

# Diagrama TTT e CCT

Engenharia e Ciência dos Materiais I  
Profa.Dra. Luralice Canale

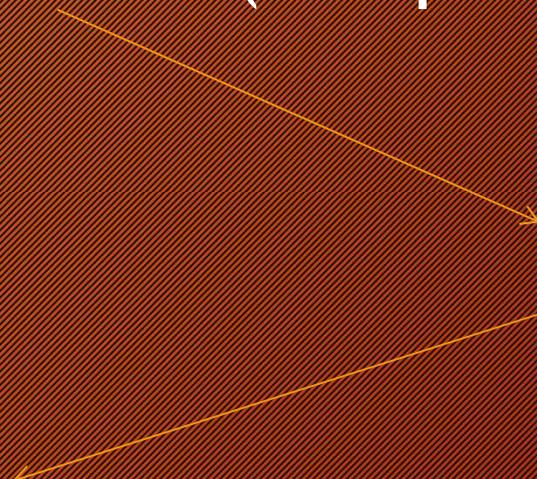
# TRANSFORMAÇÕES DE FASES EM METAIS E MICROESTRUTURAS

# Transformação de fase em metais

Tratamento térmico (tempo/temperatura)

Microestrutura

Propriedades



# Transformação de fase em metais

- Dependente da difusão , sem modificações na composição de fase ou números de fase presentes: *solidificação de metal puro, transformações alotrópicas, recristalização, etc.*
- Dependente da difusão, composição e/ou número de fases: *transformações eutetóides*
- Sem difusão: *produz uma fase metaestável por movimentos cooperativos de átomos na estrutura. (transformação martensítica).*

# Transformação de fase em metais

As transformações de fase dependentes da difusão não ocorrem instantaneamente.

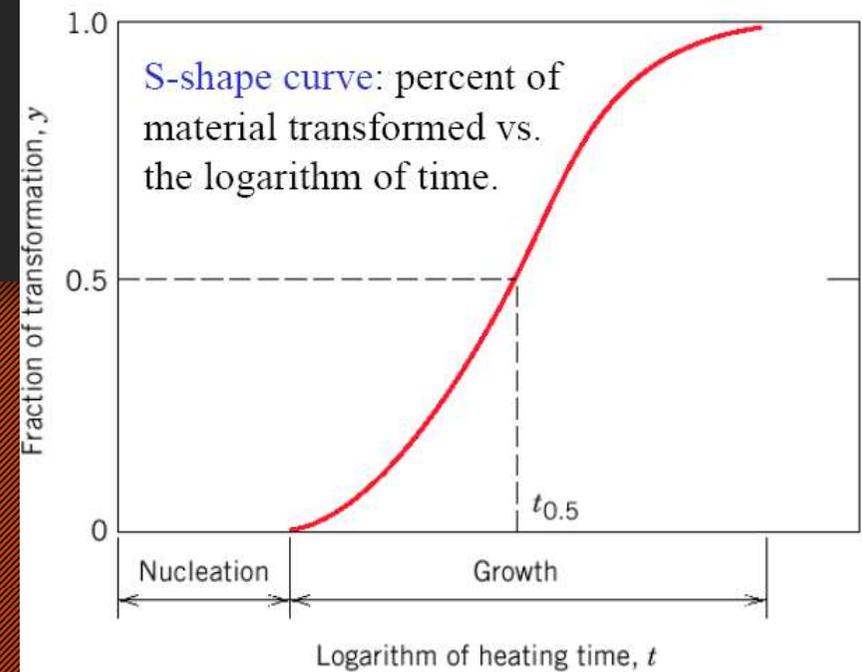
A microestrutura final depende da taxa de aquecimento e resfriamento.

Muitas transformações de fase envolvem mudança em composição, assim é necessária uma redistribuição de átomos via difusão.

O processo de transformação de fase envolve:

**Nucleação de uma nova fase:** *formação de pequenas partículas (núcleos) da nova fase. Esses núcleos são formados em contornos de grão e em outros defeitos.*

**Crescimento de uma nova fase às expensas da original.**



- Fases metaestáveis podem ser formadas como um resultado de mudanças muito rápidas de temperatura. A microestrutura é fortemente afetada pela taxa de resfriamento.

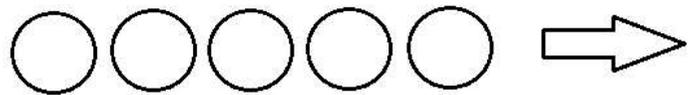
As condições de equilíbrio caracterizadas pelo diagrama de fases ocorrem apenas quando o resfriamento é dado em taxas extremamente lentas, o que para fins práticos é inviável

Um resfriamento fora do equilíbrio  
pode ocasionar:

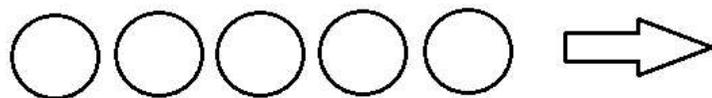
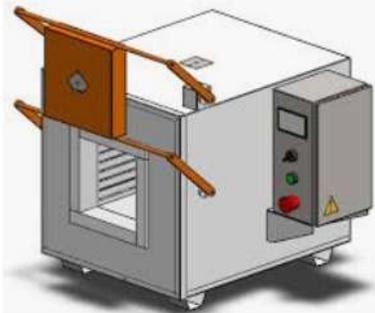
- Ocorrências de fases ou transformações em temperaturas diferentes daquela prevista no diagrama
- Existência a temperatura ambiente de fases que não aparecem no diagrama (fases metaestáveis)

# CURVAS TTT

- 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**



"Bolachas" de Aço 1080 austenitizadas

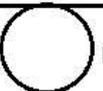


Transferidas para o banho de sal a 705 graus C



Permaneceram diferentes tempos neste banho

5,8 min



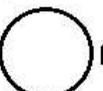
19,2 min



22,0 min

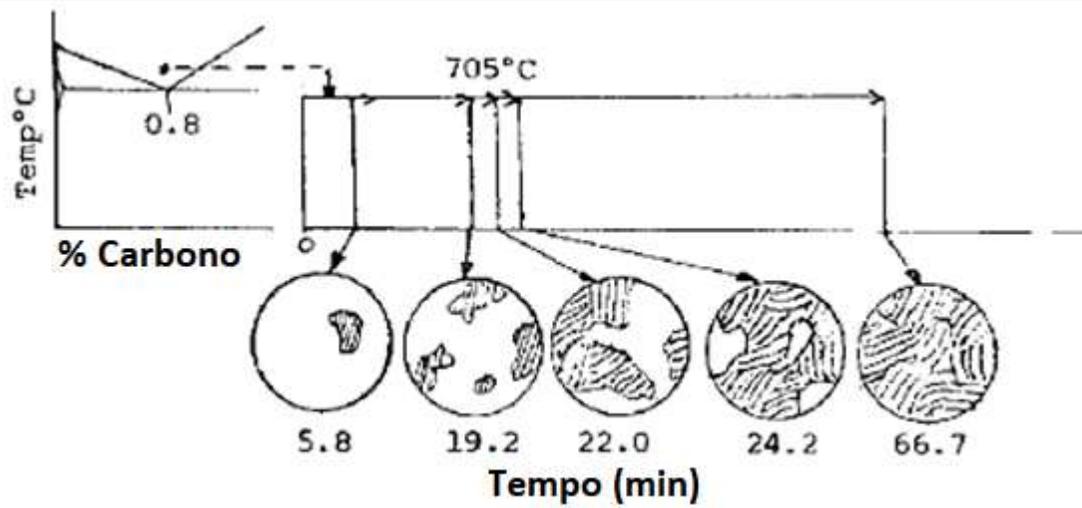


24,2 min

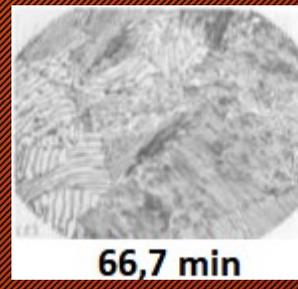
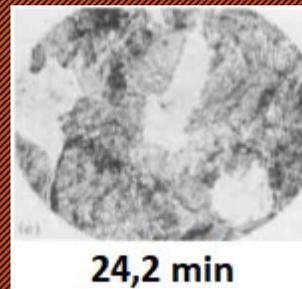
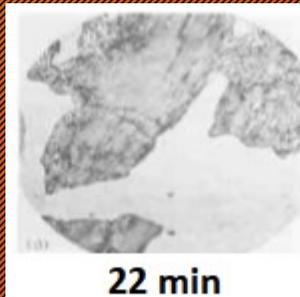
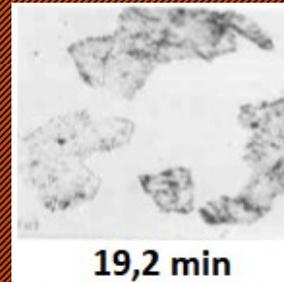
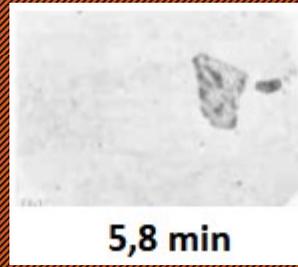


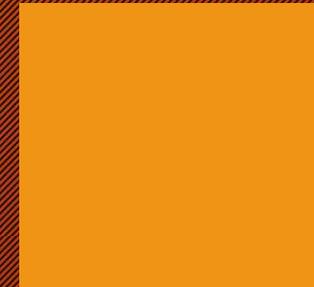
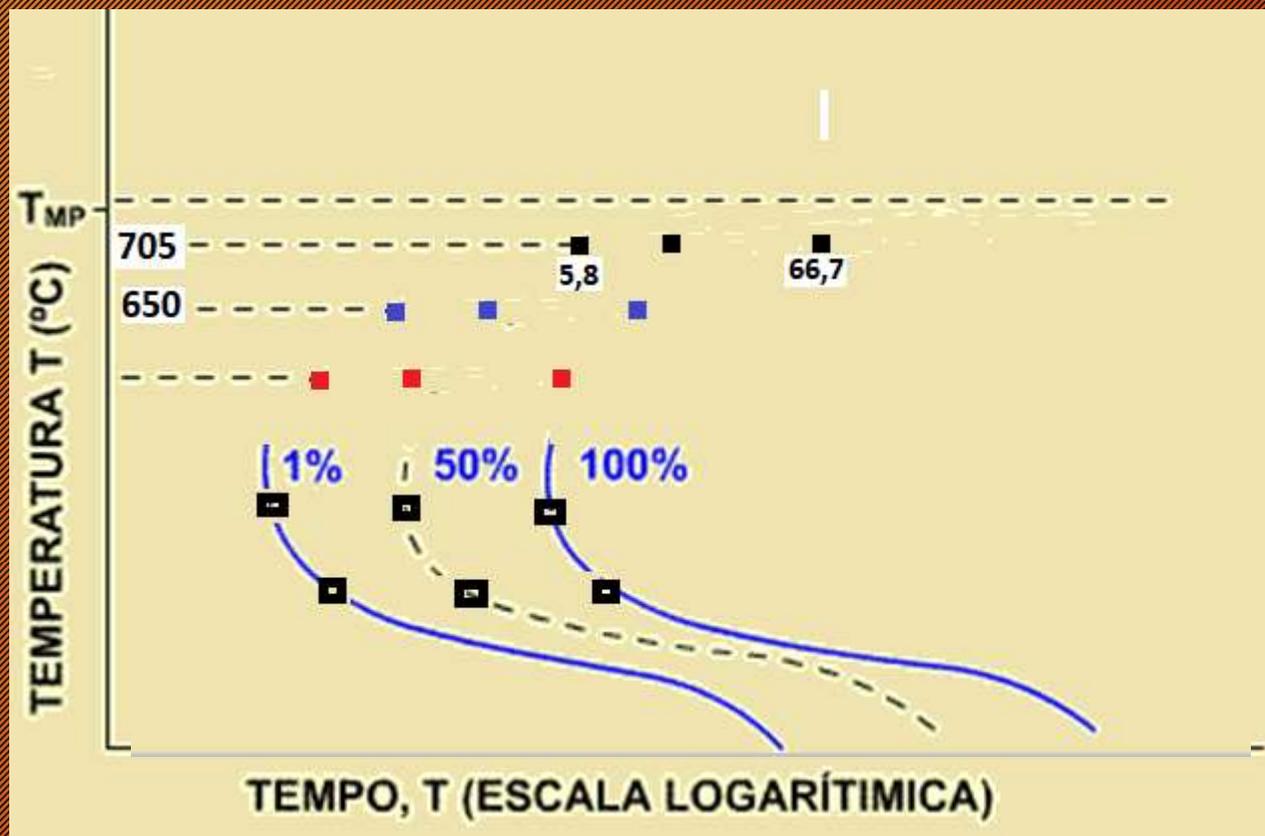
66.7 min





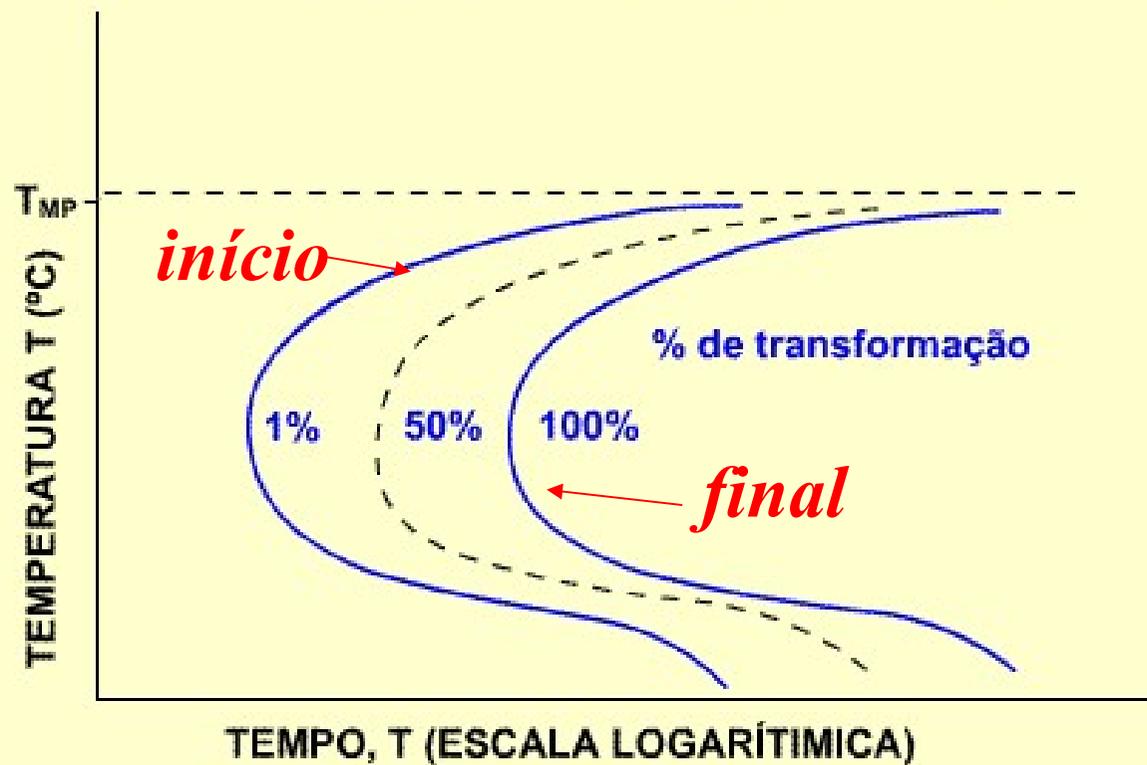
Transformação isotérmica





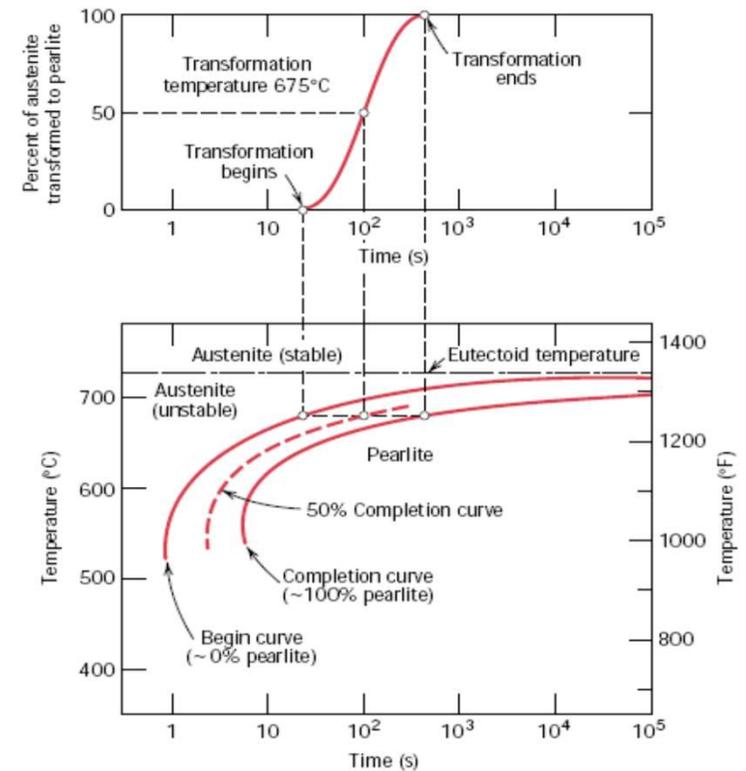
# CURVAS TTT

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



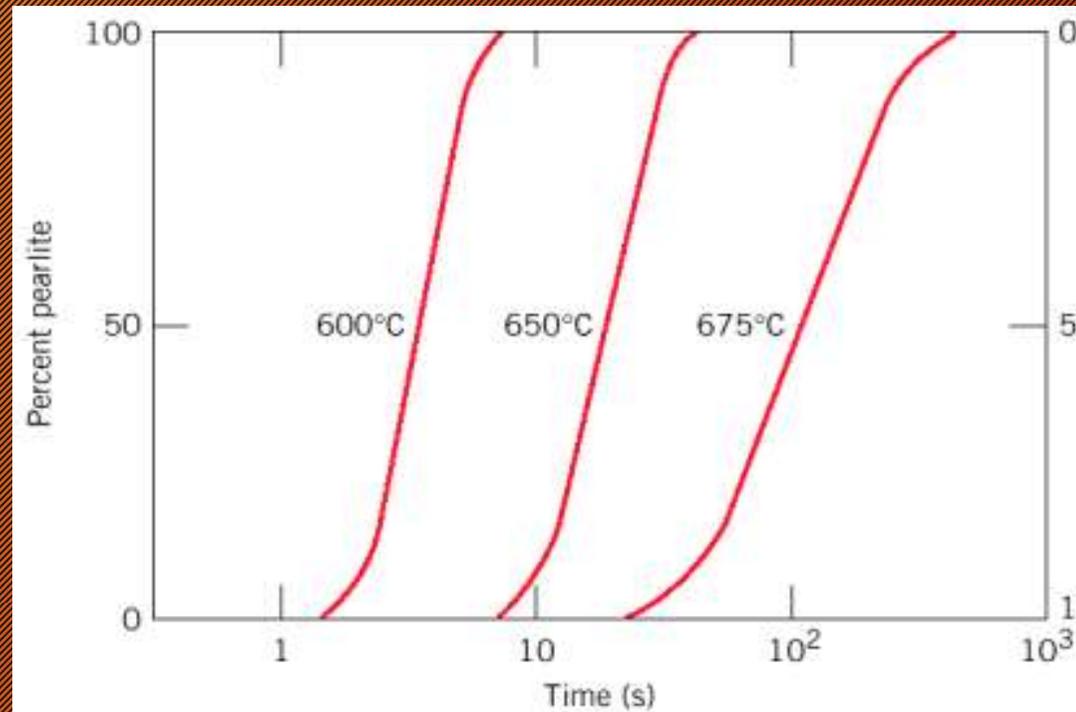
## Diagrama de Transformação isotérmica para uma liga Fe-C de composição Eutetóide

- A transformação de 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



# CURVAS TTT

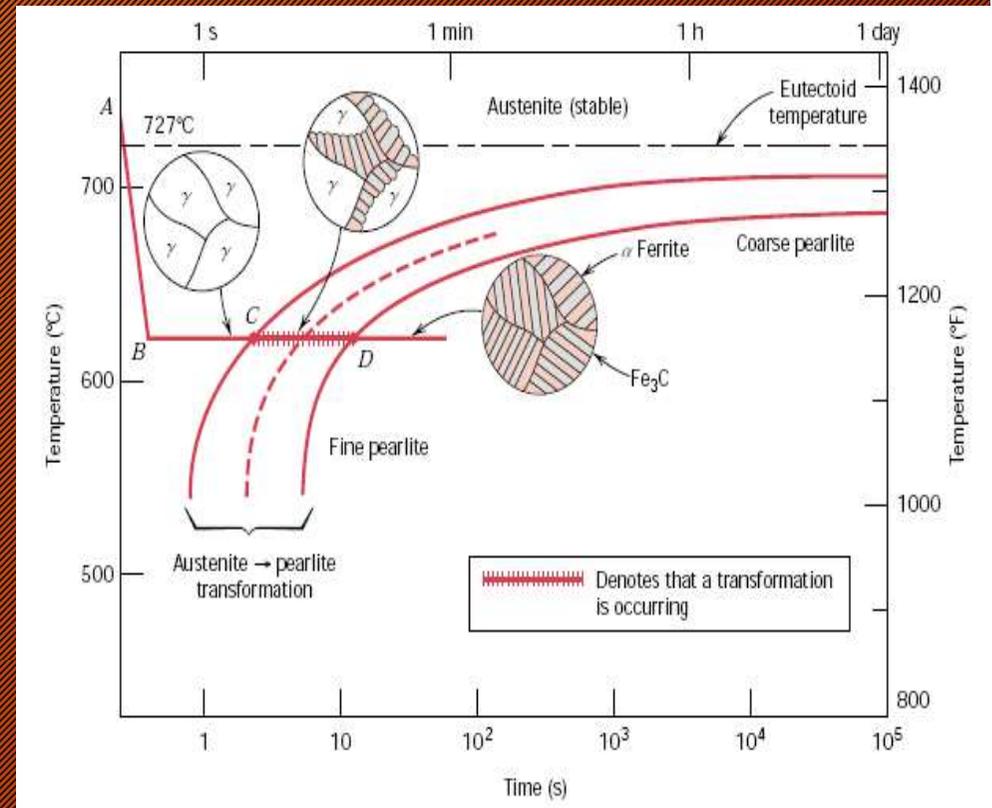
Usando uma família de curvas em S a diferentes temperaturas os diagramas TTT são construídos.



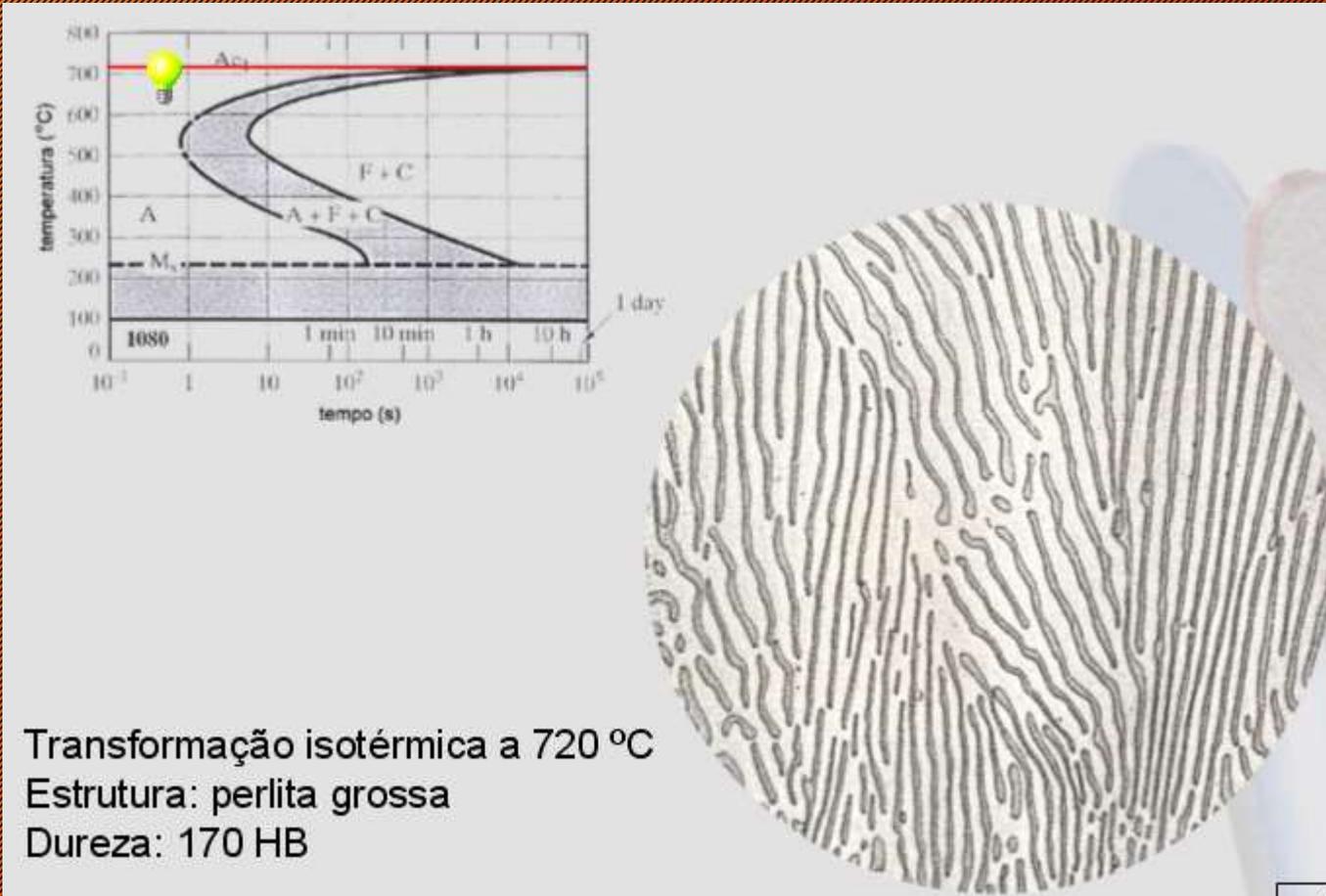
A baixas temperaturas a transformação ocorre mais cedo (é controlada pela taxa de nucleação) e o crescimento de grão (que é controlado pela difusão) é reduzido.

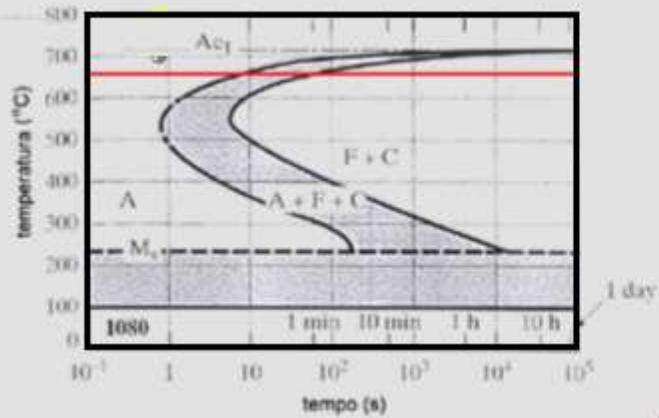
Difusão lenta a baixas temperaturas leva a uma estrutura mais fina com espaçamento lamelar menor – perlita fina.

A altas temperaturas, altas taxas de difusão permitem um maior crescimento de grão e maior espaçamento lamelar – perlita grossa.

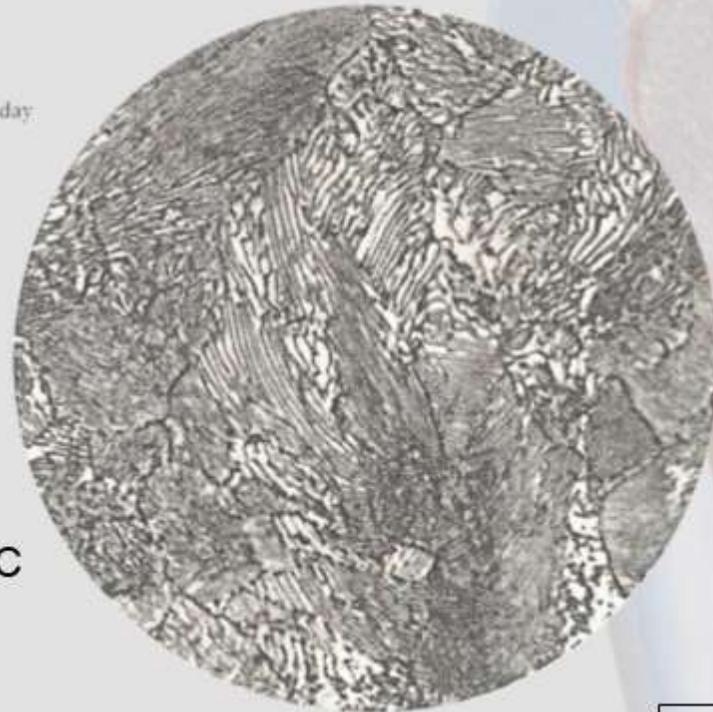
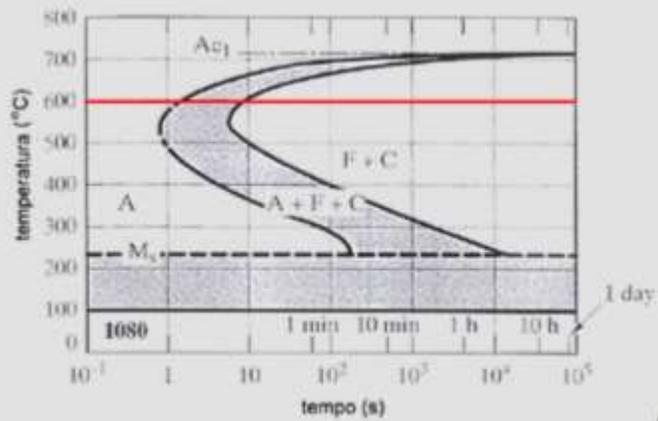


# TRANSFORMAÇÃO ISOTÉRMICA DE LIGA Fe-C (eutetóide)

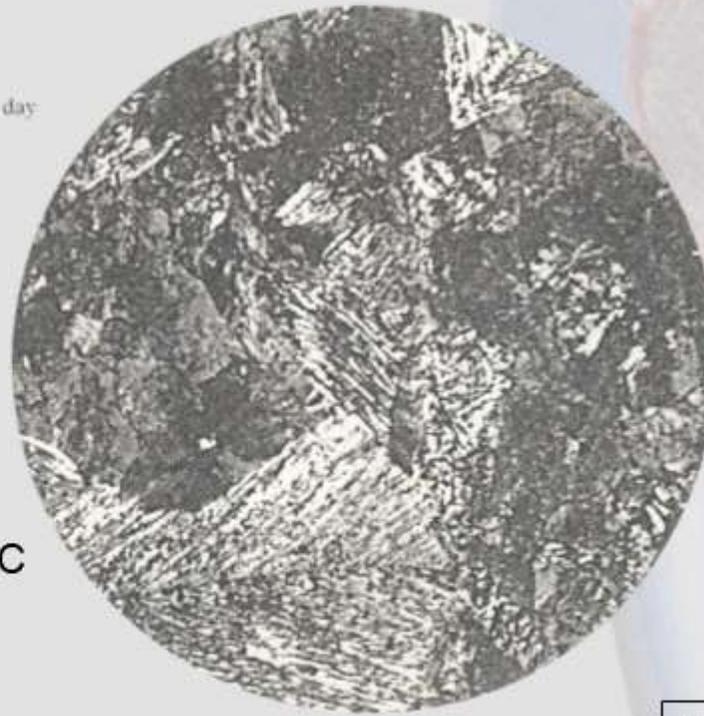
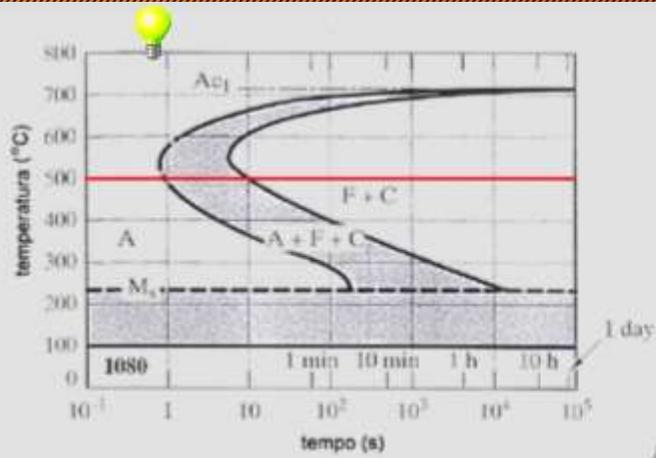




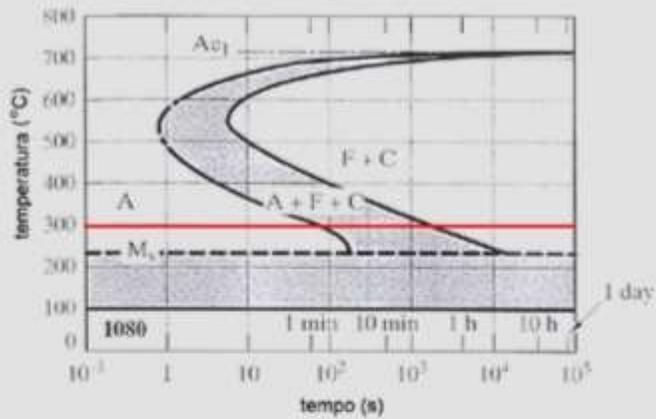
Transformação isotérmica a 660 °C  
 Estrutura: perlita média  
 Dureza: 296 HB



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



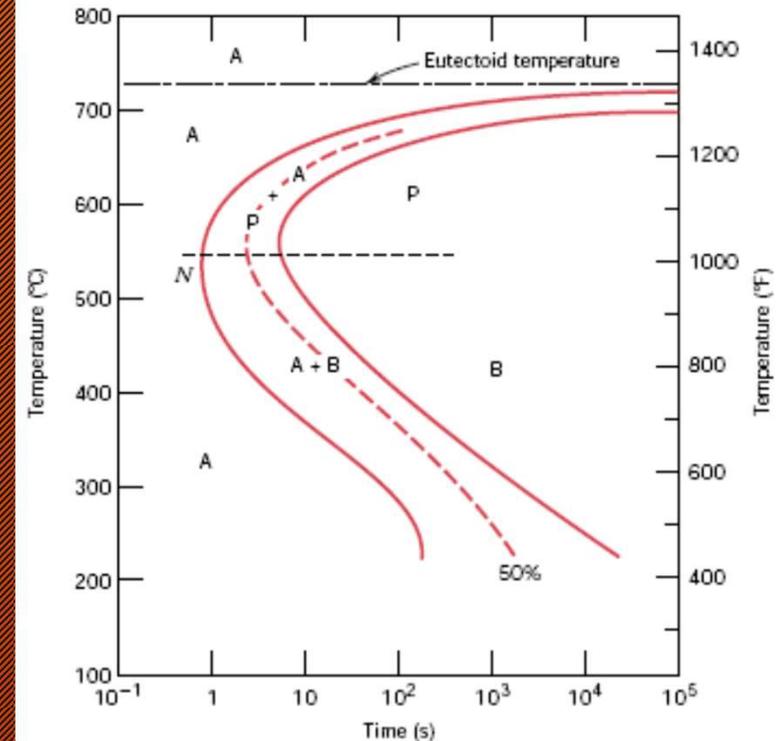
Transformação isotérmica a 480 °C  
Estrutura: bainítica



Transformação isotérmica a 300 °C  
Estrutura: bainítica

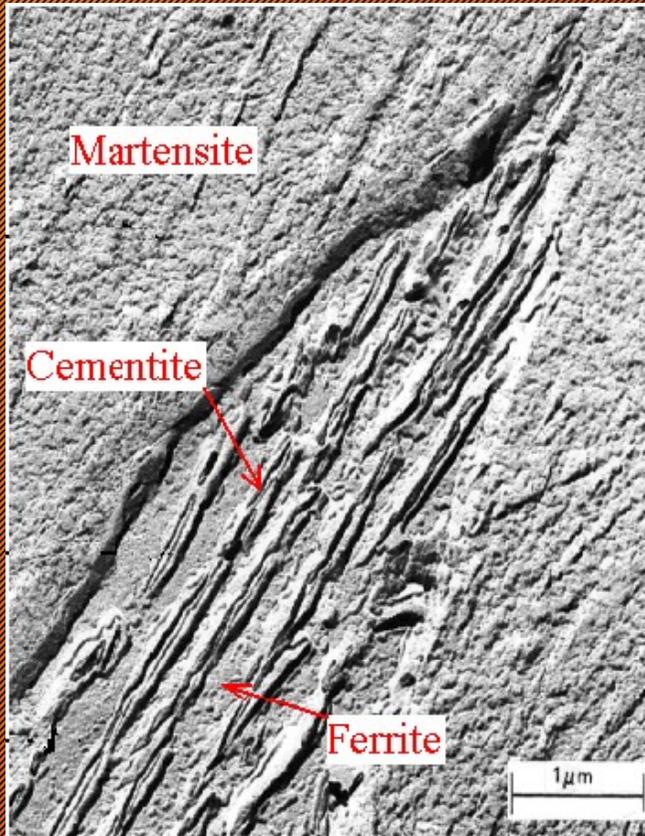
# BAINITA

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



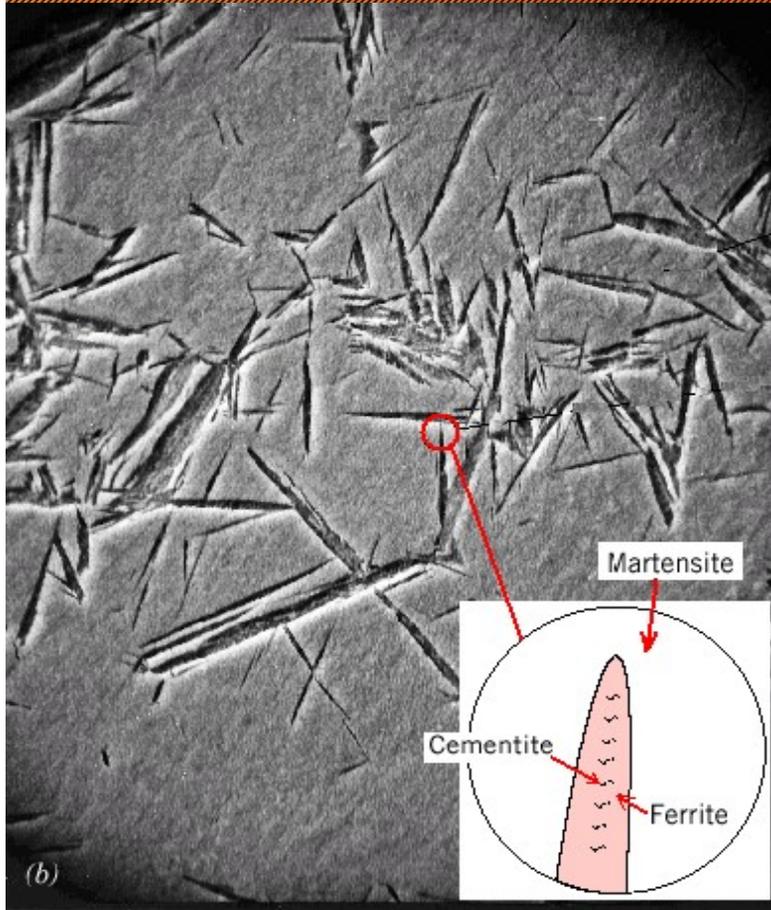
# BAINITA

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

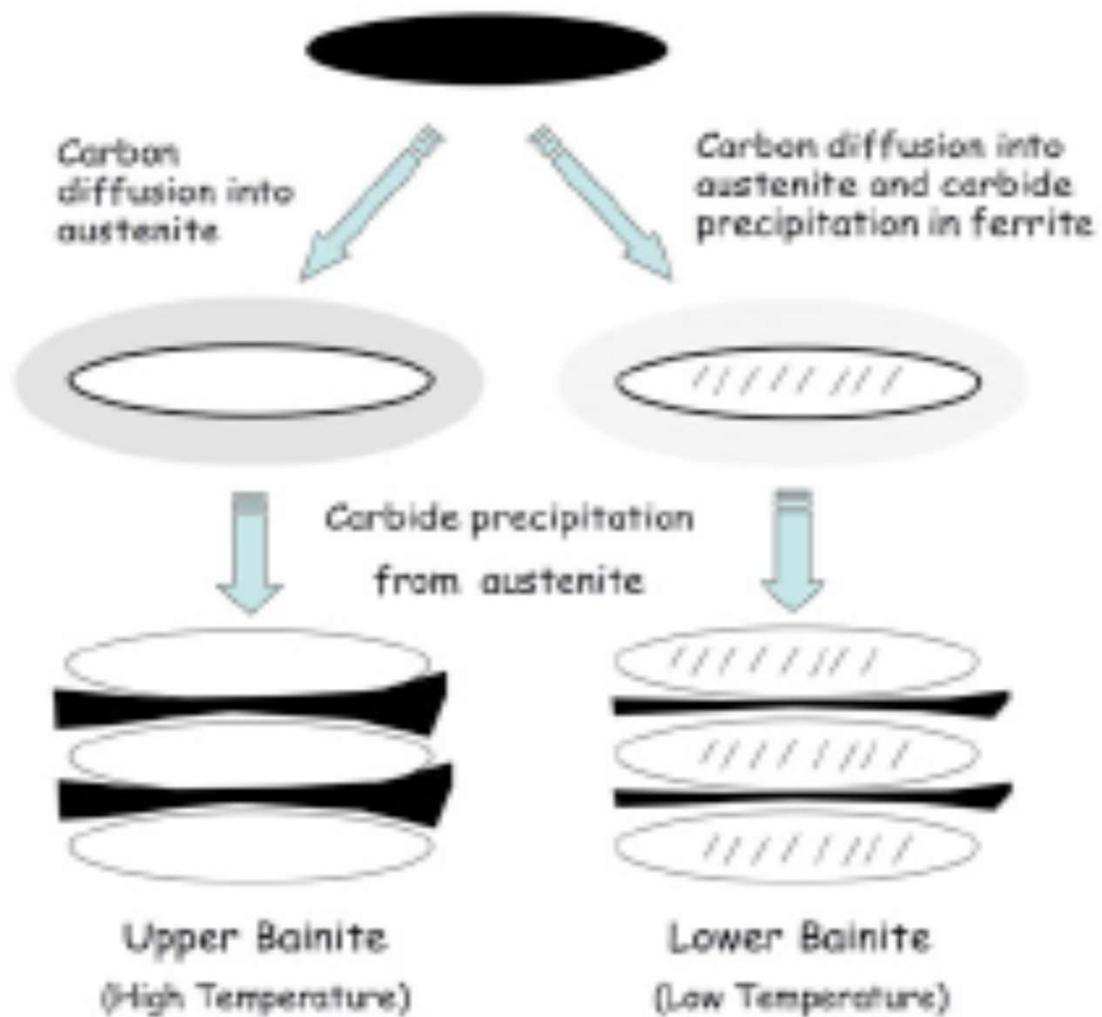


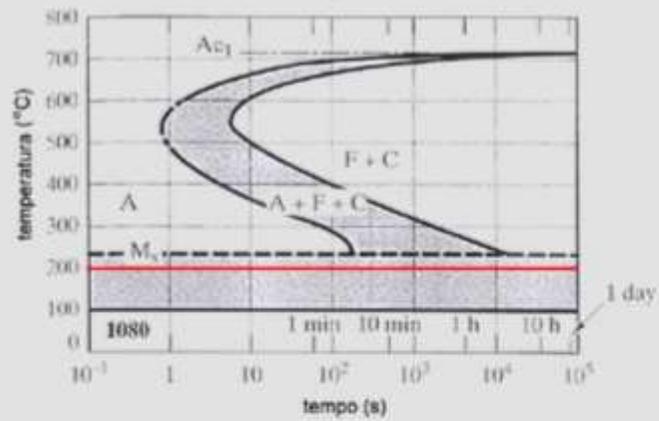
# BAINITA

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



## Carbon supersaturated plate





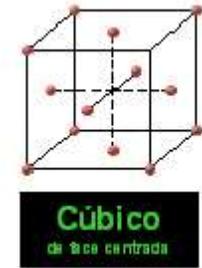
Transformação isotérmica a 200 °C  
Estrutura: martensítica

# MARTENSITA

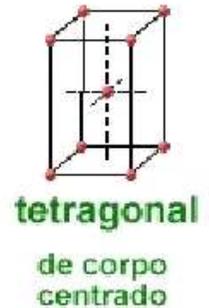
- A martensita se forma quando o resfriamento for rápido o suficiente de forma a **evitar a difusão do carbono**, ficando o mesmo retido em solução. Como consequência disso, ocorre a transformação polimórfica mostrada ao lado.

- Como a martensita não envolve difusão, a sua formação ocorre instantaneamente (independente do tempo).

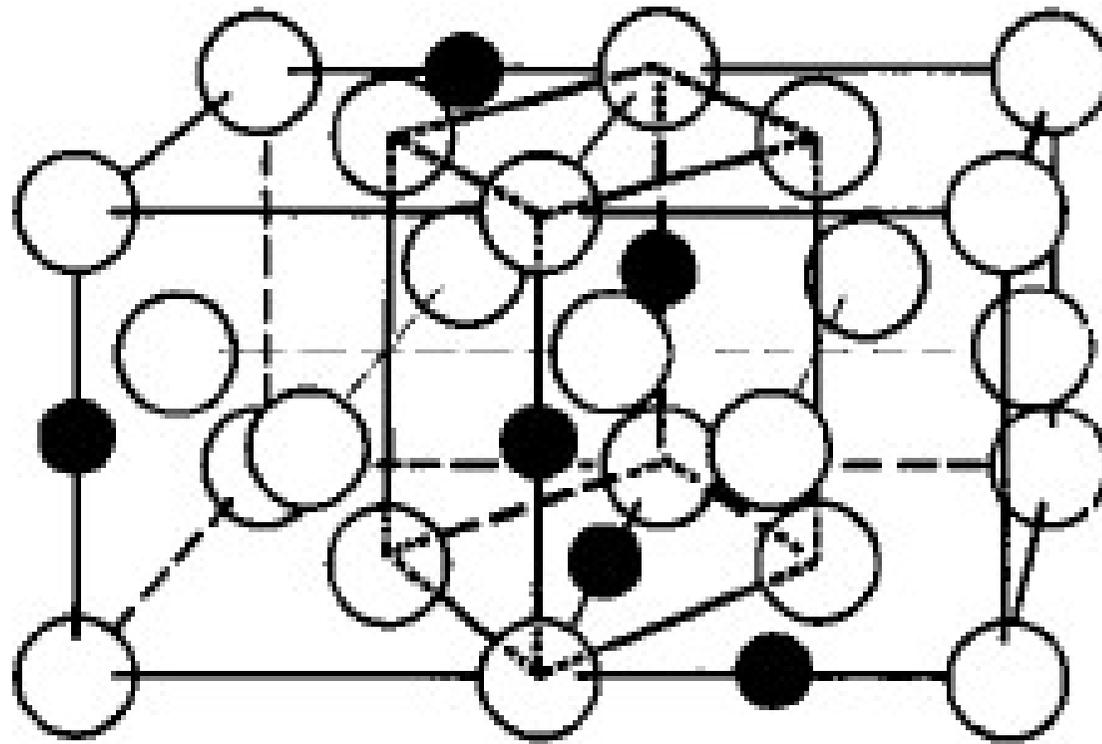
**AUSTENITA**



**MARTENSITA**



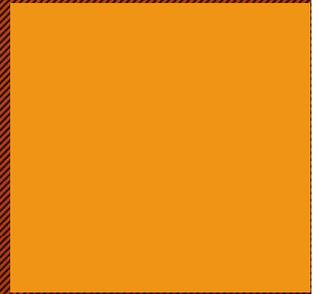
**TRANSFORMAÇÃO  
ALOTRÓPICA COM  
AUMENTO DE VOLUME,  
que leva à concentração de tensões**



*Figure 1.14* Simple model for the transformation of austenite ( $\gamma$ ) to martensite ( $\alpha$ )

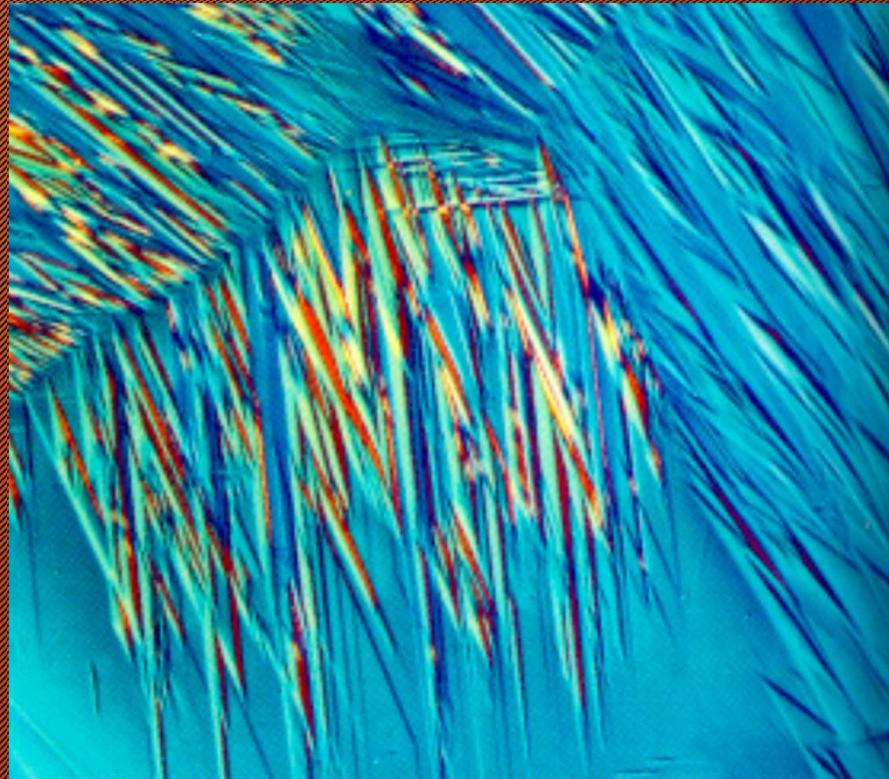
# MARTENSITA

- Sendo uma fase fora de equilíbrio, a martensita não aparece no diagrama de fases Fe – C.
- Martensita se forma quando a austenita é rapidamente resfriada a temperatura ambiente.
- Forma-se instantaneamente quando a requerida baixa temperatura é atingida.
- A transformação não envolve difusão, é
- atérmica, forma-se por escorregamento de
- planos da austenita. Velocidade de
- transformação próxima à velocidade do som.



- Martensita é metaestável, pode persistir indefinidamente na temperatura ambiente, mas se transformará em fases de equilíbrio se um recozimento a altas temperaturas for realizado.
- A martensita pode coexistir com outras microestruturas do sistema Fe-C.
- Há duas morfologias da martensita

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



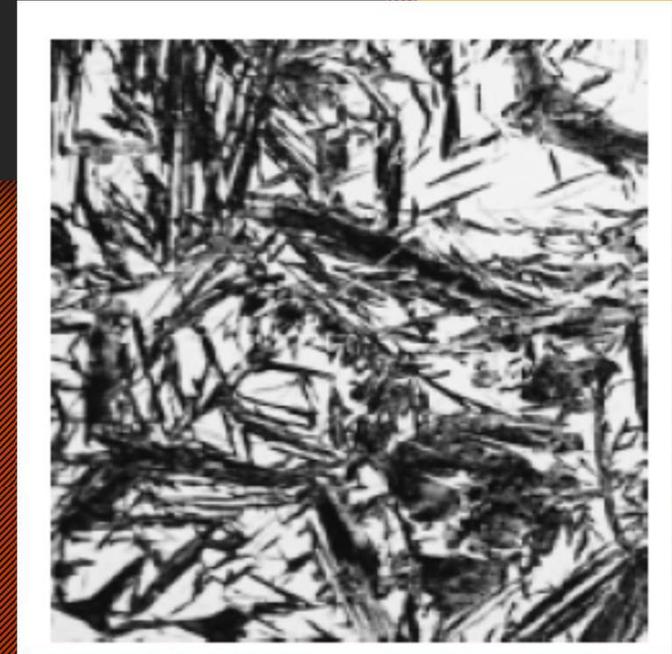
# MARTENSITA EM FORMA DE RIPAS

- 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

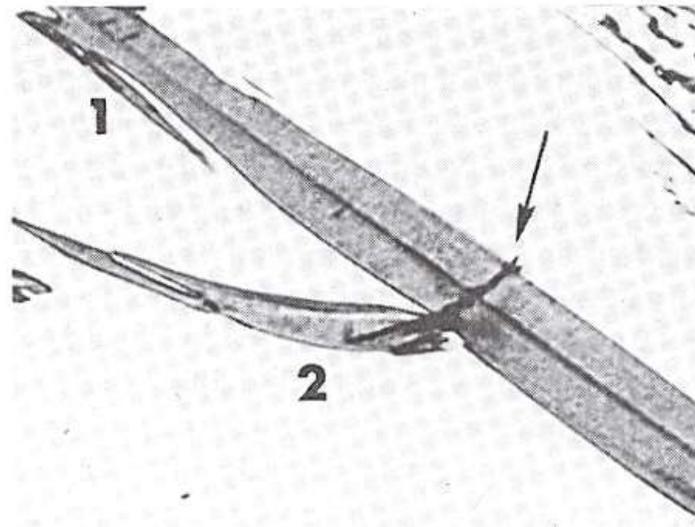
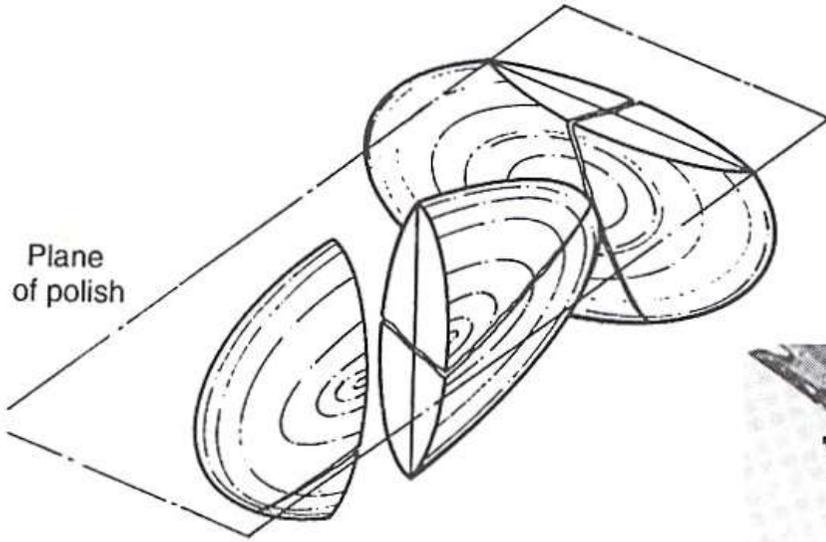


# MARTENSITA EM FORMA LENTICULAR

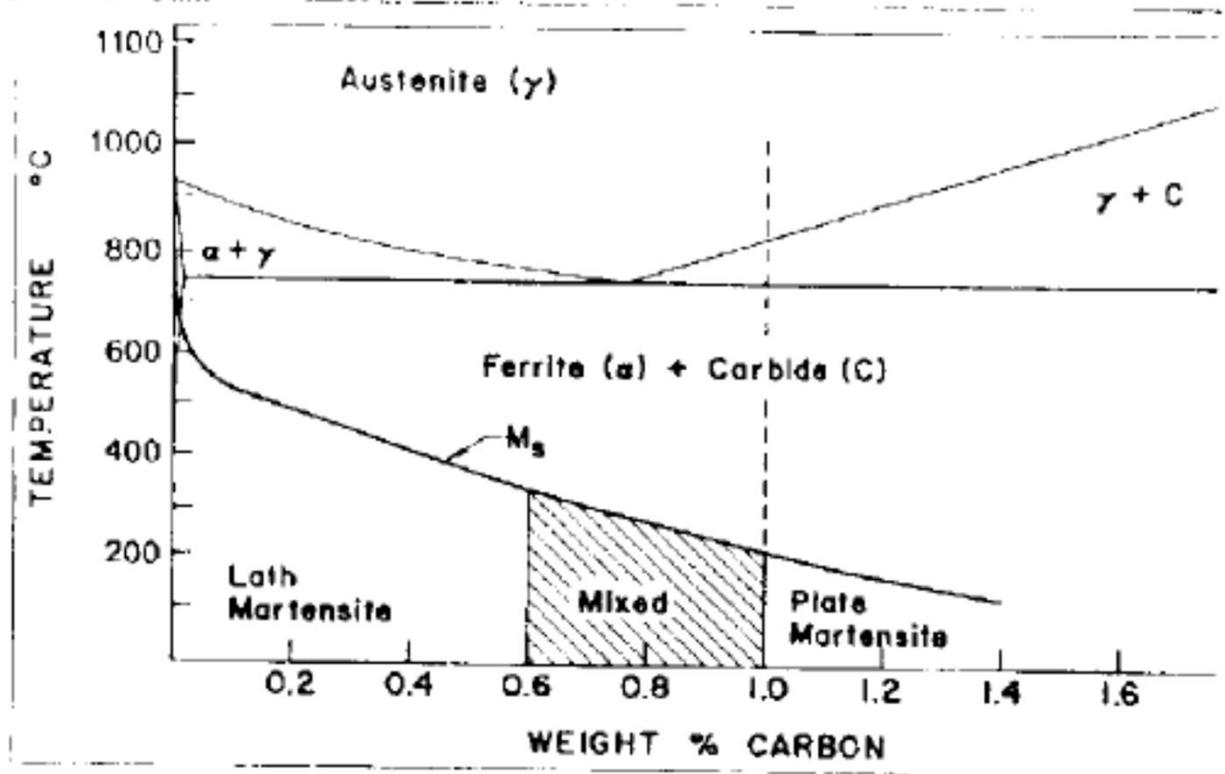
- A martensita lenticular(ou em placas) é encontrada em ligas ferro-carbono com concentrações maiores que 0,6% de C
- Na fotomicrografia pode-se observar os grãos de martensita em forma de agulhas(regiões escuras) e austenita que não se transformou durante o resfriamento (regiões claras) denominada austenita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

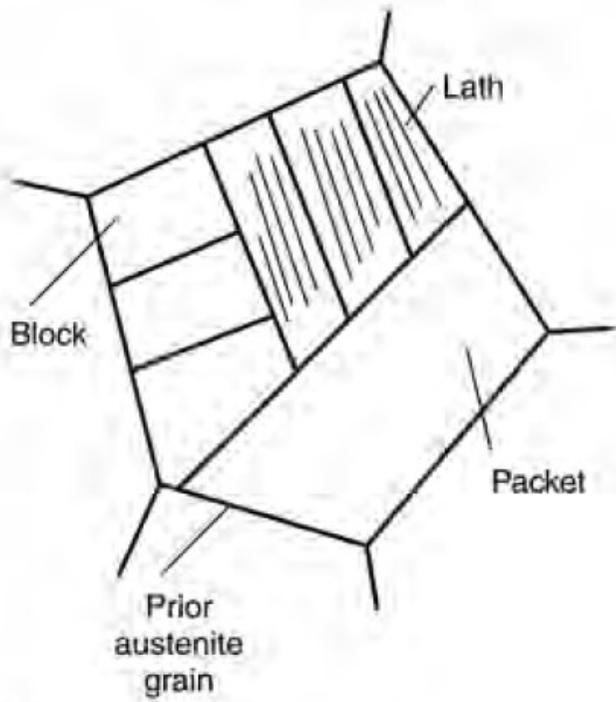


Plane  
of polish

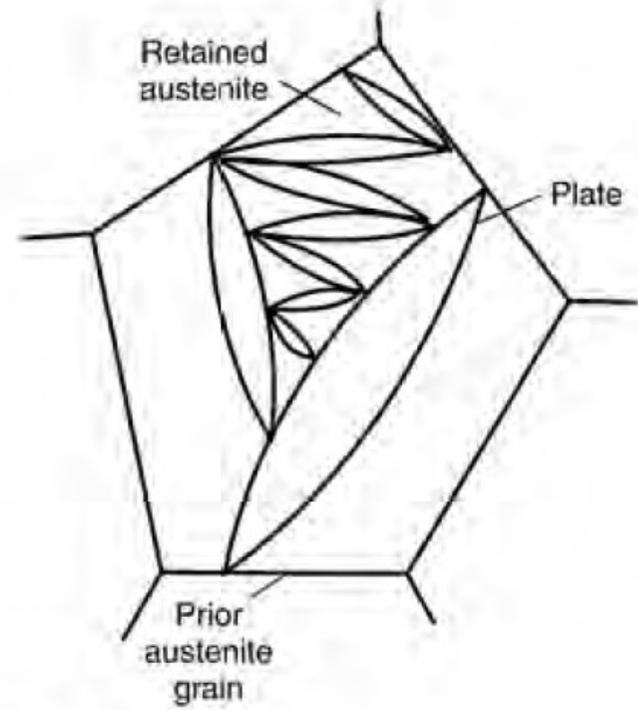


# Martensitic Transformation Temperature

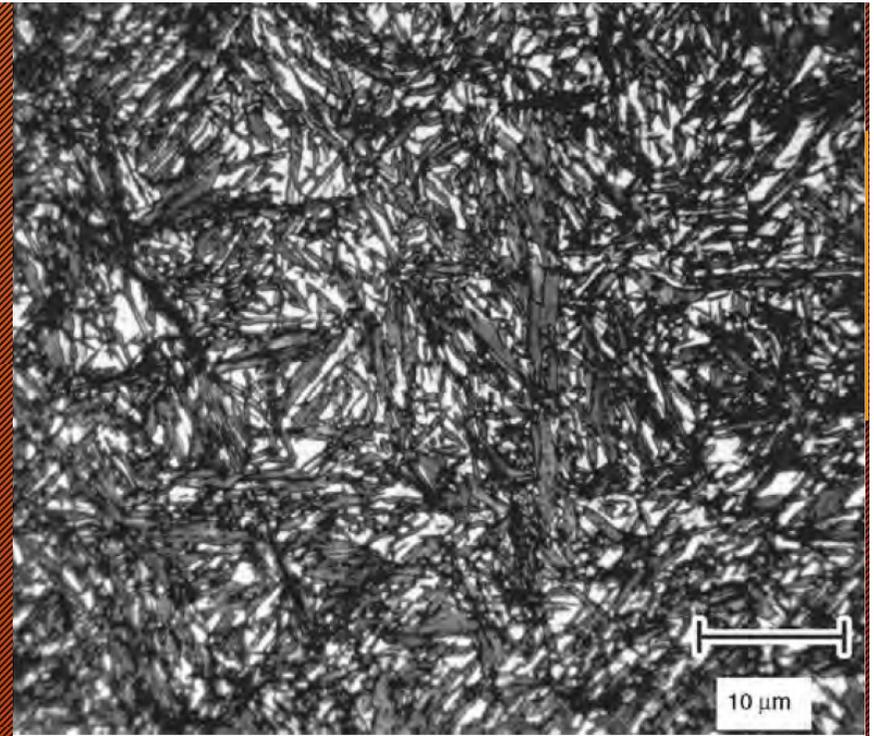
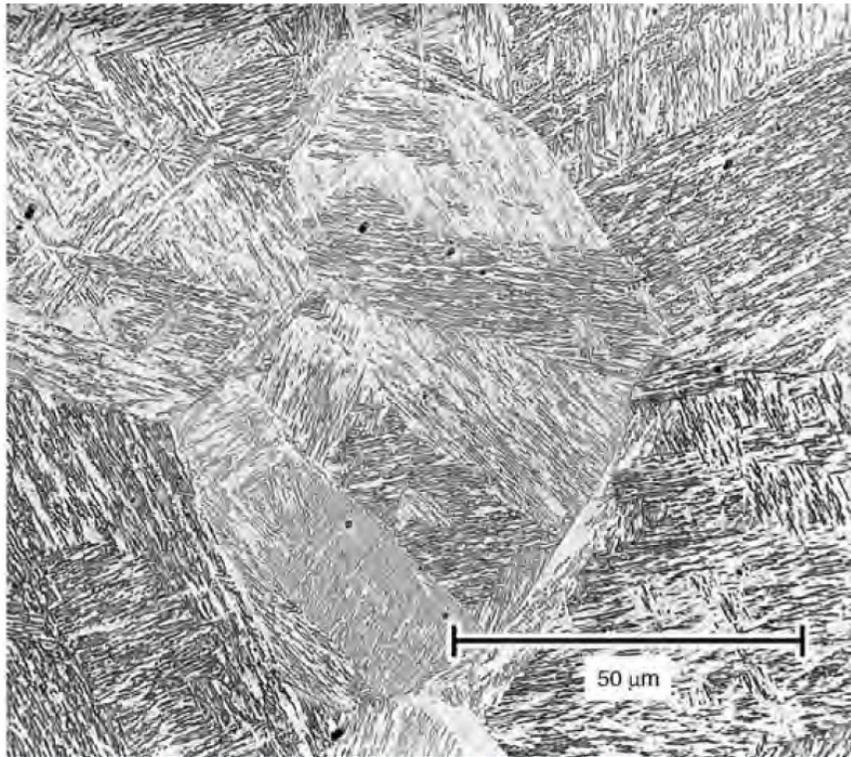




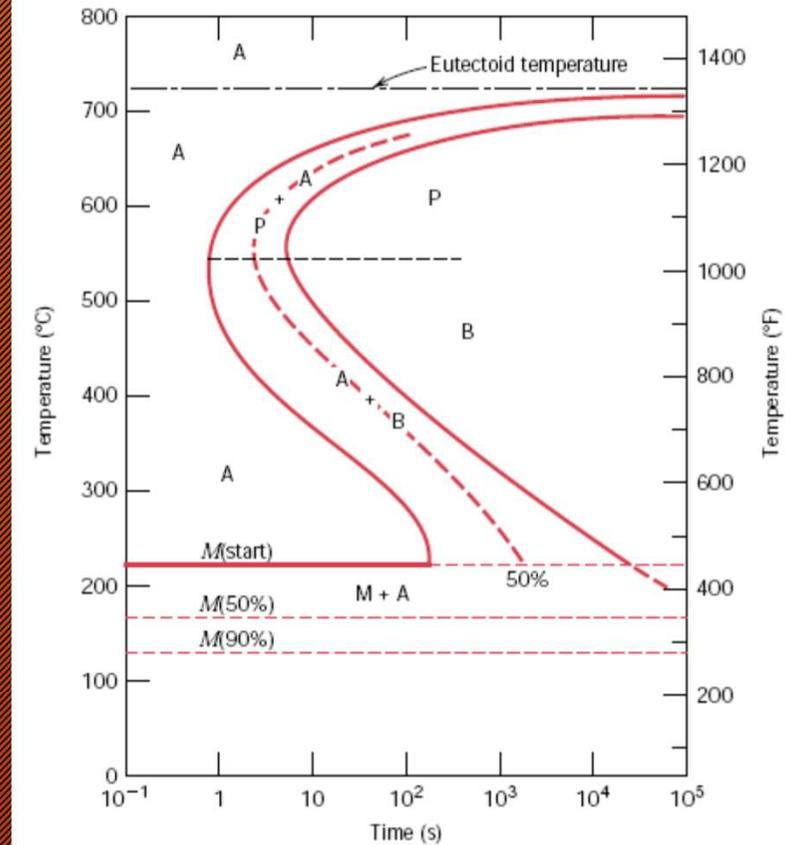
(a)

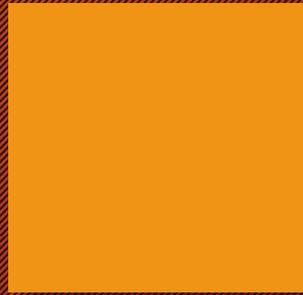
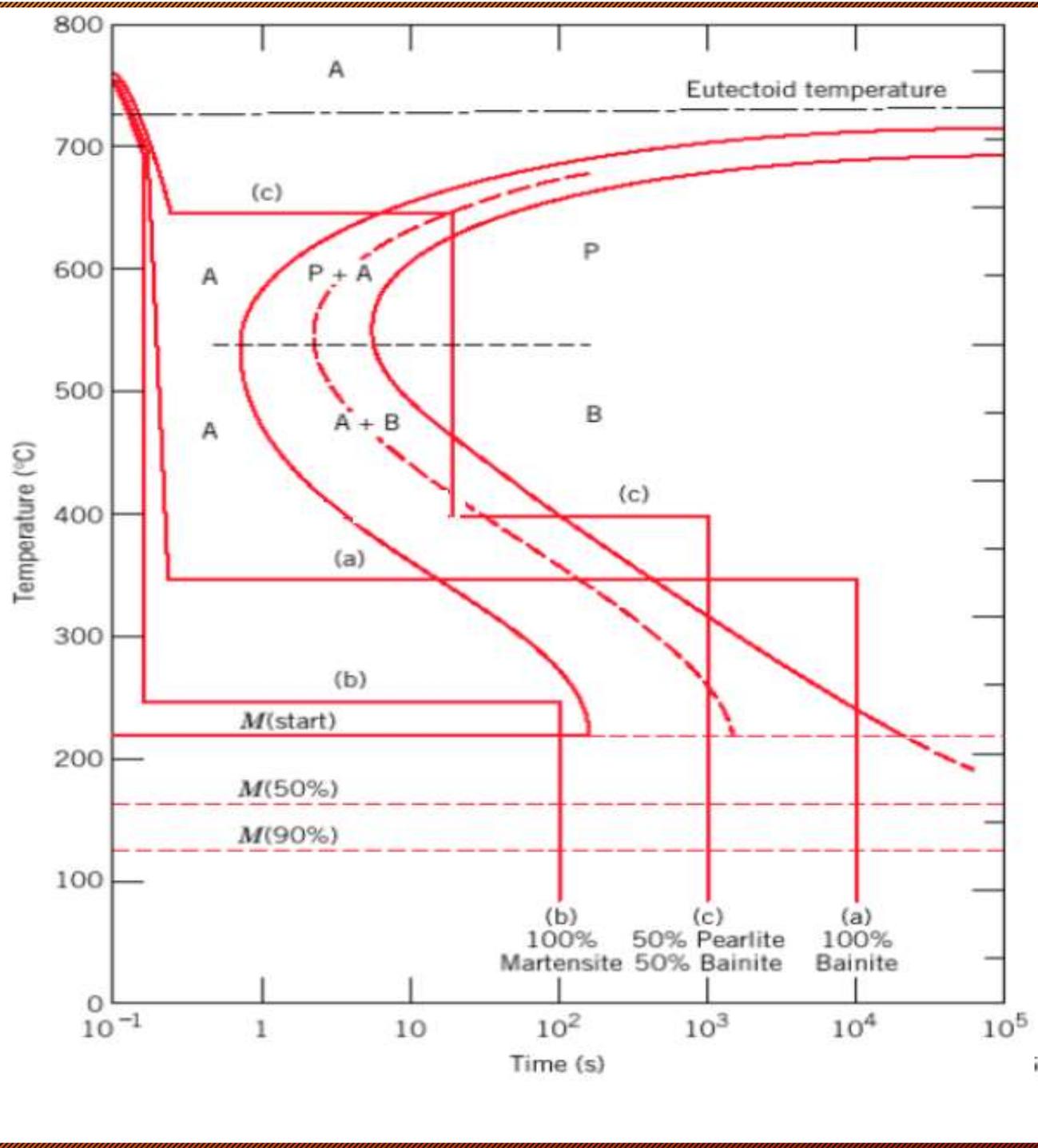


(b)



- O início da transformação martensítica está representado por uma linha horizontal designada por M(start).
- 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



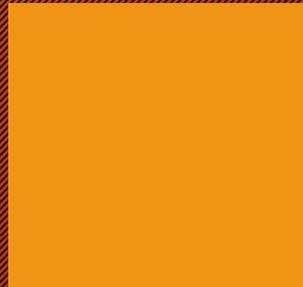
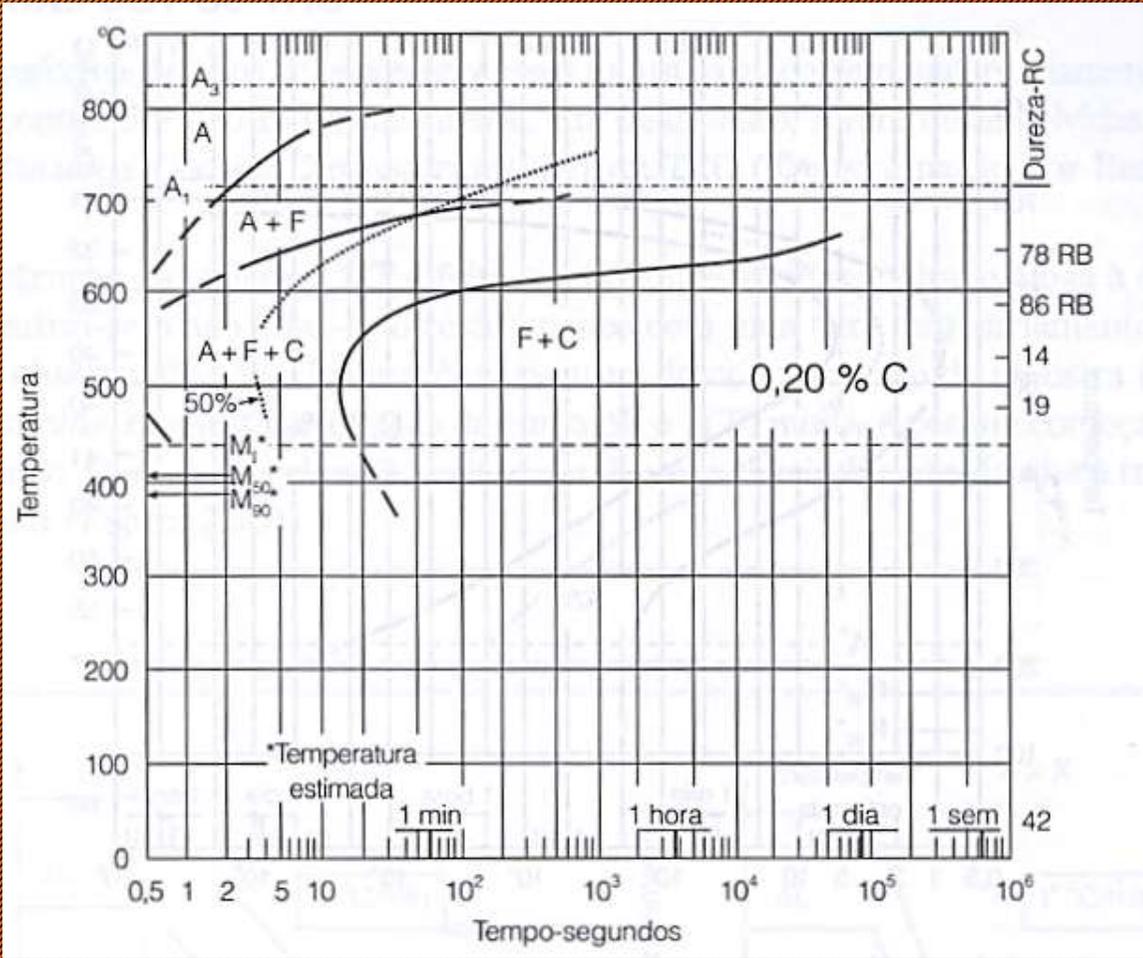


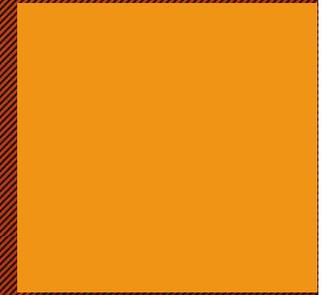
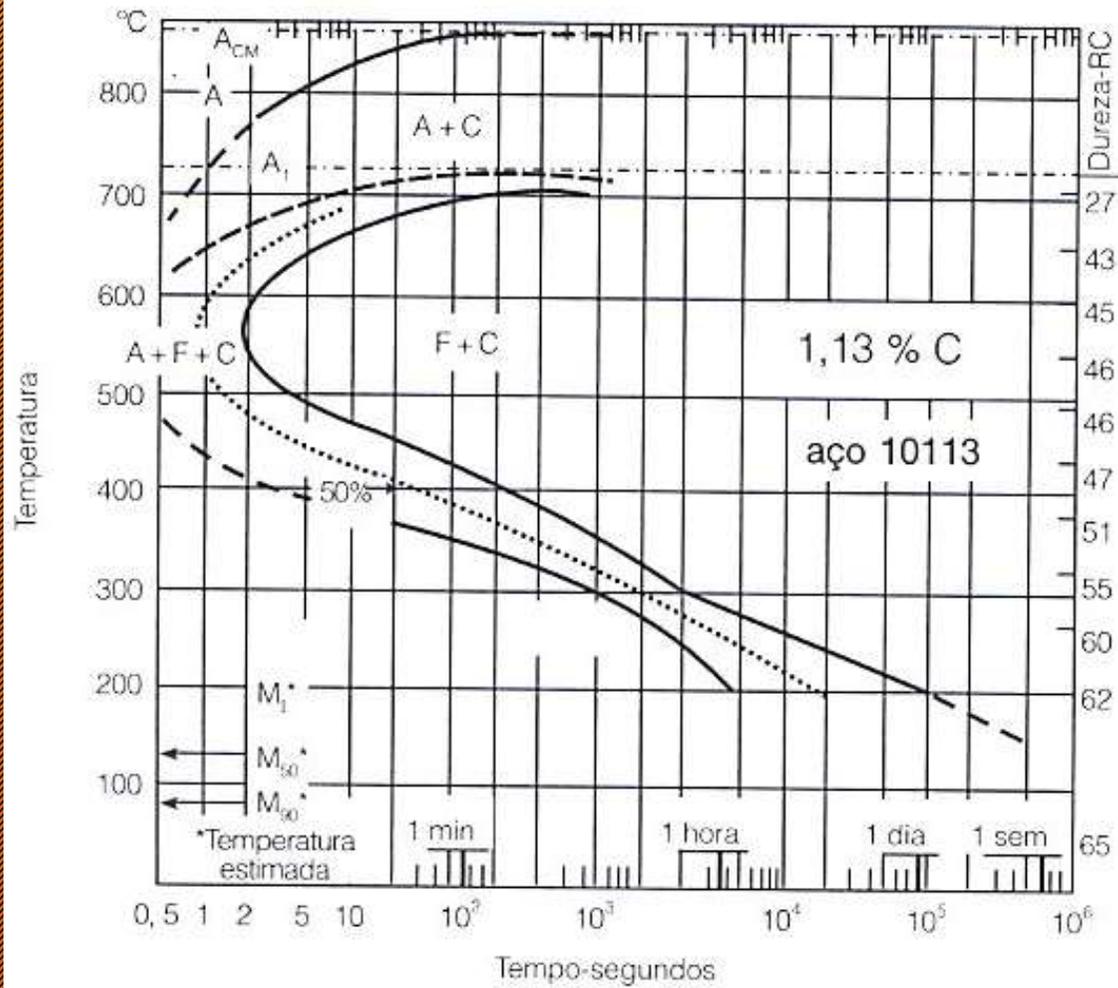
## CURVA TTT para outros aços

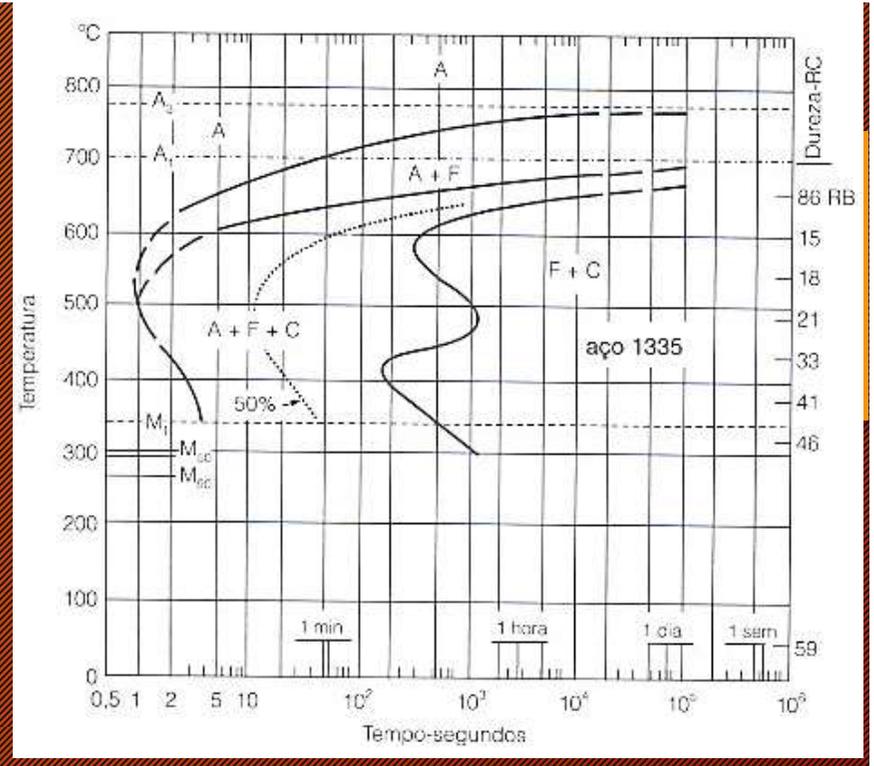
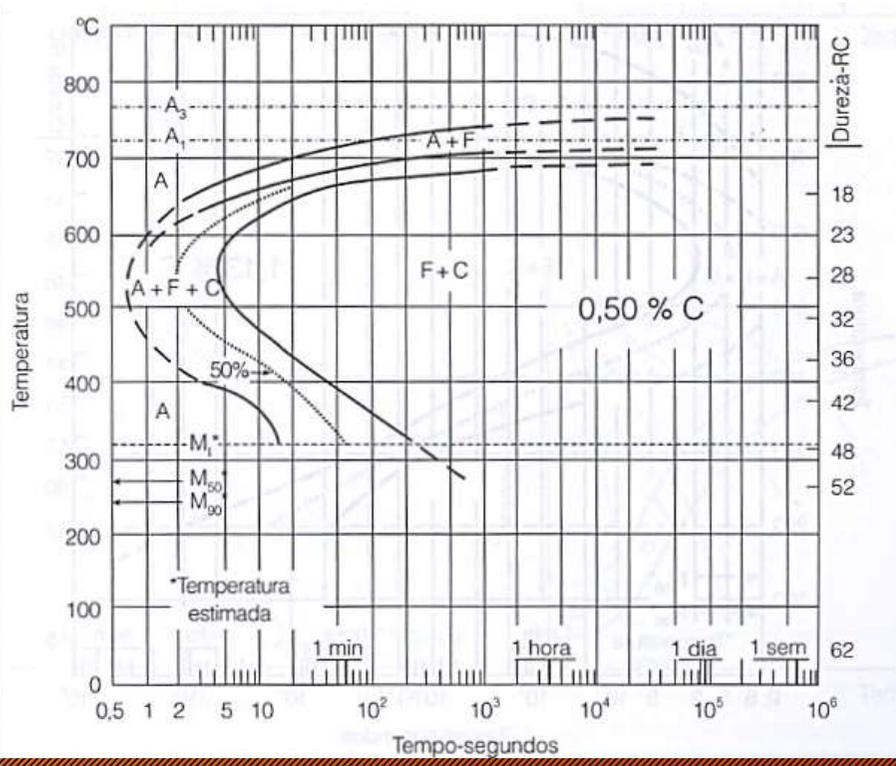
Para outras composições que não a eutetóide, fases pró eutetóides coexistem com a perlita.

Para os aços hipoeutetóides há a ferrita.

Para os aços hipereutetóides há a cementita.

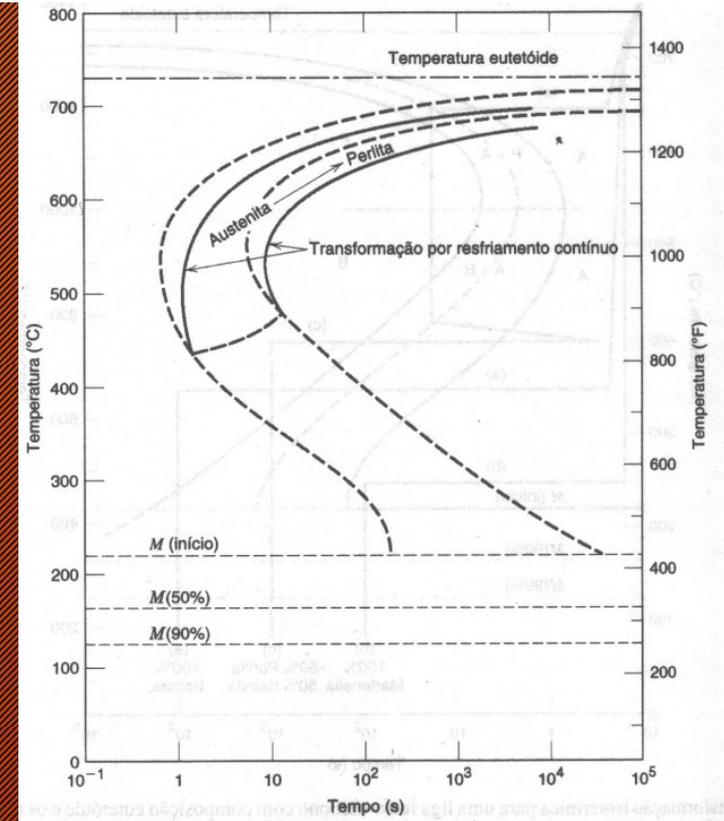






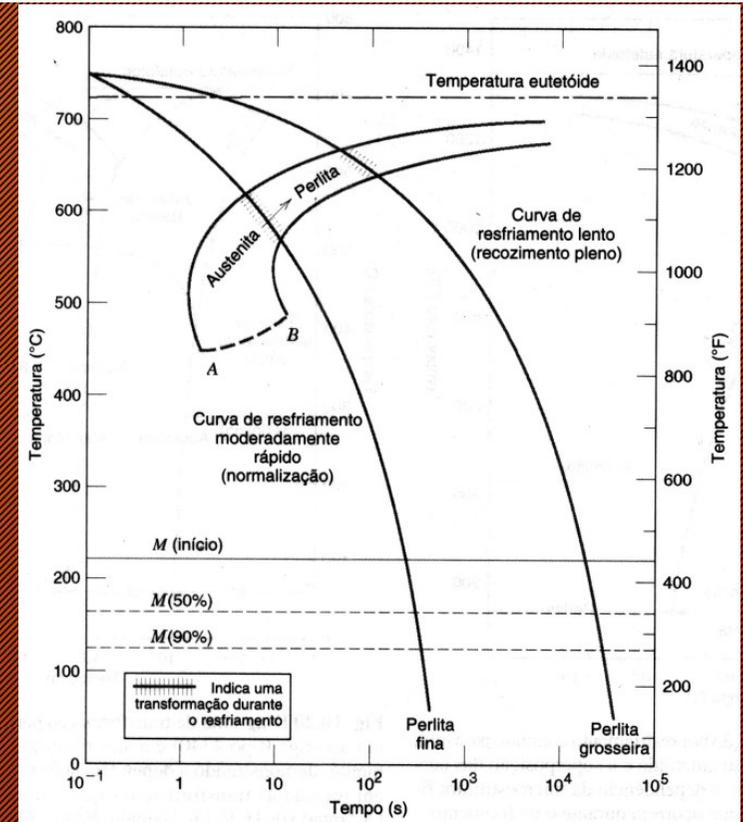
# RESFRIAMENTO CONTÍNUO

- 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



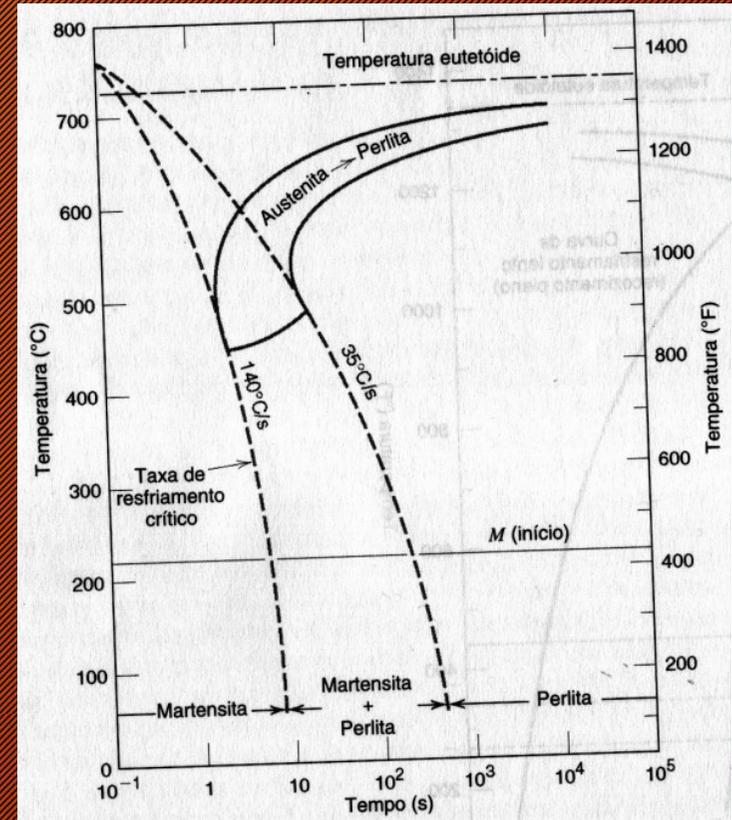
# RESFRIAMENTO CONTÍNUO

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



# 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 à 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

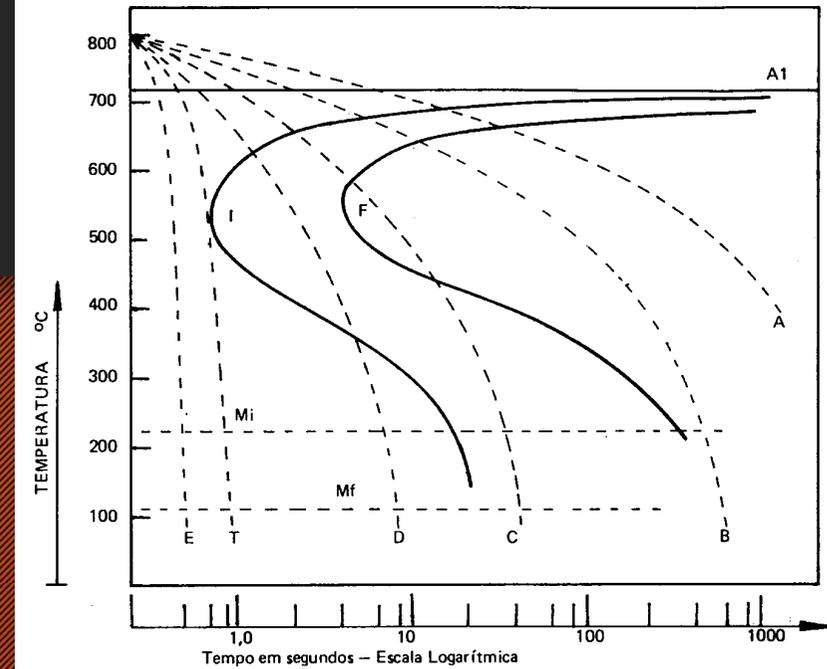
A (FORNO)= Perlita grossa

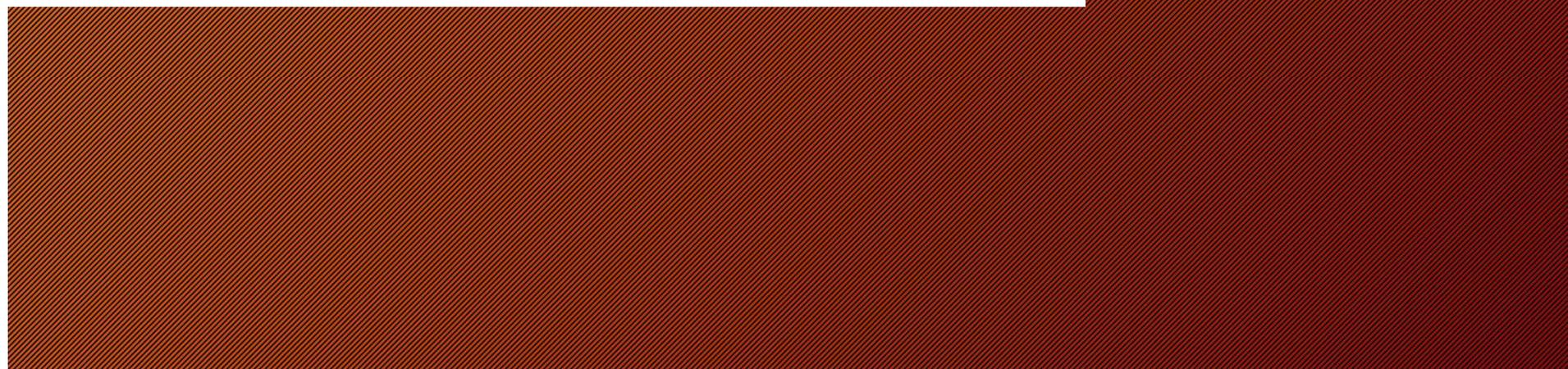
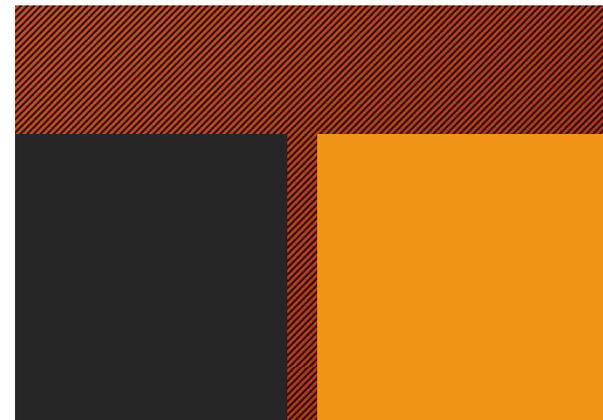
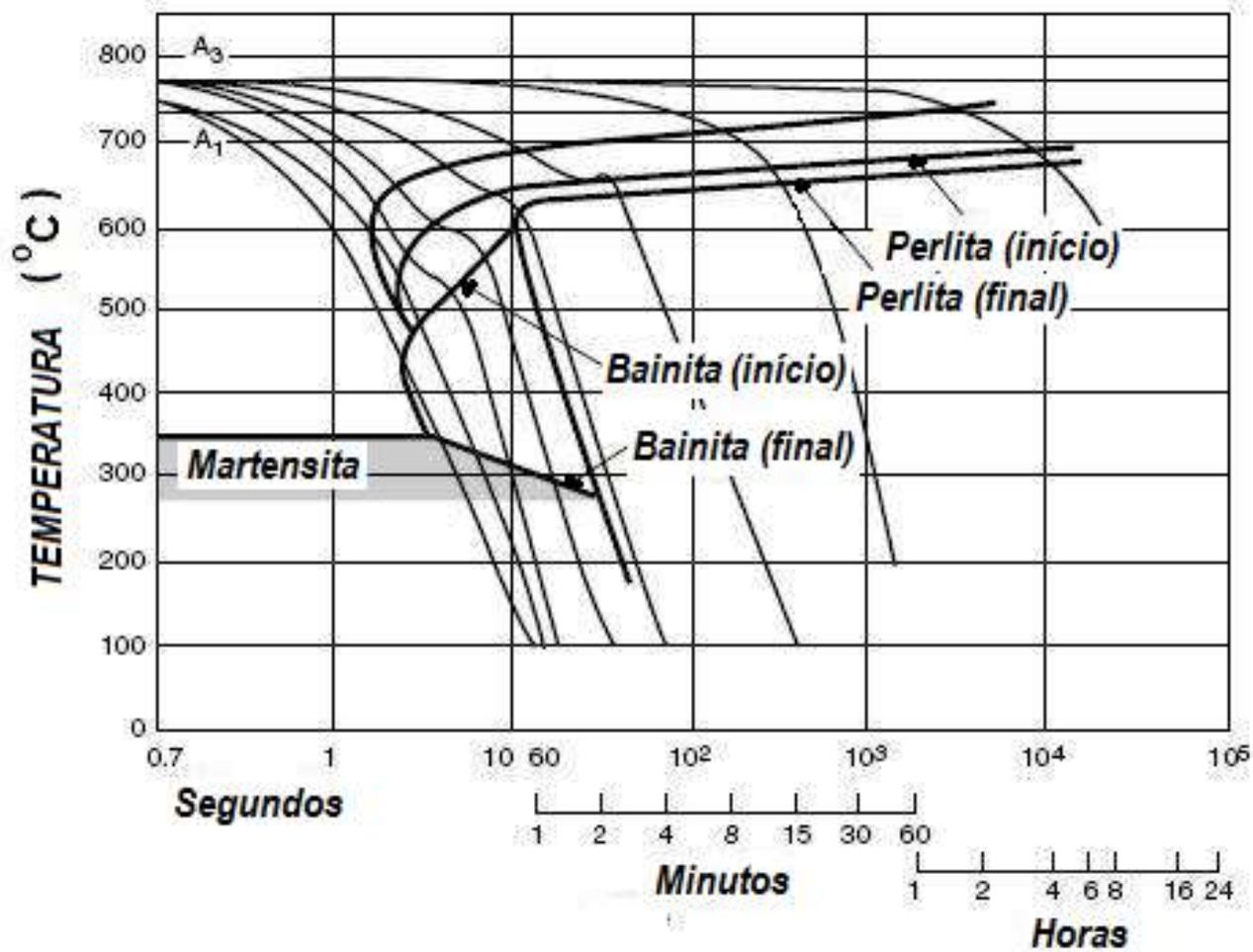
B (AR)= Perlita + fina (+  
dura que a anterior)

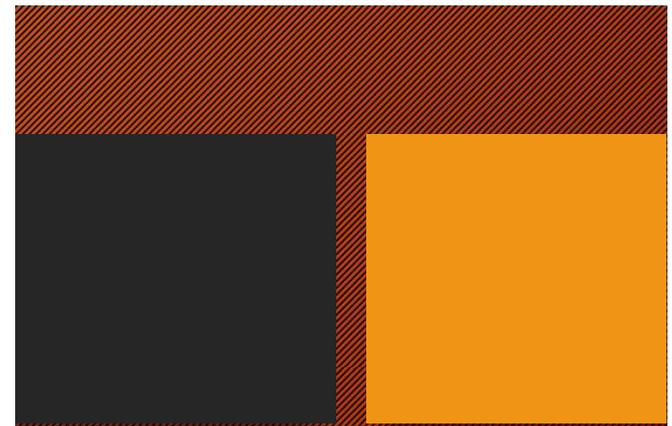
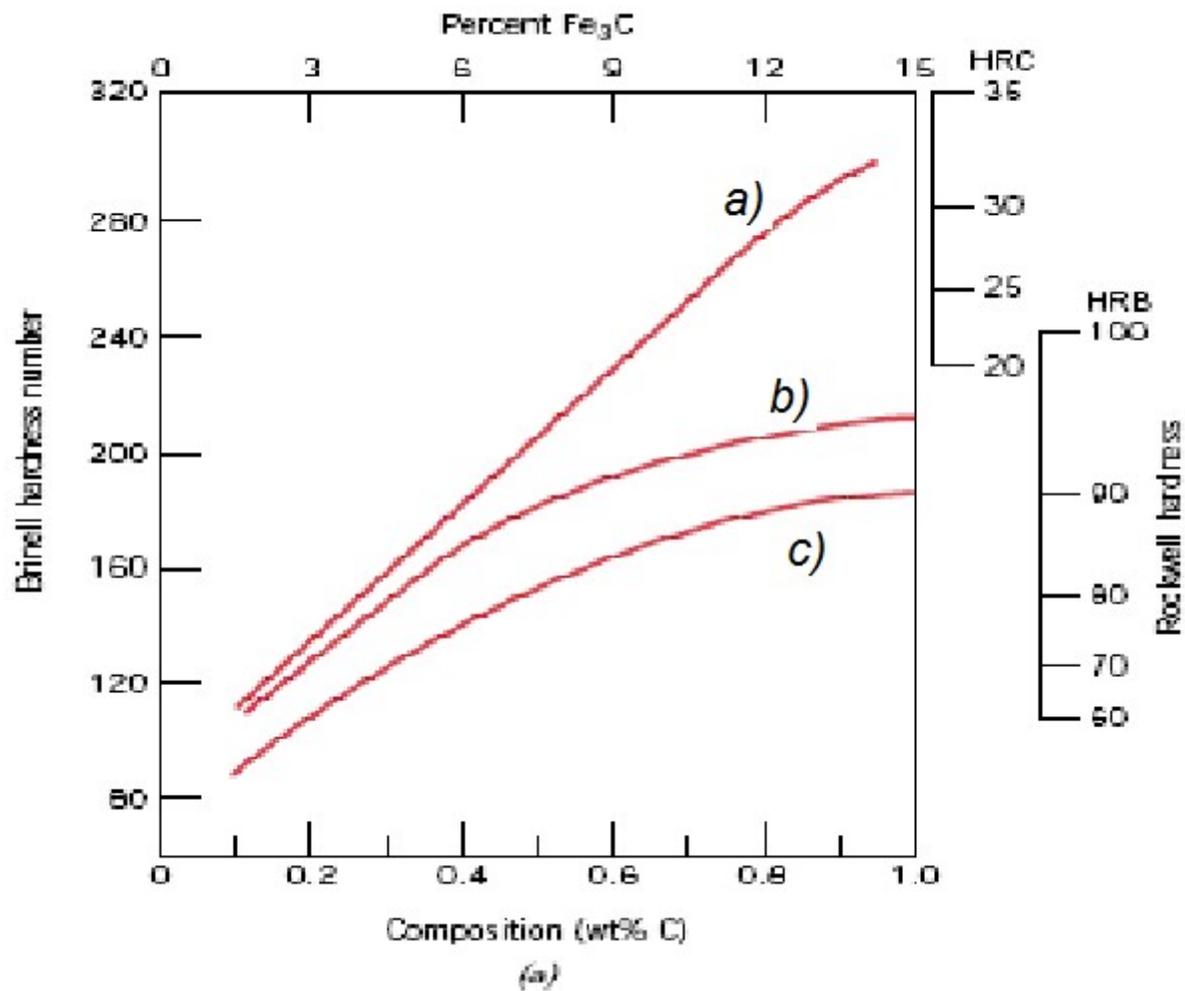
C (AR SOPRADO)= Perlita +  
fina que a anterior

D (ÓLEO)= Perlita +  
martensita

E (ÁGUA)= Martensita







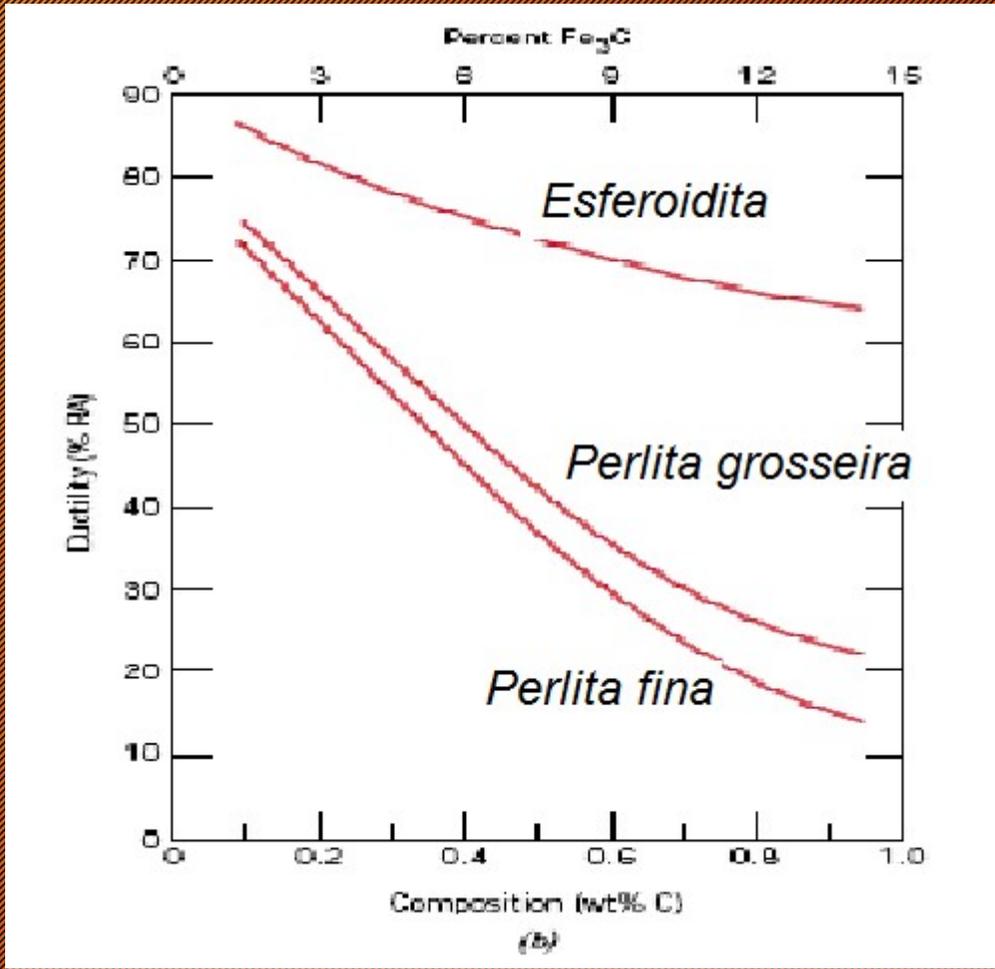
b) *Perlita grosseira*

c) *Esferoidita*

a) *Perlita fina*

# PROPRIEDADES MECÂNICAS

- Uma vez que a cementita é mais frágil, o aumento do seu teor resultará em uma diminuição de ductilidade
- A perlita grosseira é mais dúctil que a perlita fina, pois existe uma maior restrição à deformação plástica na perlita fina



# 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 possui partículas de cementita extremamente pequenas, o que lhe dá uma melhor ductilidade e tenacidade

