

# TRANSFORMAÇÕES DE FASES EM METAIS E MICROESTRUTURAS

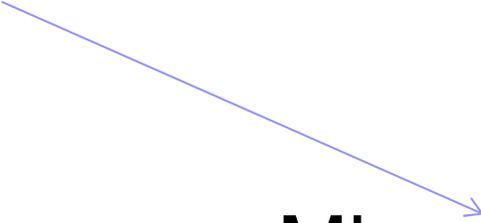
Engenharia e Ciência dos Materiais I

Profa.Dra. Luralice Canale

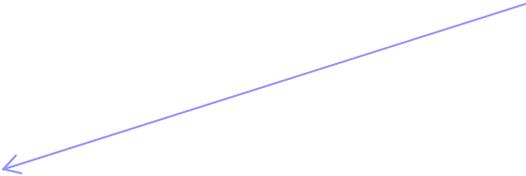


# Transformação de fase em metais

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.

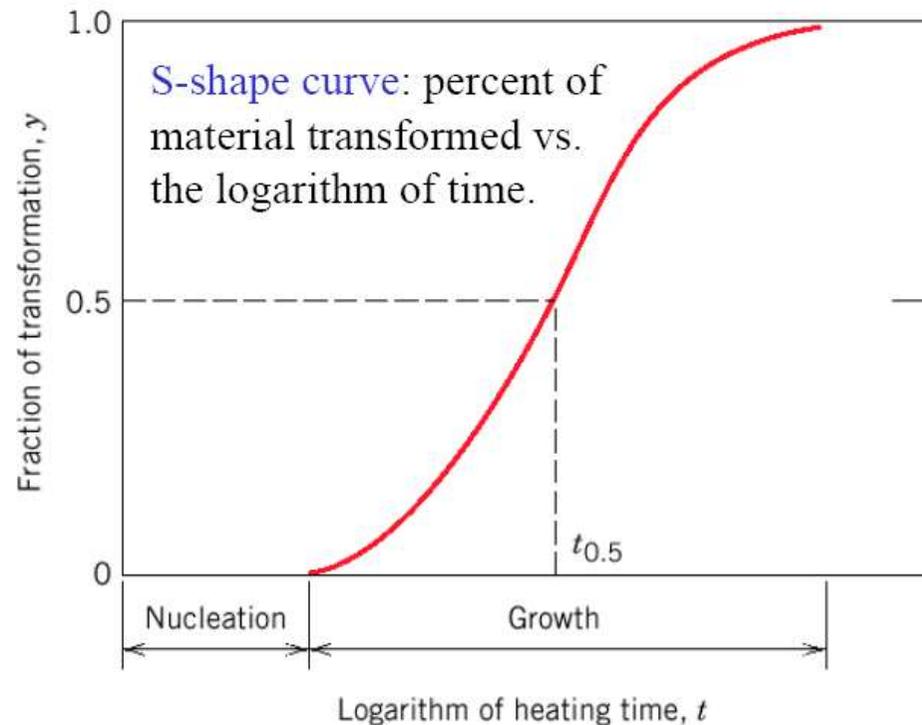
Muitas transformações de fase envolvem mudança em composição, assim é necessária uma redistribuição de átomos via difusão.

# Transformação de fase em metais

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.**





## Transformação de fase em metais

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



# Transformação de fase em metais

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)

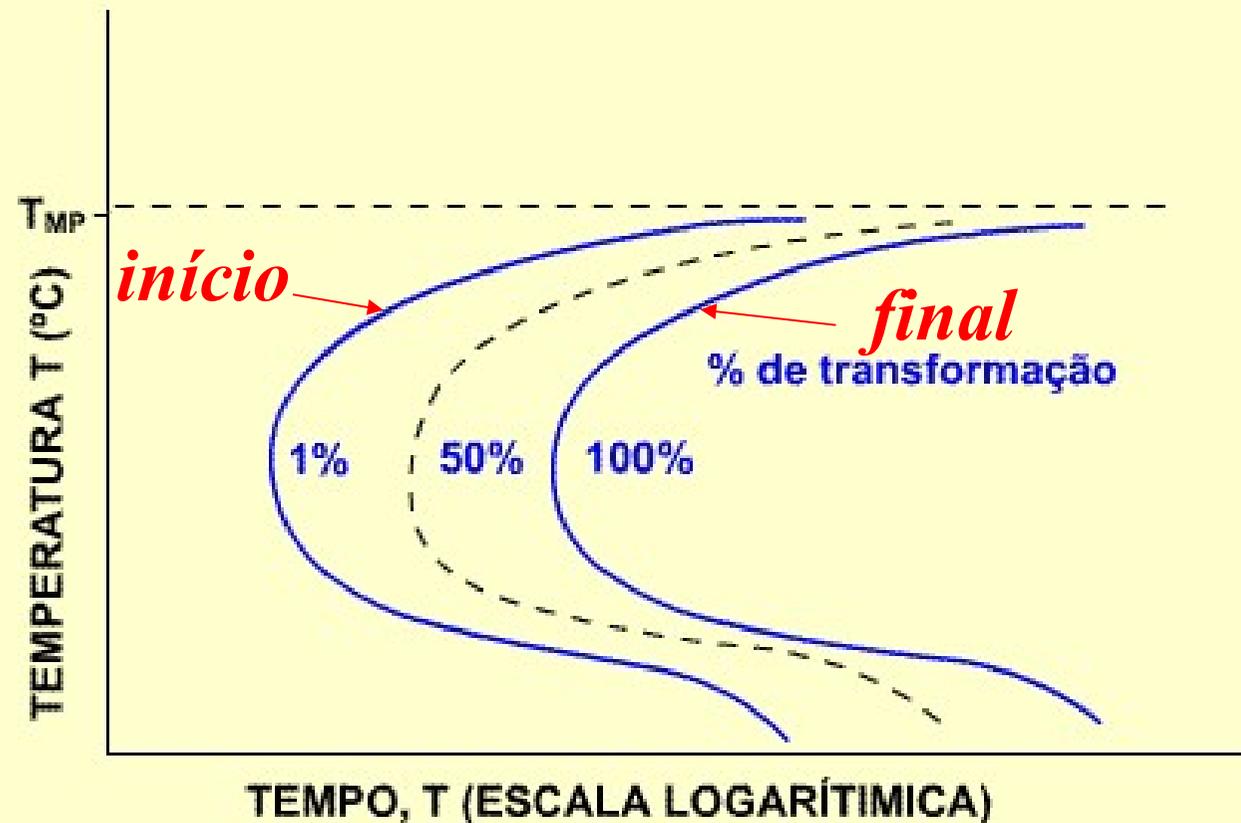


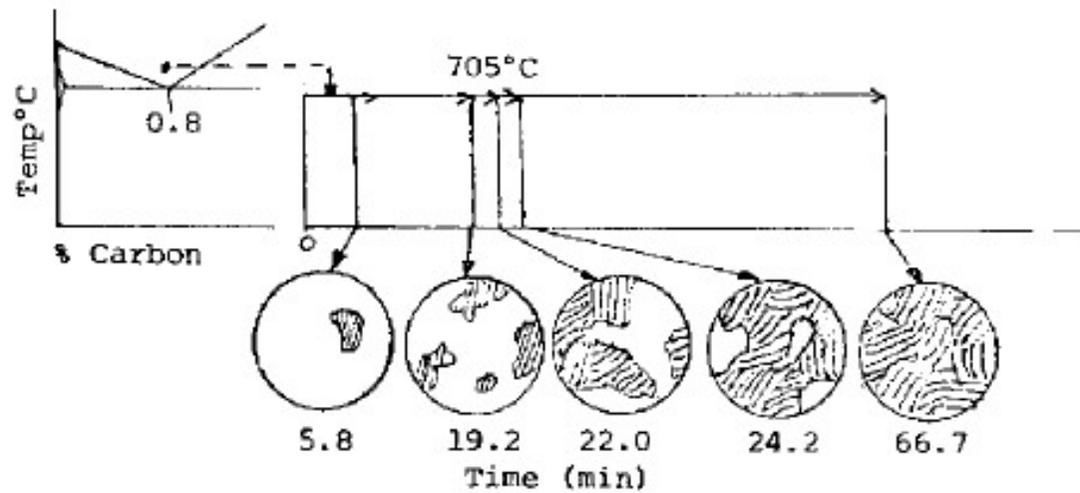
# CURVAS TTT

- 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

# CURVAS TTT

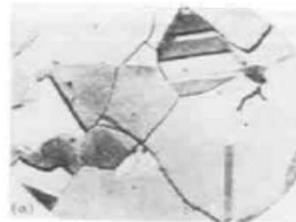
Diagrama de transformação tempo- temperatura para a reação de solidificação, ilustrando curvas com vários percentuais de finalização





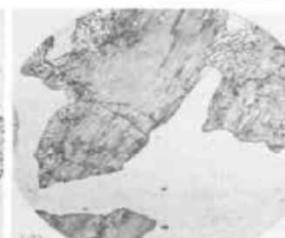
## Isothermal Transformation

Austenite



5.8 min.

19.2 min.



22.0 min.

24.2 min.



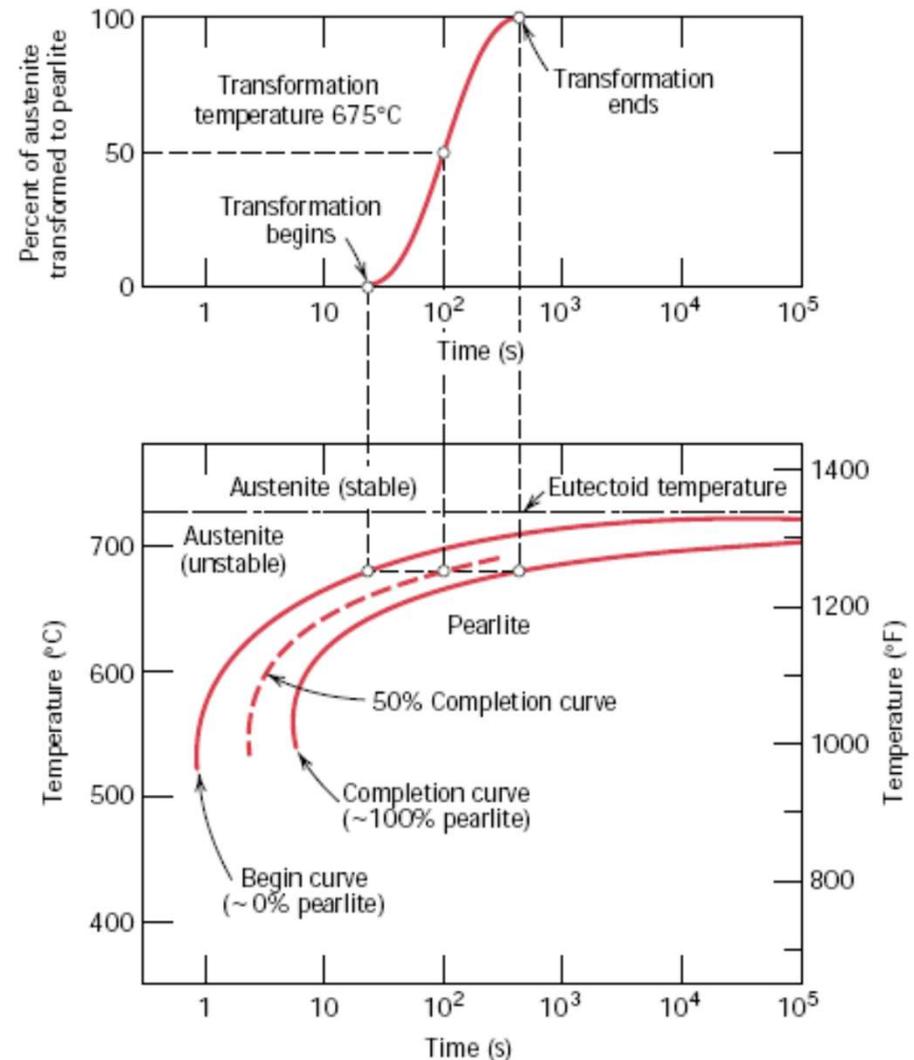
66.7 min.

Figure 1-13 Microstructures showing the change in the isothermal transformation of austenite to pearlite in an austempered plain-carbon steel at 705°C. (a) Austenite, (b) after 5.8 min, (c) after 19.2 min, (d) after 22 min, (e) after 24.2 min, (f) after 66.7 min. (Etchant: paraal; X1000) (After J. P. Hirth, E. C. Bain and H. W. Paster, in "Alloying Elements in Steel," 2nd ed., American Society for Metals, 1966, pp. 21-26.)

# TRANSFORMAÇÕES ISOTÉRMICAS

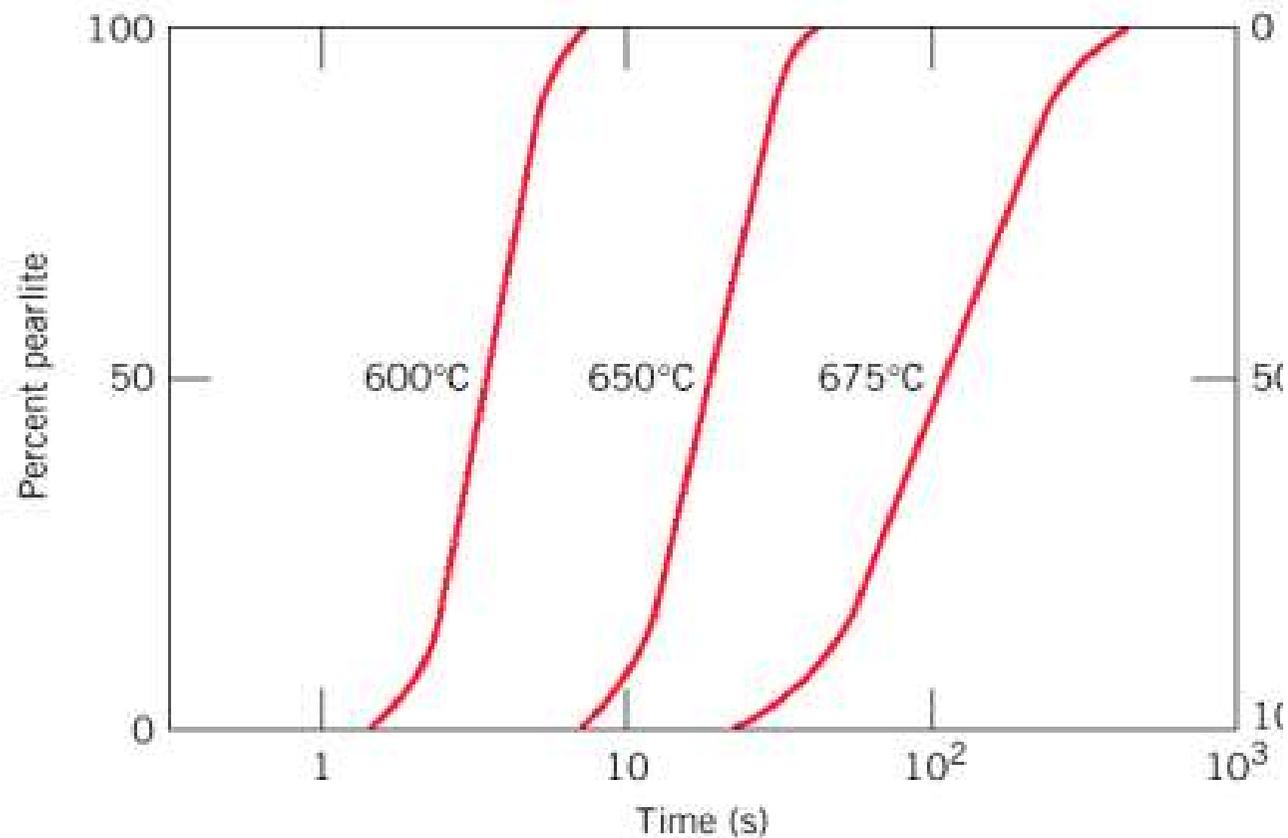
Diagrama de Transformação isotérmica para uma liga Fe-C de composição Eutetóide

- 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.

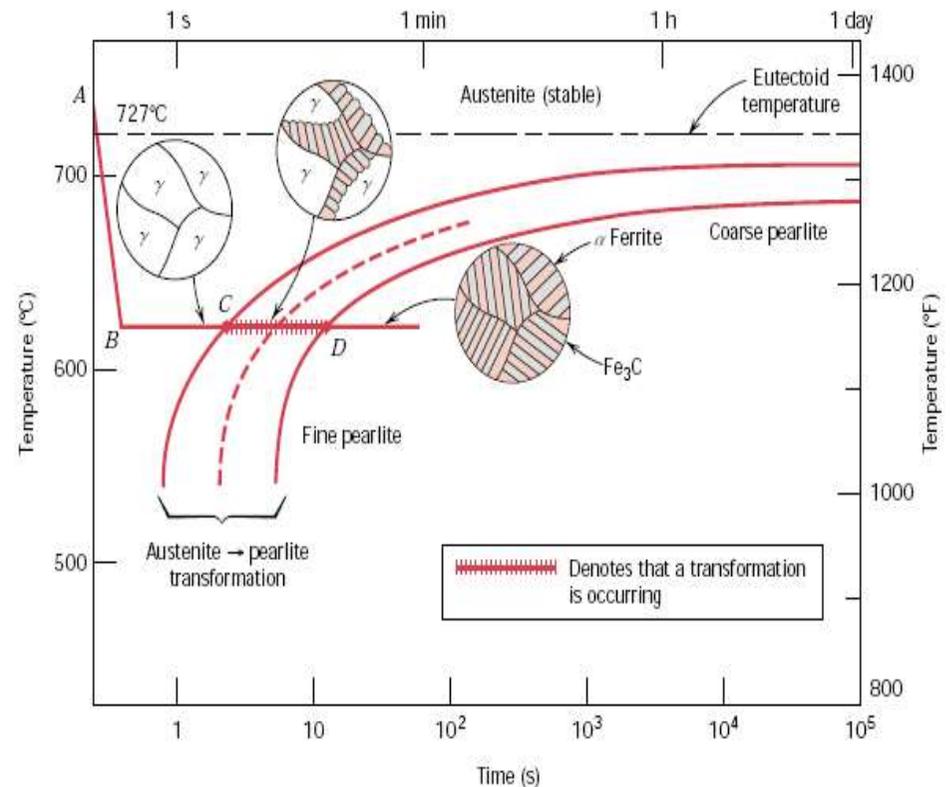


# TRANSFORMAÇÕES ISOTÉRMICAS

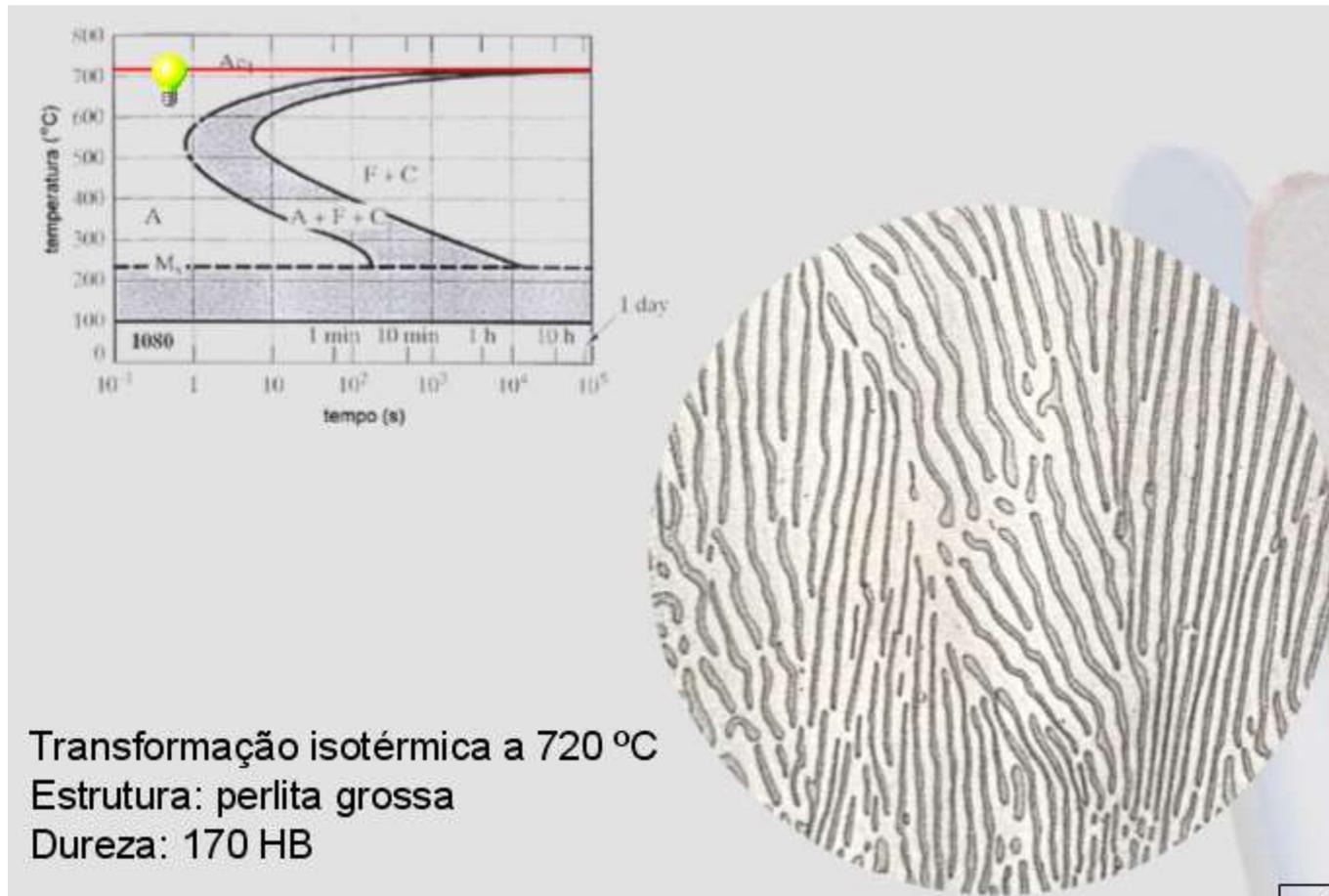
A baixas temperaturas a transformação ocorre mais cedo (é controlada pela taxa de nucleação) e o crescimento de grão (que é controlado pela difusão) é reduzido.

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

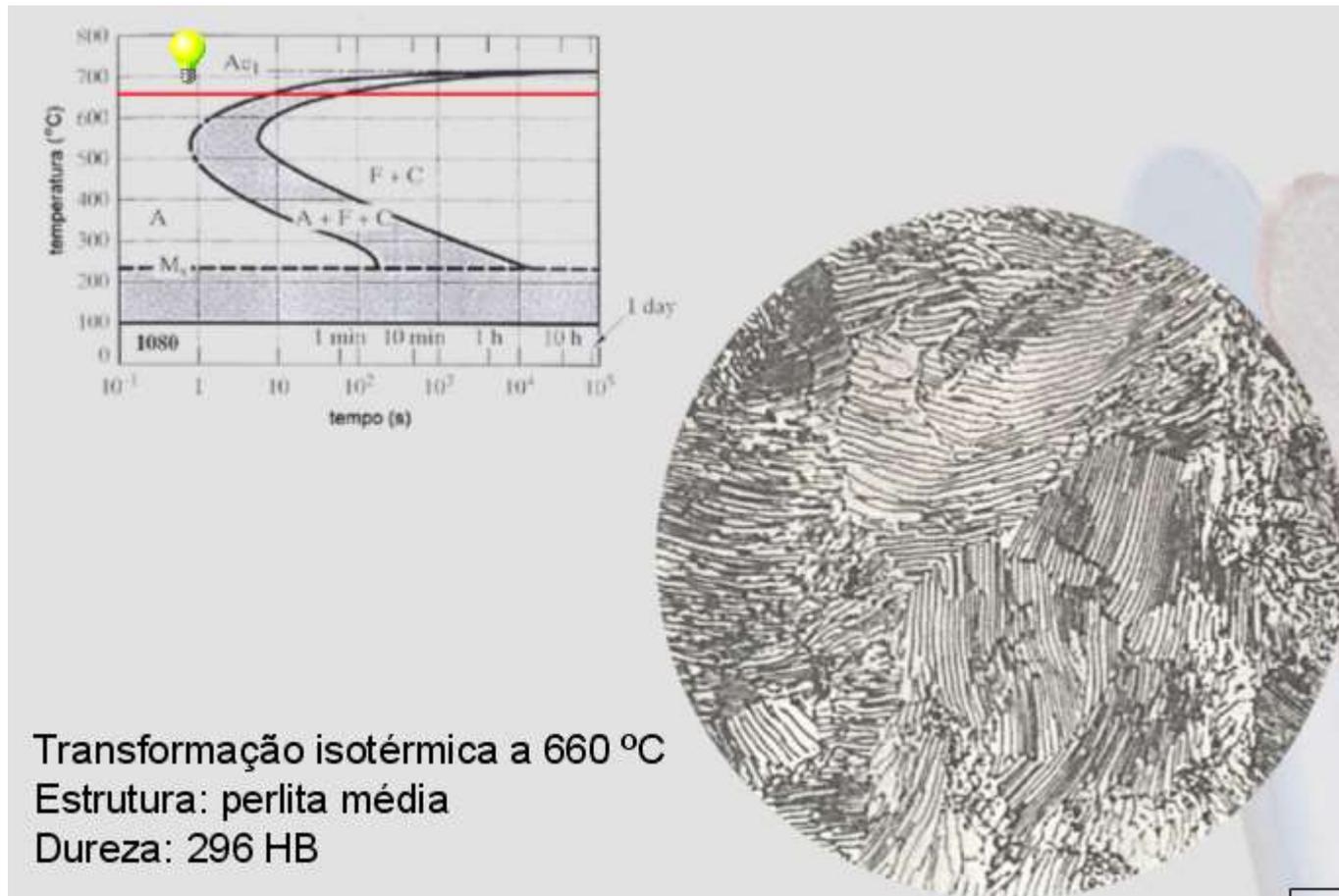
A altas temperaturas, altas taxas de difusão permitem um maior crescimento de grão e maior espaçamento lamelar – perlita grossa.



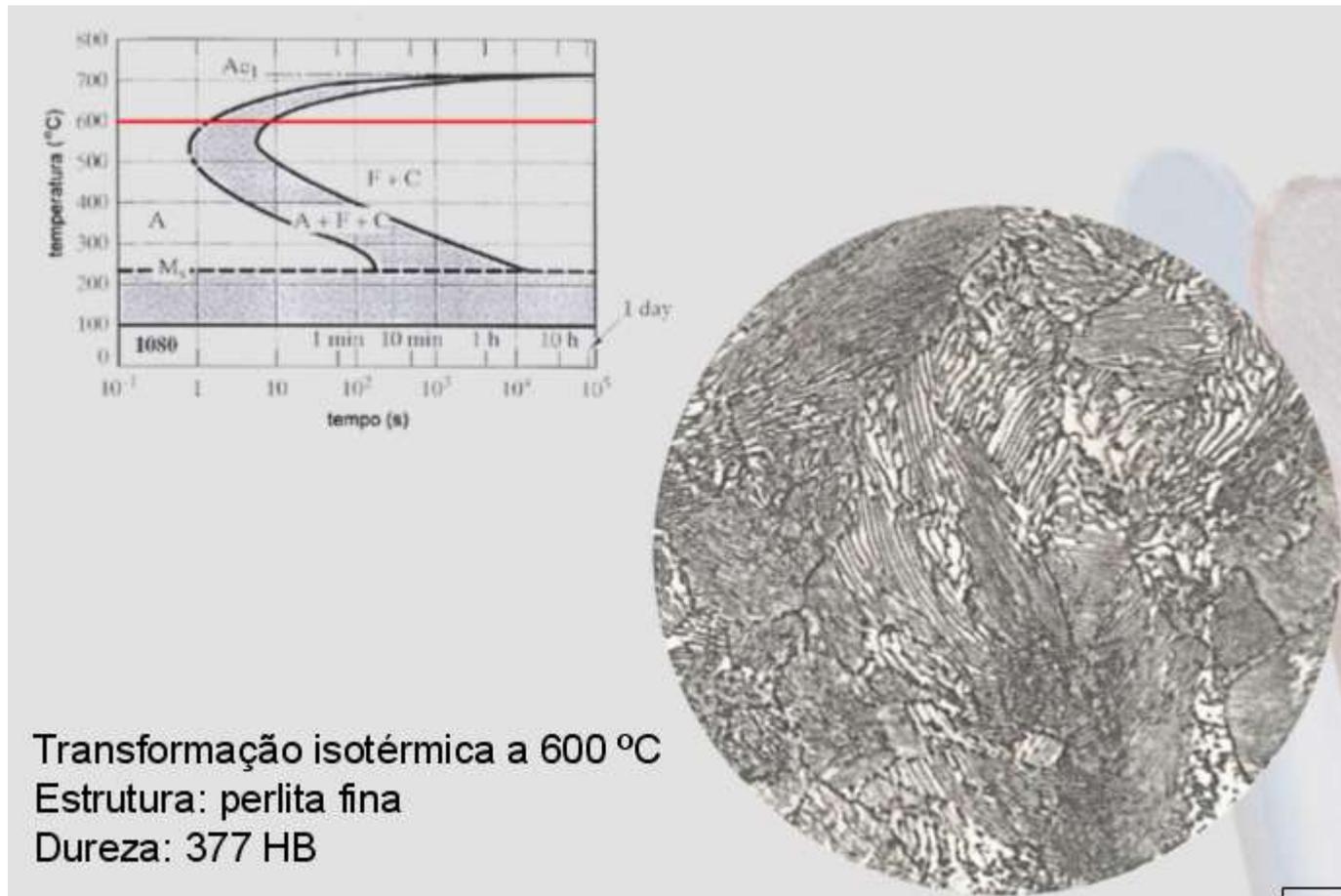
# TRANSFORMAÇÃO ISOTÉRMICA DE LIGA FE-C



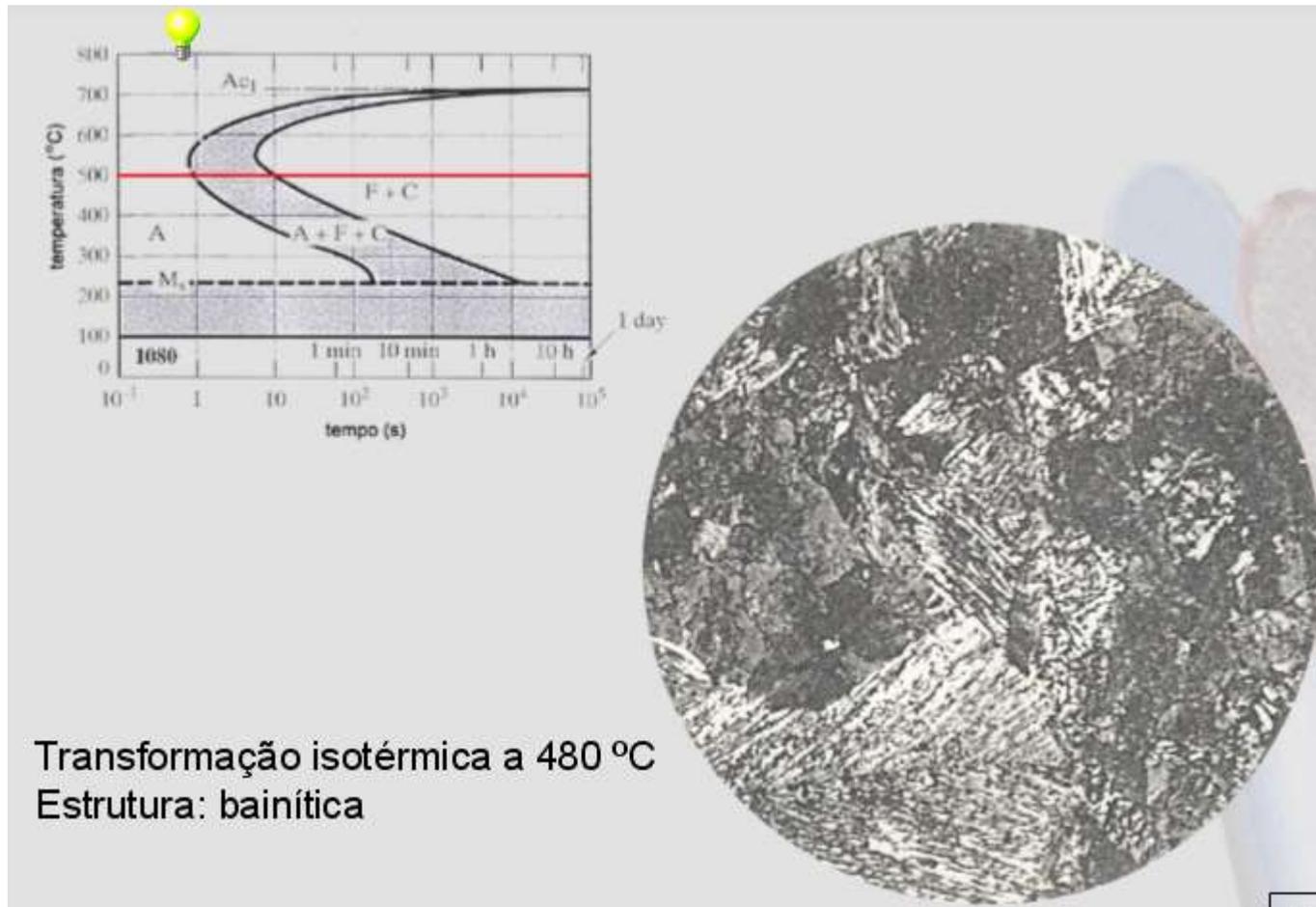
# TRANSFORMAÇÃO ISOTÉRMICA DE LIGA FE-C



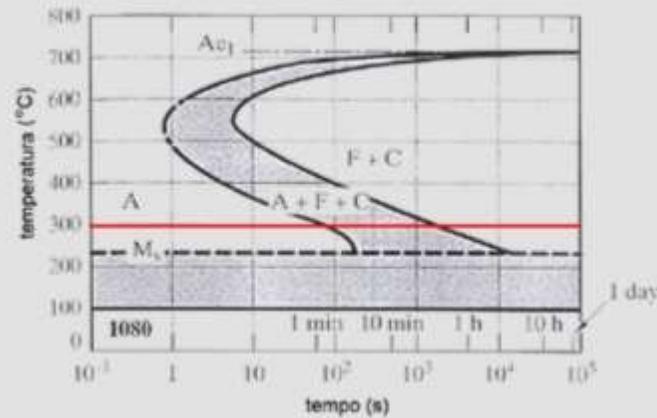
# TRANSFORMAÇÃO ISOTÉRMICA DE LIGA FE-C



# TRANSFORMAÇÃO ISOTÉRMICA DE LIGA FE-C



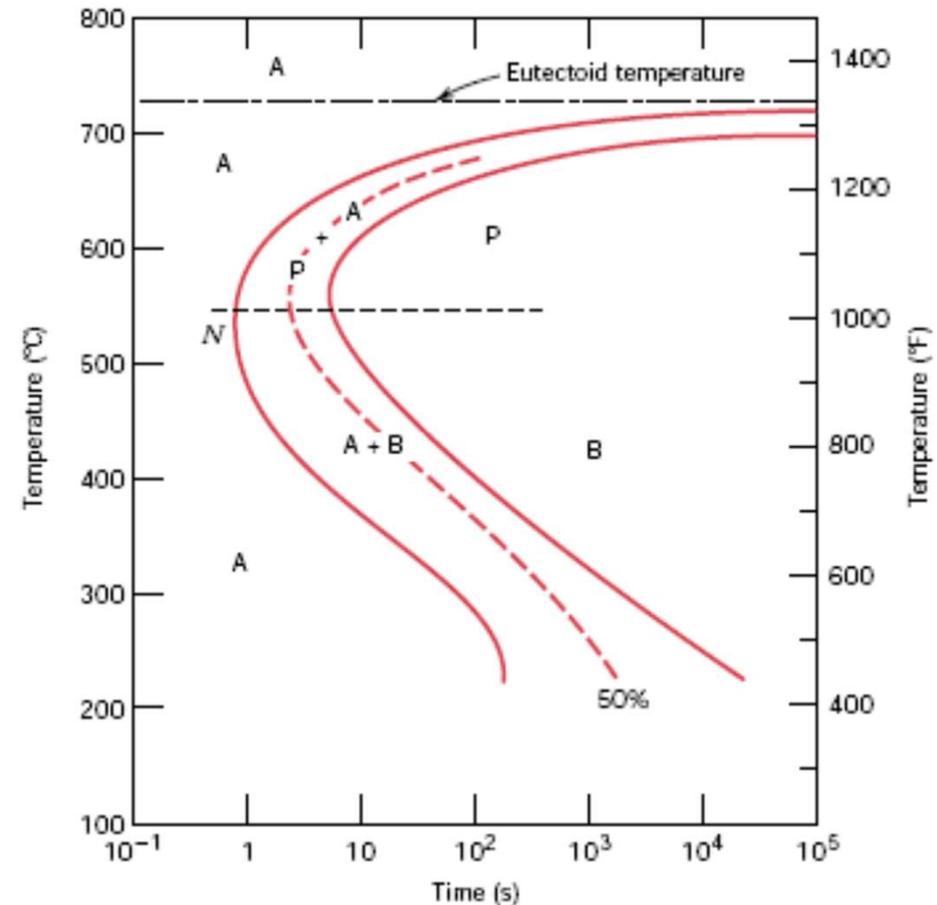
# TRANSFORMAÇÃO ISOTÉRMICA DE LIGA FE-C



Transformação isotérmica a 300 °C  
Estrutura: bainítica

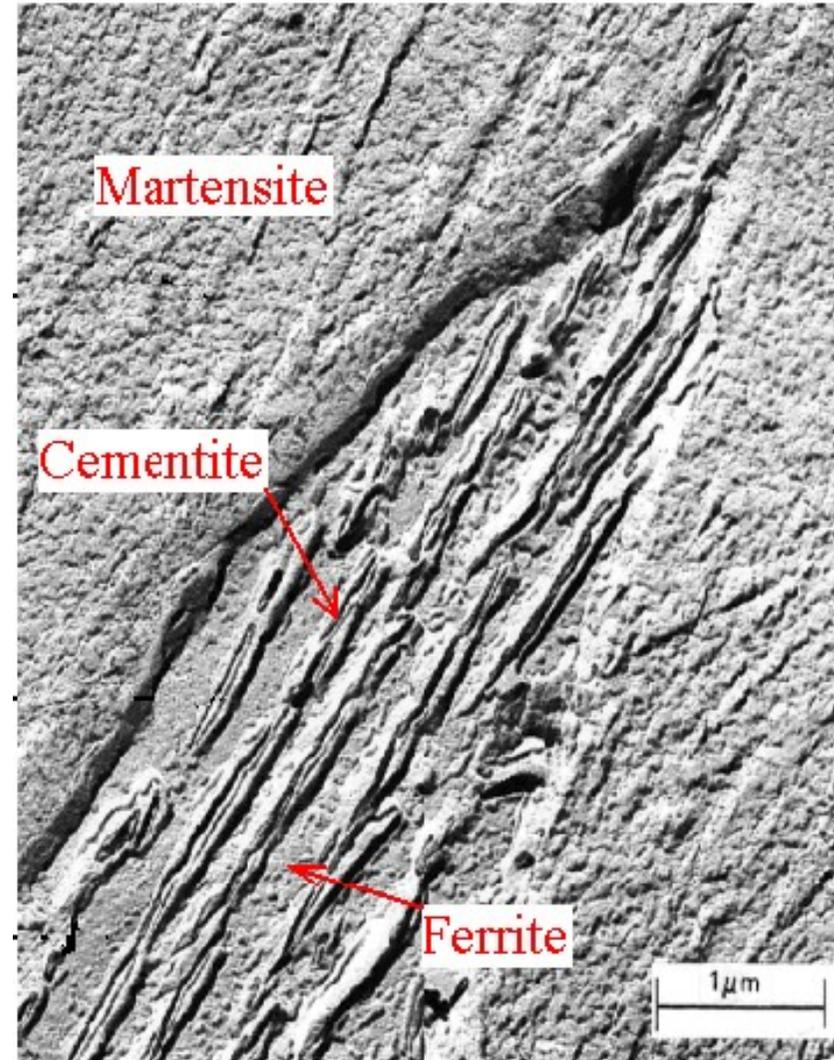
# BAINITA

- 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

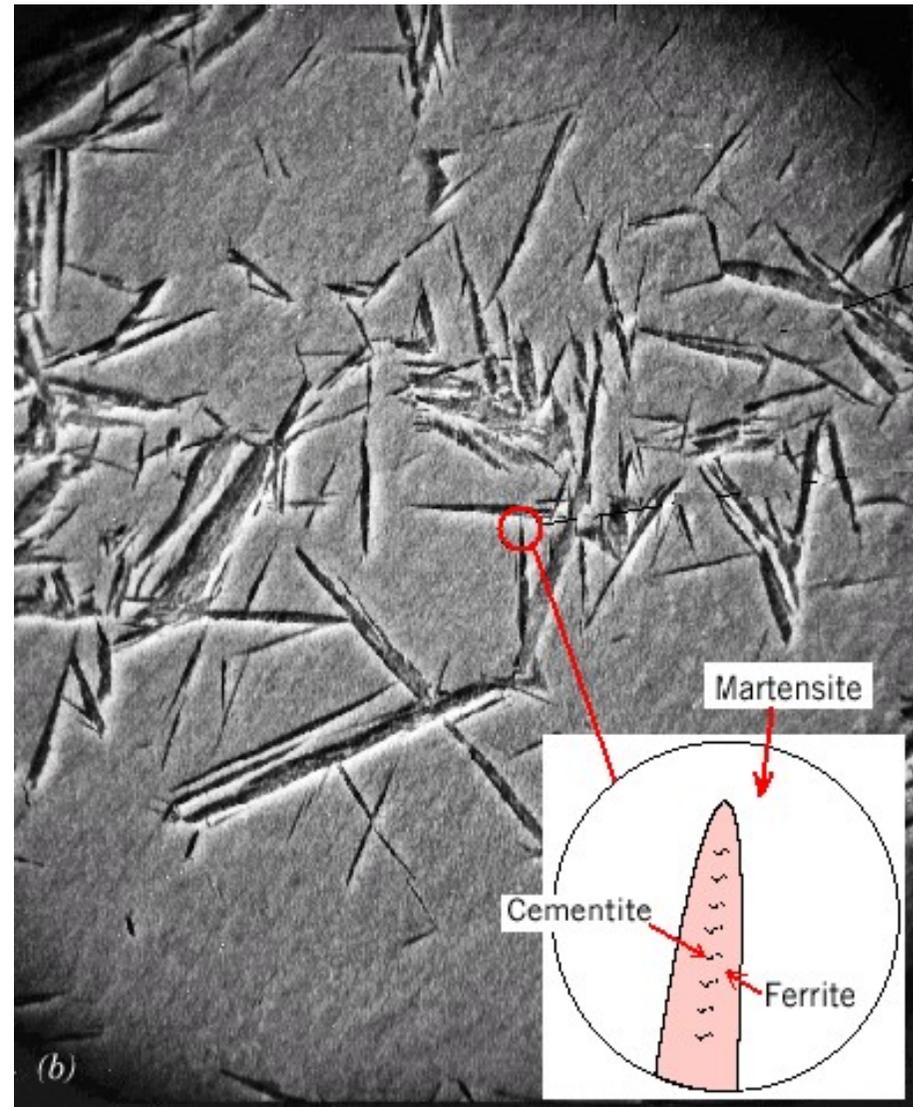


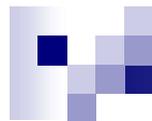
# BAINITA

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

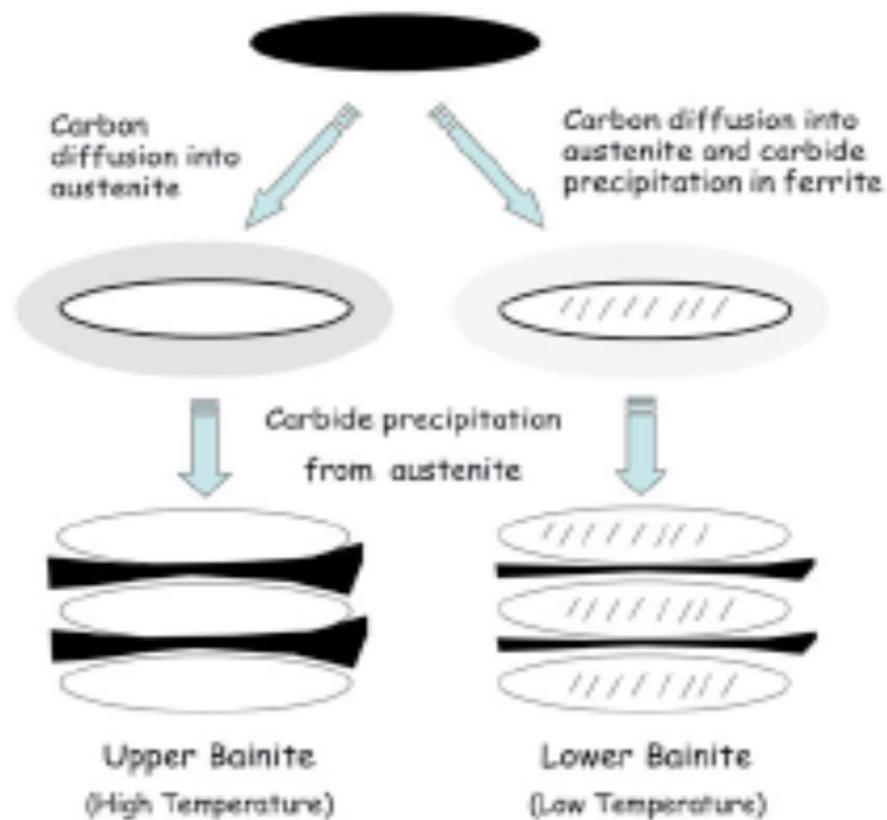


Para temperaturas entre 200C e 300C a ferrita encontra-se em placas e partículas finas de cementita se formam no interior dessas placas (**bainita inferior**)

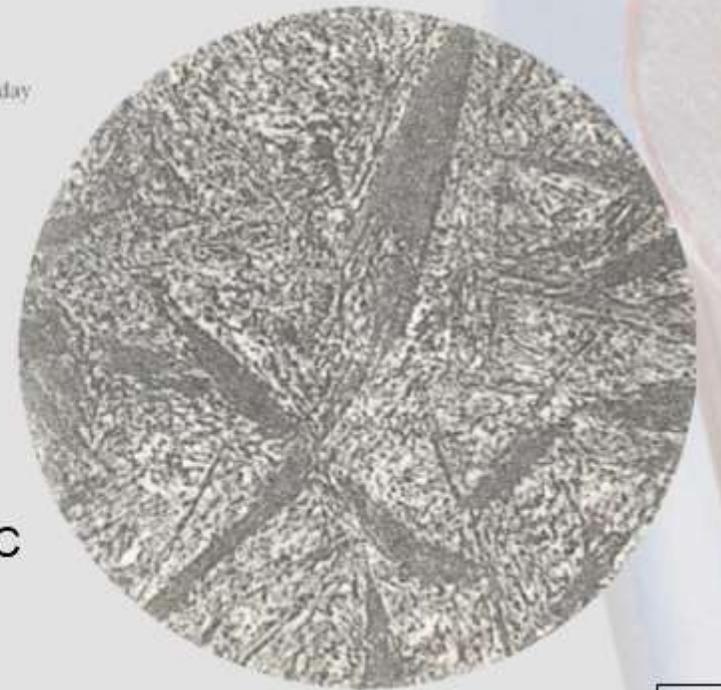
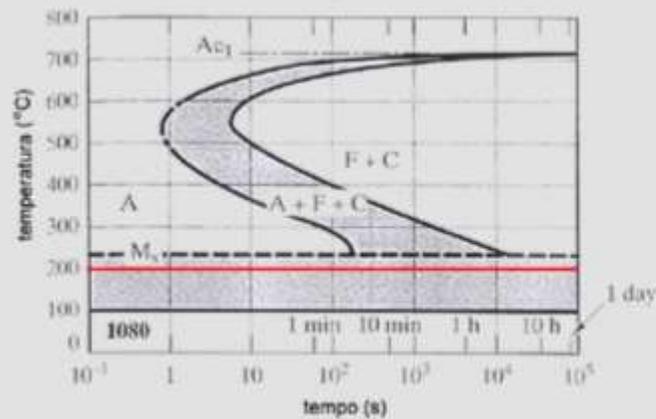




### Carbon supersaturated plate



# TRANSFORMAÇÃO ISOTÉRMICA DE LIGA FE-C

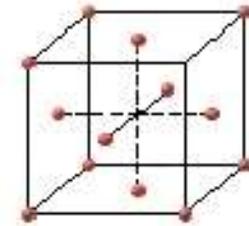


Transformação isotérmica a 200 °C  
Estrutura: martensítica

# 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).

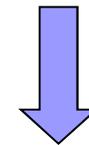
**AUSTENITA**



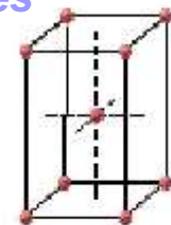
**Cúbico**  
de face centrada

**TRANSFORMAÇÃO  
ALOTRÓPICA COM  
AUMENTO DE VOLUME,**

*que leva à concentração de tensões*

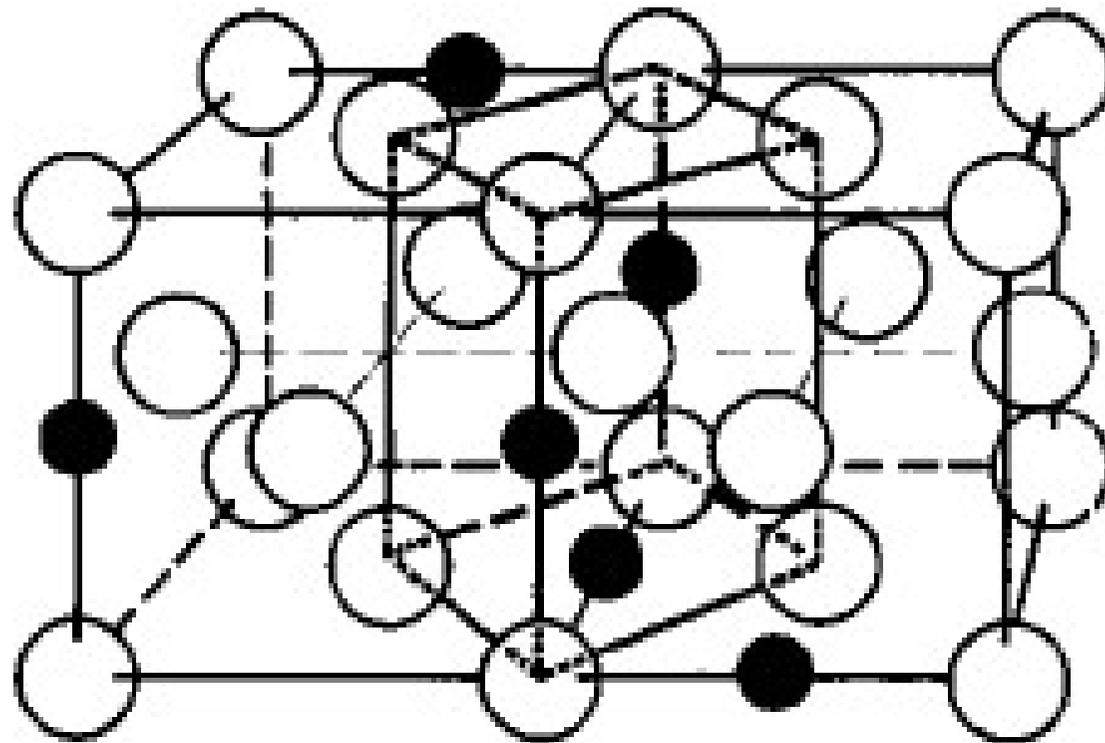


**MARTENSITA**



**tetragonal**

de corpo  
centrado



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



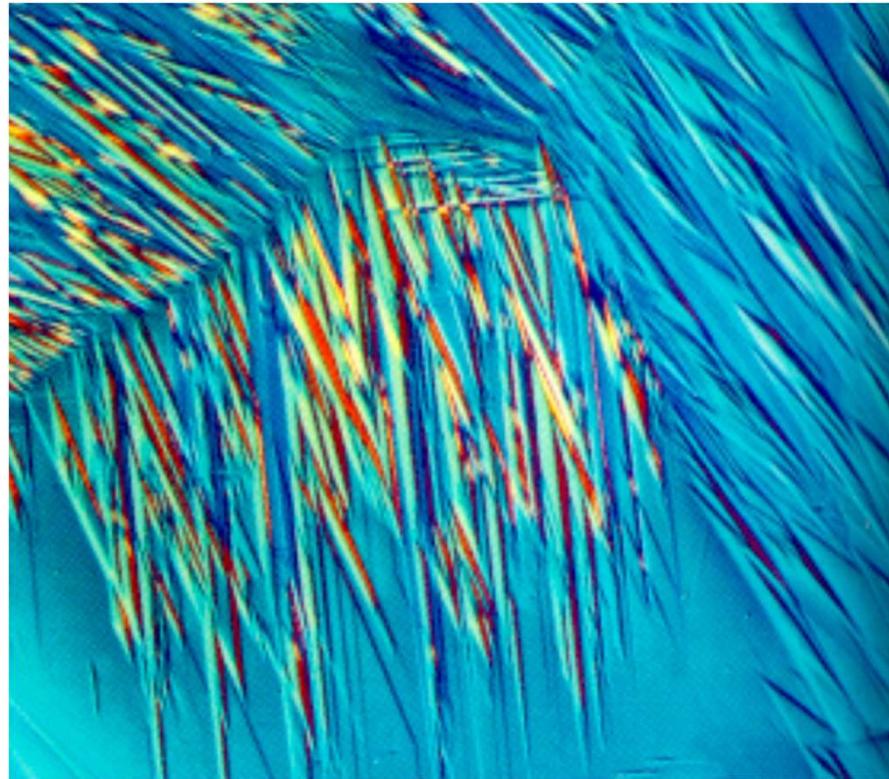
# MARTENSITA

- 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

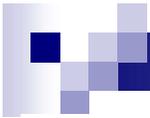
- Para ligas que contêm menos do que cerca de 0,6% de C, os grãos de martensita se formam como ripas
- São placas longas e finas, tais como as lâminas de uma folha
- Os detalhes microestruturais são muito finos e técnicas de micrografia eletrônica devem ser aplicadas para a análise dessa microestrutura



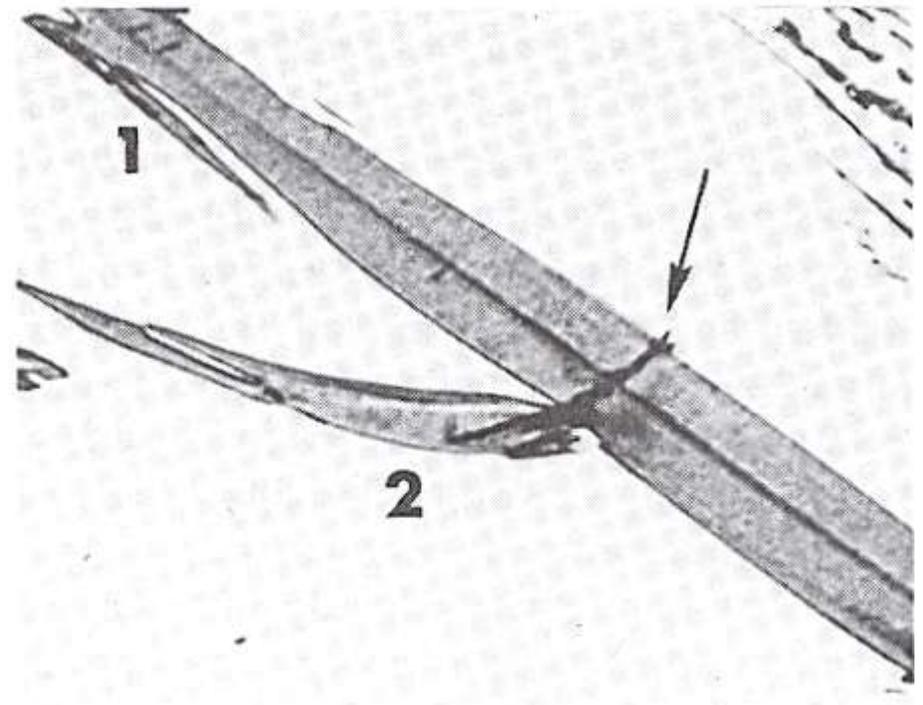
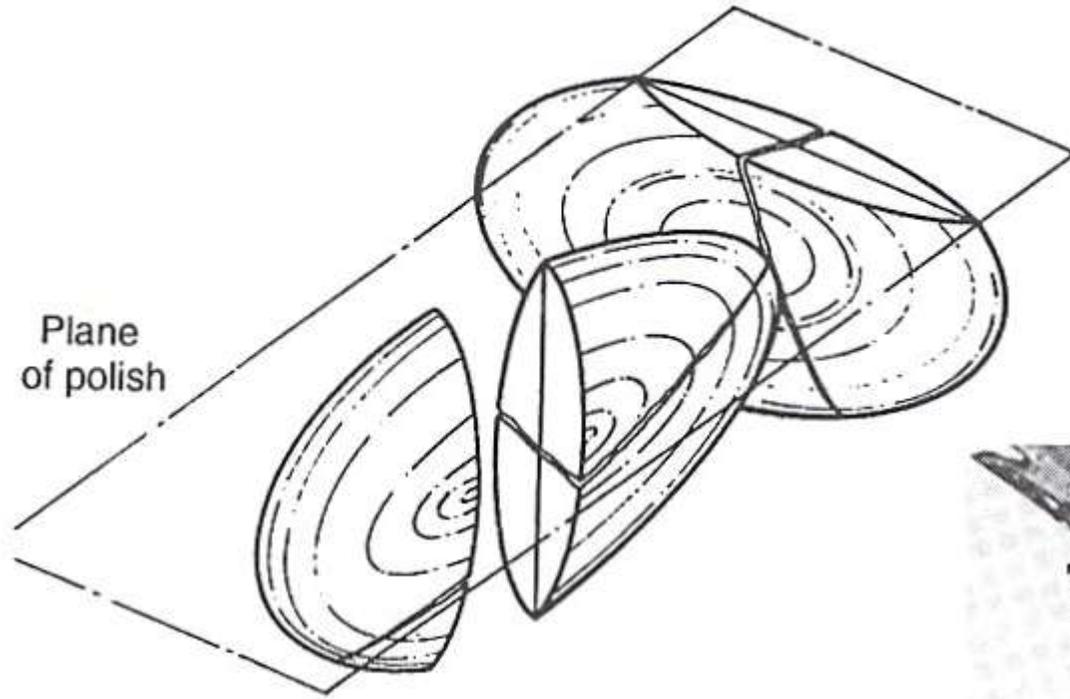
# MARTENSITA EM FORMA LENTICULAR

- 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

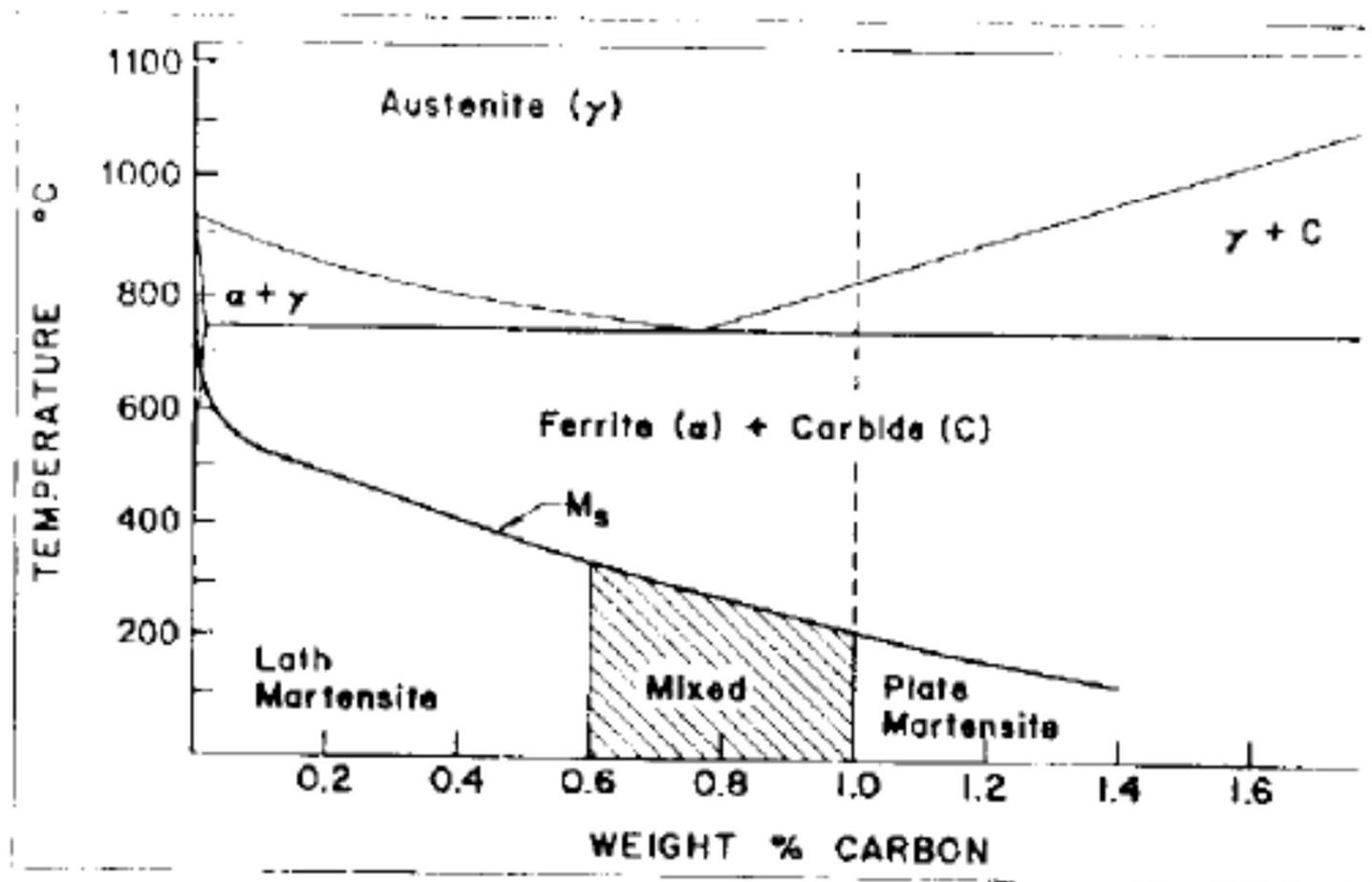


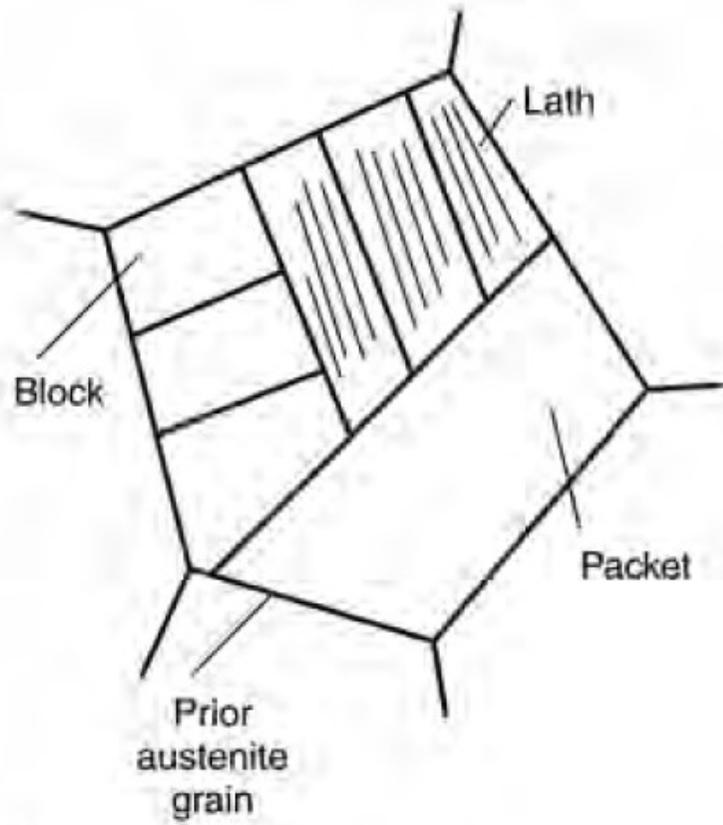
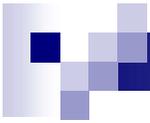


Plane  
of polish

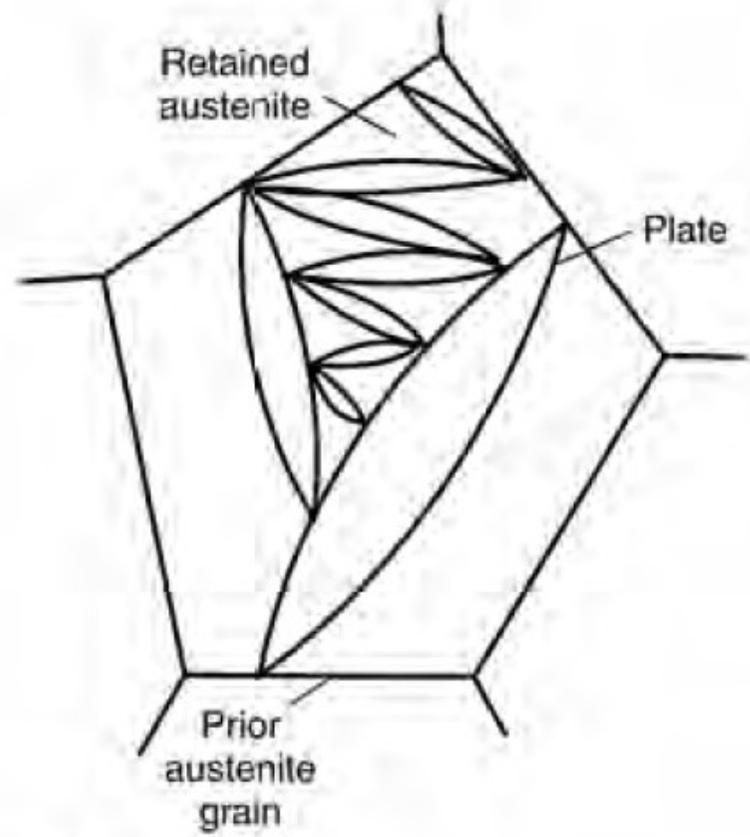


# Martensitic Transformation Temperature

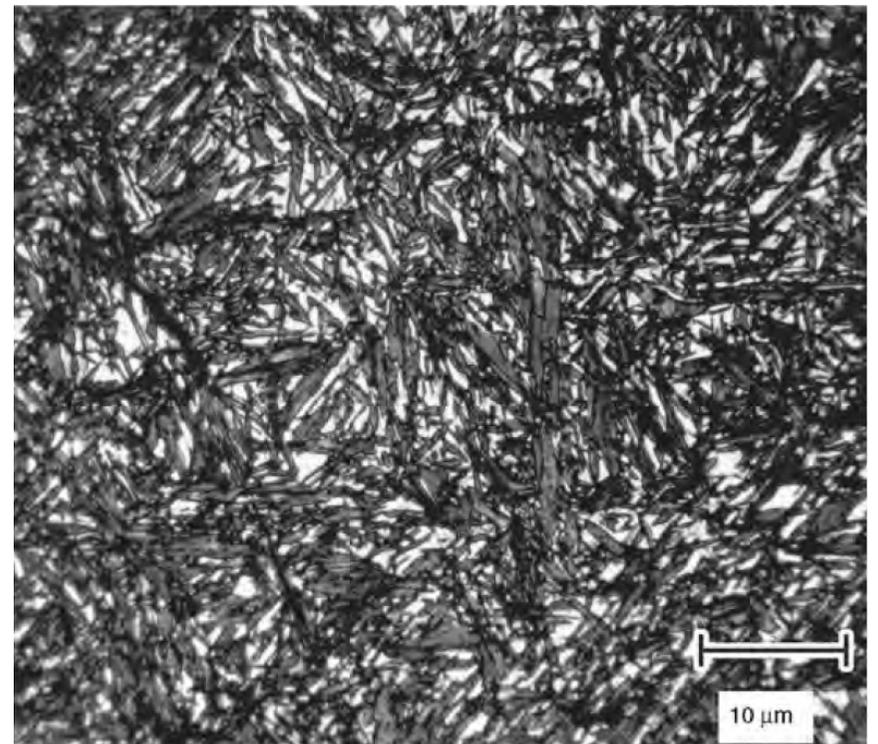
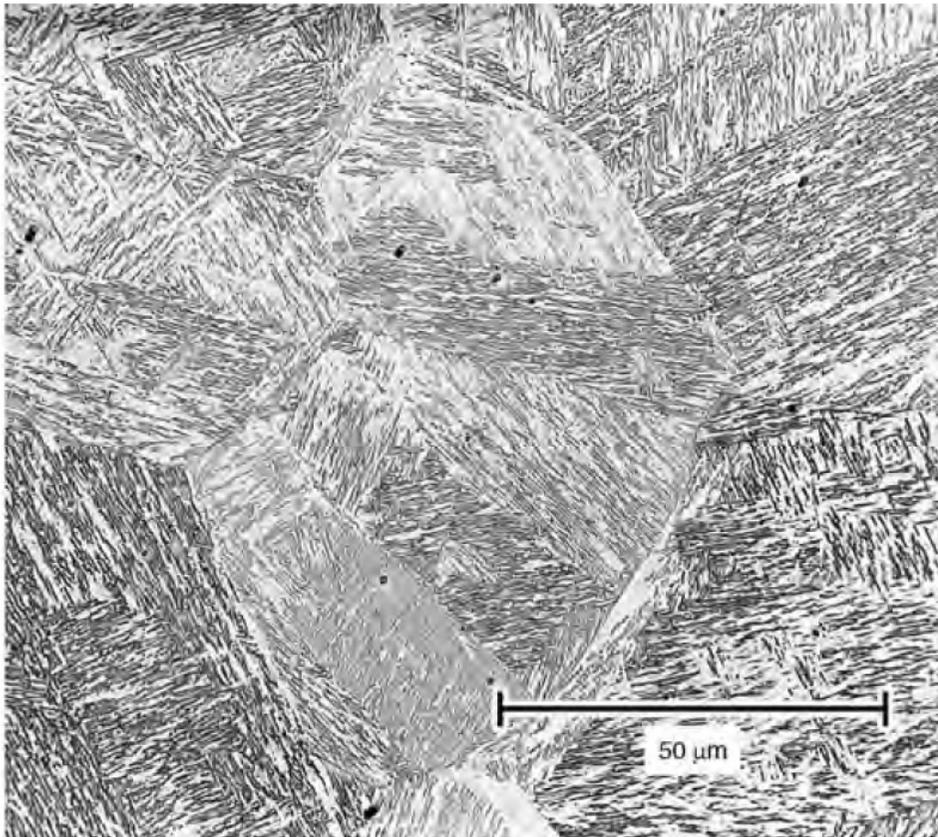




(a)

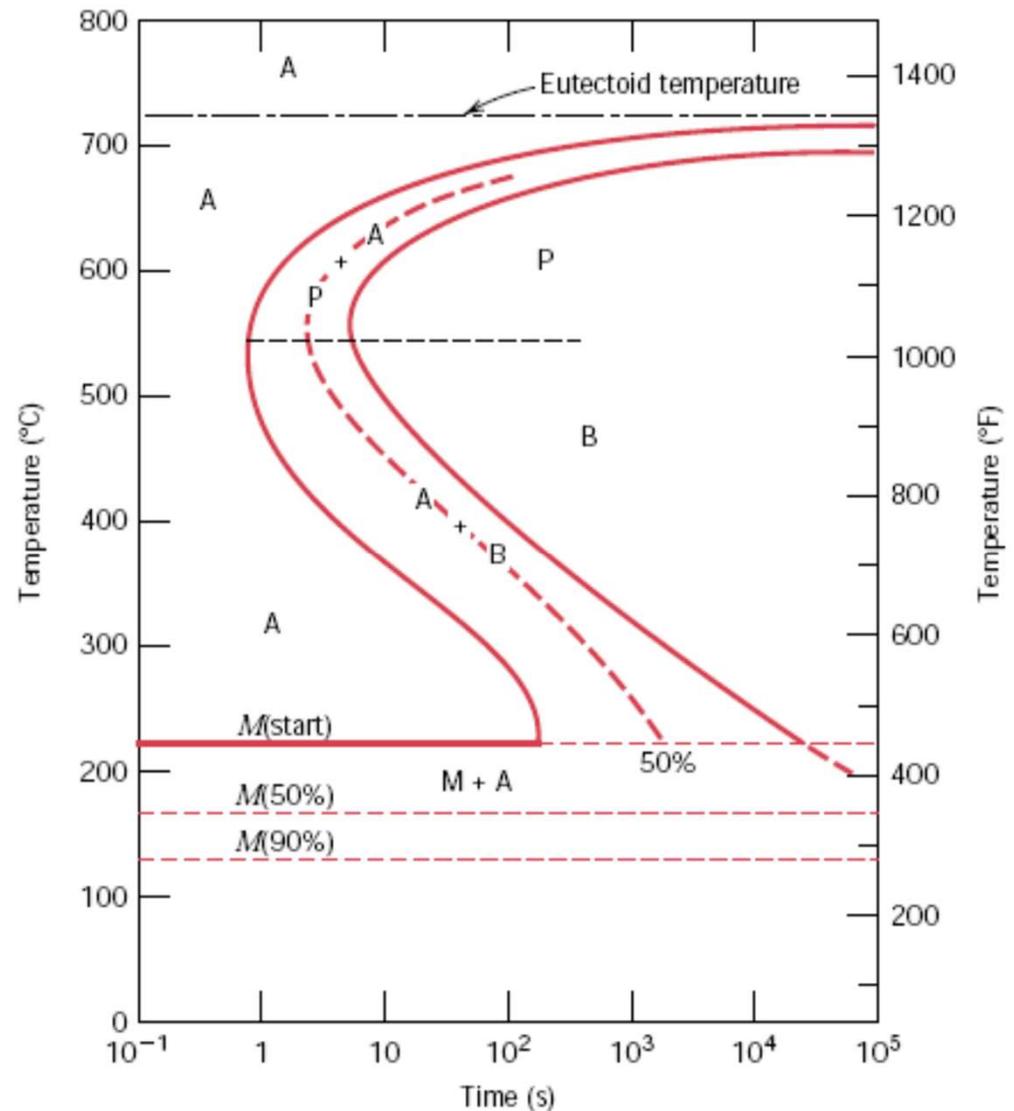


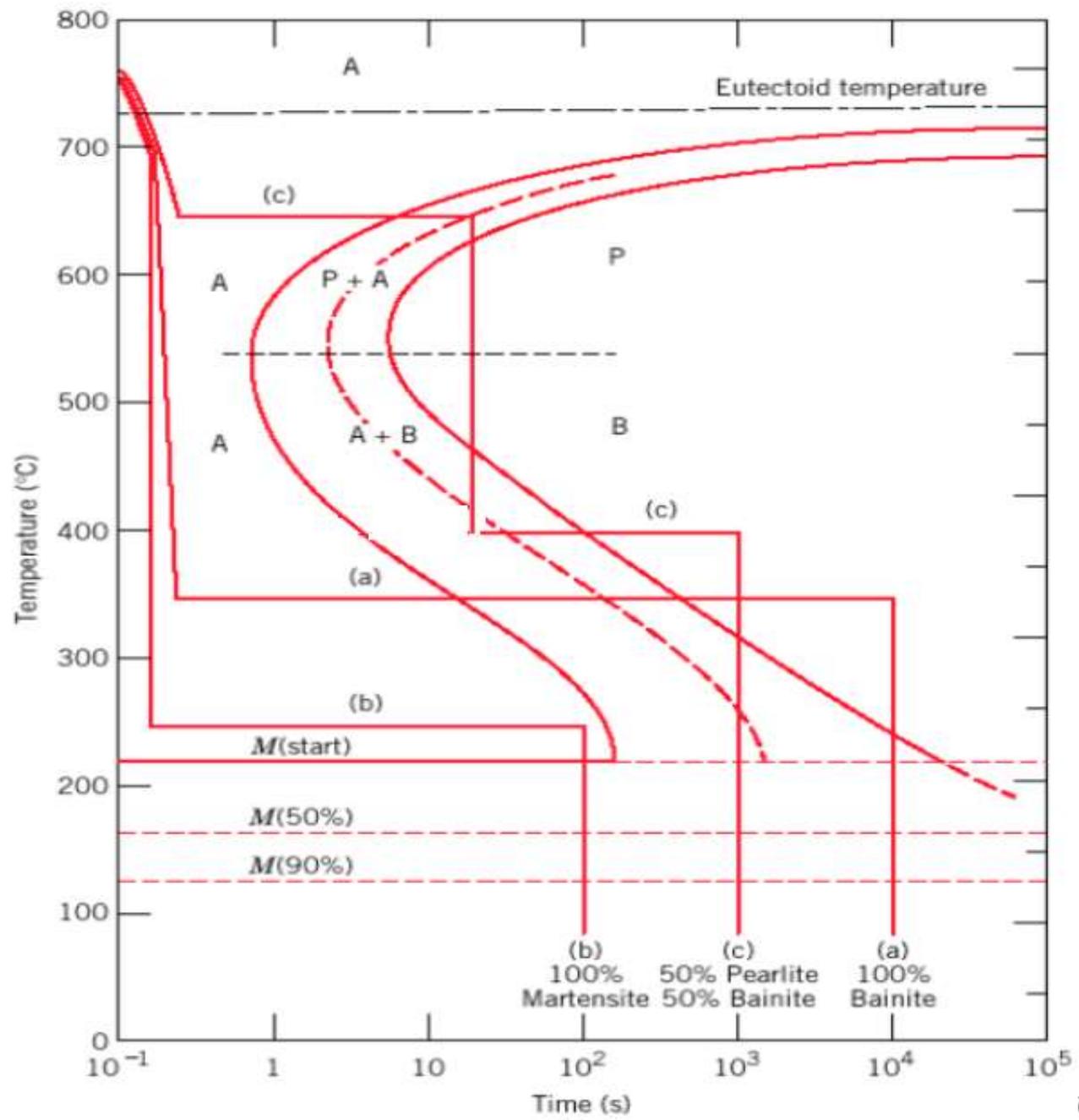
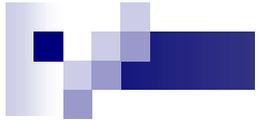
(b)



# CURVA TTT PARA AÇO EUTETÓIDE

- 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





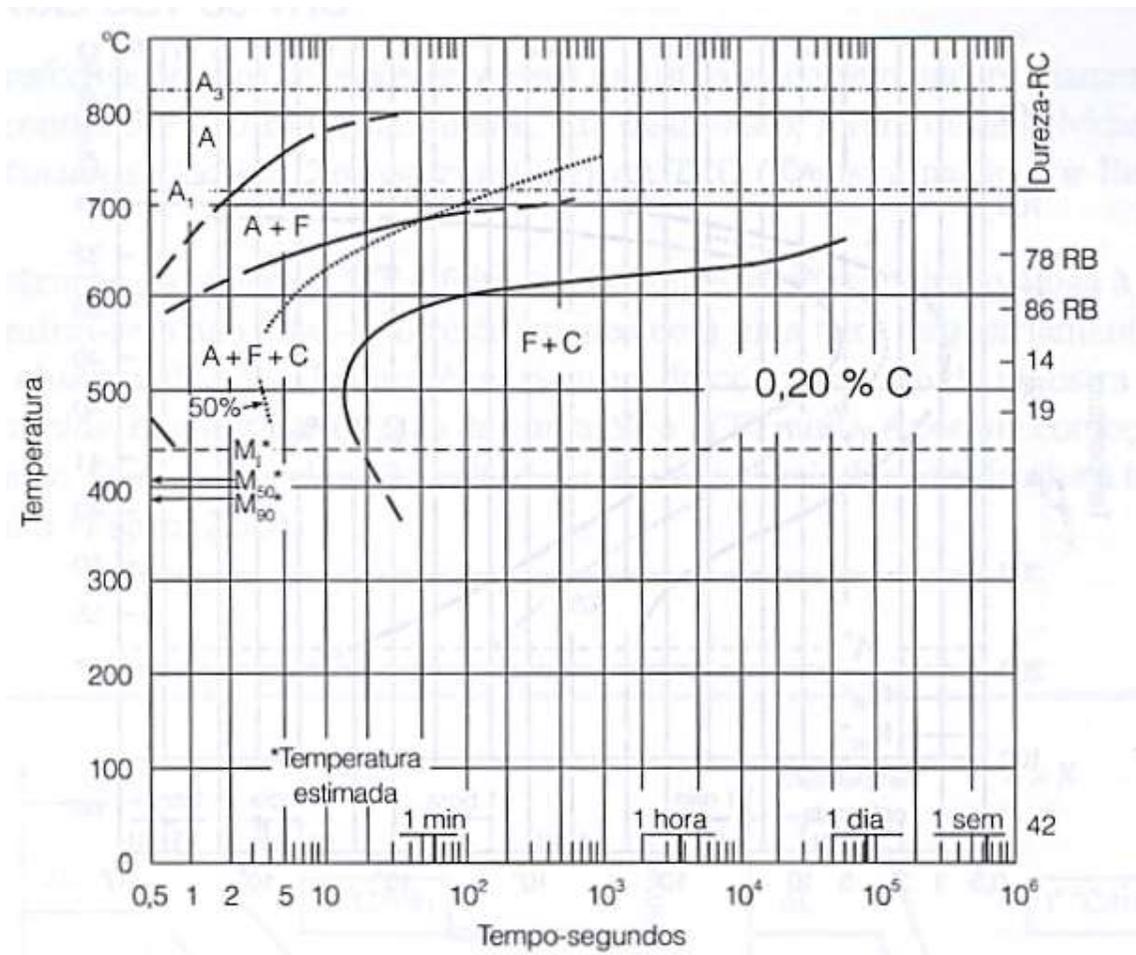


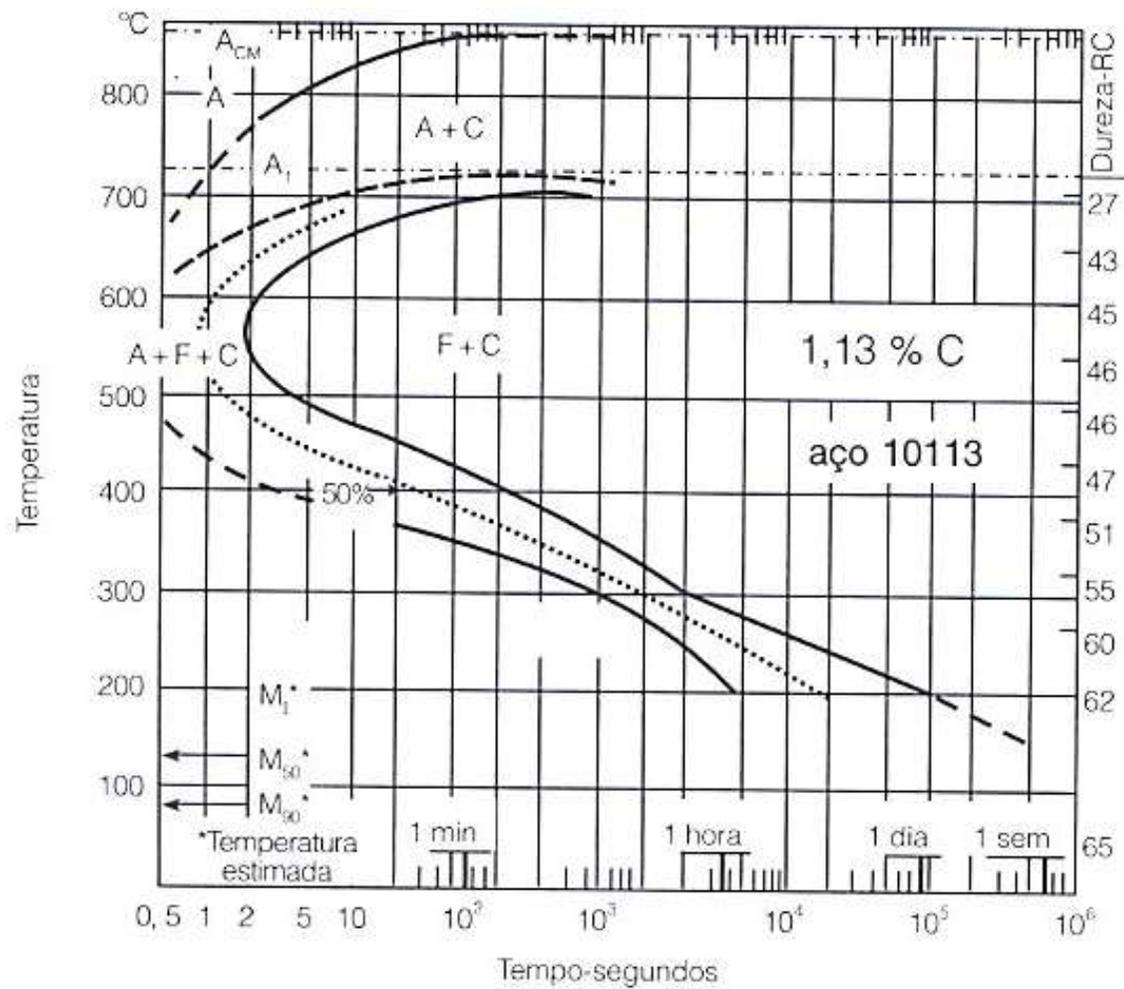
## CURVA TTT para outros aços

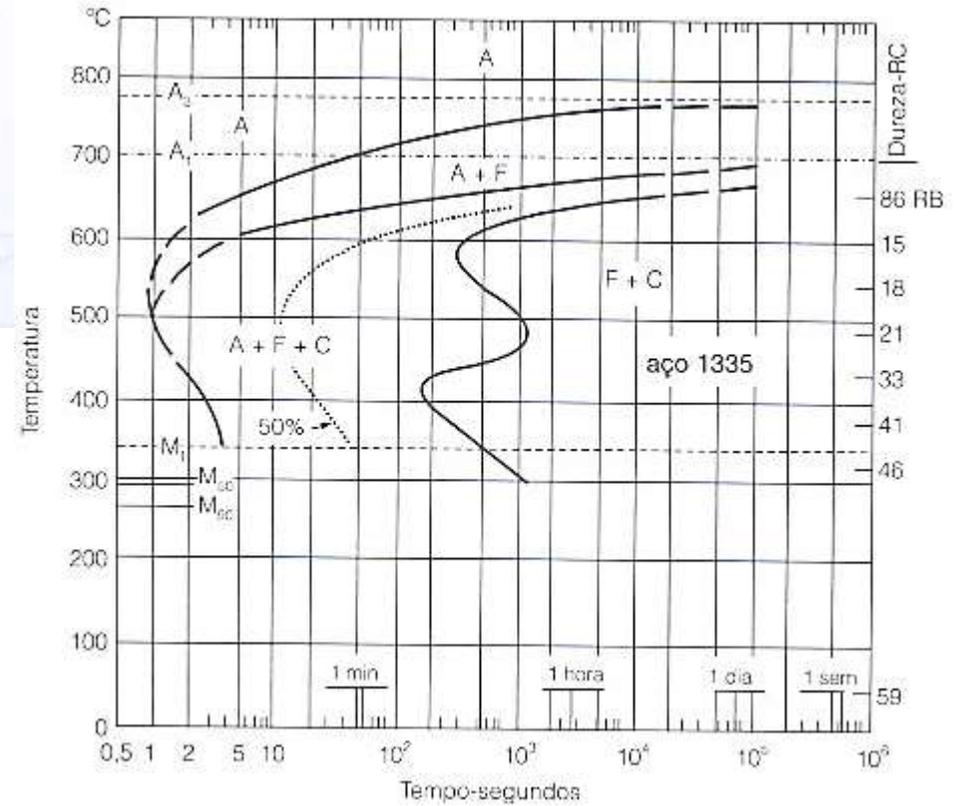
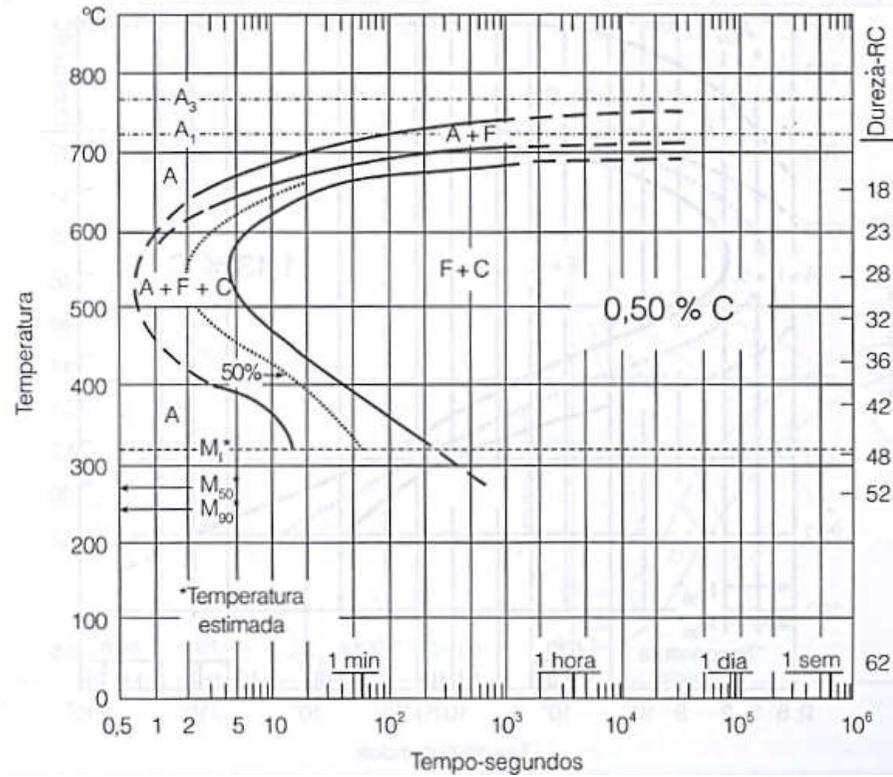
Para outras composições que não a eutetóide, fases pró eutetóides coexistem com a perlita.

Para os aços hipoeutetóides há a ferrita.

Para os aços hipereutetóides há a cementita.

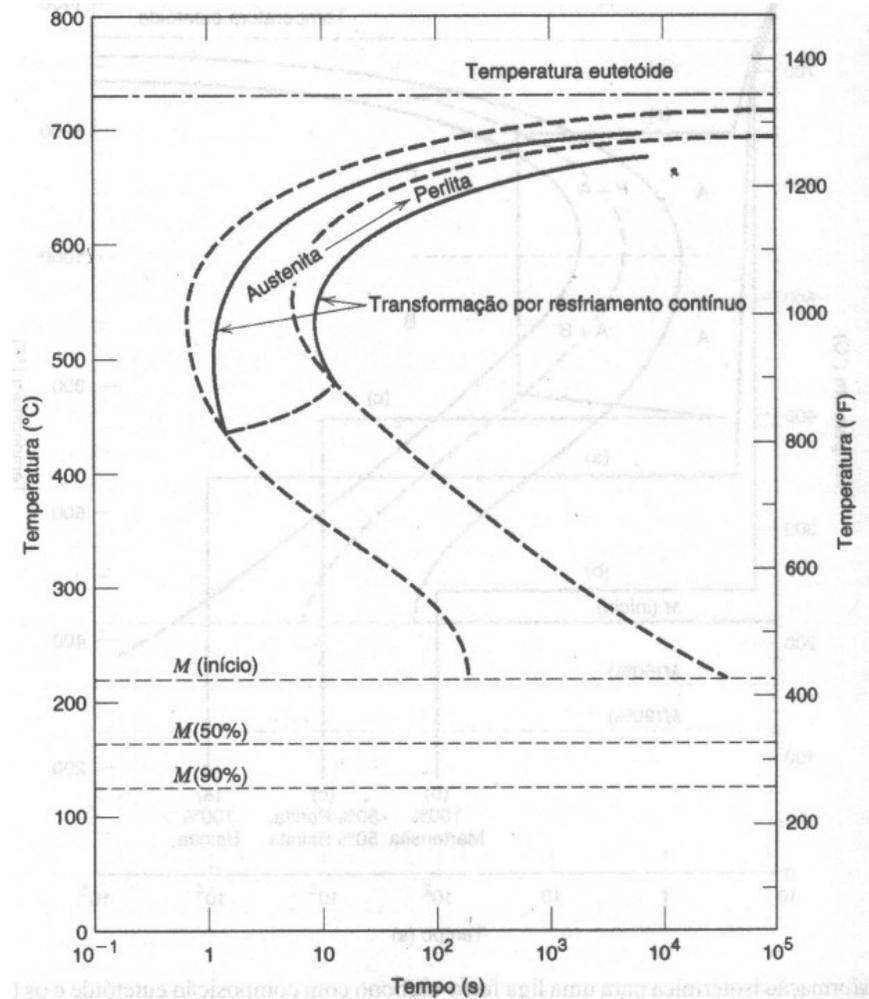






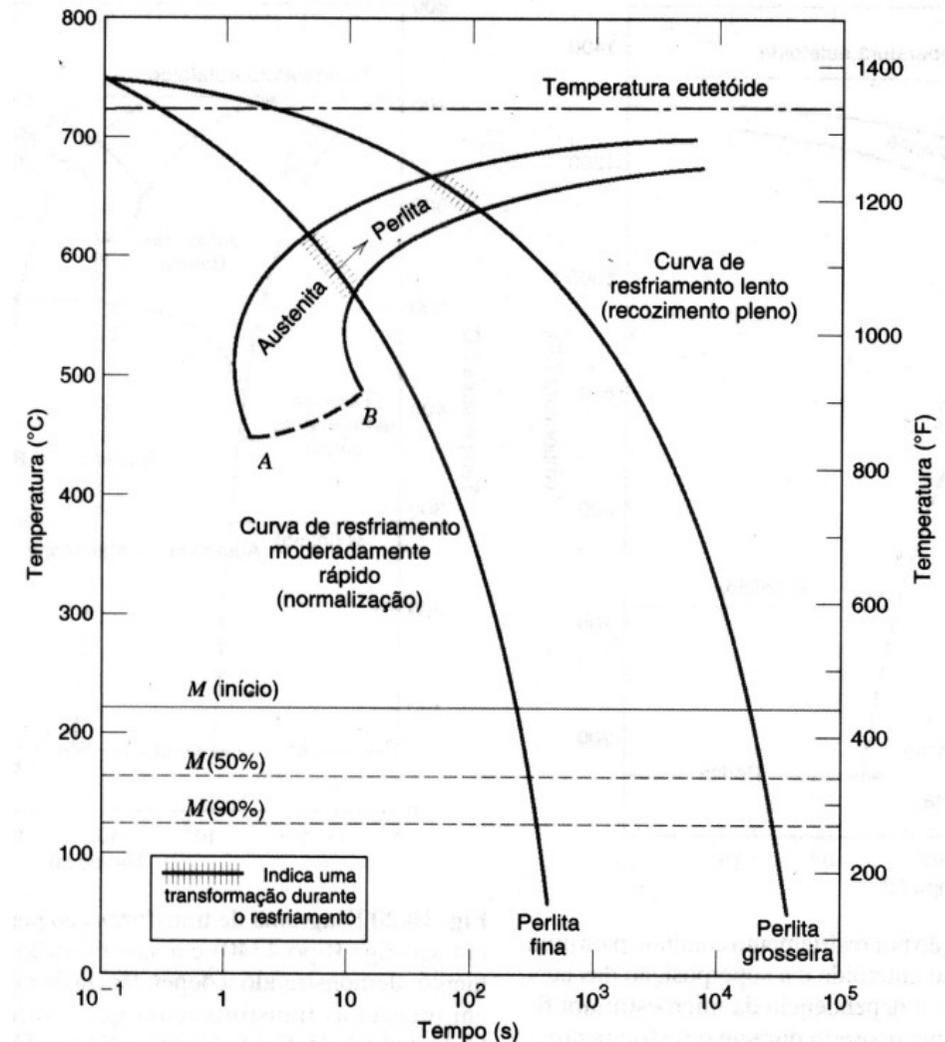
# RESFRIAMENTO CONTÍNUO

- 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



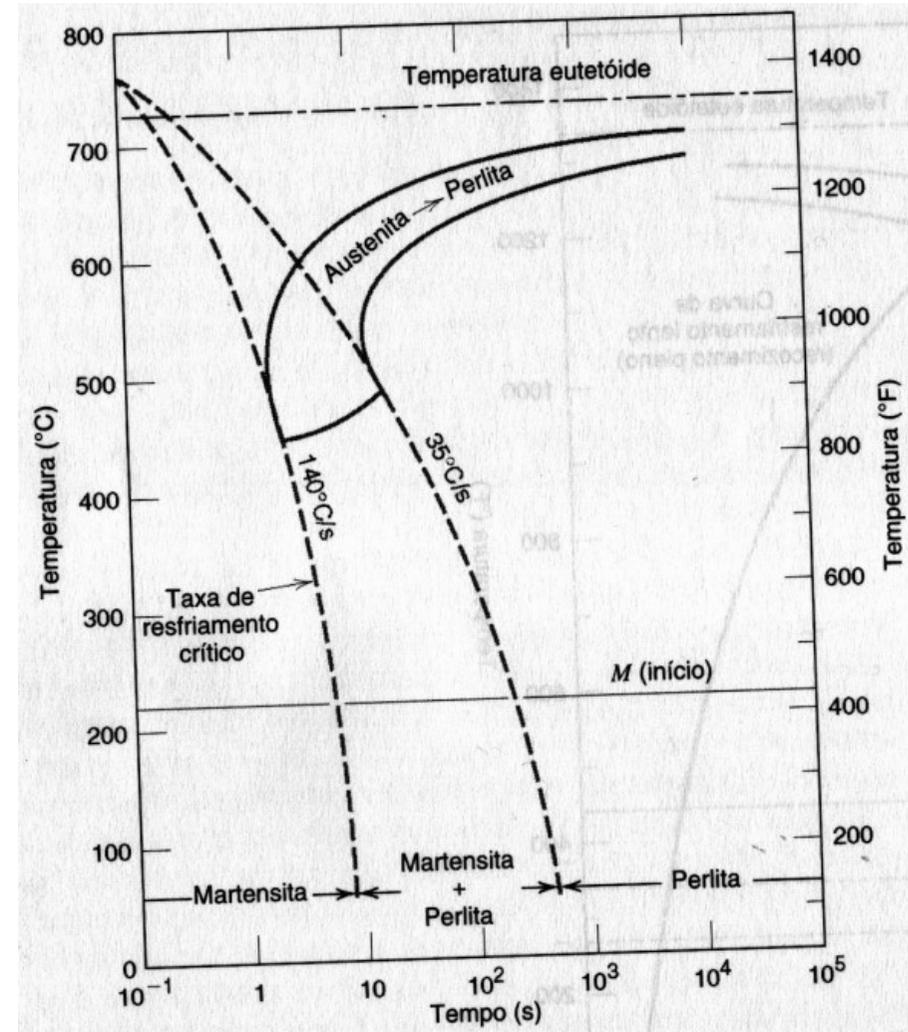
# RESFRIAMENTO CONTÍNUO

- 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

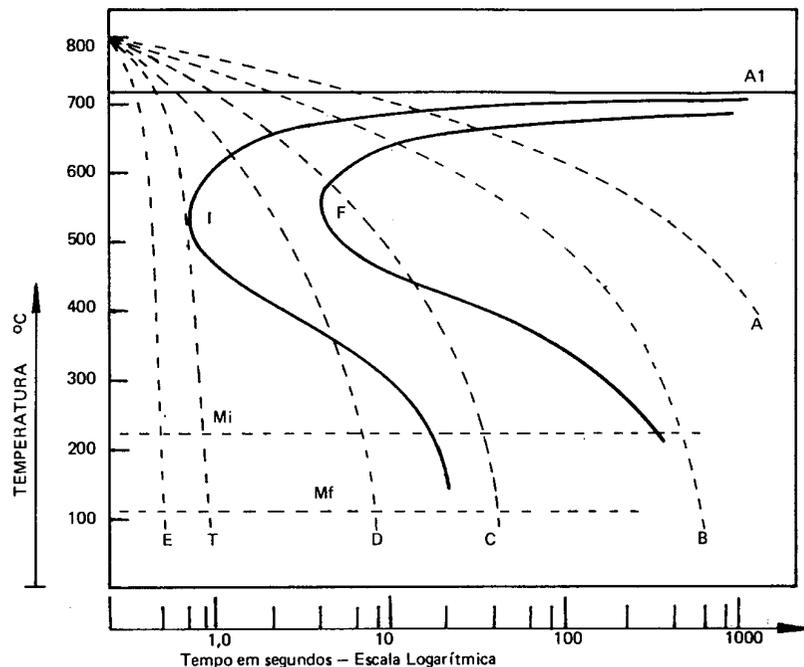


# RESFRIAMENTO CONTÍNUO

- 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



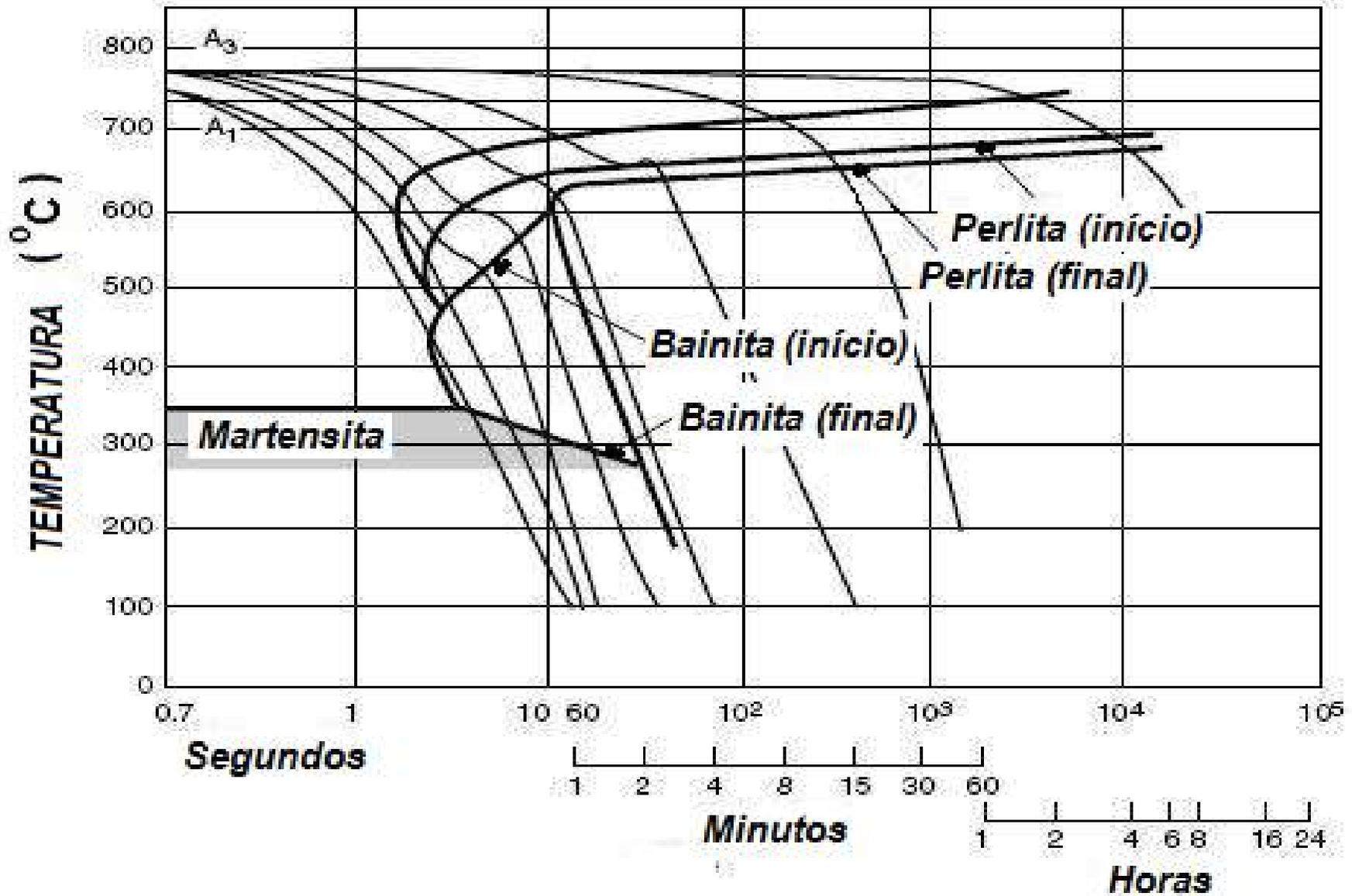
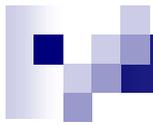
A (FORNO)= Perlita grossa

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

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

D (ÓLEO)= Perlita +  
martensita

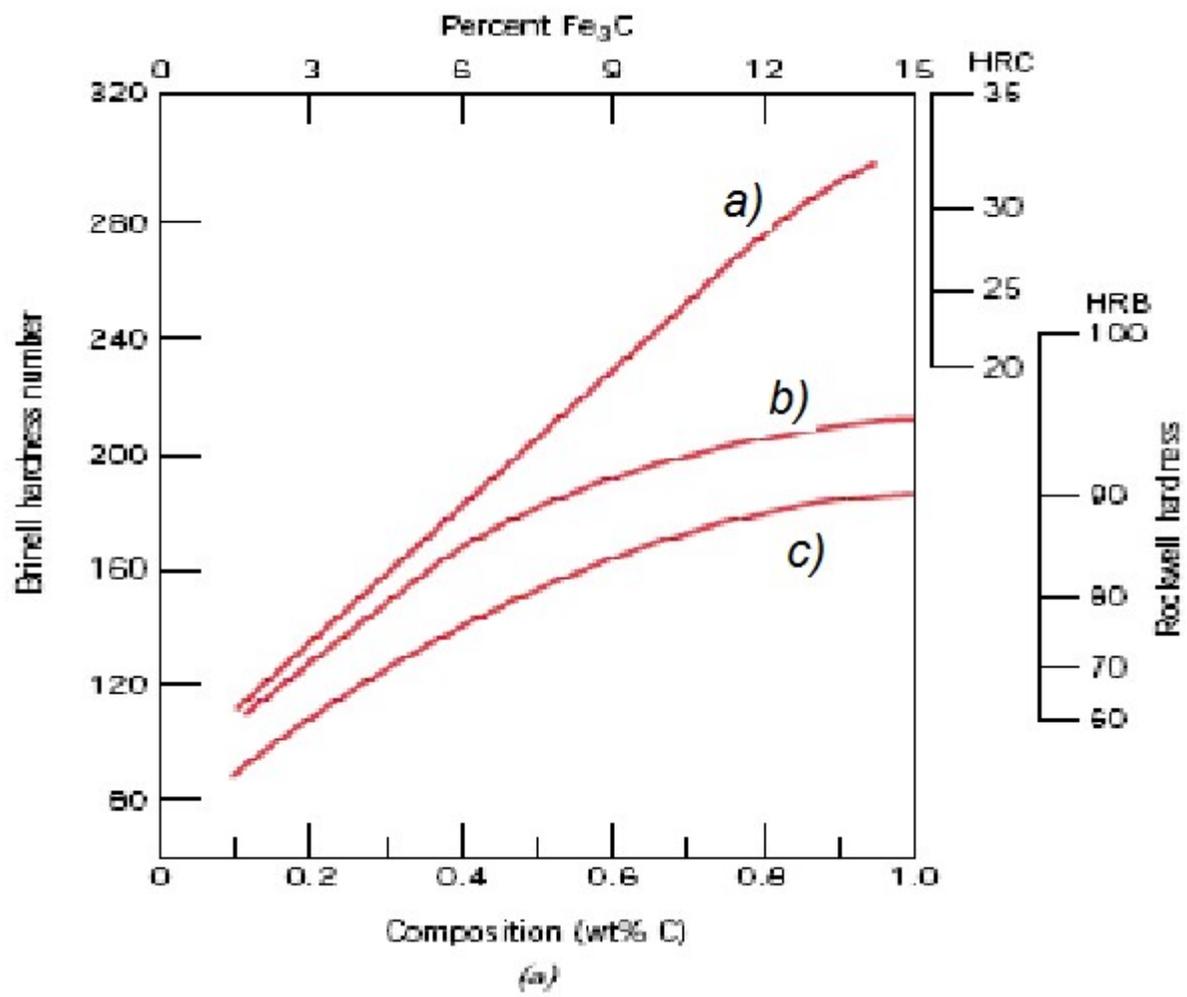
E (ÁGUA)= Martensita





# PROPRIEDADES MECÂNICAS

- A cementita é mais dura, porém mais frágil do que a ferrita. Dessa forma aumentando a fração de  $\text{Fe}_3\text{C}$  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



b) Perlita grosseira

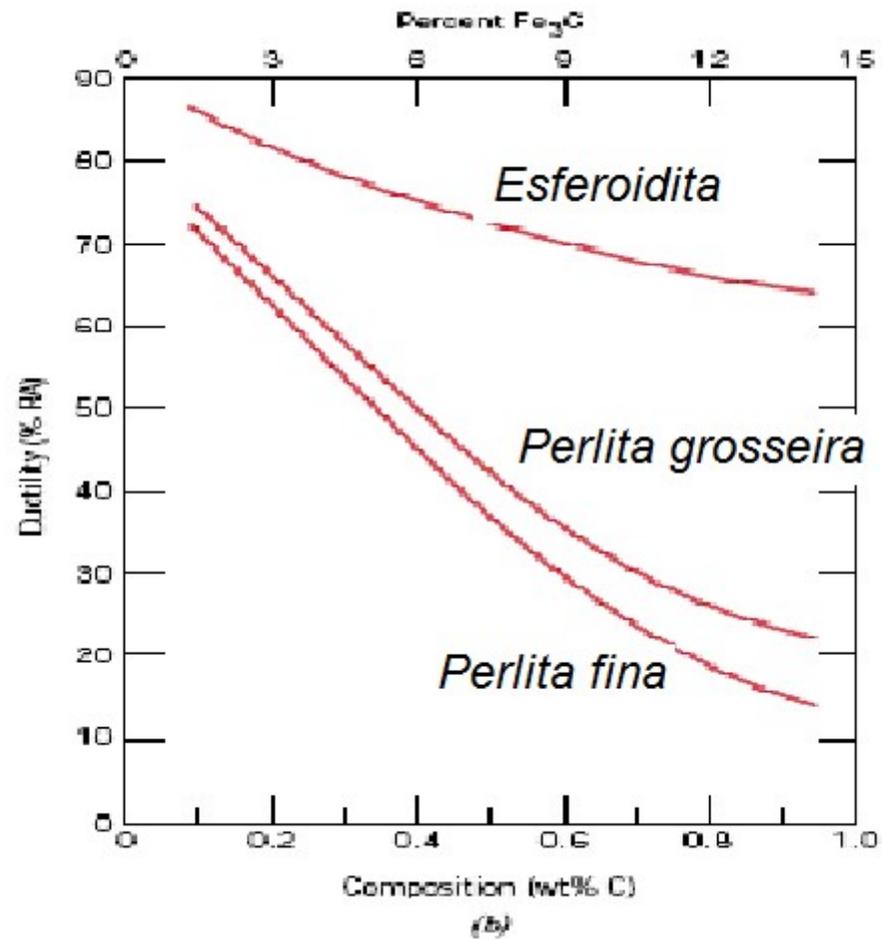
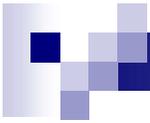
c) Esferoidita

a) Perlita fina



# PROPRIEDADES MECÂNICAS

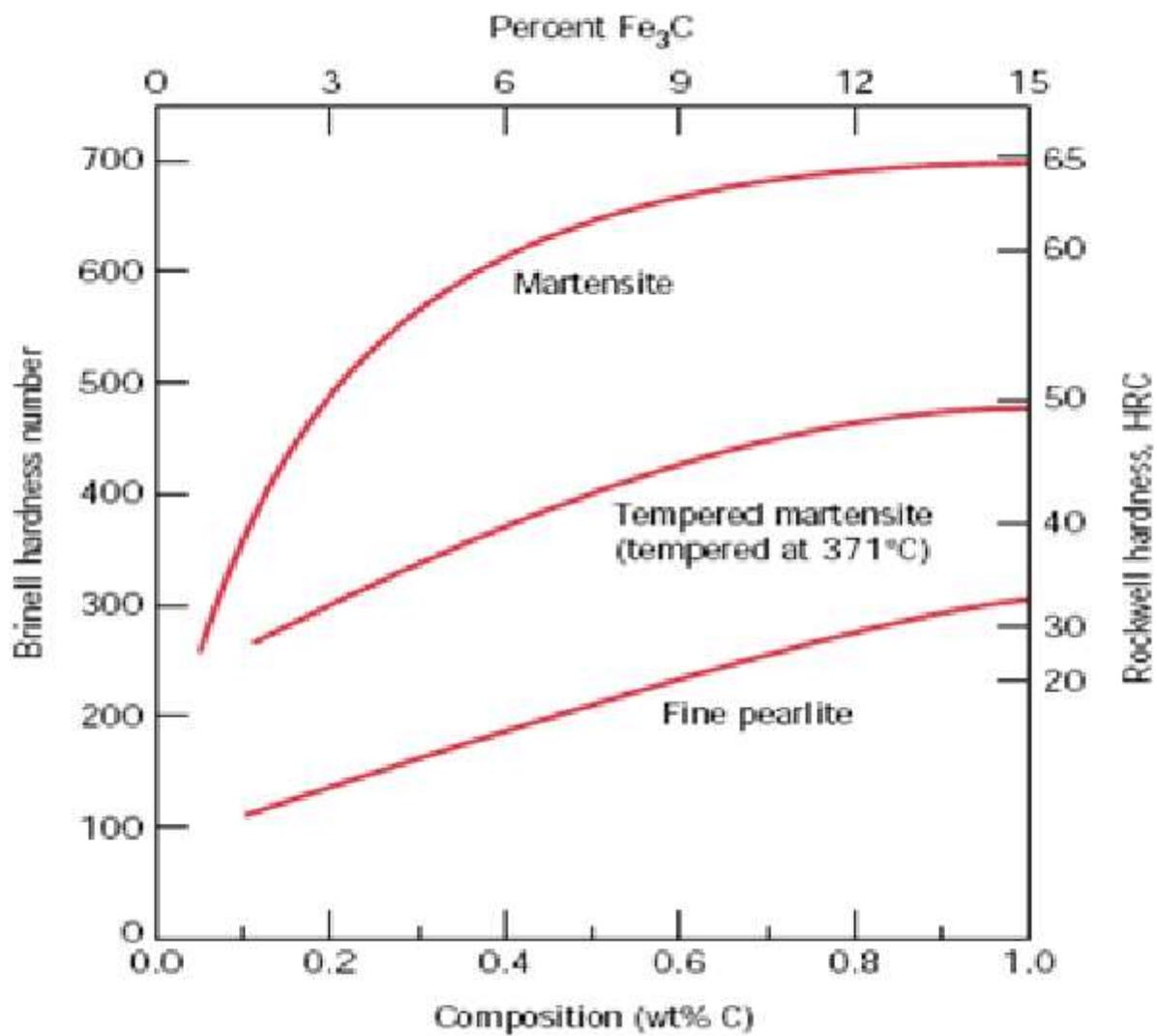
- Uma vez que a cementita é mais frágil, o aumento do seu teor resultará em uma diminuição de ductilidade
- A perlita grosseira é mais dúctil que a perlita fina, pois existe uma maior restrição à deformação plástica na perlita fina





# 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





# Meios de resfriamento

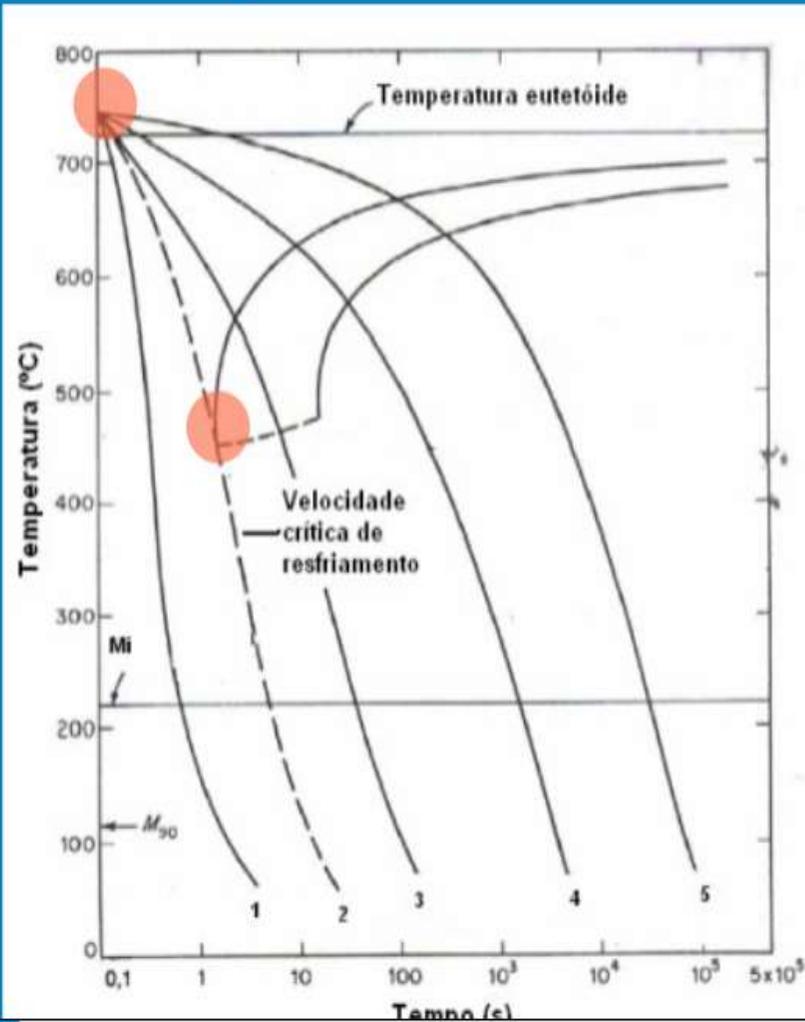
## Objetivos

Observar a metodologia de obtenção de curvas de resfriamentos;

Estudar a morfologia de curvas de resfriamentos dos diferentes fluidos;

Observar e extrair da curva de resfriamento os principais parâmetros fornecidos pelo ensaio.

# Têmpera

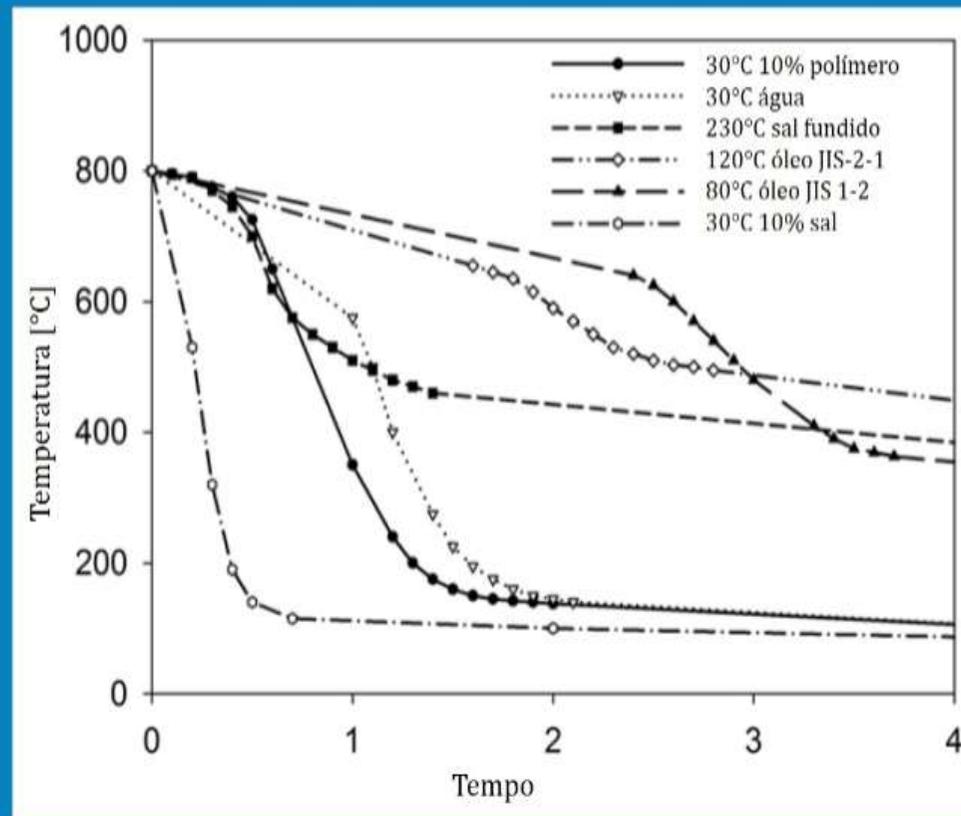


Taxa mínima necessária para ocorrer a transformação puramente martensítica:

$$TX_{\text{crítica}} = \frac{T_a - T_n}{t_n}$$

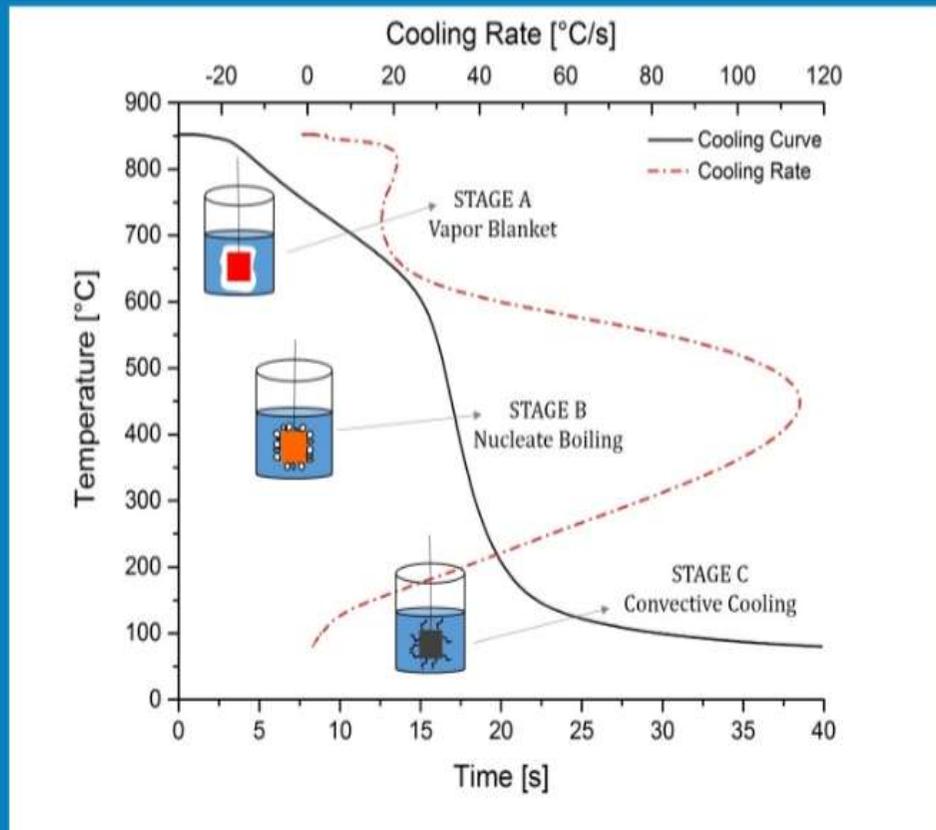
# Meios de Resfriamentos

Não Voláteis - metais e sais fundidos; gases  
Voláteis - compostos a base de água e óleos



# Mecanismos de Resfriamentos

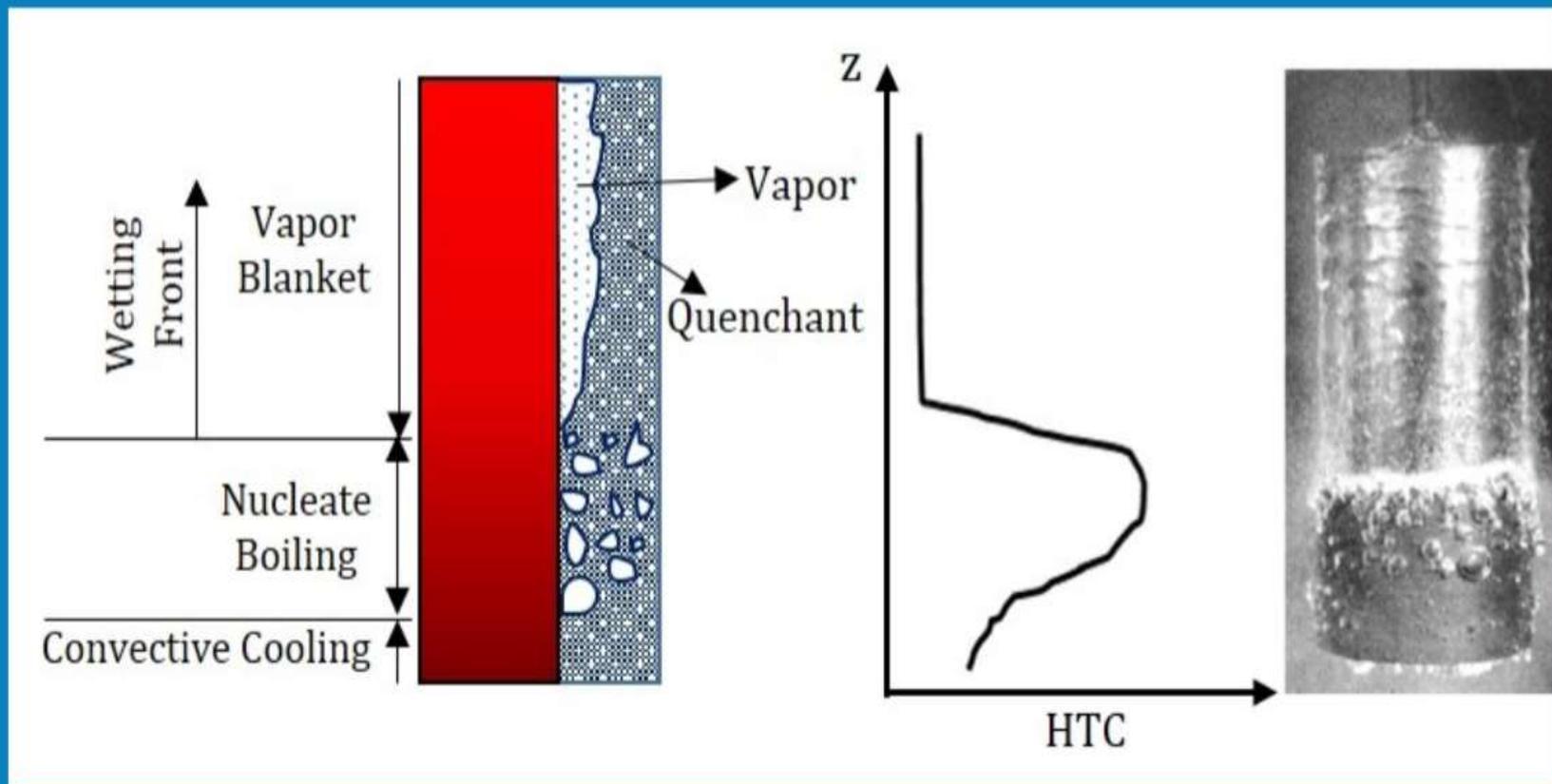
Os diferentes mecanismos de resfriamento, no processo de resfriamento em um meio volátil, podem ser identificados através da curva de resfriamento:



**CURVA DE RESFRIAMENTO:**  
 $T [^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{F}/\text{K}] \times t [\text{s}]$

**CURVA TAXA DE RESFRIAMENTO:**  
 $T [^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{F}/\text{K}] \times TX [^{\circ}\text{C}/\text{s}]$

# Frente de Molhamento



# Normas

ASTM D6200 – Standard Test Method for Determination of Cooling Characteristics of Quenching Oils by Cooling Curve Analysis

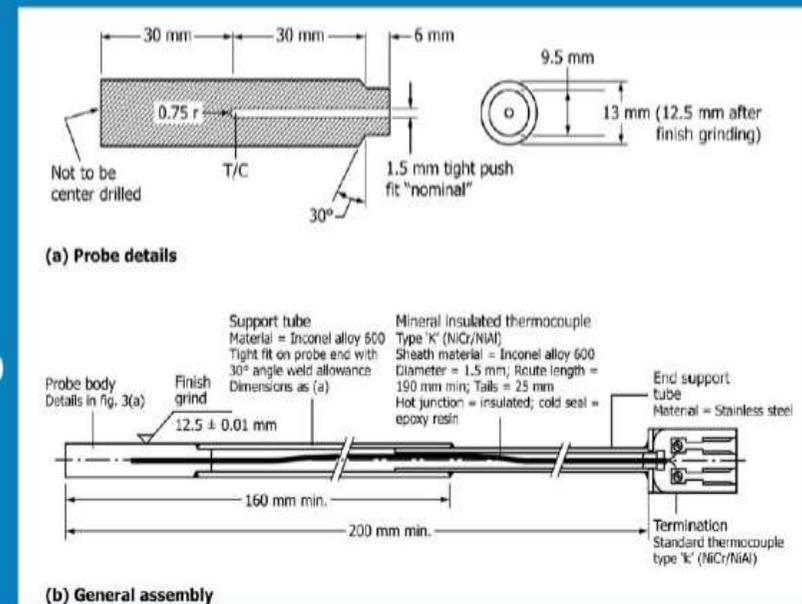
ASTM D6482 - Standard Test Method for Determination of Cooling Characteristics of Aqueous Polymer Quenchants by Cooling Curves Analysis with Agitation (Tensi Method)

# Sonda

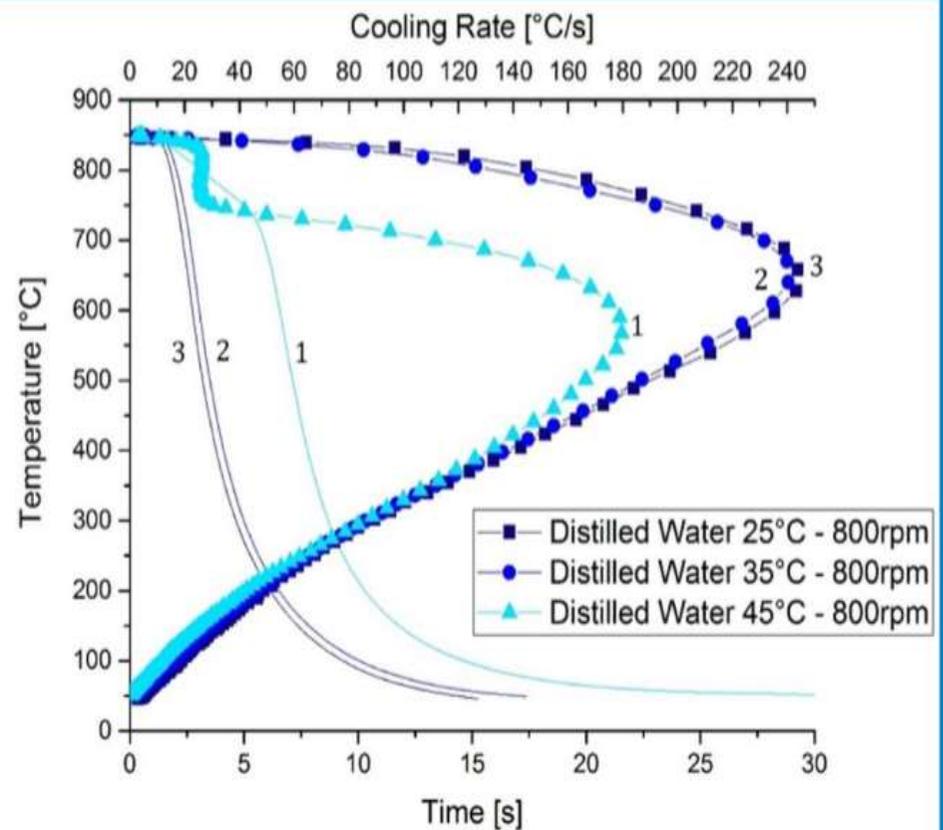
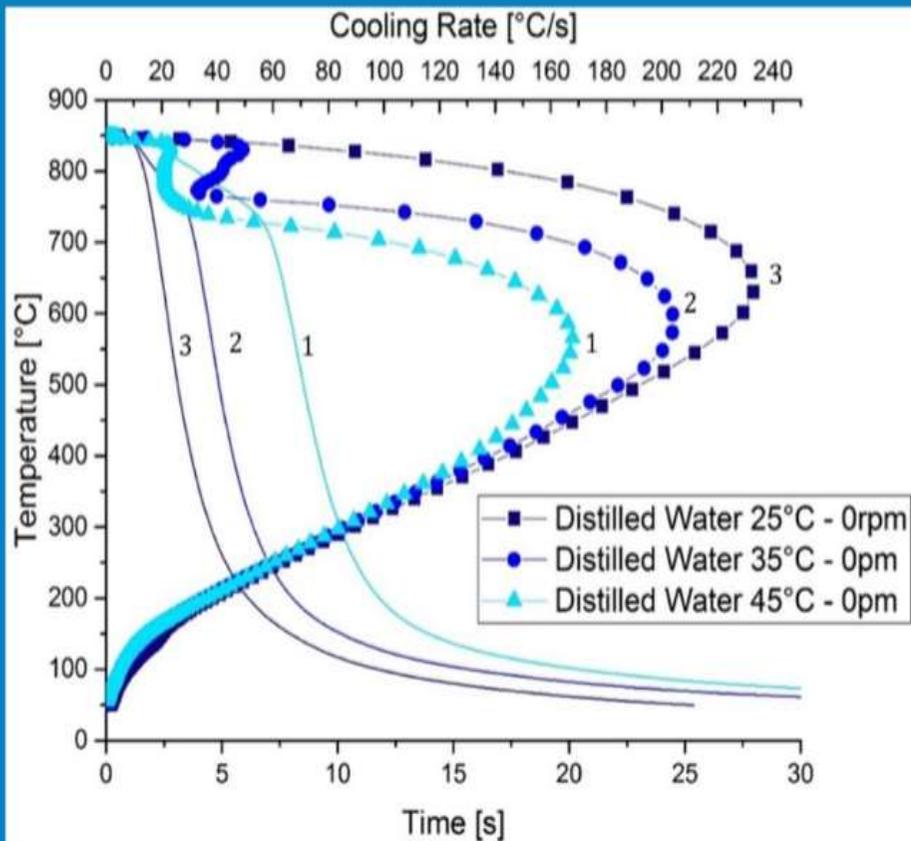
Material: aço inox 304 (tubo)  
Inconel 600 (maciço)

Termopar: Tipo K - centro geométrico

Dimensões: Comprimento=4.Diâmetro



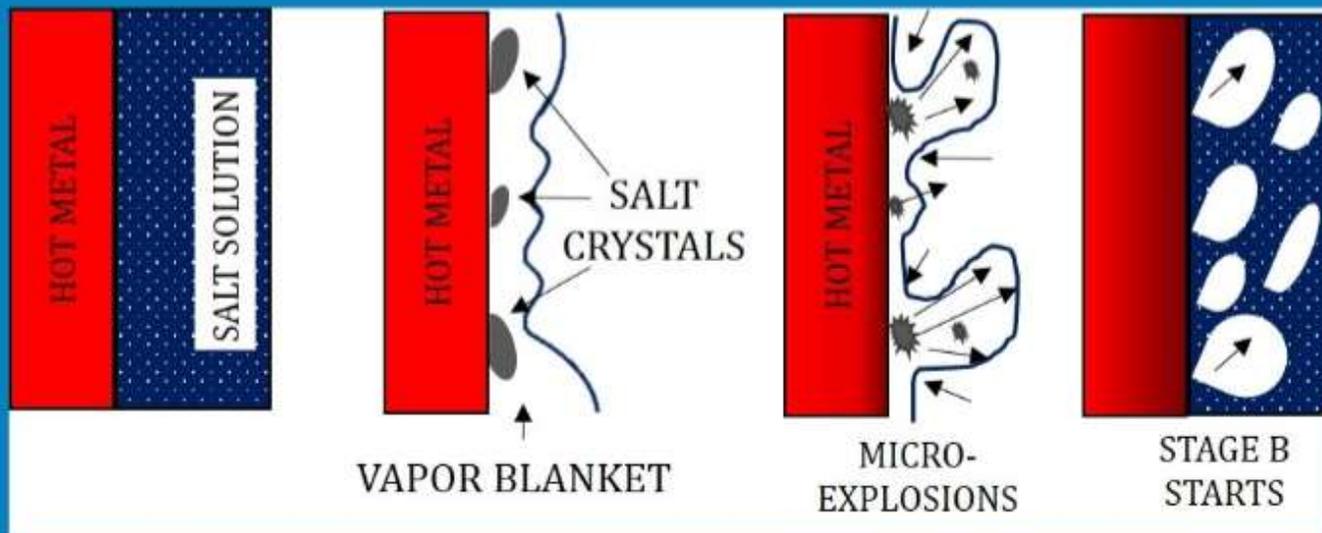
# Fatores que afetam os mecanismos



# Sais

Alta severidade - Altas TX  
Tóxicos ou não  
Estáveis quimicamente

OBS: Poder corrosivo



# Pontos de Análise

