

- Para o resfriamento contínuo de uma liga de aço existe uma taxa de têmpera crítica que representa a taxa mínima de têmpera para se produzir uma estrutura totalmente martensítica
- Para taxas de resfriamento superiores   crítica existirá apenas martensita. Além disso existirá uma faixa de taxas em que perlita e martensita são produzidos e finalmente uma estrutura totalmente perlítica se desenvolve para baixas taxas de resfriamento





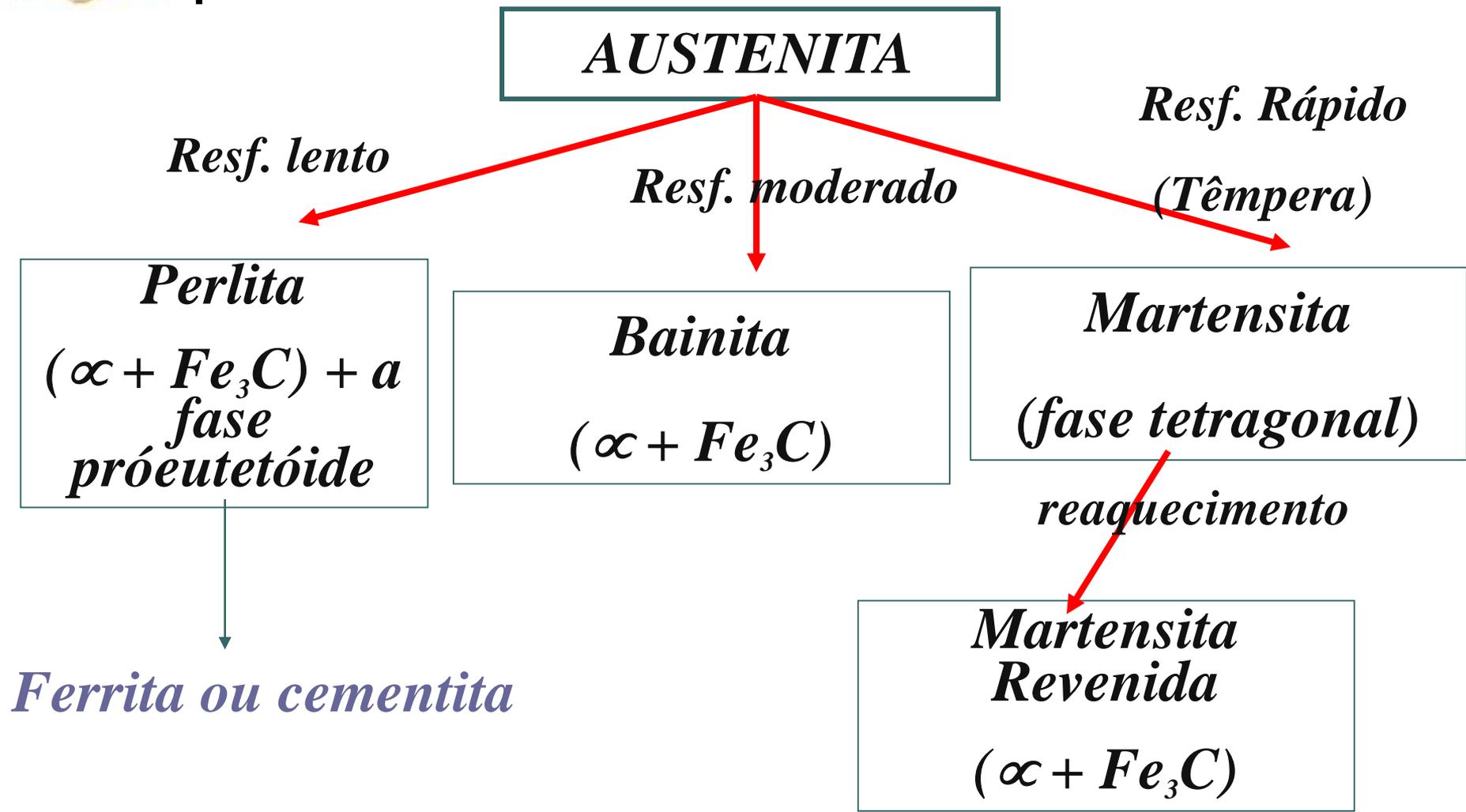
RESFRIAMENTO CONTÍNUO



- 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



Resumo Transformações

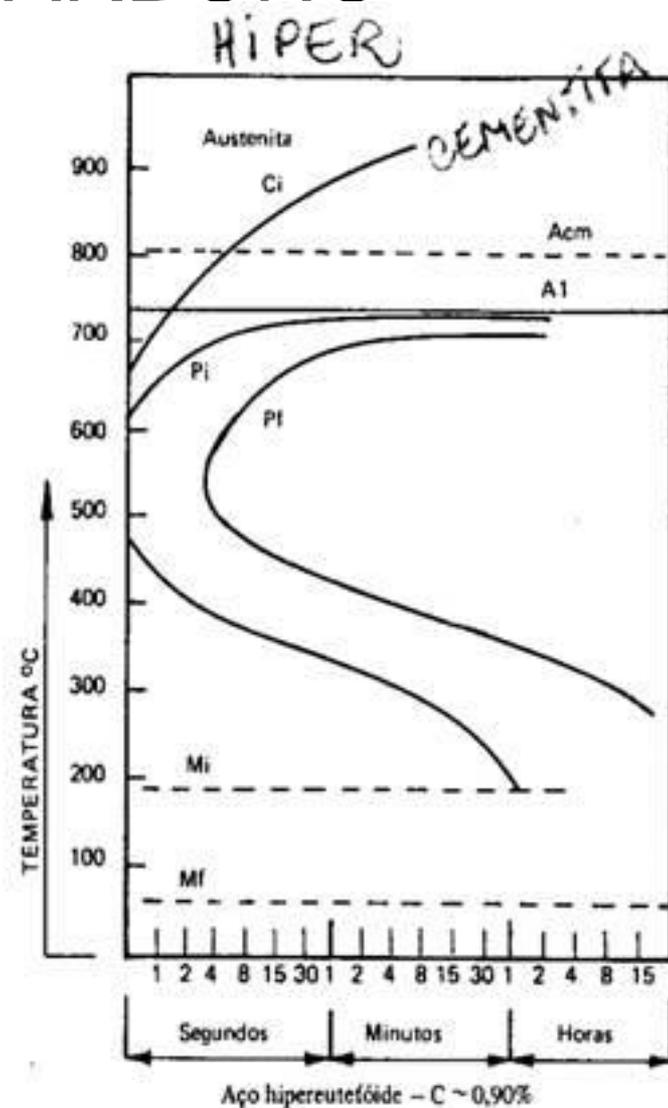
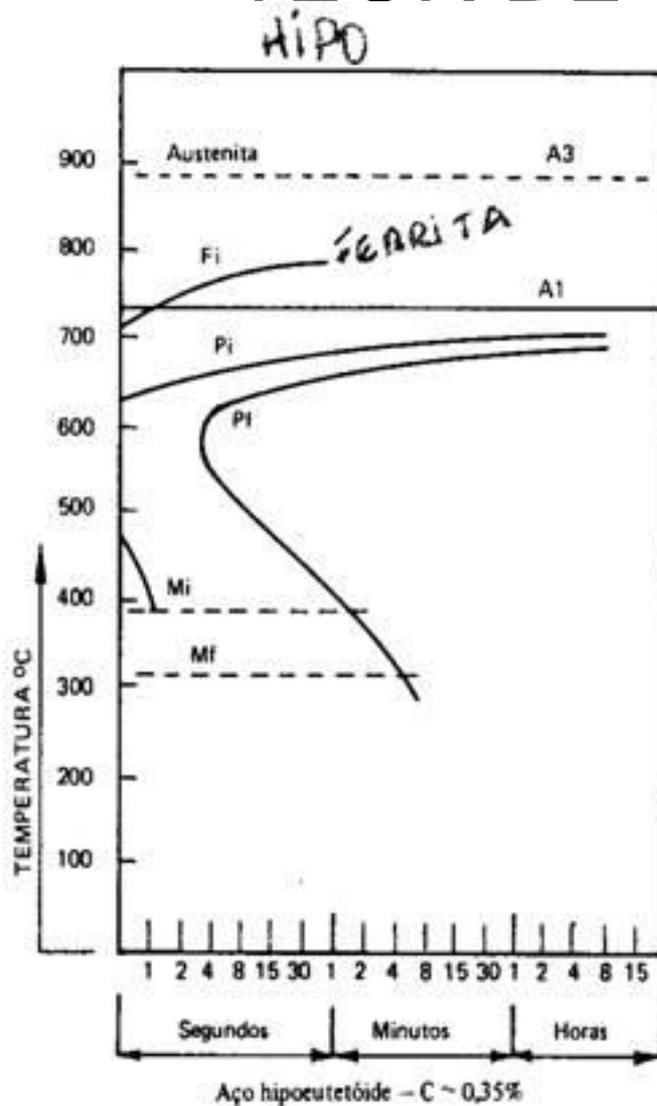




FATORES QUE AFETAM A POSIÇÃO DAS CURVAS TTT NOS AÇOS

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

TEOR DE CARBONO



- Quanto menor o teor de carbono (abaixo do eutetóide) mais difícil de se obter estrutura martensítica (desloca a curva p/ esquerda diminuindo o campo austenítico)



ELEMENTOS DE LIGA

- ❑ Quanto maior o teor e o número dos elementos de liga, mais numerosas e complexas são as reações
- ❑ Todos os elementos de liga (**exceto o Cobalto**) deslocam as curvas para a direita (aumento campo gama), retardando as transformações e promovem a formação de um Joelho separado para a bainita:

Facilitando a formação da martensita

**** Conseqüência: em determinados aços pode-se obter martensita mesmo com resfriamento lento*



EFEITO DE ELEMENTOS DE LIGA NAS CURVAS TTT

AISI 1335

AISI 5150

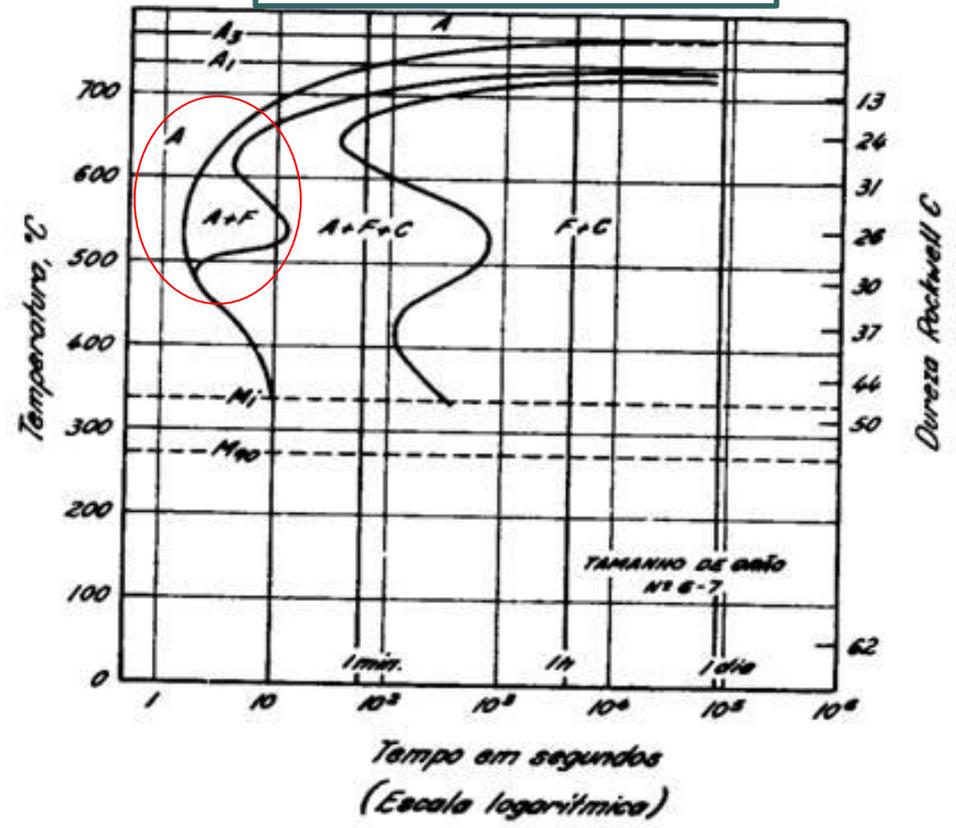
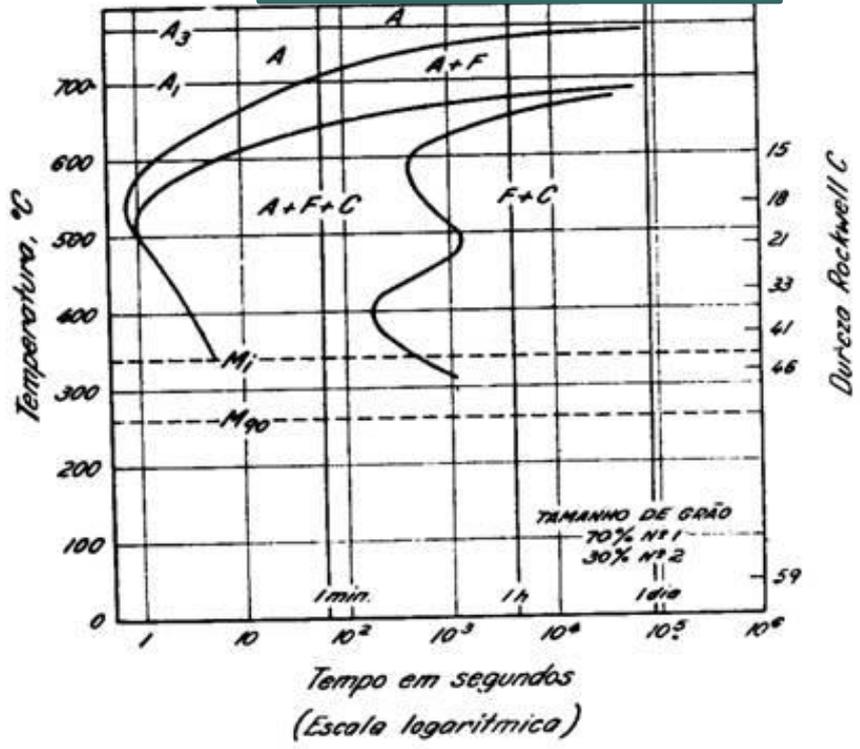


FIG. 25 — Curva TTT para aço AISI 1335 com 0,35% de carbono e 1,85% de manganês.

FIG. 27 — Curva TTT para aço AISI 5140 com 0,43% C, 0,68% Mn e 0,93% Cr.

Praticamente o mesmo teor de carbono mas com diferentes elementos de liga



COMPOSIÇÃO QUÍMICA/ELEMENTOS DE LIGA

AISI 4340 → neste aço é possível obter bainita por resfriamento contínuo

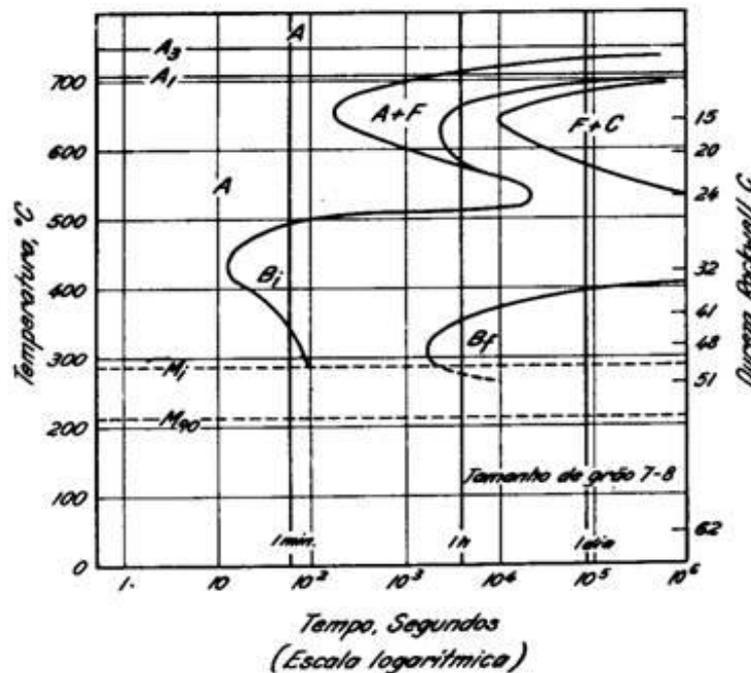


FIG. 28 — Curva TTT para aço AISI 4340 com 0,42% C, 0,78% Mn, 1,79% Ni, 0,80% Cr e 0,33% Mo.



AUSTEMPERA E MARTEMPERA

Problemas práticos no resfriamento convencional e têmpera

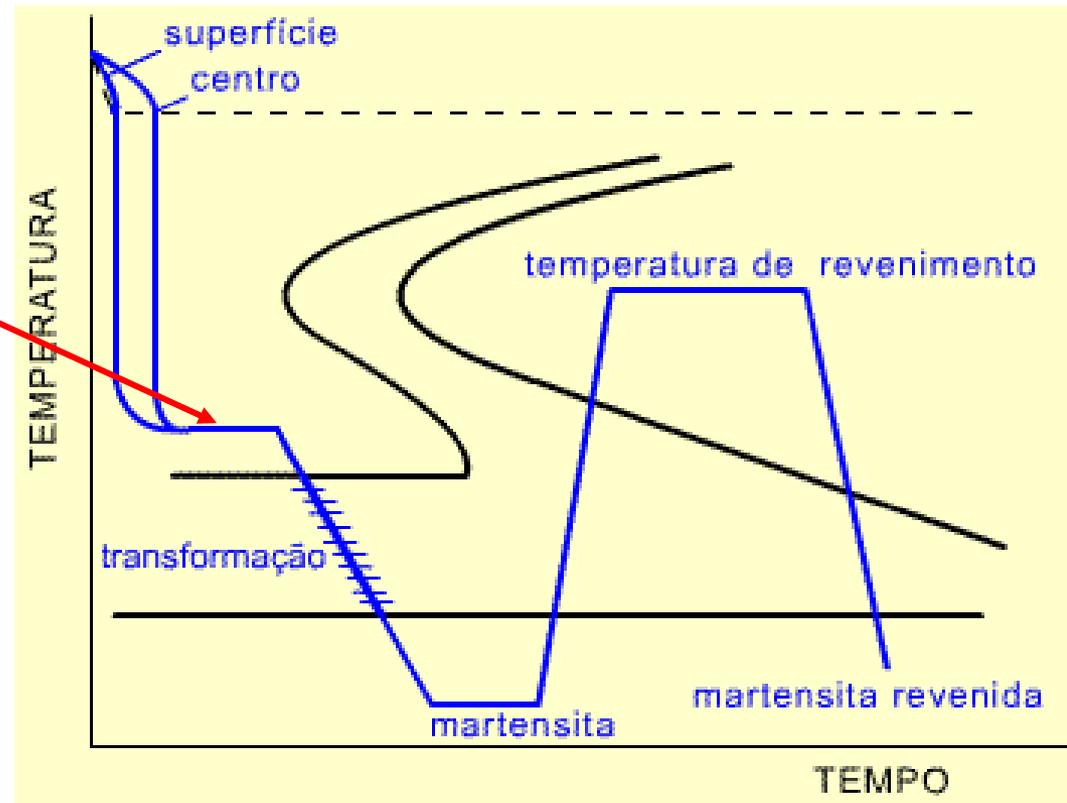
A peça/ parte poderá apresentar empenamento ou fissuras devidos ao resfriamento não uniforme. A parte externa esfria mais rapidamente, transformando-se em martensita antes da parte interna. Durante o curto tempo em que as partes externa e interna estão com diferentes microestruturas, aparecem tensões mecânicas consideráveis. A região que contém a martensita é frágil e pode trincar.

Os tratamentos térmicos denominados de ***martempera*** e ***austempera*** vieram para solucionar este problema



MARTEMPERA

- O resfriamento é temporariamente interrompido, criando um **passo isotérmico**, no qual toda a peça atinja a mesma temperatura. A seguir o resfriamento é feito lentamente de forma que a martensita se forma uniformemente através da peça. A ductilidade é conseguida através de um revenido final.





AUSTEMPERA

- Outra alternativa para evitar distorções e trincas é o tratamento denominado austêmpera, ilustrado ao lado
- Neste processo o procedimento é análogo à martêmpera. Entretanto a **fase isotérmica** é prolongada até que ocorra a completa transformação em bainita. Como a microestrutura formada é mais estável ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$), o resfriamento subsequente não gera martensita. Não existe a fase de aquecimento, tornando o processo mais barato.

