

# *Materiais de Engenharia (SEM 5908)*

Notas de Aulas v.2013

*Aula 12 – Tratamento Térmico: Severidade de Têmpera*

**Prof. Dr(es): João Manuel P. A. Rollo  
Carlos Alberto Fortulan**

**Edição: Adriana Marques**



# Tratamentos Térmicos

# Tratamentos Térmicos

## Finalidades:

Alterar as microestruturas, como consequência melhorar as propriedades mecânicas das ligas metálicas. Consiste em aquecer os materiais em temperatura e período de tempo adequados e logo esfriá-los em condições convenientes.



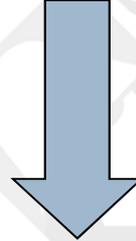
# Tratamentos Térmicos

## Objetivos:

- Remoção de tensões internas;
- Aumento ou diminuição da dureza;
- Aumento da resistência mecânica;
- Melhorar a ductilidade;
- Facilitar a usinabilidade;
- Aumentar ou promover a resistência ao desgaste;
- Aumentar a resistência à corrosão;
- Melhorar a resistência ao calor;
- Conferir ao material propriedades elétricas e magnéticas.



## Material + Tratamentos Térmicos



O Tratamento Térmico está associado diretamente com o tipo de material.

....portanto, deve ser escolhido desde o início do projeto.



## Fatores de Influência nos Tratamentos Térmicos

- Temperatura
- Tempo
- Velocidade de resfriamento
- Atmosfera\*

\* para evitar a oxidação ou perda de algum elemento químico (ex: descarbonetação dos aços)



# Fatores de Influência nos Tratamentos Térmicos

## ➤ Tempo:

O tempo de tratamento térmico depende muito das dimensões da peça e da microestrutura desejada.

Quanto maior o tempo:

- maior a segurança da completa dissolução das fases para posterior transformação;
- maior será o tamanho de grão.

Tempos longos facilitam a oxidação.



# Fatores de Influência nos Tratamentos Térmicos

## ➤ Temperatura:

A temperatura a ser trabalhado dependerá do tipo de material e da transformação de fase ou microestrutura desejada.



## Fatores de Influência nos Tratamentos Térmicos

### ➤ **Velocidade de Resfriamento:**

Depende do tipo de material e da transformação de fase ou microestrutura desejada.

É o fator mais importante porque é ele que efetivamente determinará a microestrutura, além da composição química do material.

## Principais Meios de Resfriamento

- Ambiente do forno (+ brando);
  - Ar;
  - Banho de sais ou metal fundido (o mais comum é o de Pb);
  - Óleo;
  - Água pura;
  - Soluções aquosas de NaOH,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ou NaCl (+severos)
- Entre outros...

# Tratamento Térmico dos Aços

## Mudanças de Volume e Deformação

# Causa Principal

- Desigual e rápido esfriamento das diferentes partes das peças
  - I. Têmpera em água é mais perigosa que a têmpera em óleo e esta é menos favorável que a temperatura em ar.
  - II. Mudança de volume devido a dilatação térmica e modificação na microestrutura.
- ❖ Ocorrem Simultaneamente



# Mudança de Volume por Dilatação ou Contração Térmica

- Coeficiente de dilatação dos aços; próximo de  $14 \times 10^{-6} \text{ m/m.}^\circ\text{C}$  capacidade de expandir e contrair.

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z = \alpha \cdot \Delta T$$

- Exemplo barra de 100mm de comprimento à  $0^\circ\text{C}$  quando aquecida até  $600^\circ\text{C}$  dilata 0,82mm.

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

$l_0$  = comprimento inicial

$l$  = comprimento sob a ação da força



# Mudança de volume devido as modificações dos microconstituintes

- Ferrita ; Austenita; Martensita; Perlita; Cementita.
  - No aquecimento do aço ocorre transformação de fase, dentro do estado sólido, entre as temperaturas de 743,8 e 776,2°C, ou seja a fase cúbica de corpo centrado do aço (CCC), passa para a fase cúbica de face centrada (CFC).
  - ❖ Dados relativos do aço AISI 4340 são avaliados, porém todos os aços ao carbono comum e aços ligas sofrem esta transformação.



## Coeficiente de dilatação das fases

- Austenita (CFC)  $23 \times 10^{-6} \text{ m/m.}^{\circ}\text{C}$
- Ferrita (CCC)  $14,5 \times 10^{-6} \text{ m/m.}^{\circ}\text{C}$
- Cementita (HC)  $12,5 \times 10^{-6} \text{ m/m.}^{\circ}\text{C}$
- Martensita (TCC)  $11,5 \times 10^{-6} \text{ m/m.}^{\circ}\text{C}$
- No aquecimento quando uma fase menos densa passa para outra fase mais densa ocorre uma contração.
- Observe que o fator de empacotamento da Ferrita é de 0,68 e da Austenita 0,74.



# Observação sobre as transformações

- A transformação **Martensística** é a mais perigosa (trinca), porque está mais próximo da temperatura ambiente , tem sua “plasticidade” altamente reduzida, e o aumento de volume devido a transformações de fases que ocorrem a **720 - 600 °C** são menos perigosas porque o aço está “mais plásticos” .



# Microconstituintes

- Condutividade térmica da Austenita → 18 W/MK
- Condutividade da Martensita → 8,6 W/MK
- Acima de 20mm de diâmetro, o efeito massa aparece.
- Em altas temperaturas o aço se deforma abaixo de tensões em que a frio não se deformaria.



# Na parte inferior da peça não ocorre deformação térmica

- ▶ Criam-se grandes tensões esfriando em água desde altas temperaturas.

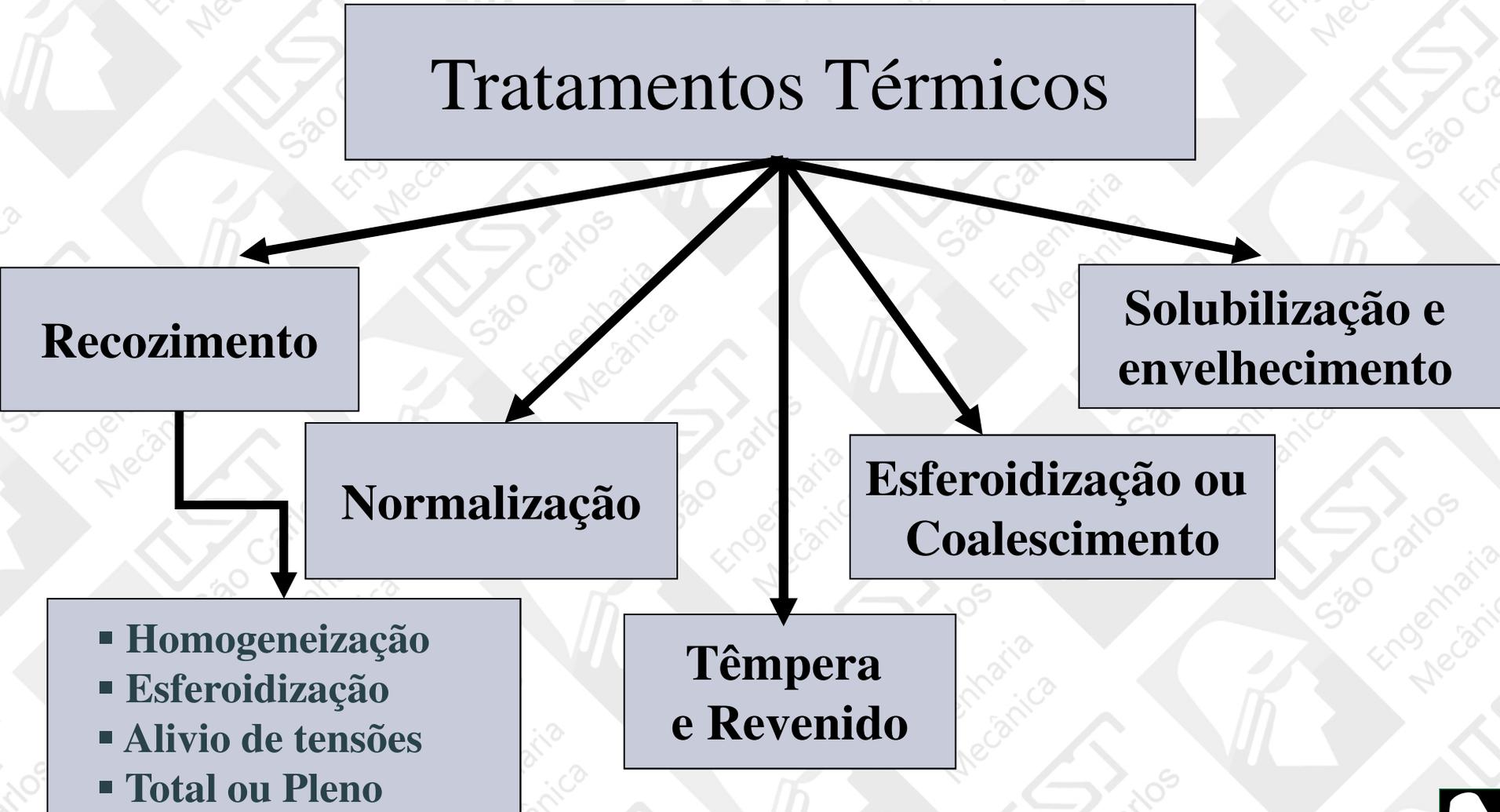


# Deformação nos Tratamentos Térmicos

- ▶ Esfriamento em água, em uma parte da peça de aço inoxidável Austenítico.
- ▶ Modificações de forma e dimensões, causadas por resfriamento desigual na peça.



## Principais Tratamentos Térmicos



# TÊMPERA

A têmpera é um tratamento térmico que usa o resfriamento severo para a produção de uma estrutura específica do material. É feita com o intuito de obter estrutura **matensítica** que promove:

- Aumento na dureza e maior RM;
- Aumento na resistência à tração;
- Aumento na resistência ao desgaste;
- Redução na tenacidade.

**\*\*\*** *A têmpera gera tensões → deve-se fazer revenido posteriormente.*

# TÊMPERA

- O teor de carbono é fundamental para produzir a dureza desejada.
- Martensita: (cementita + ferrita).  
 A curva de têmpera do aço aumenta a dureza até [ ] de 0,6%pC.
- A têmpera é a transformação da fase  $\gamma$  (austenita), mas nem toda esta fase se transforma.

## 4- TÊMPERA

### MARTENSITA

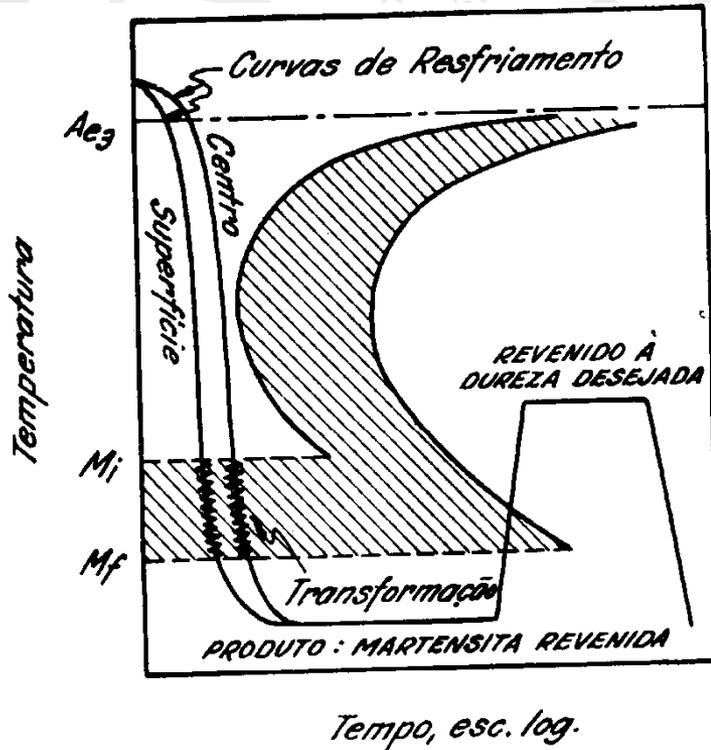


FIG. 49 — Diagrama esquemático de transformação para têmpera e revenido.

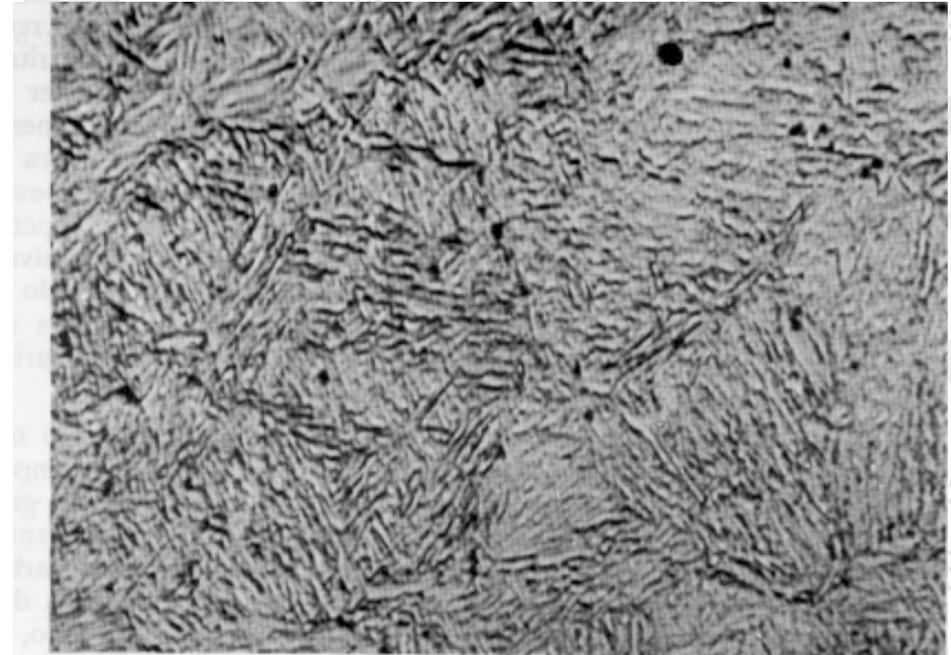


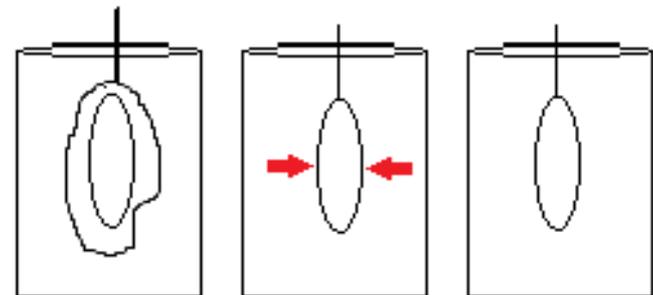
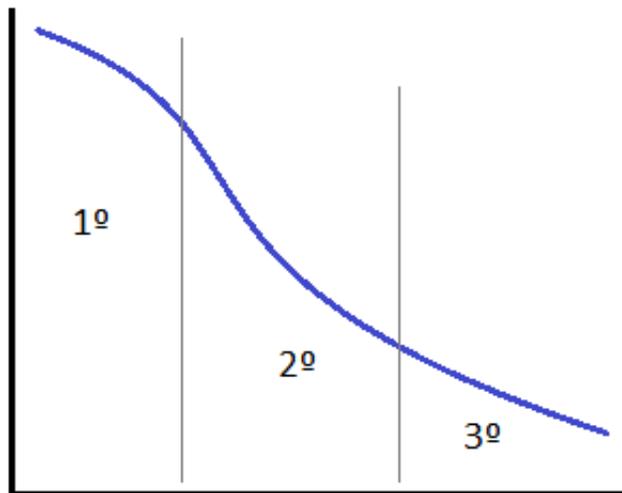
FIG. 50 — Aspecto micrográfico de aço temperado: martensita. Ataque: reativo de nital. Ampliação: 1.000 vezes. Percebe-se perfeitamente a estrutura tipicamente acicular desse constituinte.



# TÊMPERA

O TT ocorre inicialmente da superfície para o centro do material.

Quando coloca-se um material para esfriar em meio líquido, 1º) forma-se uma camada de vapor que impede a T de cair bruscamente; 2º) a camada de vapor se quebra e a T cai bruscamente; 3º) a temperatura decai lentamente da superfície para o centro da peça.



# TÊMPERA

A estrutura **martensítica** TCC, forma-se pelo movimento de cisalhamento entre os planos (discordâncias).

- Aços de alto C ( $>1,0\%$ ): martensita “plate” (placas);
- Aços de alto C ( $<0,6\%$ ): martensita “lath” (ripas);
- $0,6\% < [C] < 1,0\% =$  Mistura;

# martensita “plate” em  $\pm 90\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $\pm 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

# martensita “lath” em  $\pm 700\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $\pm 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$

# TÊMPERA

## Temperatura

Superior à linha crítica (A1)

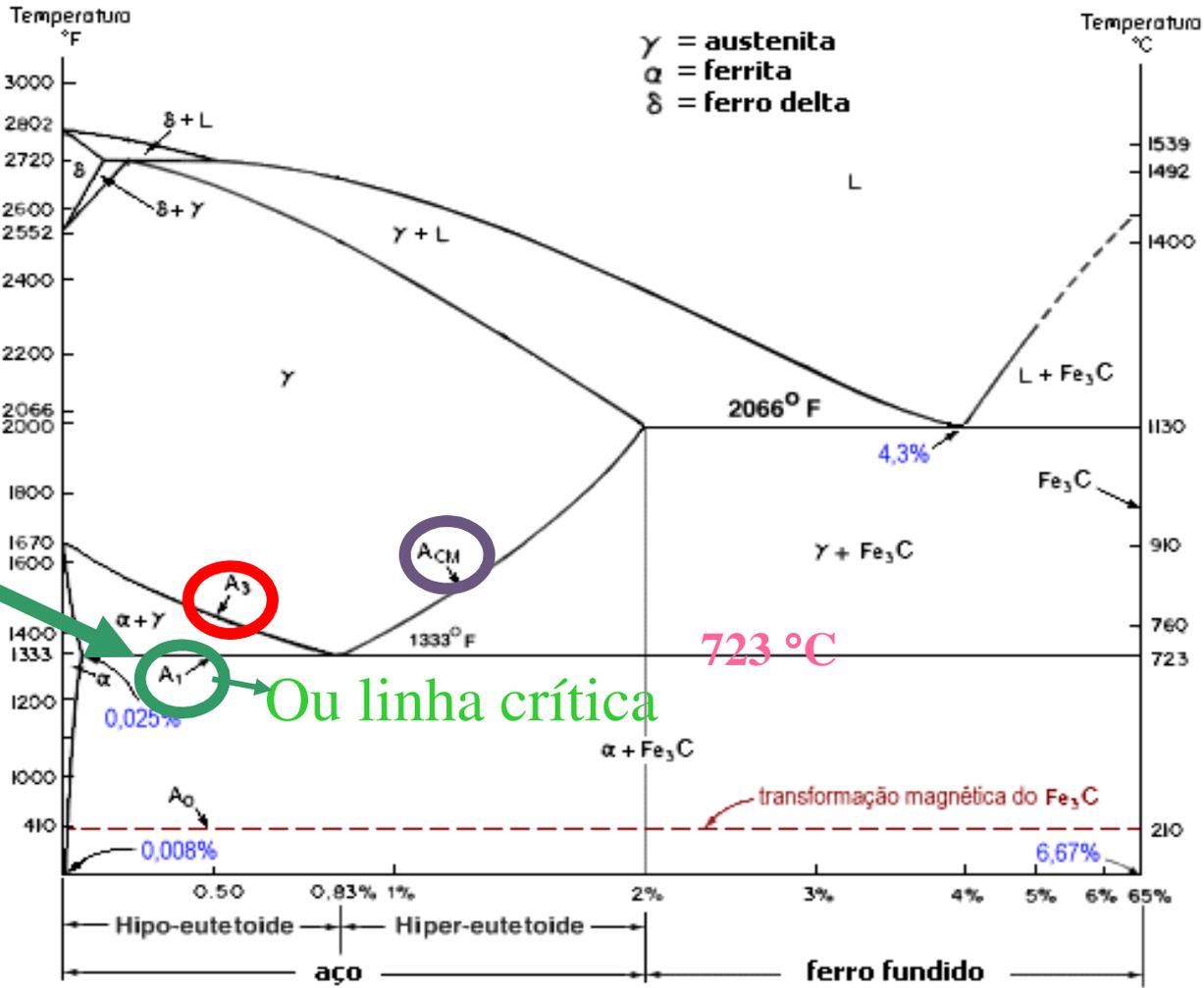
*Deve-se evitar o superaquecimento, pois formaria martensita acicular muito grosseira, de elevada fragilidade.*

## ➤ Resfriamento

Rápido de maneira a formar martensita (ver curvas TTT).

# Verificando no Diagrama Fe-C

➤ **Temperatura Superior a linha A1**



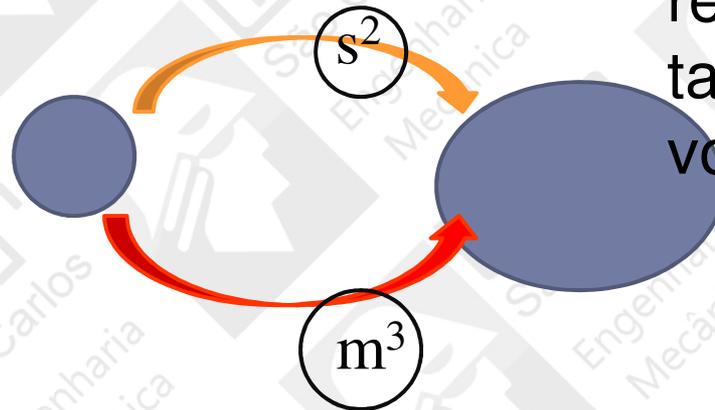
Ou linha crítica

723 °C

transformação magnética do  $Fe_3C$

## Fatores dependentes da Peça

- Geometria ( razão/ volume/ superfície de contato;
- Acabamento superficial;
- Arranjo de carga e densidade;
- Tipo de liga;
- Massa.



Importante:  
relação entre o  
tamanho e o  
volume da peça.

## Meios de Resfriamento

Depende muito da composição do aço (% de carbono e elementos de liga) e da espessura da peça.

- Solução de subs. não orgânicas em água;
- Água pura;
- Solução de polímeros em água;
- Óleos de têmpera em graus variáveis;
- Sais fluidizados;
- Leitos fluidizados;
- Gases pressurizados e circulados ( $N_2$ , He, Ar).

## Características do Meio de Têmpera.

- Densidade;
- Viscosidade;
- Calor específico ;
- Condutividade térmica do fluido;
- T de ebulição;
- T de Leidenfrost (T de transição entre a camada de vapor e o estágio de ebulição);
- Propriedades do molhamento do líquido.

## Fatores dependentes de facilidades de Têmpera.

- Temperatura do banho;
- Taxa de agitação;
- Direção do Fluxo;
- [ ] da solução se aplicável.



Deve ser proporcional ao tamanho e o volume da peça.

## Temperabilidade

A temperabilidade é a medida da penetração da Têmpera.

- Realiza-se o Ensaio Jominy em um cilindro com seu comprimento de 5x o diâmetro do mesmo.



*\*\*\* O material é aquecido e colocado em uma máquina onde é resfriado em apenas uma extremidade (com jato de água) que irá gerar um gradiente de dureza do mesmo.*

## Temperabilidade

Para medir a temperatura e sua dureza correspondente, este cilindro é perfurado com um identador à cada  $1/16''$ .

& mede-se a dureza deste material, correlacionando as curvas de dureza em Superfície/  $3/4$  raio/  $1/2$  raio e Centro com a curva de dureza vs distanciamento da extremidade em in ( $1/16''$ ).

# Temperabilidade

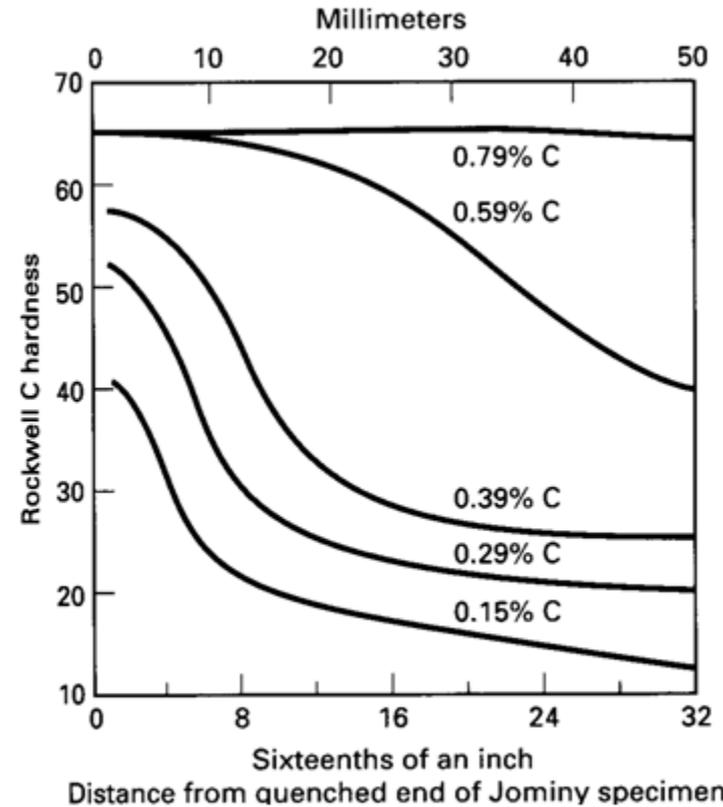
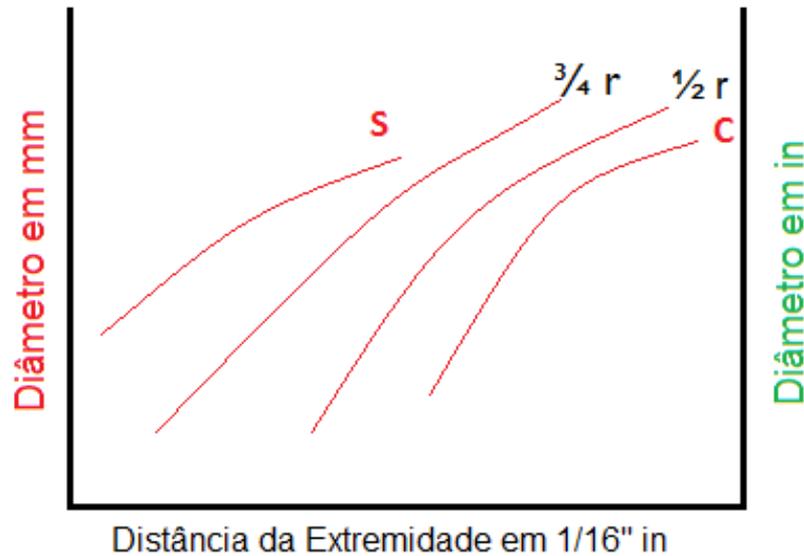
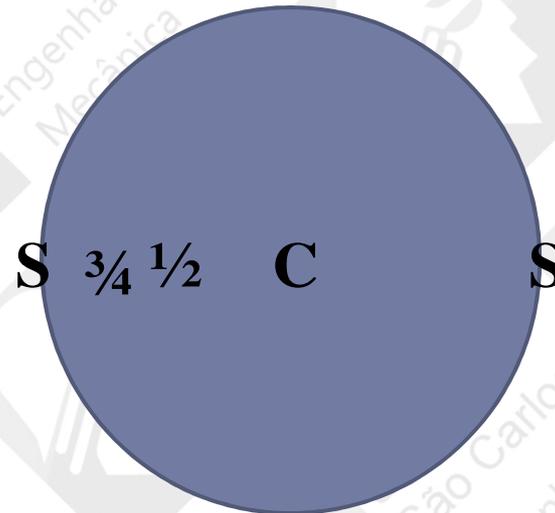


FIGURE 5.16 Jominy hardness curves for engineering steels with identical alloy conditions but variable carbon content.

## Temperabilidade

Correlaciona-se em qual ponto da barra, teria-se a mesma taxa de resfriamento. ( $T_x 2$  &  $T_x 1$ ). Para obter as curvas em U.



## Severidade de Têmpera

A severidade de têmpera pode ser medida, realizando o Ensaio Jominy, com um determinado material, e temperando-o em um meio de têmpera de estudo; de forma a obter uma estrutura não totalmente endurecida.

*Severidade de Têmpera: representa o número que indica a eficiência de retirada de calor do material. Símbolo (letra H)*

➤ *Quanto maior este número, mais severo é este TT empregado.*



( ↓ *Dureza* )

## Severidade de Têmpera

<i>H</i> <i>(severidade)</i>	<i>Meio</i>	<i>Agitação</i>
<i>0,20</i>	<i>Óleo</i>	<i>Sem agitação</i>
<i>0,35</i>	<i>Óleo</i>	<i>Moderada</i>
<i>0,5</i>	<i>Óleo</i>	<i>Adequada</i>
<i>0,7</i>	<i>Óleo</i>	<i>Severa</i>
<i>1,0</i>	<i>Água</i>	<i>Sem agitação</i>
<i>1,5</i>	<i>Água</i>	<i>Severa</i>
<i>2,0</i>	<i>Salmoura</i>	<i>Sem agitação</i>
<i>5,0</i>	<i>Salmoura</i>	<i>Severa</i>

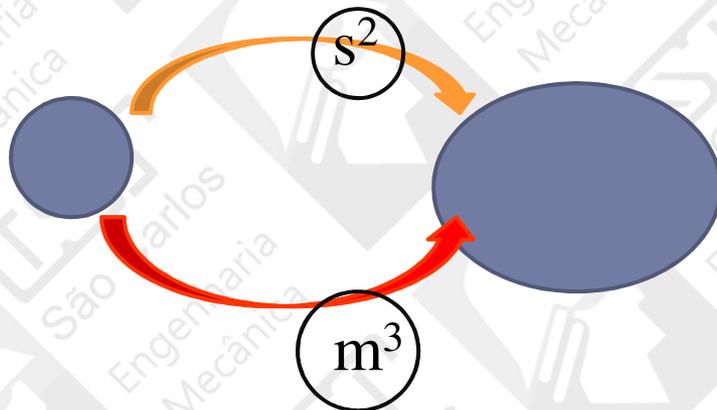
## Referências

- PEREIRA, R.L. *Tratamentos Térmicos dos Metais*. Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 3<sup>a</sup> ed. 1979. pp 111-132.
- Prof. Dr. Carlos Casteletti - Aulas de Tratamentos Térmicos e Termoquímicos .

## Outros tratamentos térmicos

## RECOZIMENTO

Consiste em aquecer o material a uma temperatura controlada, mantendo-a nestas condições por um tempo predeterminado(\*avaliado segundo as características geométricas da peça) e após deixar o material sob resfriamento lento dentro do forno onde foi tratado.



Importante: relação entre o tamanho e o volume da peça.

# RECOZIMENTO

## ➤ Objetivos:

- Remoção de tensões internas devido aos tratamentos mecânicos;
- Diminuir a dureza para facilitar a usinabilidade;
- Alterar as propriedades mecânicas como a resistência e ductilidade;
- Ajustar o tamanho de grão;
- Melhorar as propriedades elétricas e magnéticas;
- Produzir uma microestrutura definida.

## TIPOS DE RECOZIMENTO

- **Recozimento para alívio de tensões (qualquer liga metálica).**
  - Recozimento para recristalização (qualquer liga metálica).
- **Recozimento de esferoidização (aços).**
- **Recozimento de homogeneização (para peças fundidas).**
- **Recozimento total ou pleno (aços).**



## a) Recozimento para Alívio de Tensões

### ➤ **Objetivo**

Realizado para a remoção de tensões internas originadas de processos (tratamentos mecânicos, trabalhos à quente/frio, corte, desbastes ...).

### ➤ **Temperatura**

A temperatura empregada deve ser de 500-600°C.

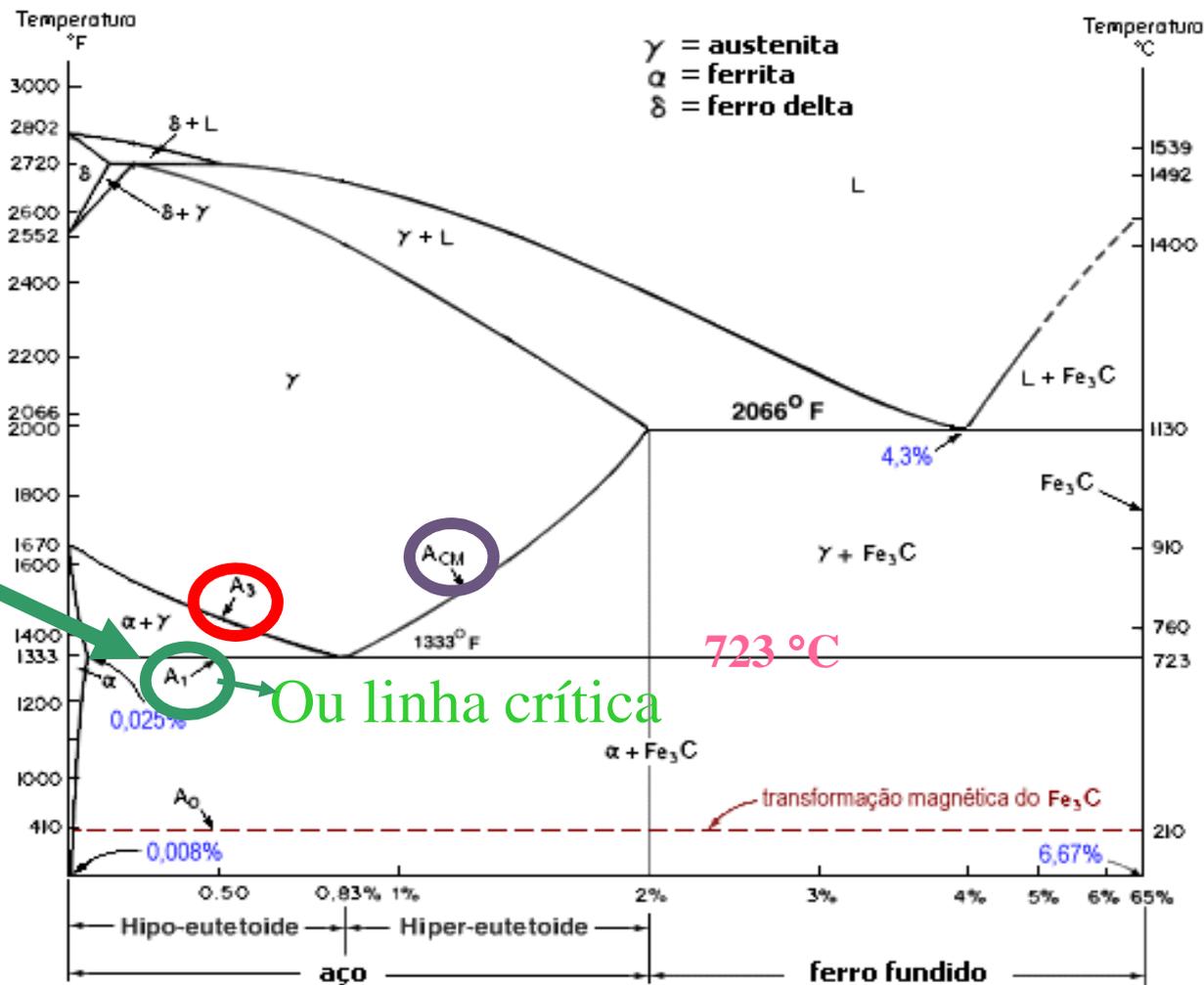
➔ Não deve ocorrer nenhuma transformação de fase.

### ➤ **Resfriamento**

Deve-se evitar velocidades muito altas devido ao risco de distorções (Resfriamento Lento).

# Verificando no Diagrama Fe-C

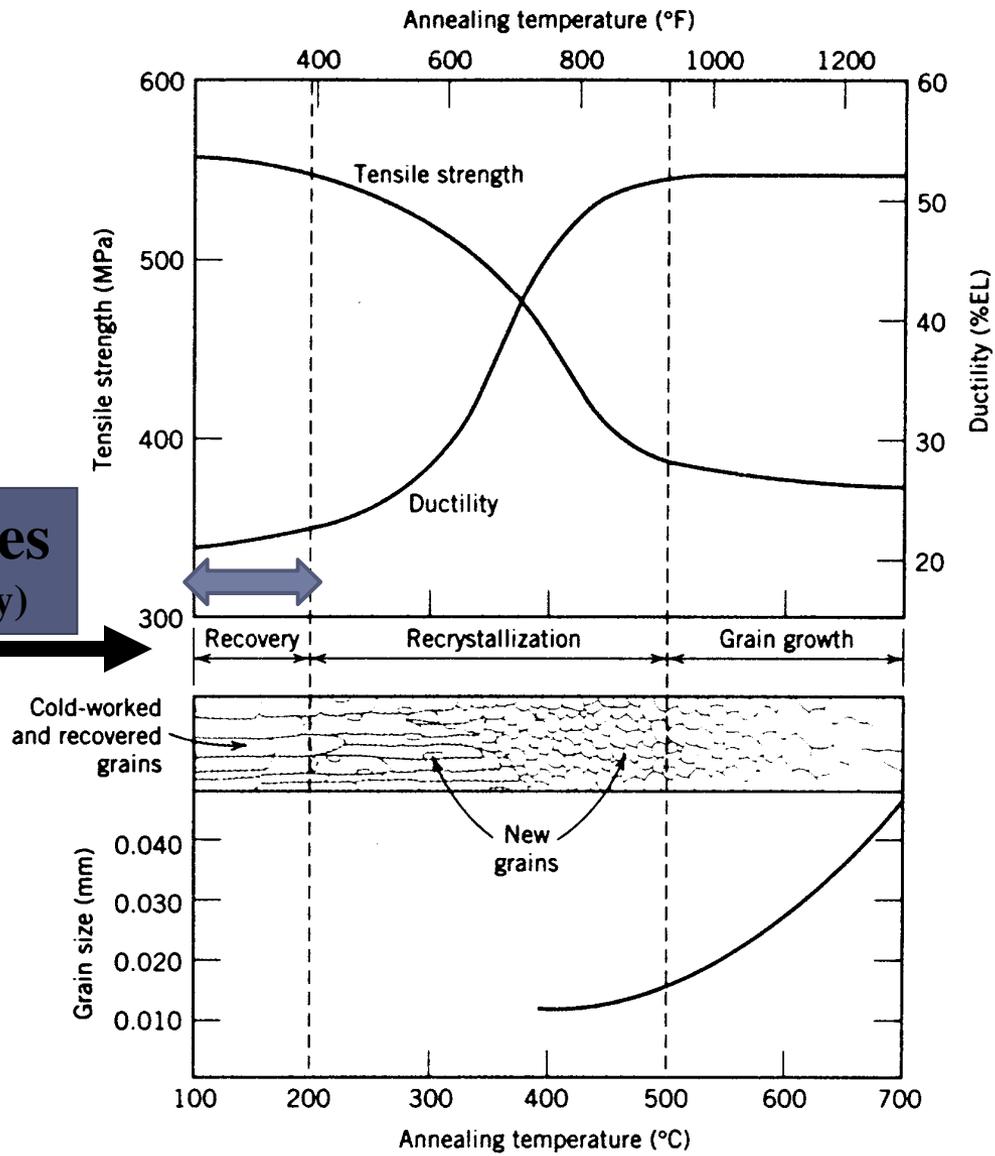
➤ **Temperatura**  
Abaixo da linha A1  
➔ Não há nenhuma transformação (500-600°C)



➔ Ou linha crítica

# Influência da Temperatura de Recozimento na Resistência à Tração e Ductilidade.

**Alívio de Tensões  
(Recuperação/Recovery)**



## - Recozimento para Recristalização.

Após a Recuperação (o re-arranjo das discordâncias), também conhecido como recozimento de alívio de tensões. Onde não há mudanças na estrutura do material.

Faz-se a Recristalização deste,

➤ Objetivo:

Eliminar o encruamento gerado pela deformação à frio.

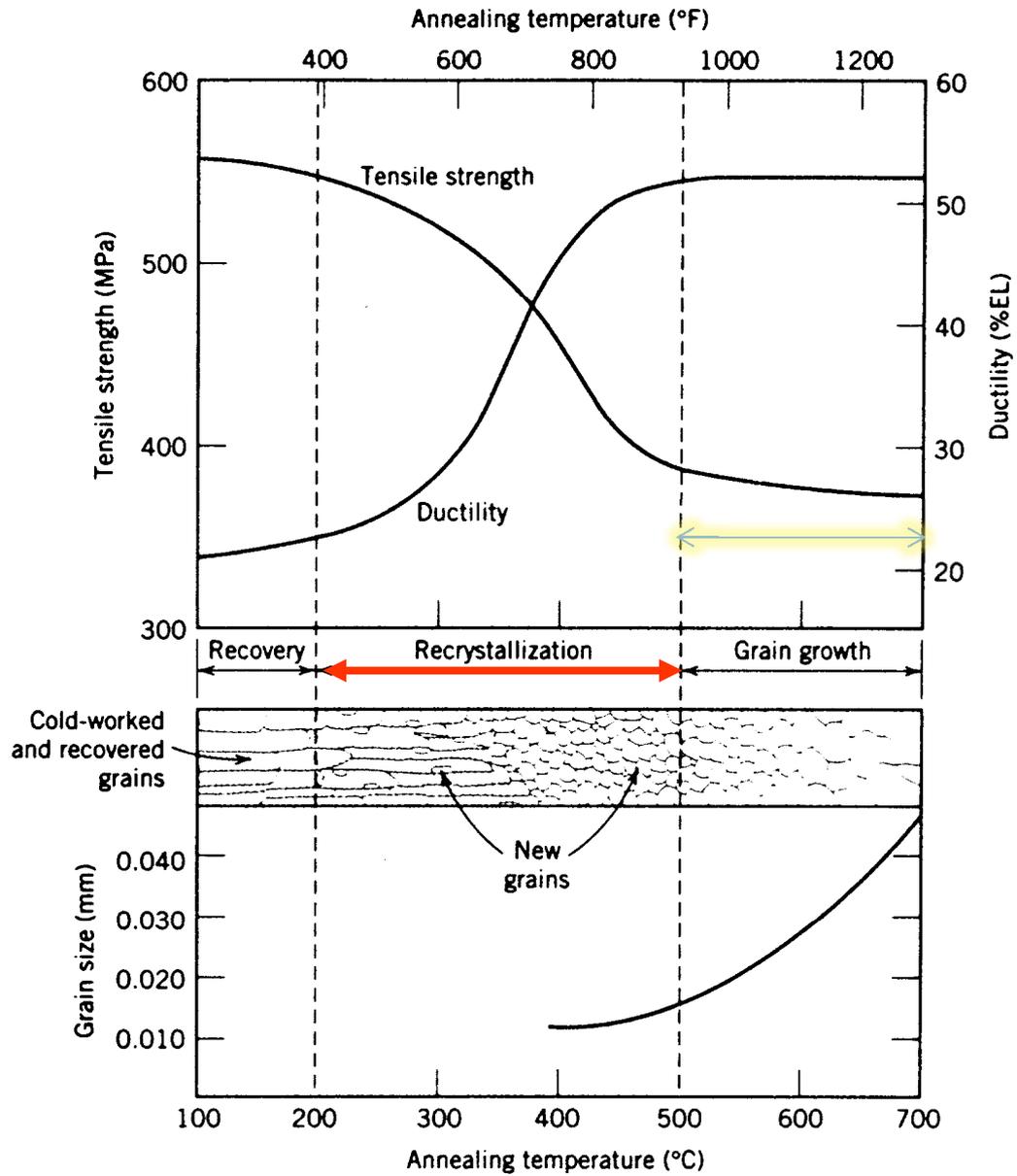
→ Não deve ocorrer nenhuma transformação de fase.

## - Recozimento para Recristalização.

Na recristalização nucleam-se novos e diminutos cristais de composição idêntica aos grãos originais não deformados. São grãos equi-axiais poligonais.

Após esta etapa devido ao aumento de temperatura os grãos recristalizados tendem a crescer.

- ▶ Resfriamento
  - Lento (ao ar ou ao forno)



## b) Recozimento de Esferoidização (Esferoidização e Coalescimento).

### *Esferoidita*

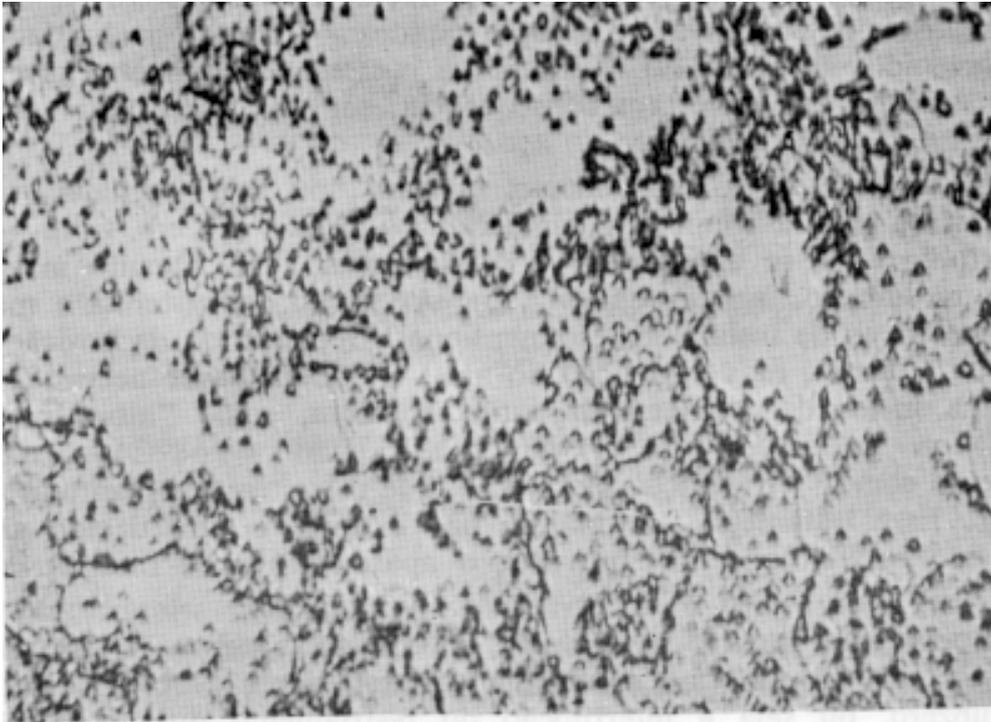
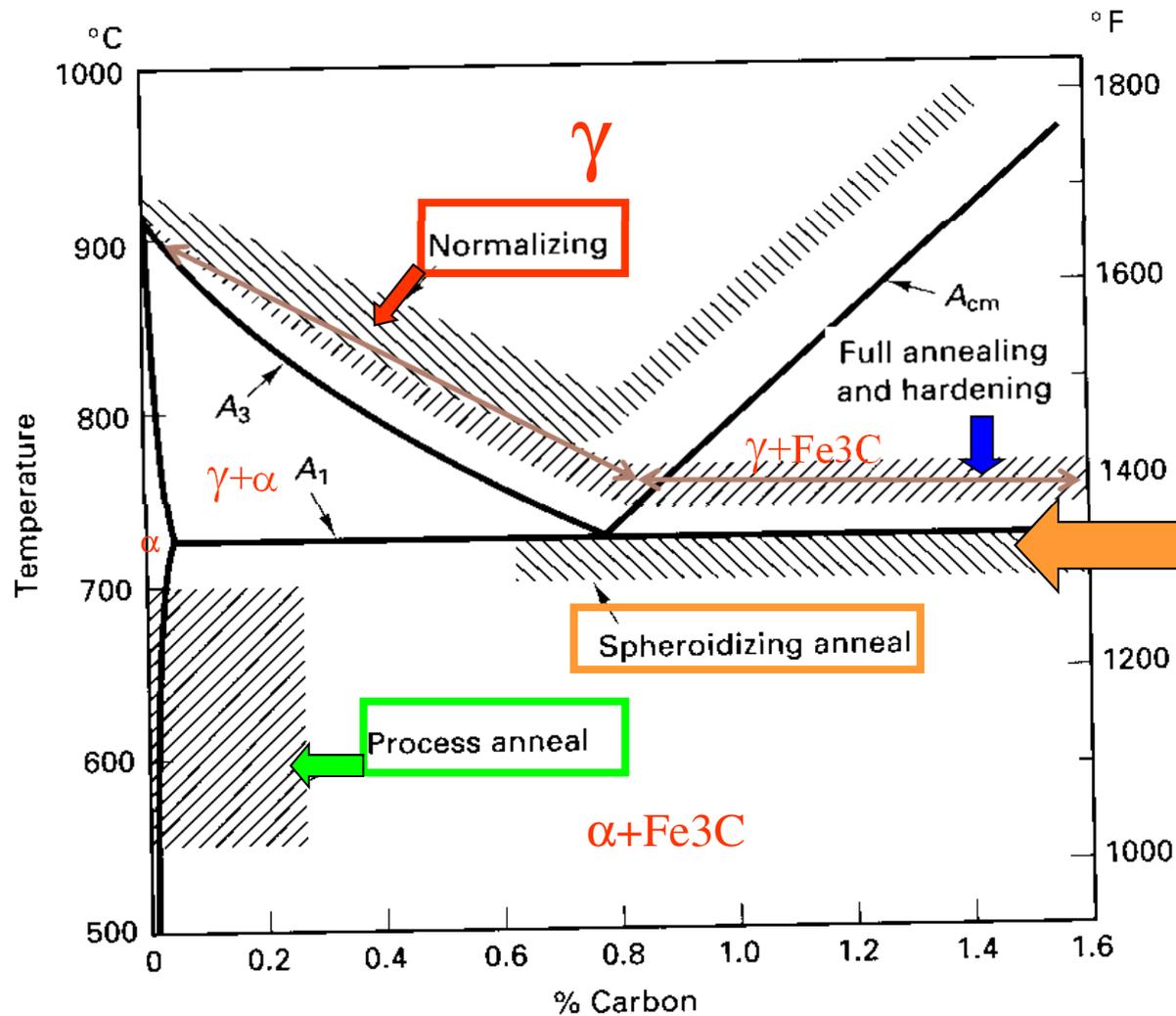


FIG. 56 — Aspecto micrográfico de aço coalescido: esferoidita. Ataque: reativo de nital. Ampliação: 1.000 vezes.

- Objetivo: Fornecer ao aço uma estrutura globular ou esferoidal composta de carbonetos no ferro ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) em matriz de  $\alpha$ .
- melhorar a usinabilidade, especialmente dos aços alto carbono.
  - facilitar a deformação a frio.

FIGURE 5.2 Graphical summary of the process heat treatments for steels on an equilibrium diagram.



Recozimento Pleno.  
 Esferoidização ou coalescimento.

## Recozimento de esferoidização (Esferoidização e Coalescimento).

A Esferoidização é aplicavel em:

- Aços Ferramenta;
- Aços de alta liga;
- & Aços com alto carbono.

**Coalescimento:** quando aços de alta liga são submetidos ao tratamento de globulização.



## Recozimento de esferoidização (Esferoidização e Coalescimento).

A Temperatura deste TT é função da [ ] de carbono e de seus elementos de liga.

Esferoidização é aplicável em:

- Aços (0,5 pC) não devem ser tratados no recozimento de globulização.
- Aços (0,8-0,9 pC) são aquecidos à 680-700° C na zona crítica.
- Aços Hipereutetóides (0,8-0,9 pC) devem ser aquecidos à 680-740° C na zona crítica.



## Outras maneiras de produzir a Esferoidização ou Coalescimento.

- Aquecimento por tempo prolongado a uma temperatura logo abaixo da linha inferior da zona crítica.
- Aquecimento e resfriamentos alternados entre temperaturas que estão logo acima e logo abaixo da faixa de transformação.



## c) Recozimento de Homogeneização.

### ➤ **Objetivo**

Melhorar a homogeneidade da microestrutura de peças fundidas, através da difusão de seus elementos por todo o material.

### ➤ **Temperatura**

*A Difusão requer temperaturas altas de: 1050-1200°C.*

→ Não deve ocorrer nenhuma transformação de fase.

## Recozimento de Homogeneização.

O tempo de permanência sob a temperatura proposta é função da composição química e das dimensões da peça, ou seja pode variar devido a [ ] de carbono, características geométricas ou mesmo com elementos de liga, tais como o Cr, Ni, Mo e W.

→ sob altas temperaturas, cuidar para não queimar o aço e perder o material.

### ➤ **Resfriamento**

Deve-se evitar velocidades muito altas devido ao risco de distorções(Resfriamento Lento).

## d) Recozimento Pleno.

### ➤ **Objetivo**

Amolecer o aço e regenerar sua microestrutura apagando TT anteriores, obtendo dureza e estrutura controlada.

### ➤ **Temperatura**

O tempo de permanência sob a temperatura proposta é função da composição química e das dimensões da peça. *A Difusão requer temperaturas altas de +/- 50 °C acima da zona crítica.*

→ Não deve ocorrer nenhuma transformação de fase.

## Recozimento Total ou Pleno

### Usado para aços

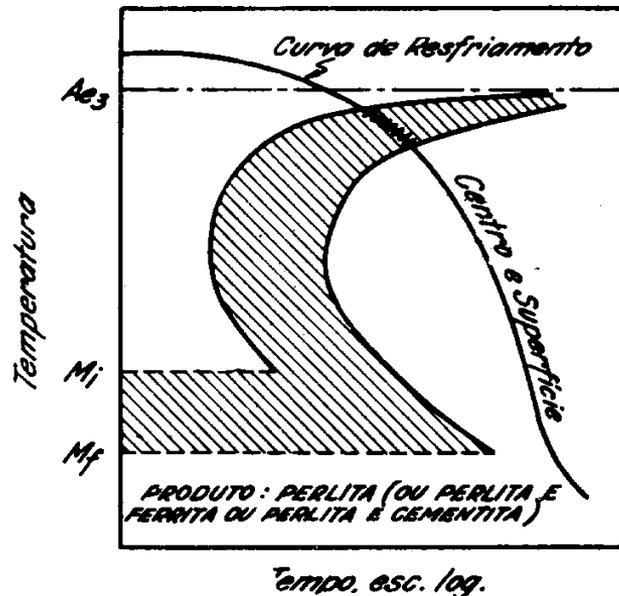


FIG. 44 — Diagrama esquemático de transformação para recozimento pleno.

#### ➤ Temperatura

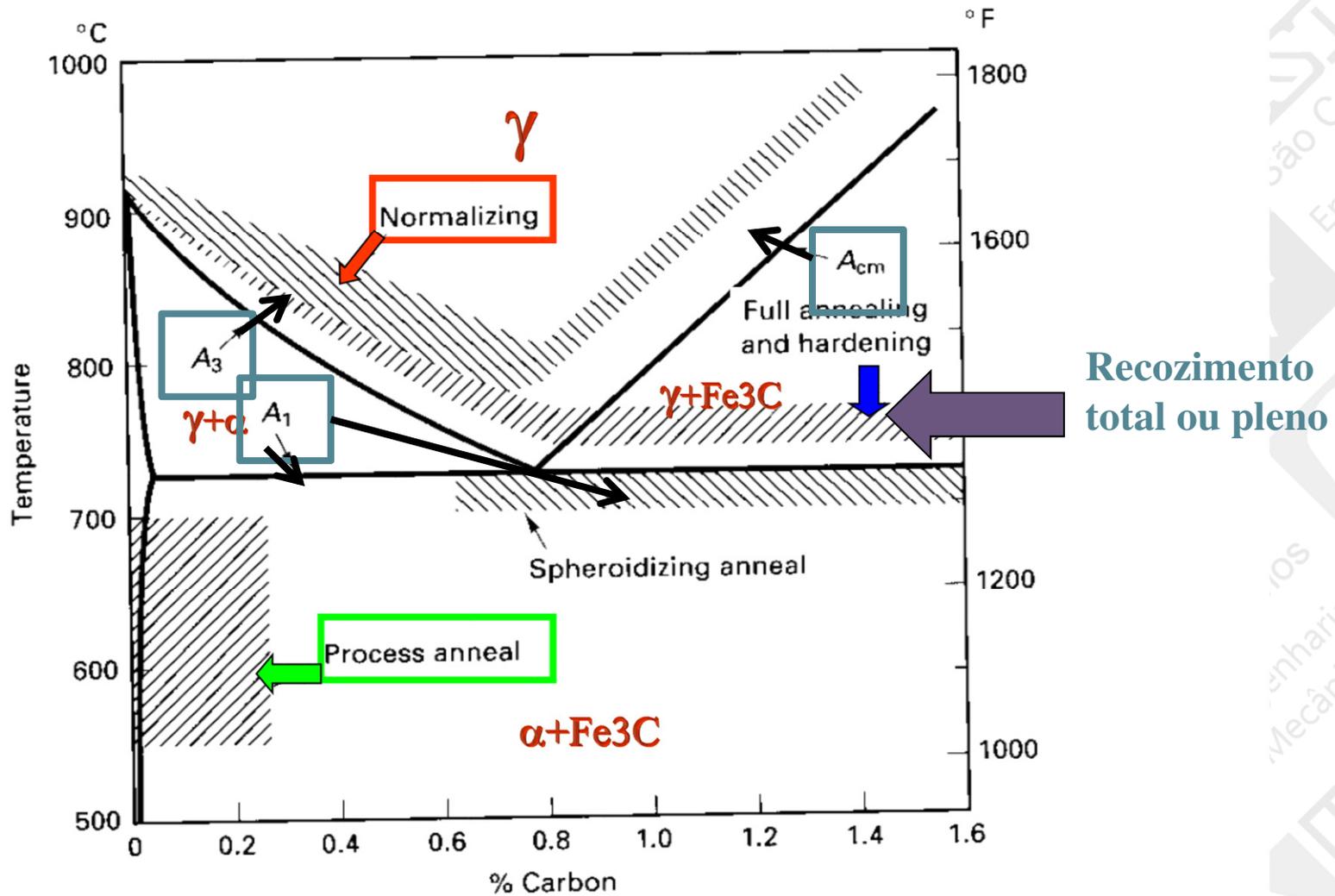
Hipoeutetóide → +/- 50 °C acima da linha A3

Hipereutetóide → Entre as linhas Acm e A1

#### ➤ Resfriamento

Lento (dentro do forno) → implica em tempo longo no processo (desvantagem).

FIGURE 5.2 Graphical summary of the process heat treatments for steels on an equilibrium diagram.

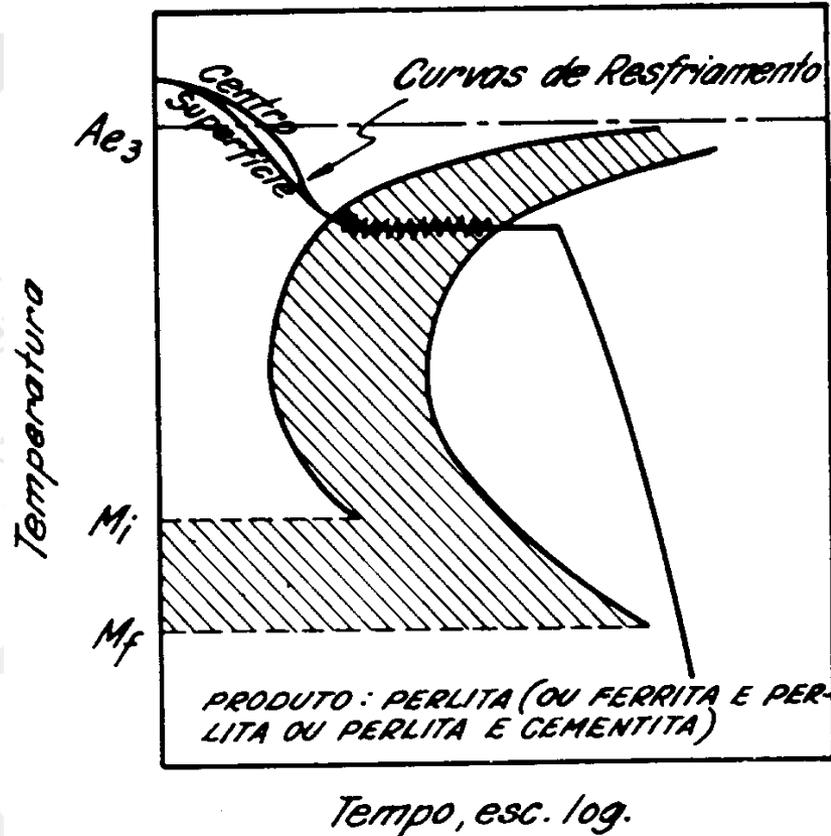


## Recozimento Total ou Pleno

- **Constituintes Microestruturais resultantes.**
  - Hipoeutetóide: ferrita + perlita grosseira
  - Eutetóide: perlita grosseira
  - Hipereutetóide: cementita + perlita grosseira
- \* *A perlita grosseira é ideal para melhorar a usinabilidade dos aços baixo e médio carbono.*
- \* *Para melhorar a usinabilidade dos aços alto carbono recomenda-se a esferoidização.*

## Recozimento Isotérmico ou Cíclico

### Usado para aços



- A diferença do recozimento pleno está no resfriamento que é bem mais rápido, tornando-o mais prático e mais econômico,
- Permite obter estrutura final, deixando-a mais homogênea
- Não é aplicável para peças de grande volume, porque é difícil de baixar a temperatura do núcleo da mesma.



# NORMALIZAÇÃO

**Usada para aços**

Consiste em aquecer o material (aços) e deixá-los resfriar à temperatura ambiente (ao ar).

Objetivos: Melhorar a microestrutura do material, através do refinamento do tamanho do grão.

\*\*\* É usada antes da têmpera e revenido.

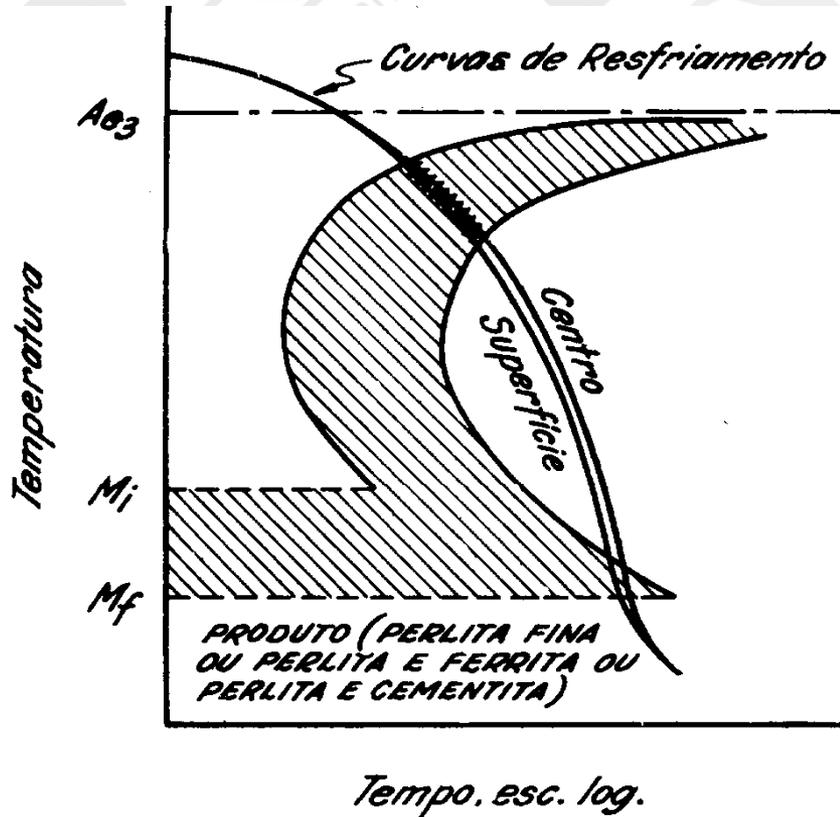
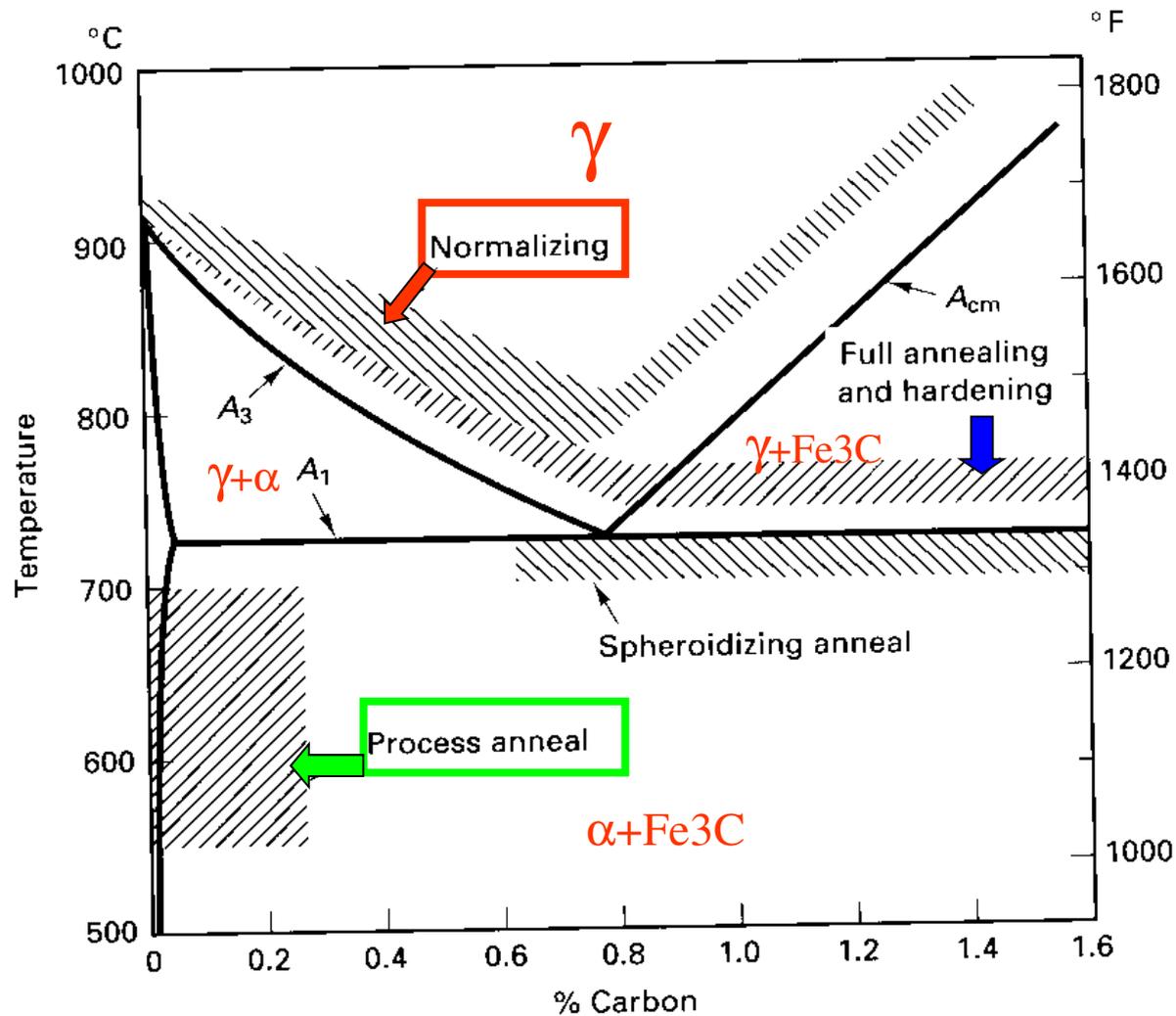


FIG. 47 — Diagrama esquemático de transformação para normalização.



FIGURE 5.2 Graphical summary of the process heat treatments for steels on an equilibrium diagram.



## NORMALIZAÇÃO

### Temperatura

- Hipoeutetóide +/- 70° C acima da linha A3.
- Hipereutetóide +/- 70° C acima da linha Acm\*

*\* Não há formação de um invólucro de carbonetos frágeis devido a velocidade de resfriamento ser maior.*

### Resfriamento

- ✓ Ao ar (calmo ou forçado)



## NORMALIZAÇÃO

### Constituintes Estruturais resultantes

- Hipoeutetóide: ferrita + perlita fina.
- Eutetóide: perlita fina.
- Hipereutetóide: cementita + perlita fina.

\* *Conforme o tipo de aço pode-se obter bainita.*

Em relação ao recozimento a microestrutura é mais fina, apresenta menor quantidade e melhor distribuição de carbonetos.



## REVENIDO

Aquece o material, para que ocorra a migração de carbonos da estrutura TCC, formando carbonetos, estes retornar a estrutura CCC, porém encrustados na estrutura martensítica.

\*\*\* Sempre acompanha a têmpera. (fragiliza-a)

No Revenido aumenta-se a resistência do material e sua tenacidade.

Objetivos:

- Alivia ou remove tensões.
- Corrige a dureza e a fragilidade, aumentando a dureza e a tenacidade.



# REVENIDO

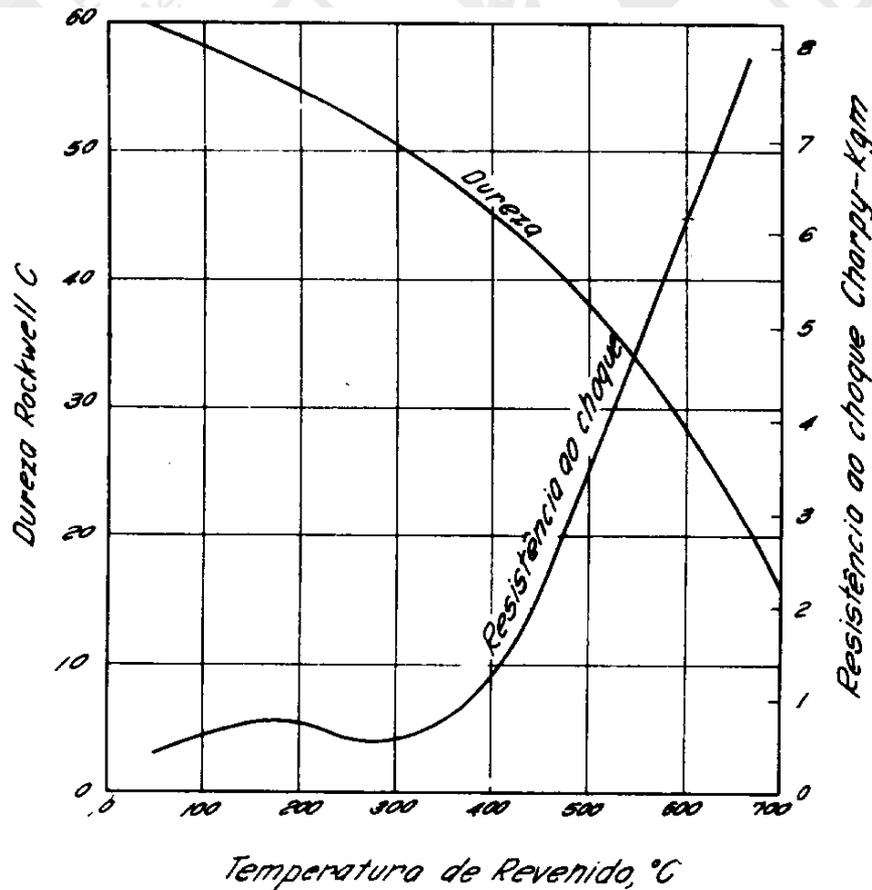


FIG. 52 — Efeito da temperatura de revenido sobre a dureza e a resistência ao choque (expressa em valores Charpy) de um aço 1045 temperado.

## ➤ Temperatura

*Pode ser escolhida de acordo com as combinações de propriedades desejadas.*



## REVENIDO

100-250°C → Formação dos carbonetos  $\xi$  ( $\text{Fe}_{2,4}\text{C}$ )  
ou  $\eta$  ( $\text{Fe}_2\text{C}$ ) precipitam em matriz de ferrita ( $\alpha$ ).

200-300°C → Decomposição da austenita retida “interlath”, decompondo ferrita  
e  $\text{Fe}_3\text{C}$ .

250-350°C → Formação dos carbonetos  $\xi$  ( $\text{Fe}_{2,4}\text{C}$ ) e  $\text{Fe}_3\text{C}$ .

## REVENIDO

150- 230°C → os carbonetos começam a precipitar

Estrutura: martensita revenida

(escura, preta)

Dureza: 65 RC → 60-63 RC

230-400°C → os carbonetos continuam a precipitar em forma globular (invisível ao microscópio)

Estrutura: TROOSTITA

Dureza: 62 RC → 50 RC

## REVENIDO

400- 500°C → os carbonetos crescem em glóbulos,  
visíveis ao microscópio

Estrutura: **SORBITA**

Dureza: 20-45 RC

650-738°C → os carbonetos formam partículas  
globulares

Estrutura: **ESFEROIDITA**

Dureza: <20 RC

## MICROESTRUTURAS DO REVENIDO

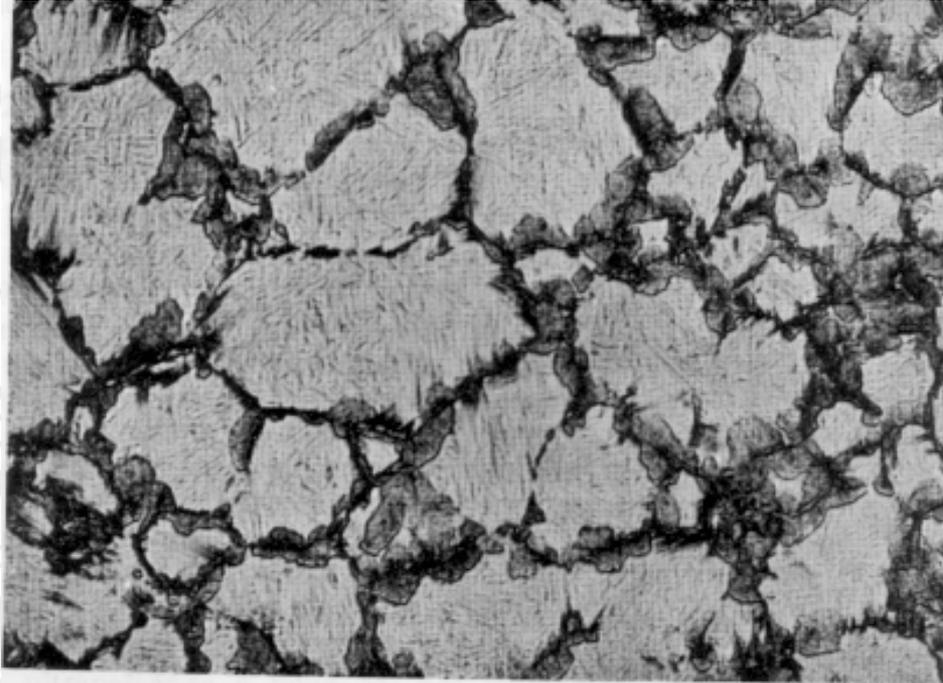


Fig. 53 — Aspecto micrográfico de um aço temperado mostrando a estrutura mista troostita-martensita. Ataque: reativo de nital. Ampliação: 200 vezes.

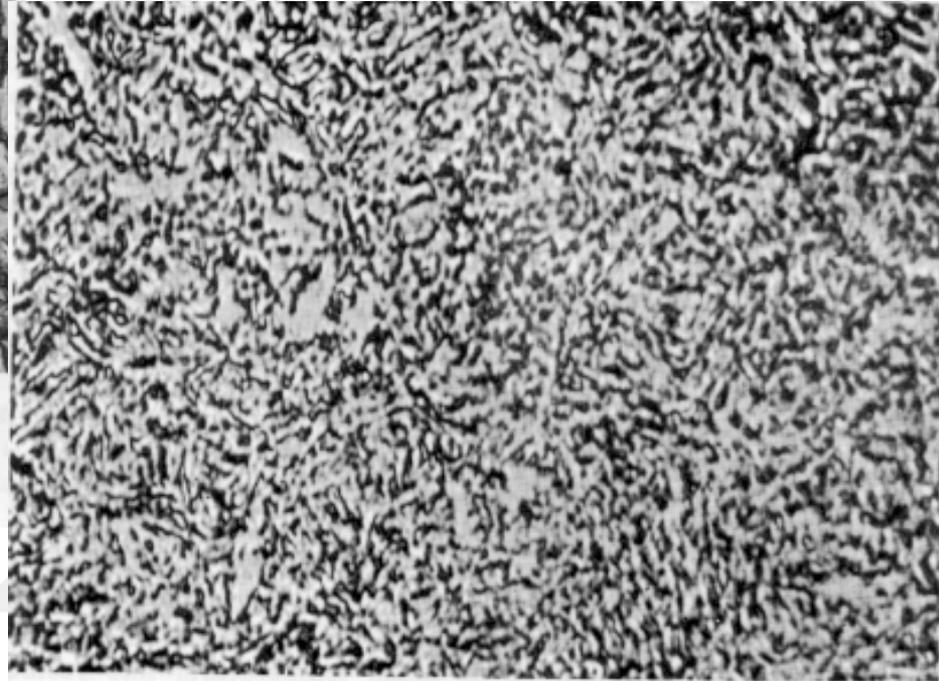


Fig. 54 — Aspecto micrográfico de um aço temperado e revenido. Estrutura: sorbita. Ataque: reativo de nital. Ampliação: 1.000 vezes.

## FRAGILIDADE DE REVENIDO

- A fragilidade só é revelada no ensaio de Resistência ao choque, não há alteração na microestrutura.
- Ocorre em determinados tipos de aços quando aquecidos na faixa de temperatura entre  $375-475\text{ }^{\circ}\text{C}$  ou quando resfriados lentamente nesta faixa.
- A fragilidade ocorre mais rapidamente na faixa de  $470-475\text{ }^{\circ}\text{C}$



## AÇOS SUSCEPTÍVEIS À FRAGILIDADE DE REVENIDO

- Aços -liga de baixo teor de liga.
- Aços que contém apreciáveis quantidades de Mn, Ni, Cr, Sb\*, P, S.
- Aços ao Cr-Ni são os mais susceptíveis ao fenômeno.

*\*é o mais prejudicial*



## COMO MINIMIZAR A FRAGILIDADE DE REVENIDO

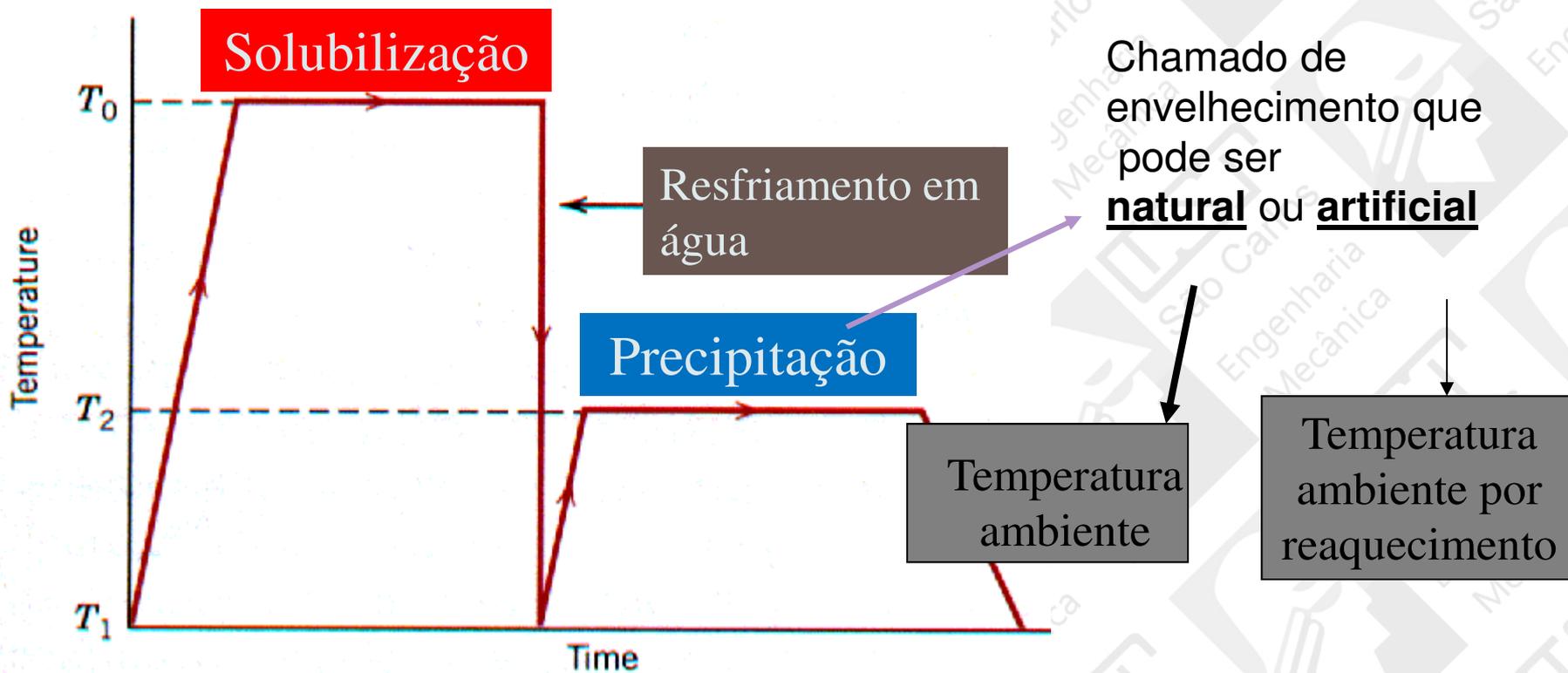
- Manter os teores de P abaixo de 0,005% e para o S mcom concentrações menores de 0,01%.
- Reaquecer o aço fragilizado a uma temperatura de  $\sim 600$  °C seguido de resfriamento rápido até abaixo de 300 °C.



## ENVELHECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO

- *Consiste na precipitação de outra fase, na forma de partículas extremamente pequenas e uniformemente distribuídas.*
- *Esta nova fase enrijece a liga.*
- *Após o envelhecimento o material terá adquirido máxima dureza e resistência.*
- *O envelhecimento pode ser natural ou artificial.*

# Tratamento térmico de solubilização seguido de envelhecimento

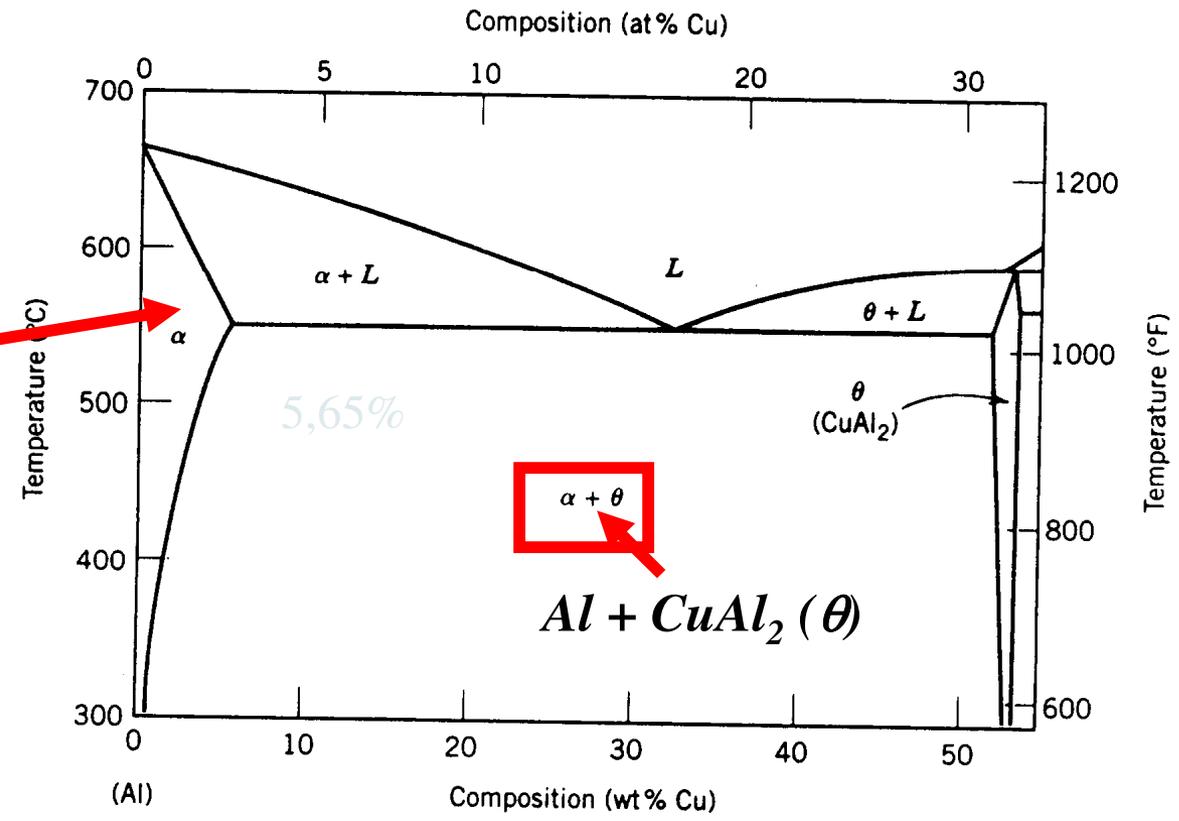


## ENVELHECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO

- *Na solubilização, permite-se o endurecimento da liga através do aquecimento do Cu, com um resfriamento rápido para fixar a estrutura original com características anteriores.*
- *Na solubilização não há precipitação.*
- *Qto mais próximo de 5,65 % de Cu, mais a estrutura pode se liquefazer ou não solubilizar, por isso trabalha-se com até 4,0 % de Cu.*
- *Qto mais temperatura e tempo for disponibilizado mais dureza adquirida.*

# EXEMPLO: Sistema Al-Cu

**Solubilização**



**As partículas de precipitação das ligas Al-Cu é o  $\text{CuAl}_2$  ( $\theta$ ).**

# Diagrama de Equilíbrio Ferro, Carboneto de Ferro (Diagrama aproximado ferro-grafita, em pontilhado)

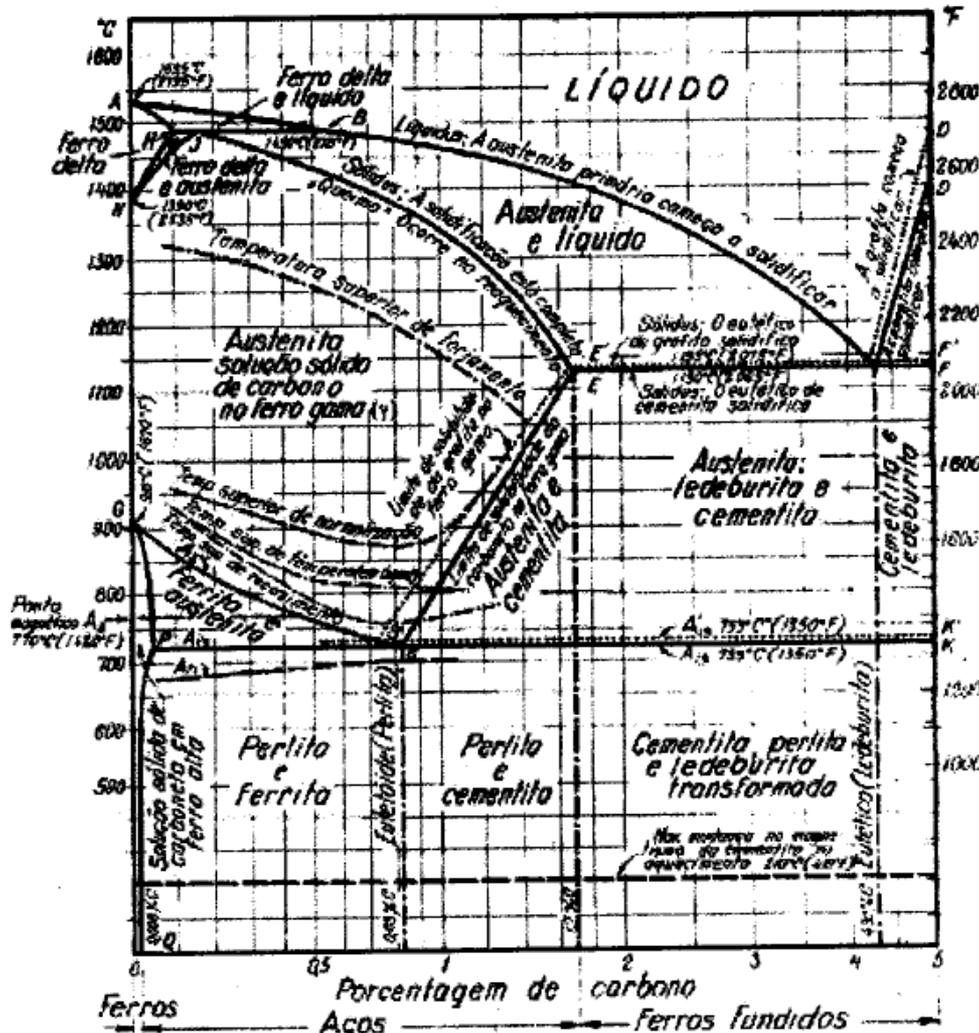
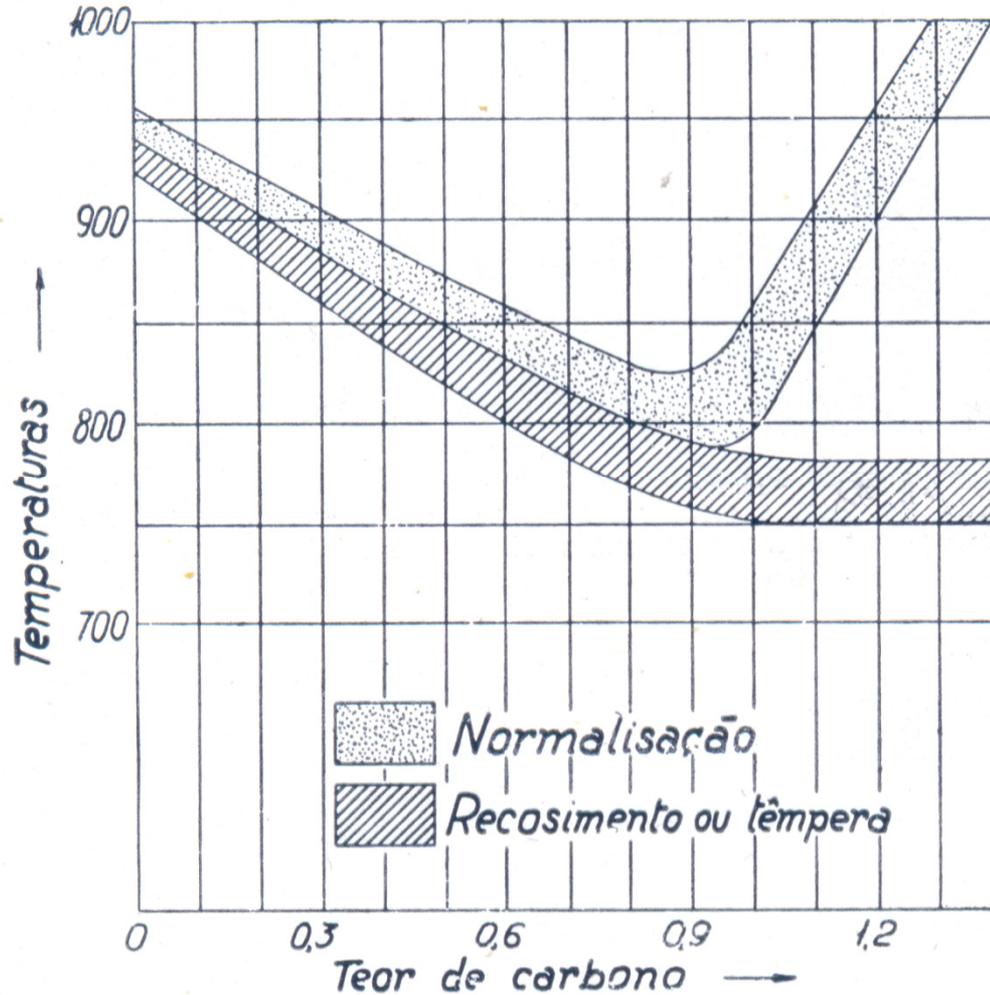


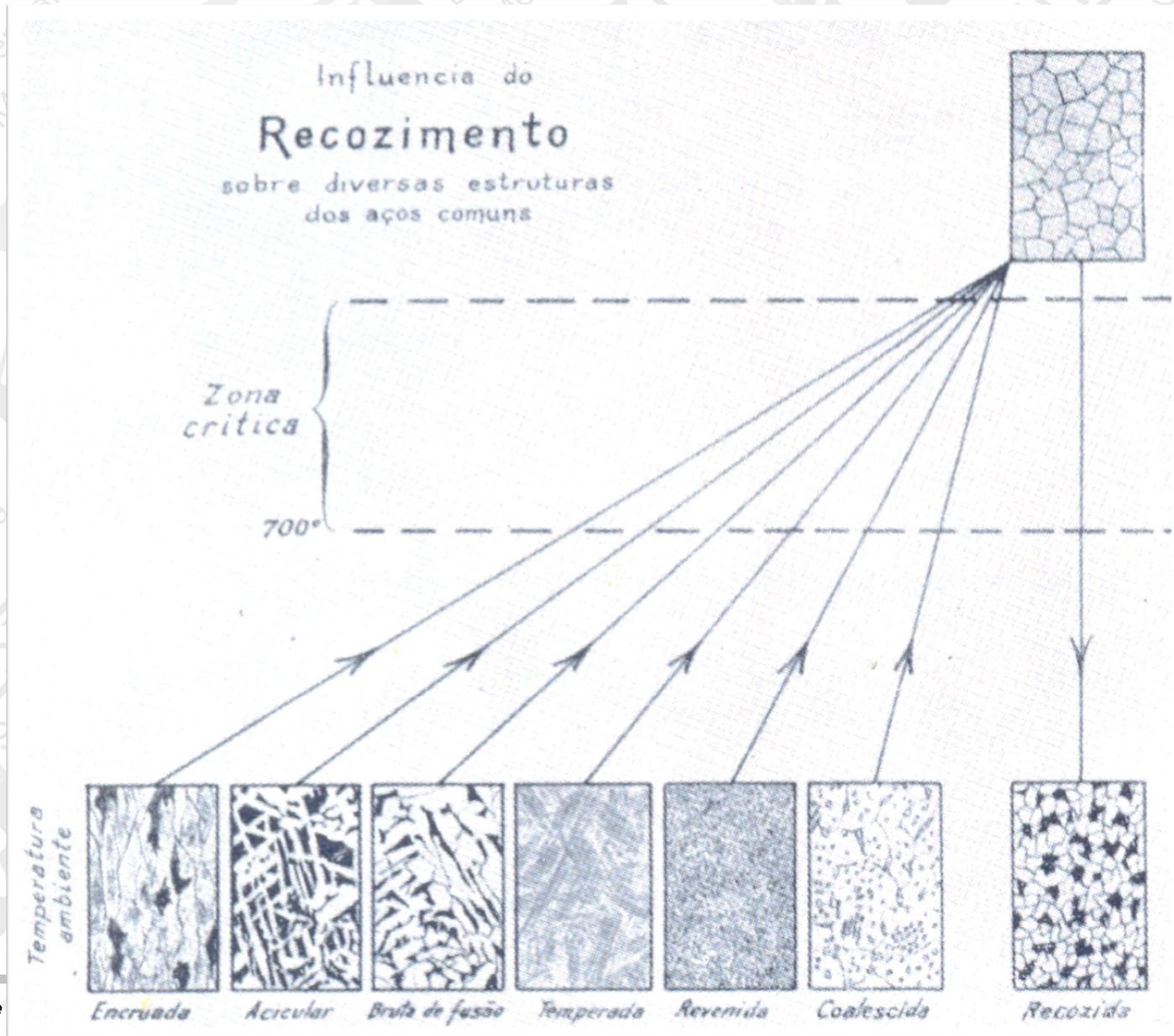
Figura 12c – Diagrama de fases Ferro – Fe<sub>3</sub>C (cementita), detalhamento as faixas dos tratamentos térmicos



# Temperaturas mais adequadas à normalização, recozimento e têmpera em função do teor de carbono no aço



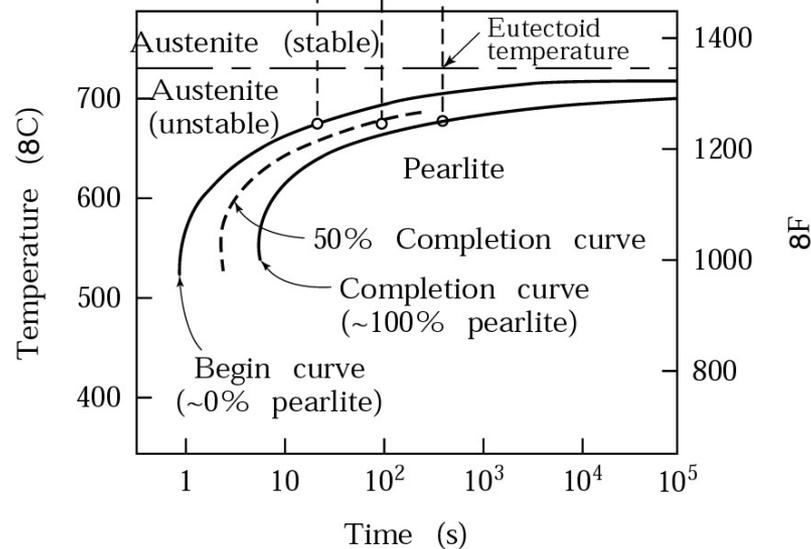
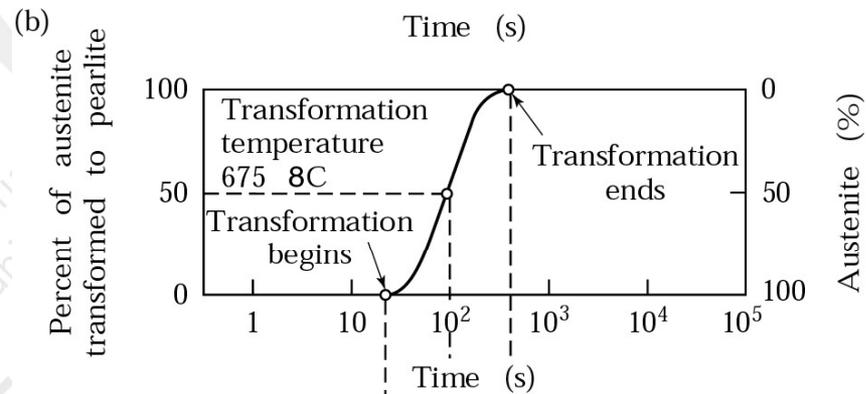
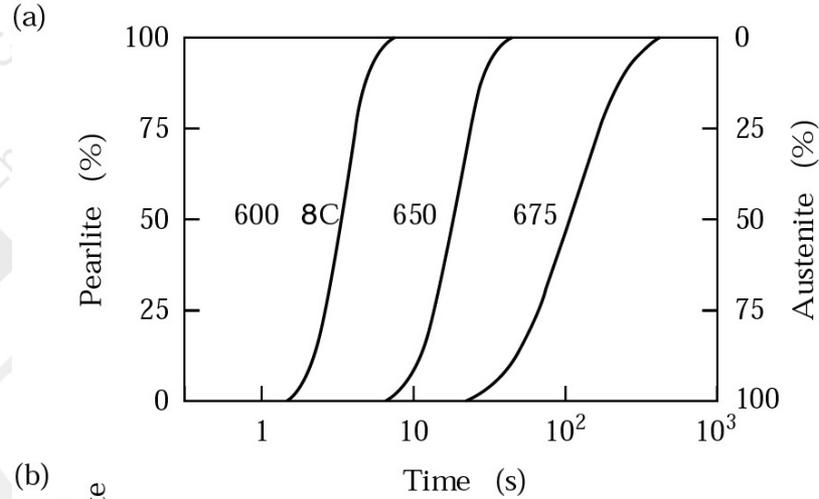
# Recozimento



# Transformação: Austenita → Perlita

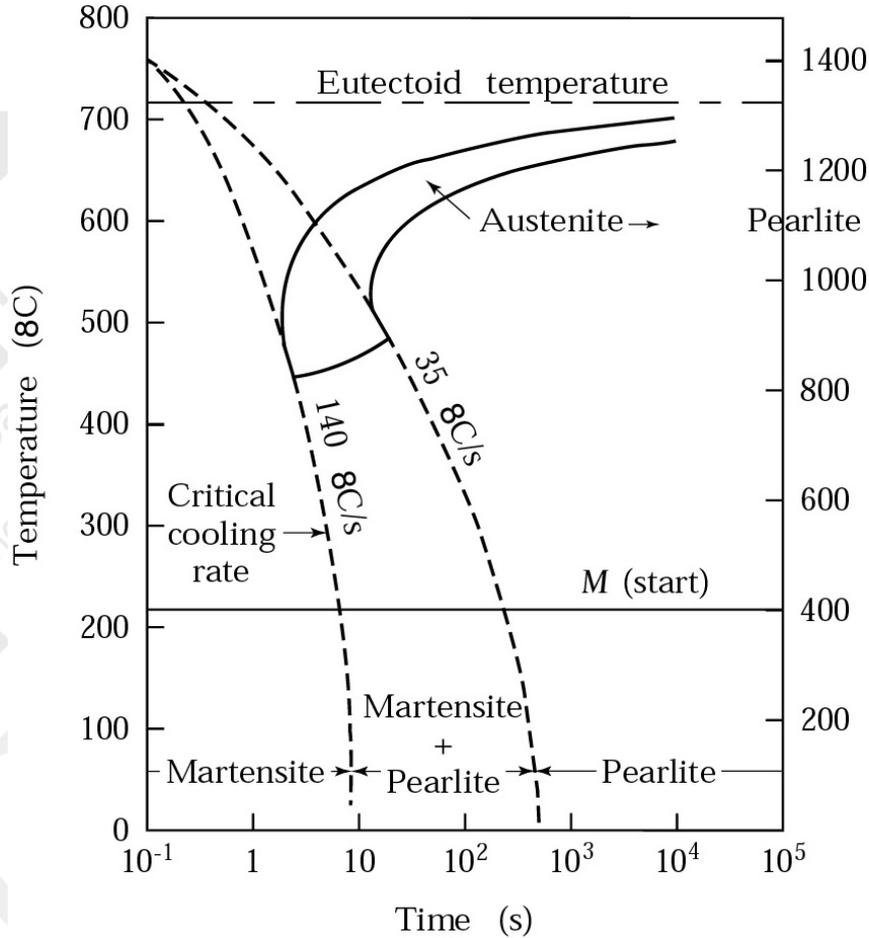
(a) Austenita para perlita transformação da liga ferro-carbono como função do tempo e da temperatura.

(b) Isotermas → diagrama da transformação obtida de (a) para a temperatura de transformação de 675 °C.



# Transformação: Austenita para Perlita (cont.)

(c)



(c) Microestruturas obtidas de uma liga eutetóide ferro-carbono em função da taxa de resfriamento.

Fonte: ASM International.

# Estudo das ligas Fe-C com mais de 1,70%C “Ferros Fundidos”

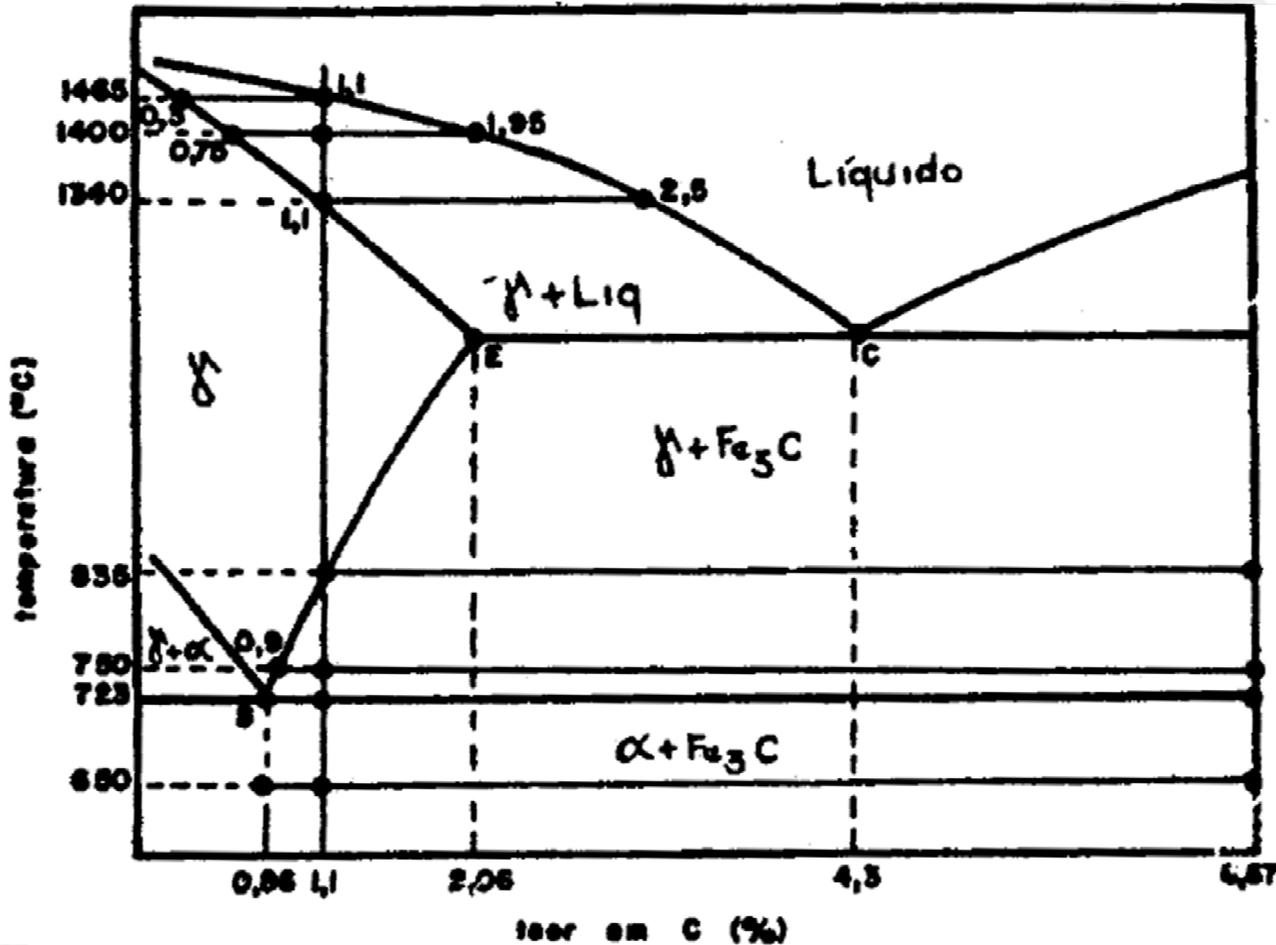


Figura 13 – Diagrama de fases Fe-C em ênfase para porcentagens de carbono acima de 1,70% (ferros fundidos)

# Referências