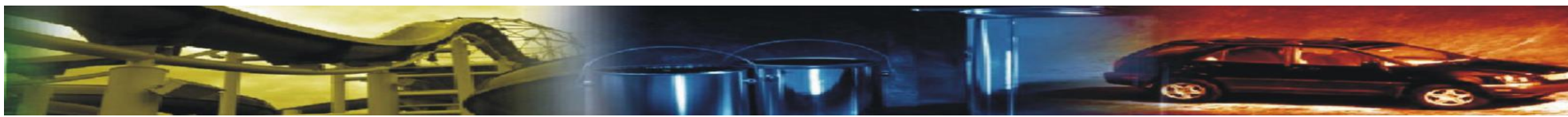


**PGMEC – EME774**

# **Tratamentos Térmicos dos Aços**

**Prof. Scheid**



# 1- Revisão

## Aços:

Ligas contendo ferro e carbono entre 0 e 2.11% em peso, podendo conter elementos de ligas adicionados intencionalmente e ainda impurezas.

## Tratamento Térmico:

Definido como sendo o conjunto de operações de aquecimento e resfriamento controlados, que visam modificar a microestrutura, com objetivo de atingir determinadas propriedades mecânicas.

## Grupos de Tratamento Térmico:

- 1- Os tratamentos nos quais se deseja reduzir a dureza do material e/ou aliviar as tensões internas.
- 2- Os tratamentos nos quais se deseja aumentar a dureza do material.



# Normalização

## **Definição:**

***Consiste em aquecer o aço até o campo austenítico, manter durante certo tempo (encharque) e, em seguida, resfriar o componente ao ar calmo ou ligeiramente agitado.***

## **Objetivos:**

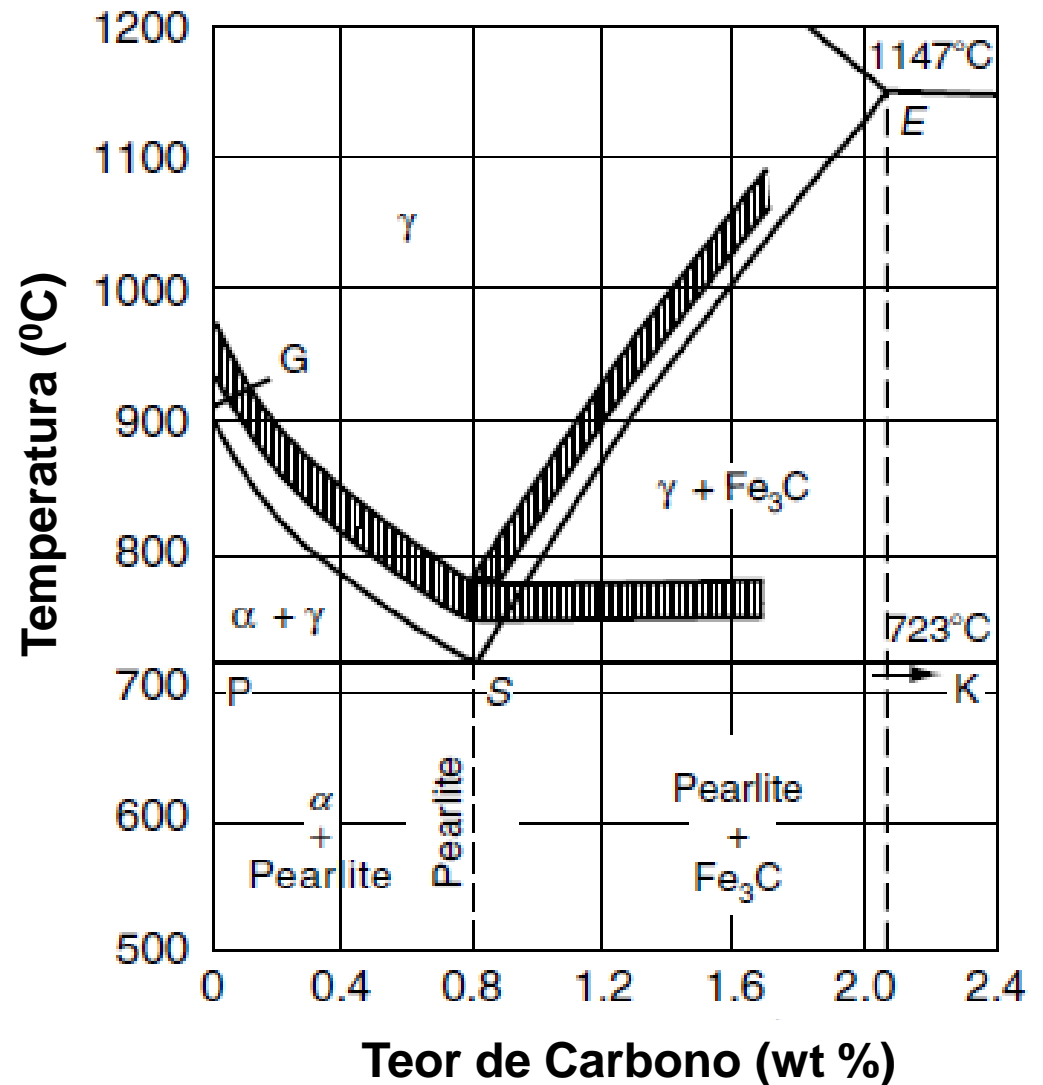
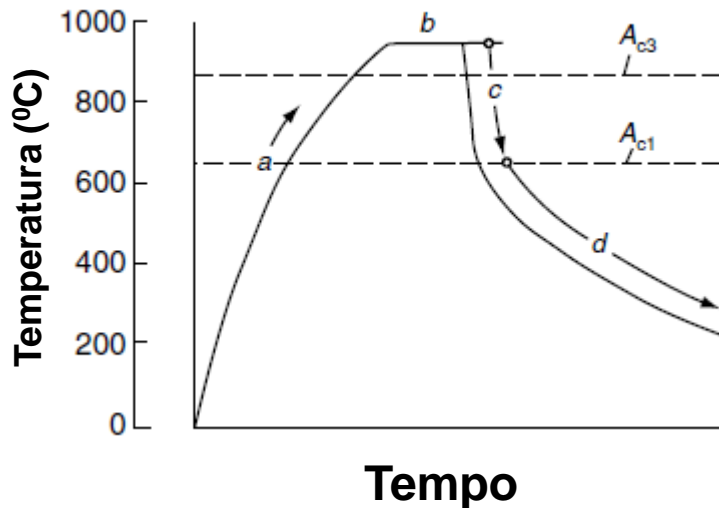
- Melhorar a usinabilidade de aços de baixo carbono,***
- Refinamento da estrutura em forjados e fundidos,***
- Homogeneização da estrutura em forjados e fundidos,***
- Alívio de tensões residuais.***

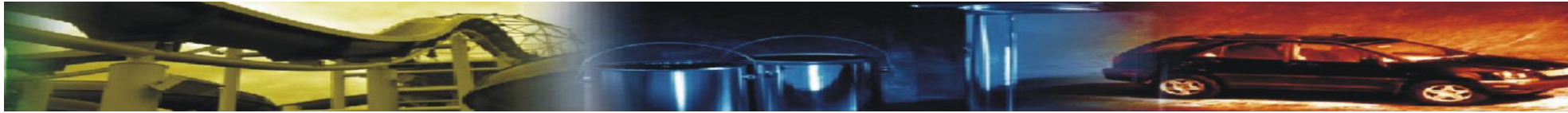


# Normalização

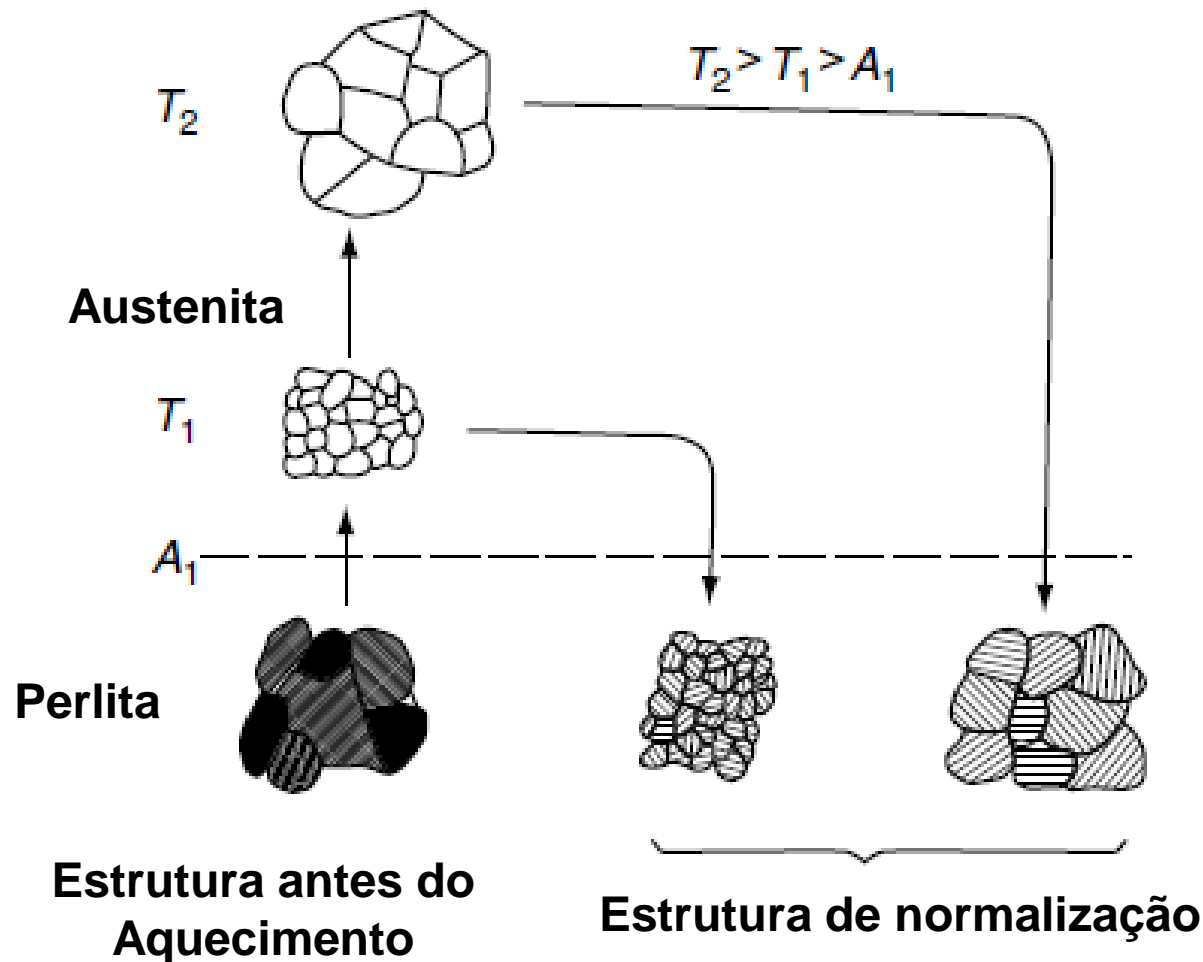
**Faixas de Austenitização  
Acima de SE:  
Austenitização visando  
Dissolução total dos  
carbonetos**

**Ciclo de Normalização:**



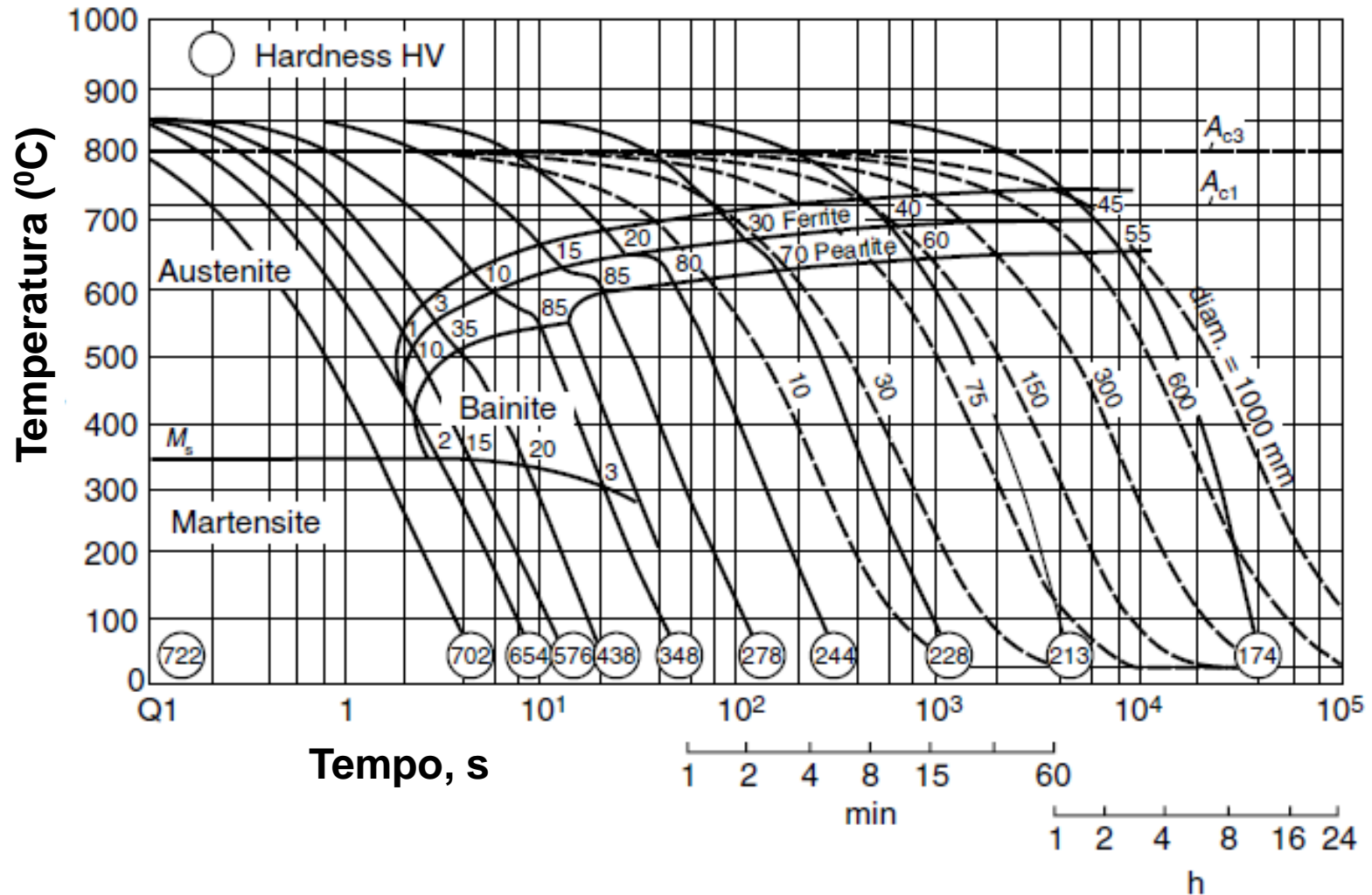


***Efeito da temperatura de austenitização sobre o tamanho de grão obtido ao final da normalização. Aço Eutetóide.***





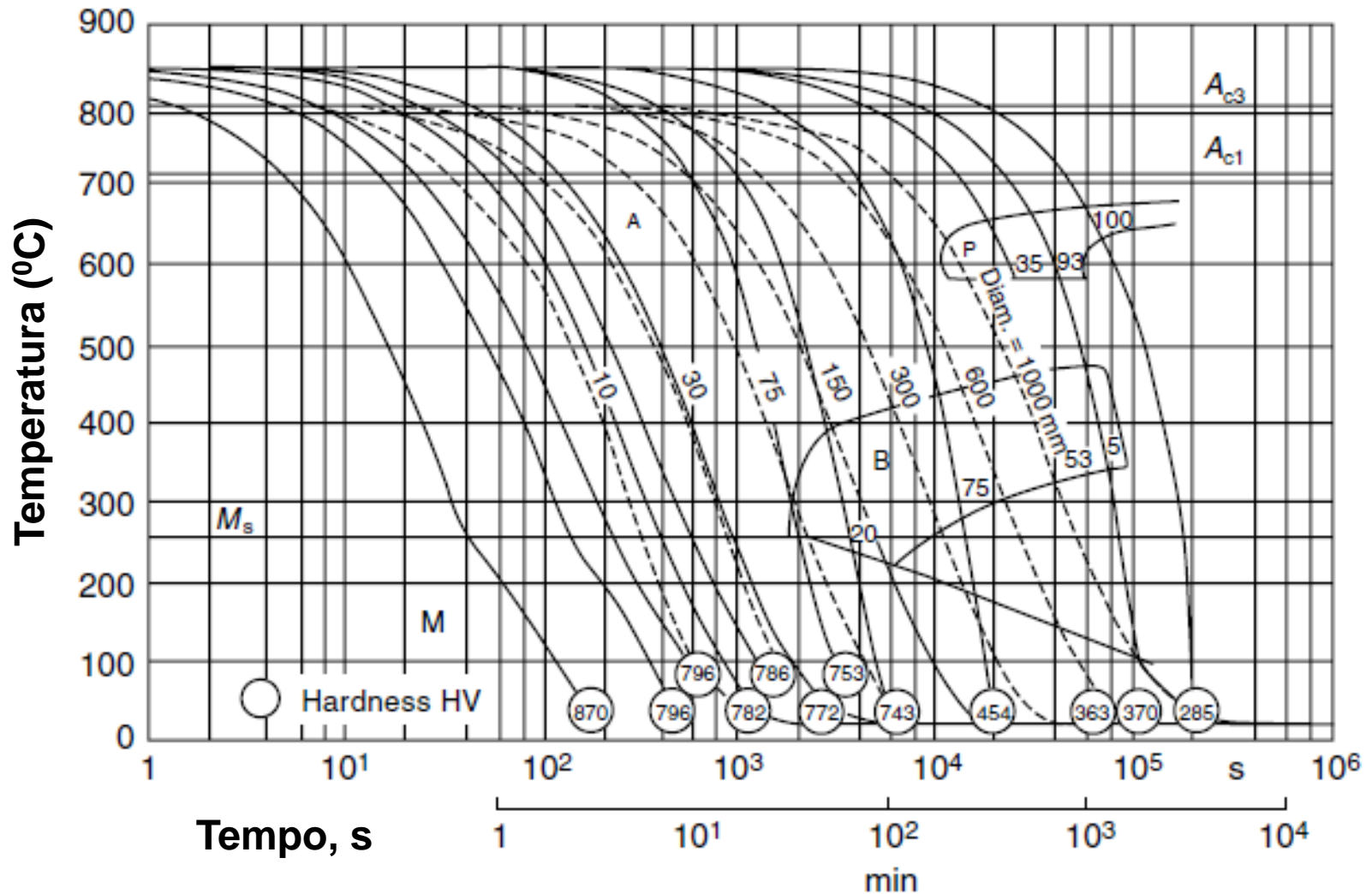
## Efeito da velocidade de resfriamento na microestrutura de barras de DIN ck45 resfriado com diversas taxas de resfriamento.







***Efeito da velocidade de resfriamento na microestrutura de barras de DIN 55NiCrMoV6 resfriado com diversas taxas de resfriamento.***



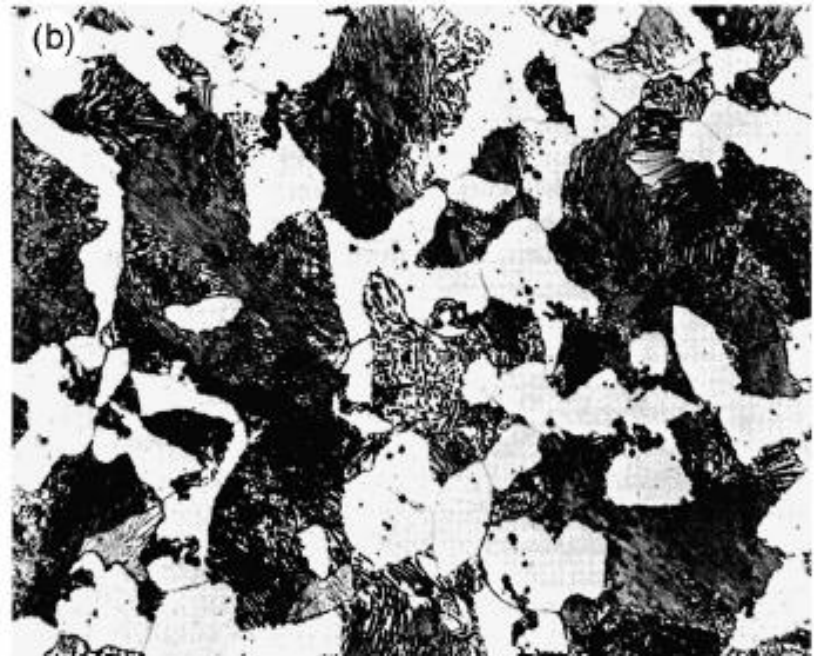
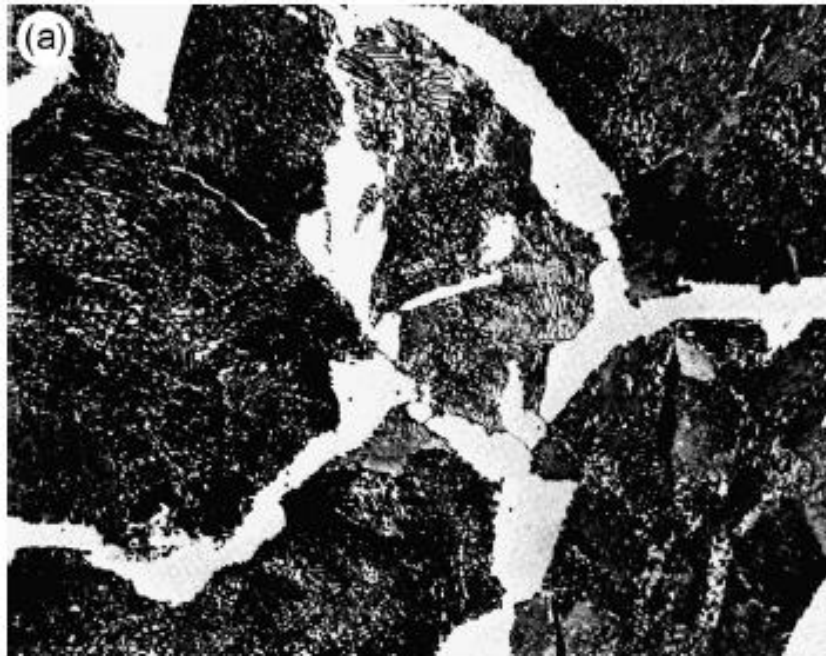


# Normalização

*Normalização de aço SAE 1050 Forjado:*

*(a) Como forjado*

*(b) Forjado e Normalizado*





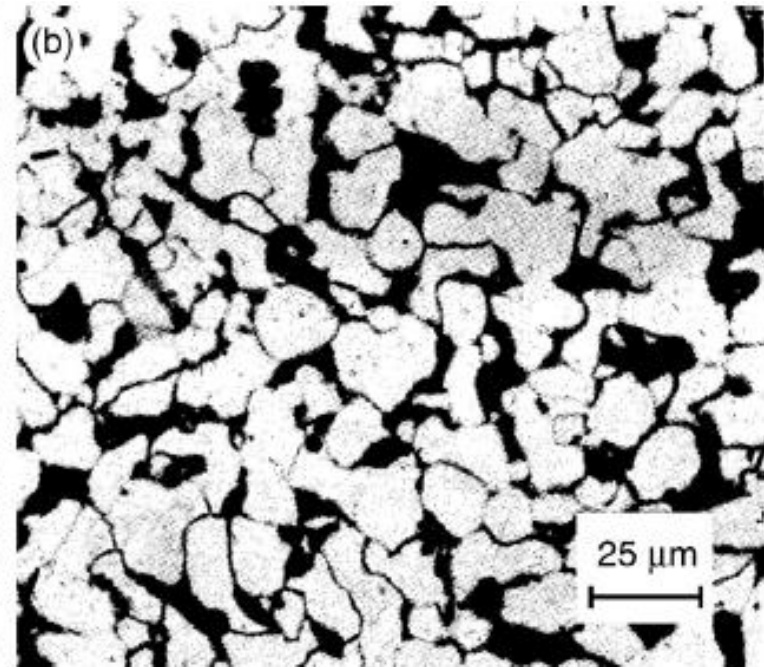
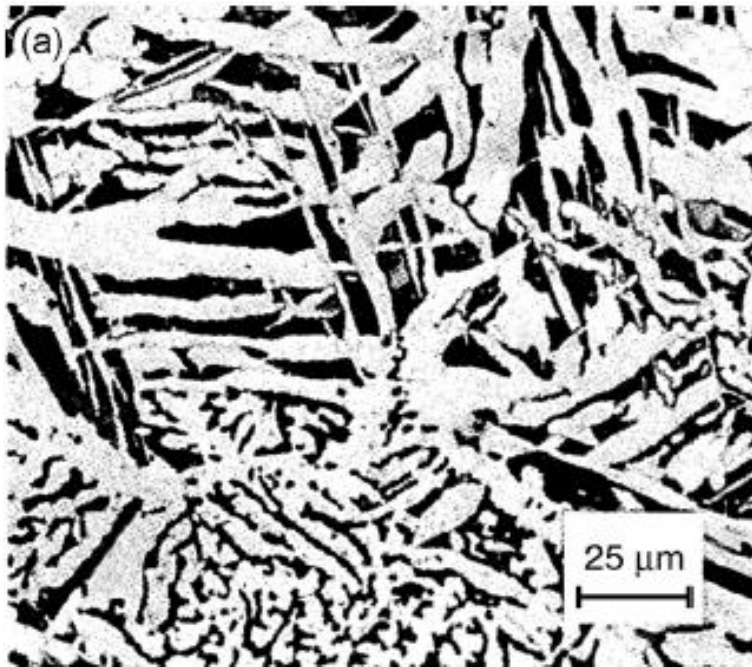


# Normalização

*Normalização de aço carbono fundido:*

*(a) Como fundido*

*(b) Fundido e Normalizado*



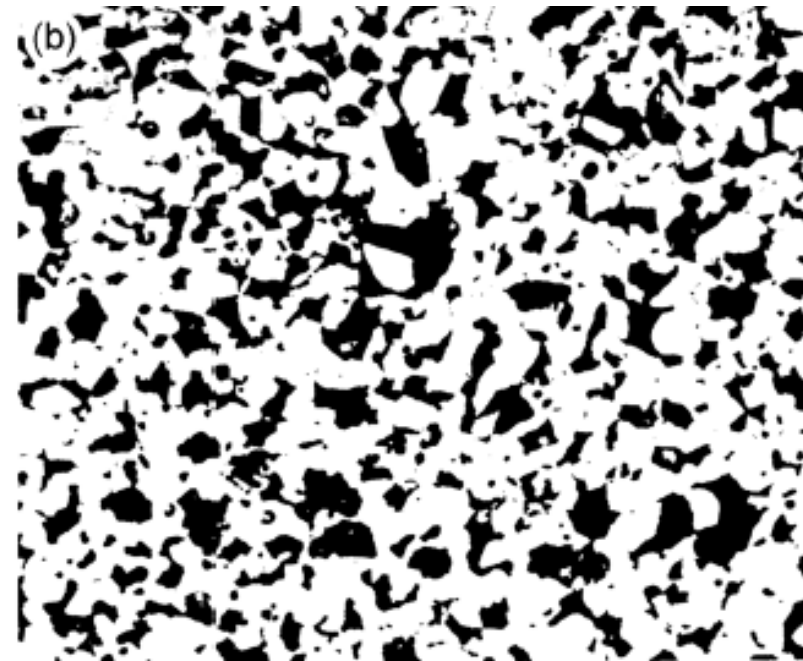


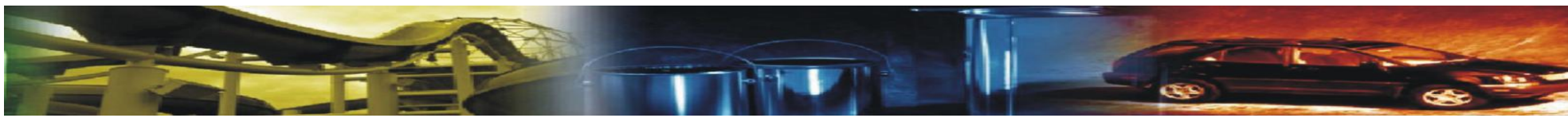
# Normalização

*Normalização de aço DIN 20MnCr5 Laminado a quente:*

*(a) Como laminado*

*(b) Laminado a quente e Normalizado*





# Recozimento Isotérmico

## ***Definição:***

***Consiste em aquecer o aço até o campo austenítico, manter durante certo tempo (encharque) e, em seguida, resfriar o componente até um patamar isotérmico abaixo de  $A_{c1}$  e manter nesta temperatura até a completa transformação da austenita.***

## ***Objetivos:***

- Redução do custo de tratamento térmico,***
- Redução do tempo de tratamento.***

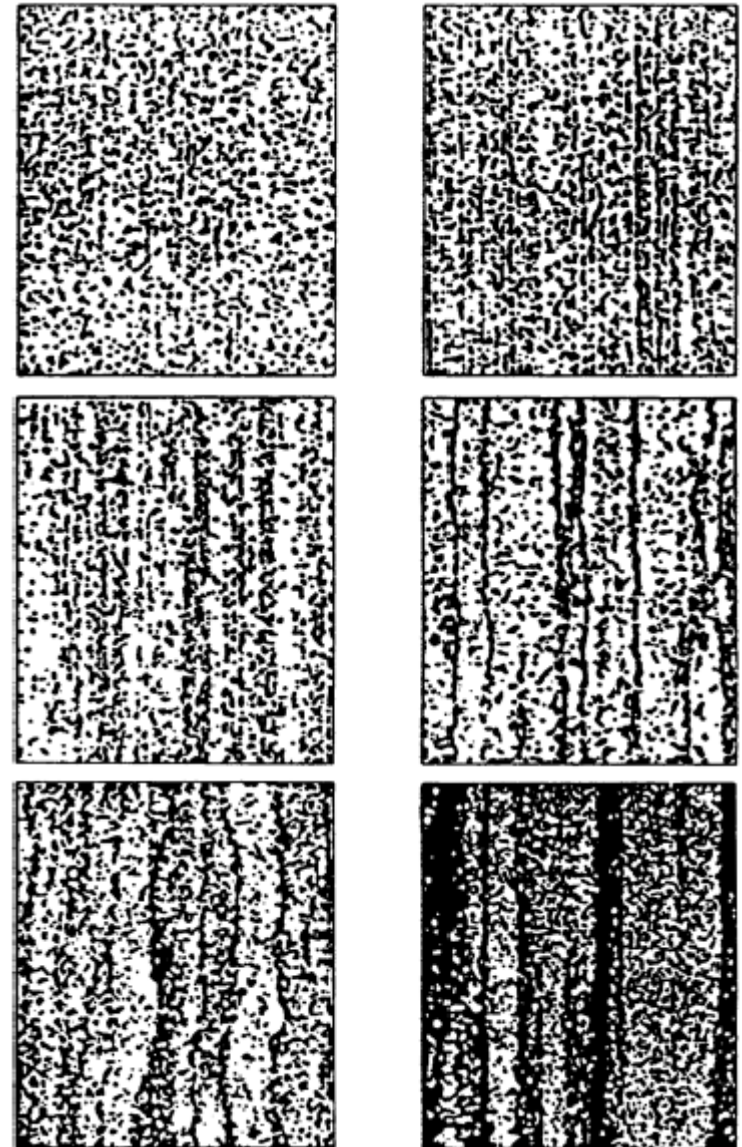
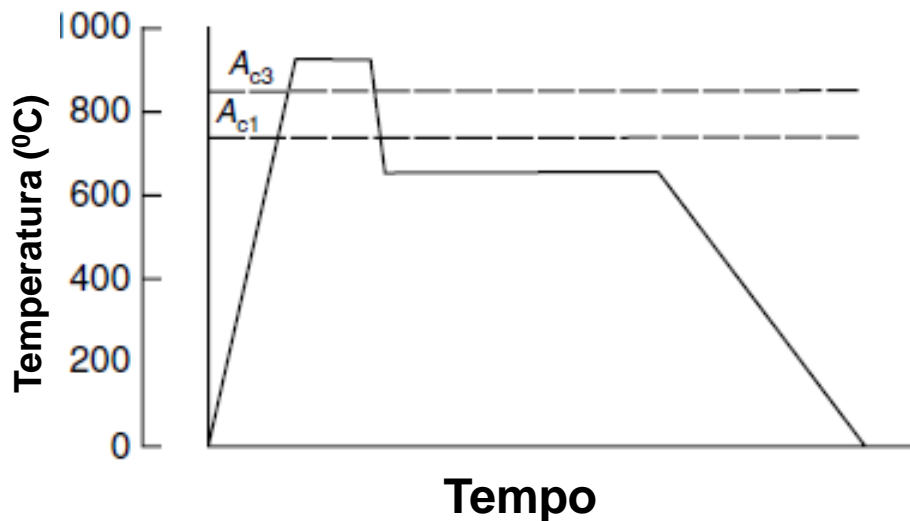




# Recozimento Isotérmico

*Estrutura texturizada (bandeada) de ferrita e perlita pode ser formada se o resfriamento até o patamar for demasiado lento (figura)*

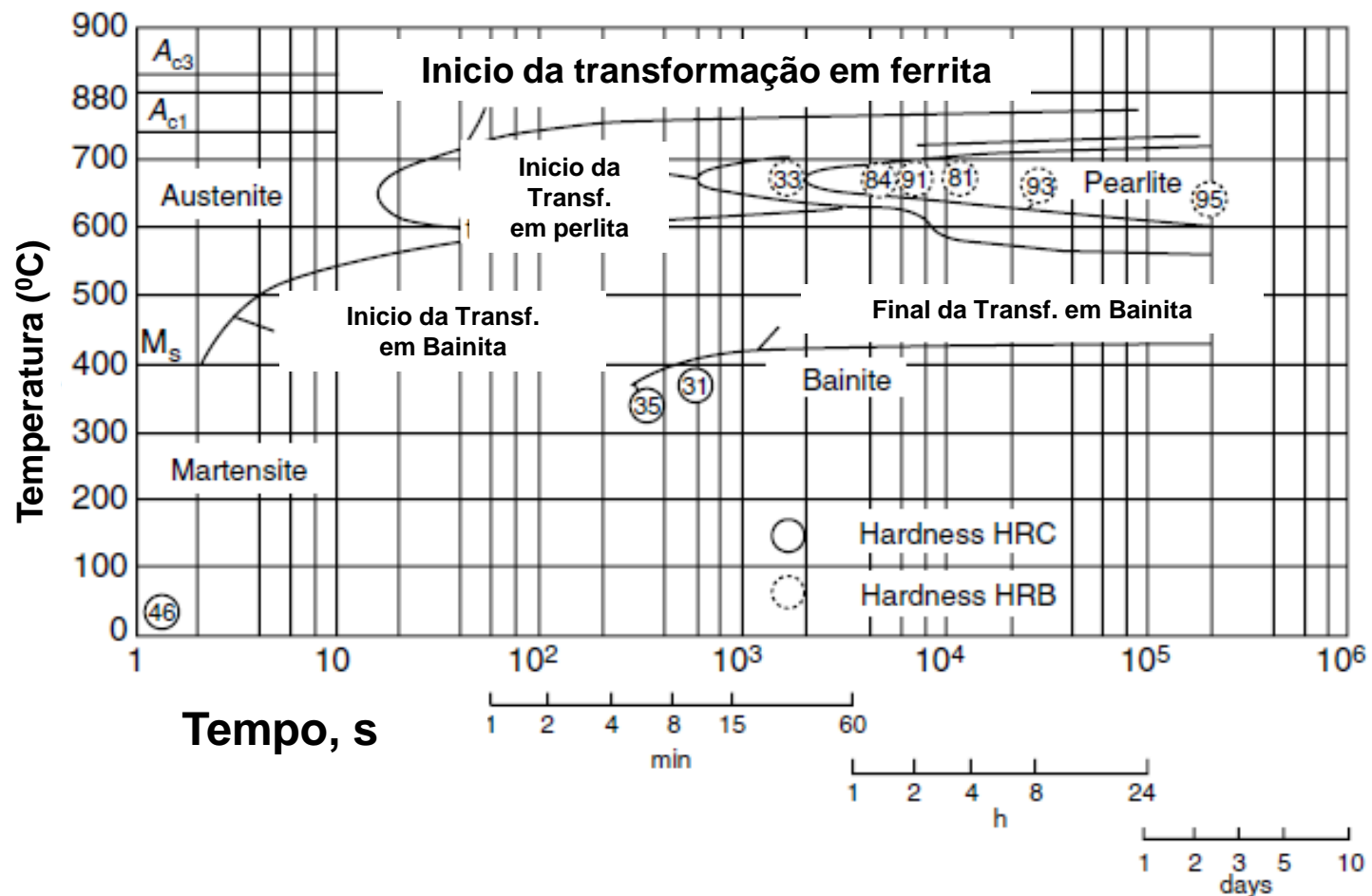
*Deve-se cuidar para não resfriar a ponto de formar bainita.*





# Recozimento Isotérmico

## Diagrama DIN 17CrNiMo6







# Recozimento Pleno

## **Definição:**

*Consiste em aquecer o aço até o campo austenítico, manter durante certo tempo (encharque) e, em seguida, resfriar o componente lentamente dentro do forno até a completa decomposição da austenita.*

## **Objetivos:**

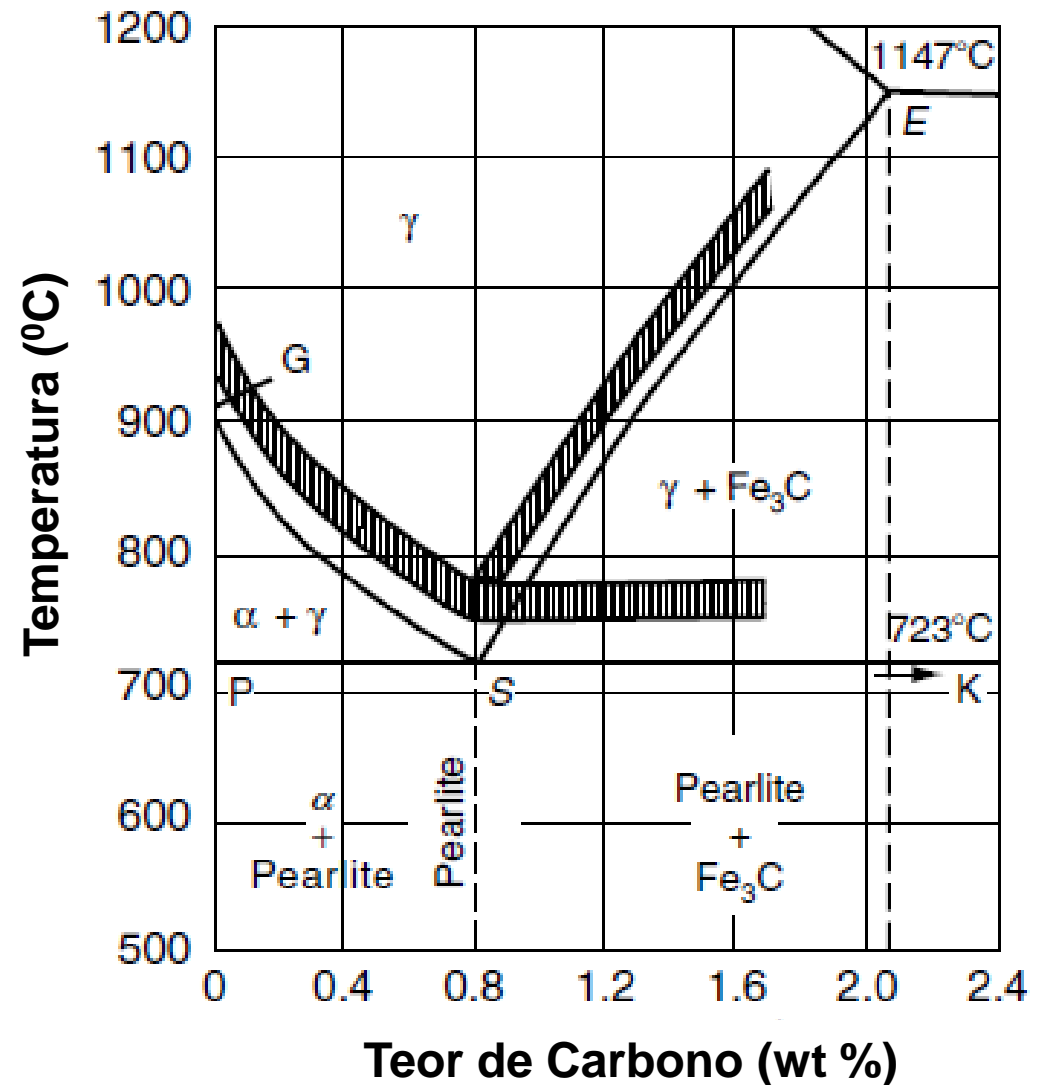
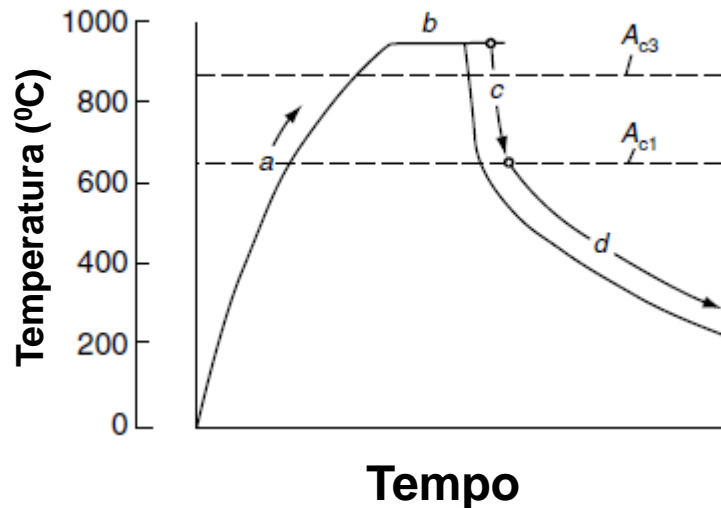
- Melhorar a usinabilidade de aços de médio e alto carbono,*
- Homogeneizar a estrutura e a distribuição de carbono nas peças.*



# Recozimento Pleno

*Faixa de Austenitização:  
Região intercrítica SK.*

*Resfriamento em forno,  
conforme linha “d” de  
resfriamento*



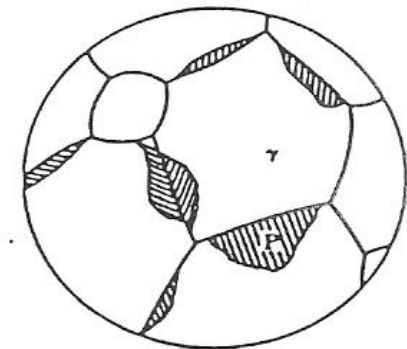
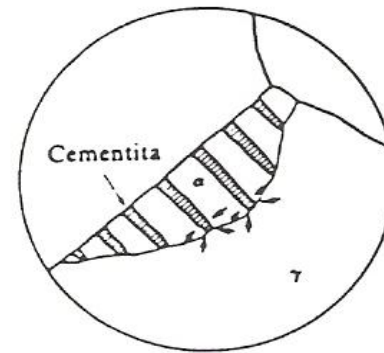
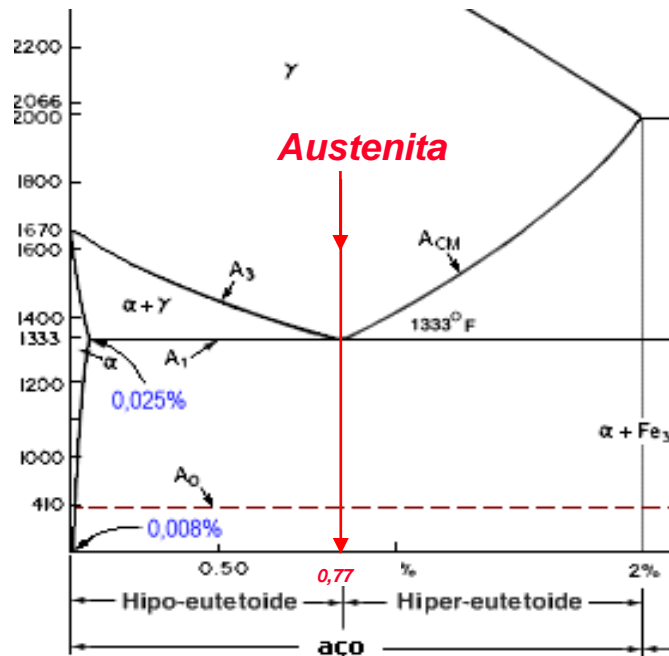
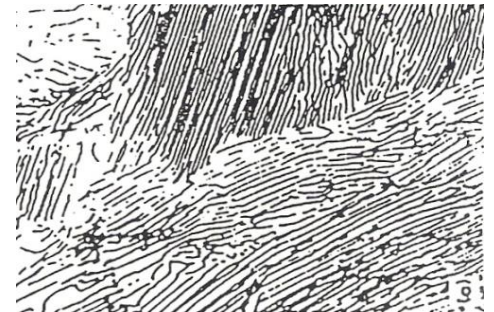


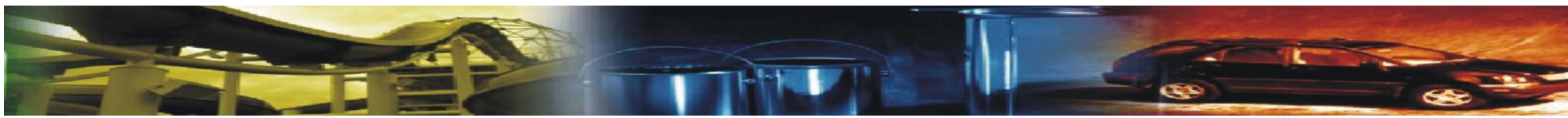
# Recozimento Pleno ~ Condições Equilíbrio

## - Diagrama de Fase - Fe-Fe<sub>3</sub>C

Transformações no Estado Sólido – Conforme Equilíbrio Termodinâmico.

A transformação Eutetóide ocorre pela decomposição da Austenita em Ferrita e Cementita, na forma de lamelas intercaladas. Esta microestrutura é chamada de Perlita e é uma mistura de duas fases.





# Recozimento de Esferoidização

## **Definição:**

*Pode ser conduzido de diversas formas, a partir de aquecimento e manutenção por longo período (horas) em temperaturas abaixo e/ou acima de  $A_c1$  ( $723^{\circ}\text{C}$ ).*

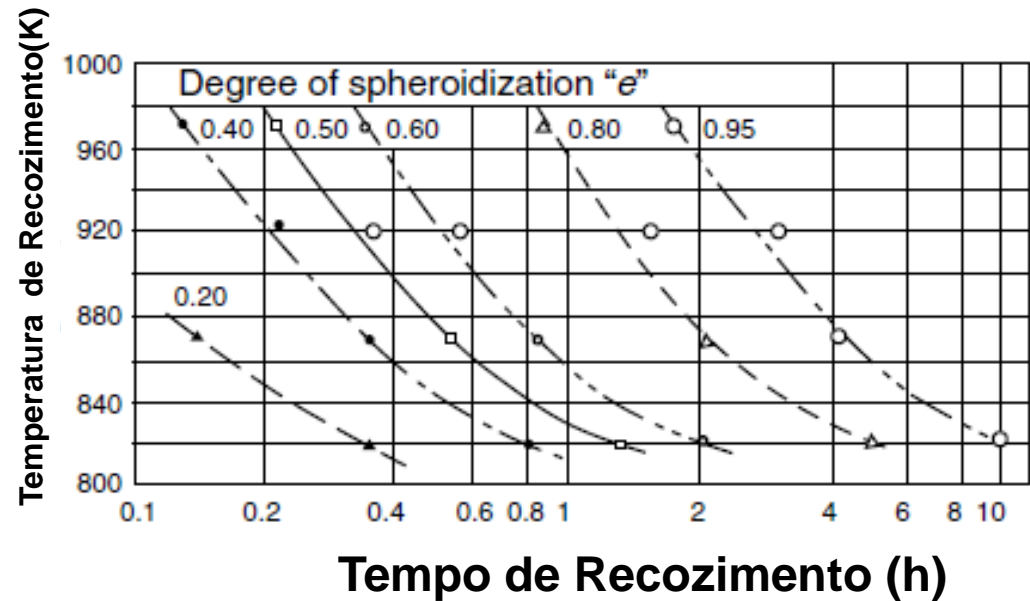
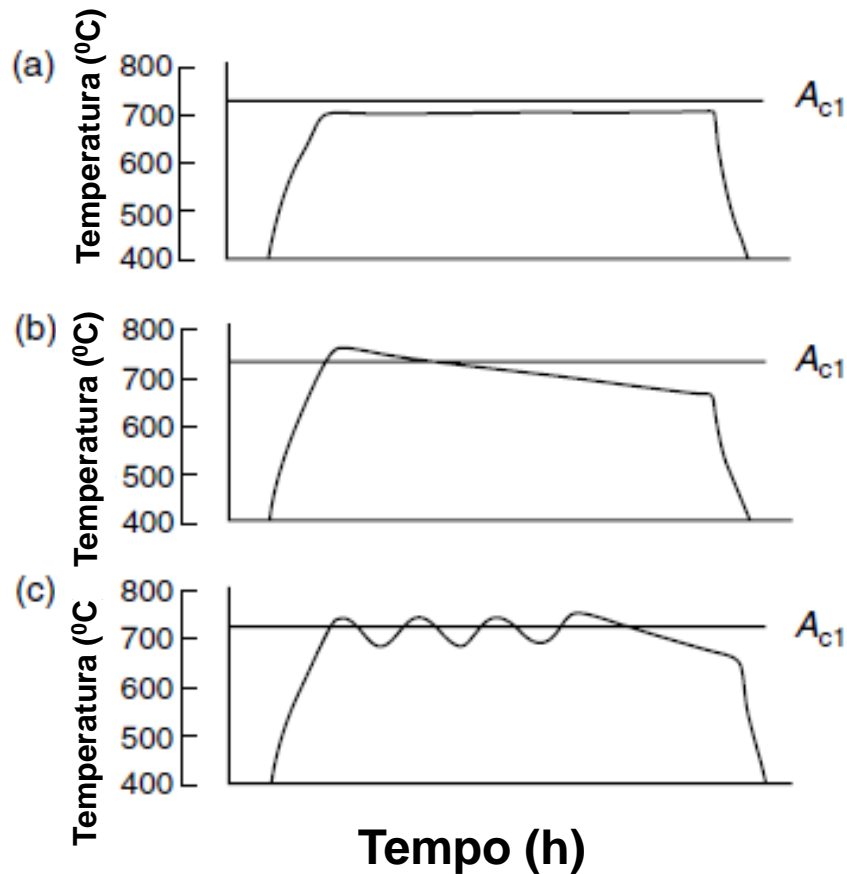
## **Objetivos:**

- Melhorar a usinabilidade de aços de médio e alto carbono,*
- Homogeneizar a estrutura e a distribuição de carbono nas peças.*

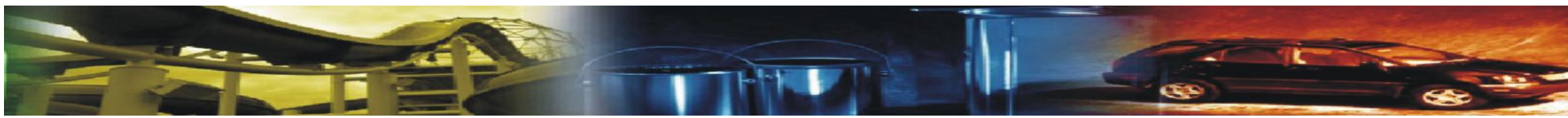


# Recozimento de Esferoidização

## Ciclos de esferoidização e efeito da temperatura



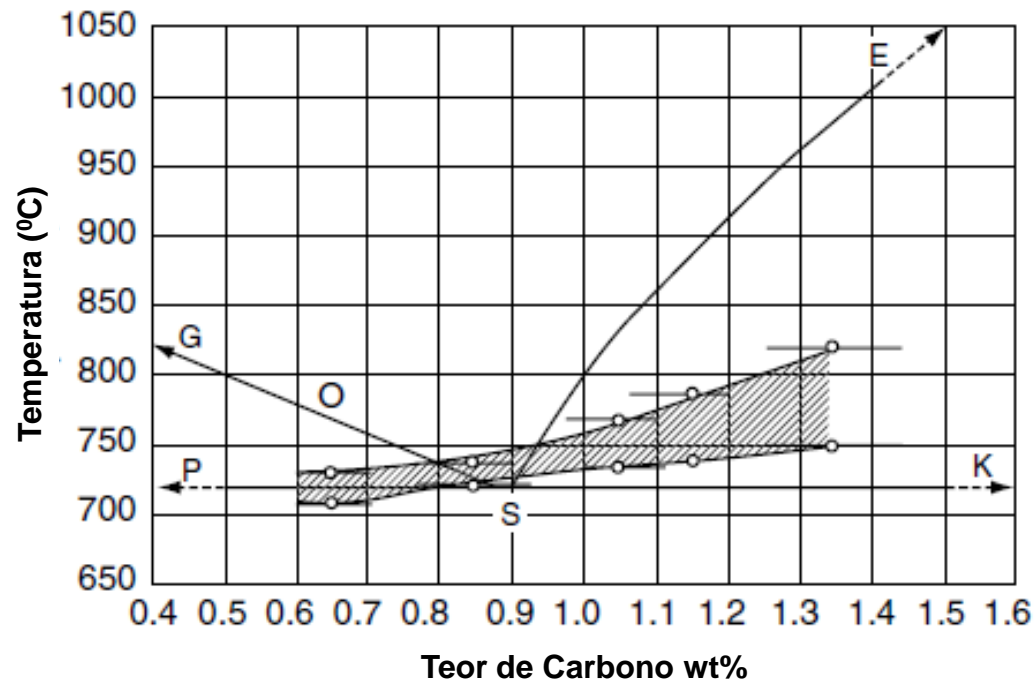


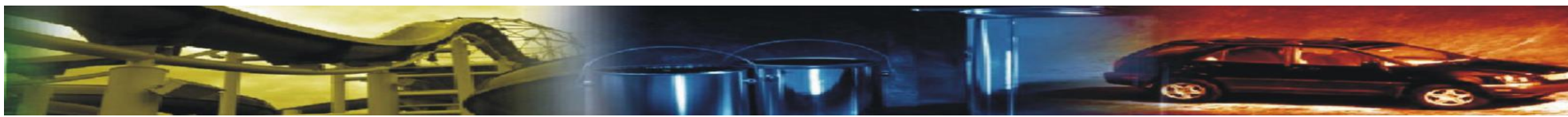


# Recozimento de Esferoidização

## Faixa de Temperatura Esferoidização

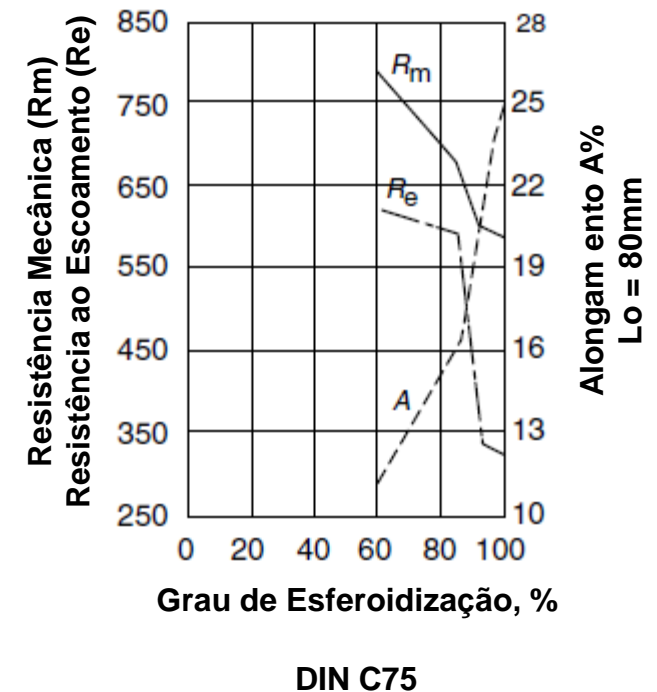
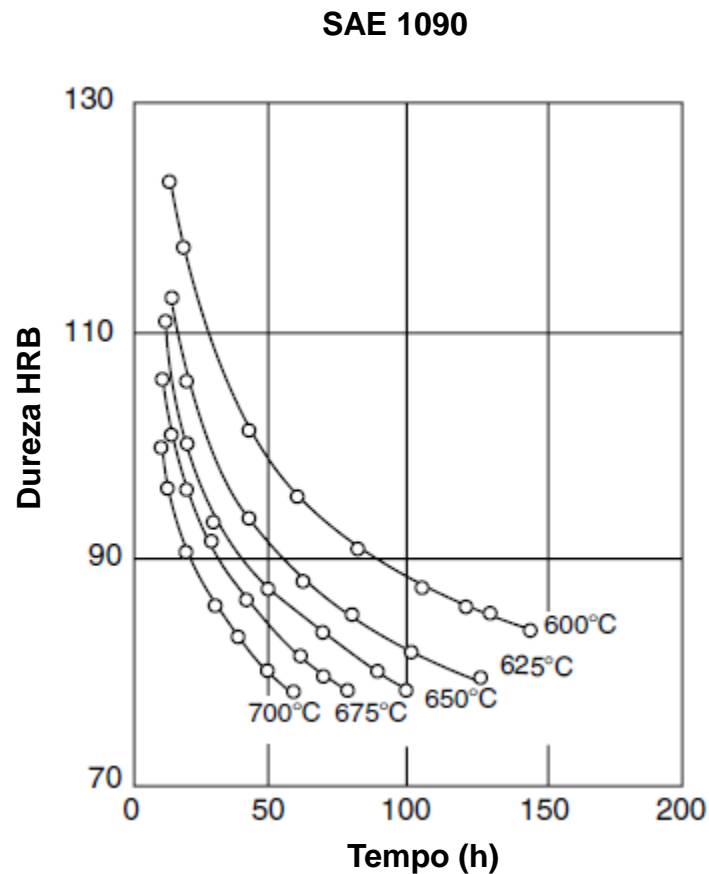
*Faixa de temperatura na Esferoidização (DIN C35) com 50% de deformação prévia.*

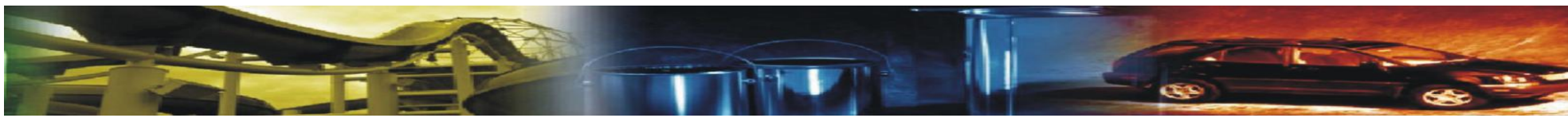




# Recozimento de Esferoidização

## Propriedades dos aços esferoidizados:





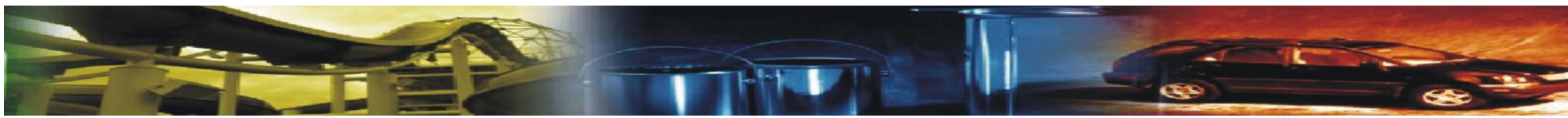
# Recozimento Subcrítico

## ***Definição:***

***Largamente aplicado a aços de baixo carbono deformados a frio com elevado encruamento na estrutura. Consiste em aquecer o aço em temperaturas abaixo de 723°C.***

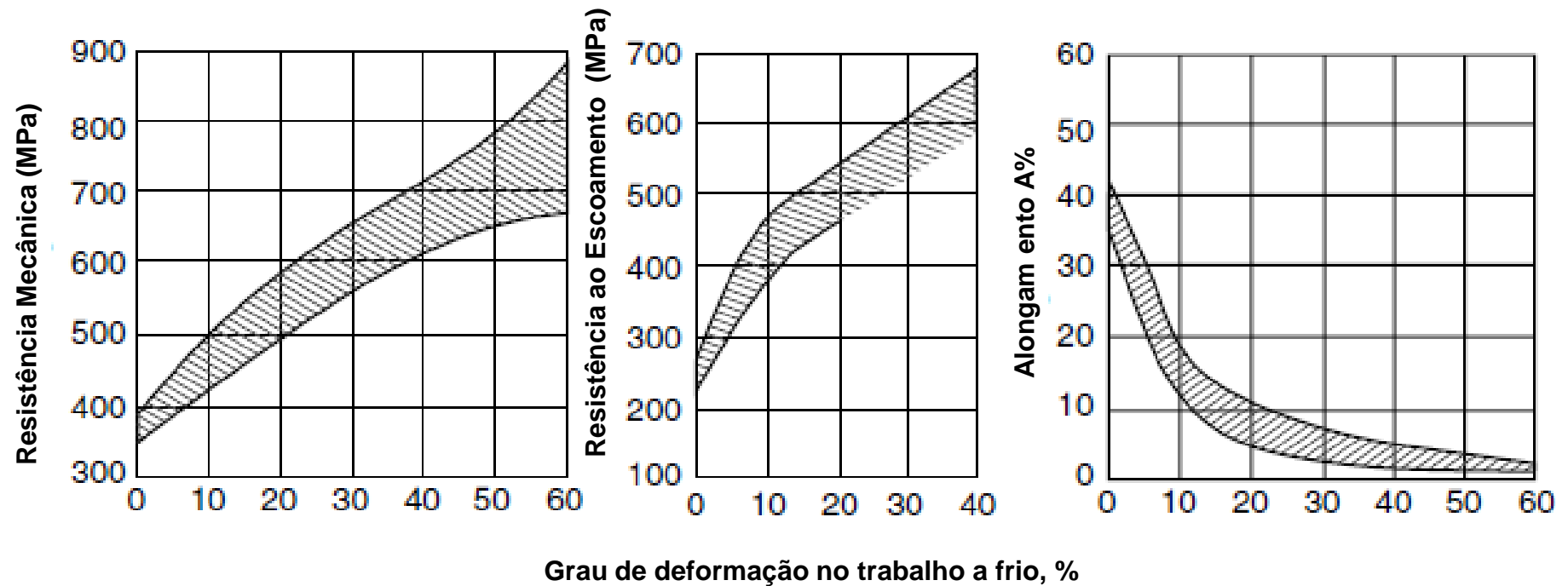
## ***Objetivos:***

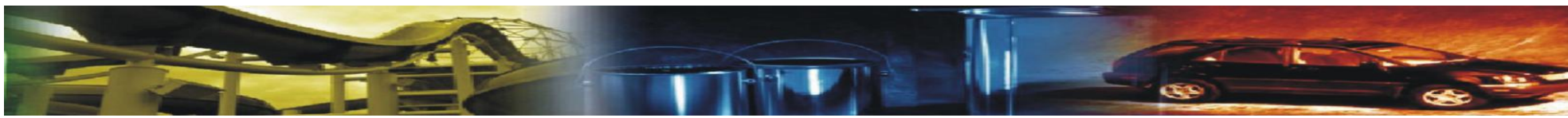
- Melhorar a estampabilidade de aços,***
- Aliviar tensões,***



# Recozimento Subcrítico

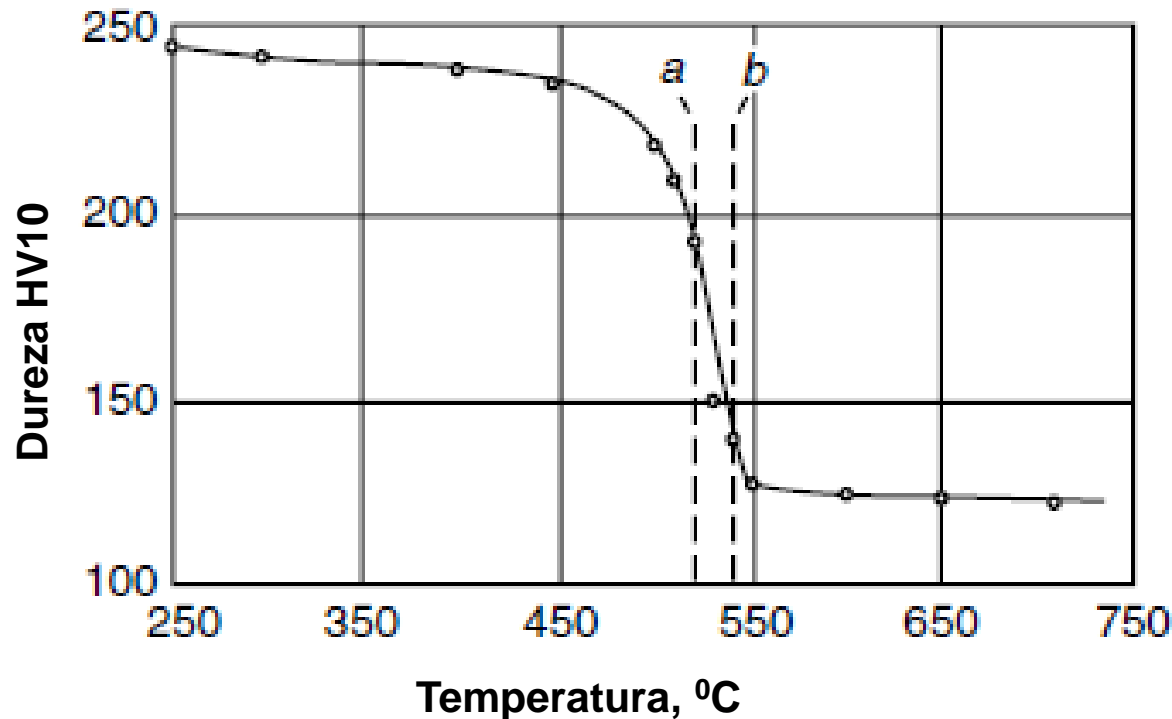
*Características de aços com trabalho a frio.*





## Recozimento Subcrítico

*Aço com 0,03 wt% carbono, 0,54 wt% Si e 0,20 wt% Mn, encruado 80% em Laminação a frio. a: início da formação de novos grãos, b: final da formação dos novos grãos.*

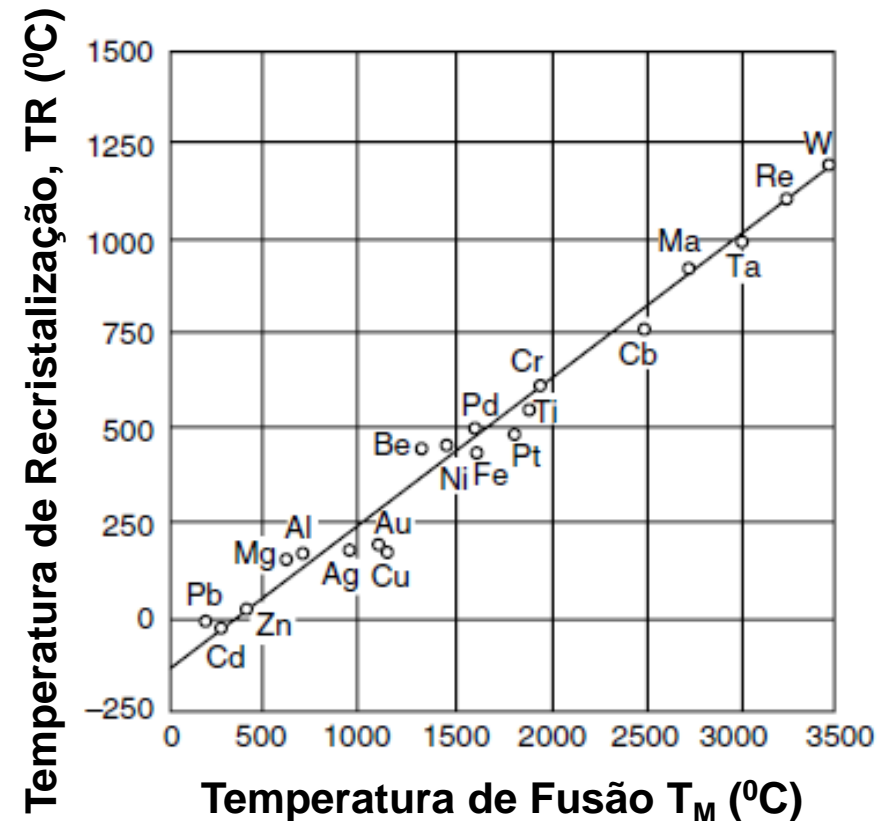
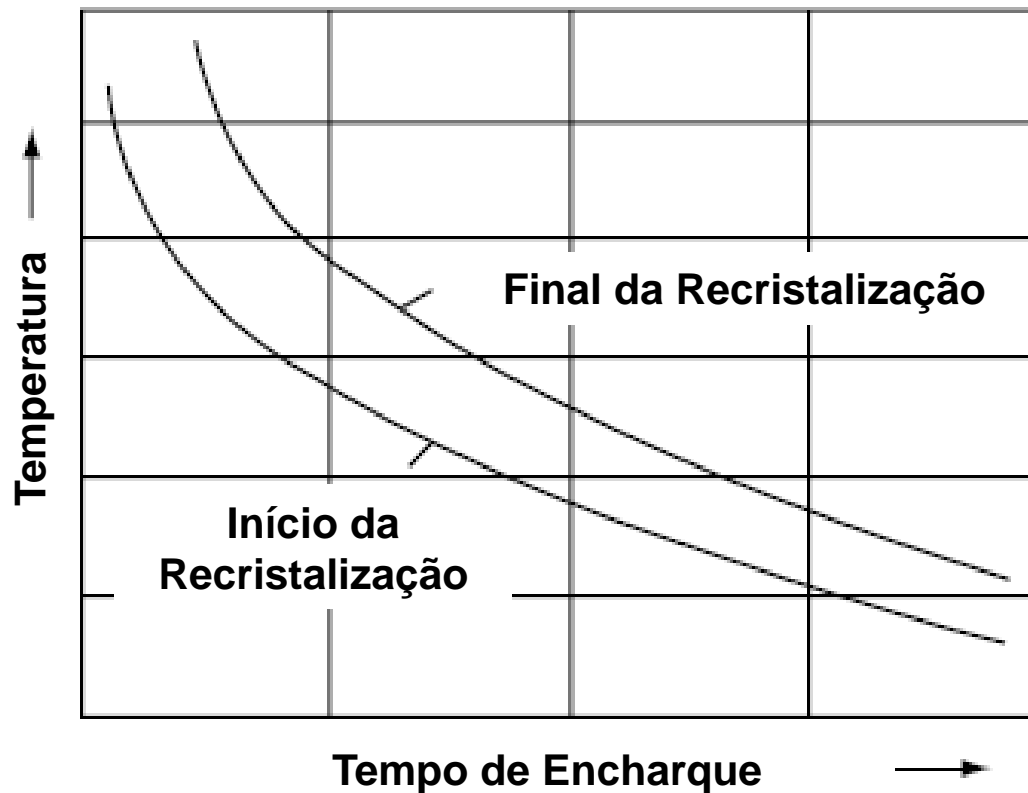


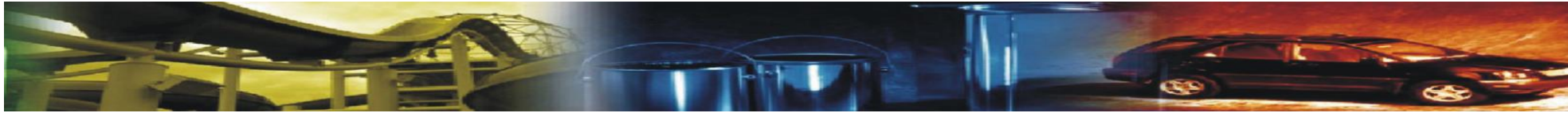




# Recozimento Subcrítico

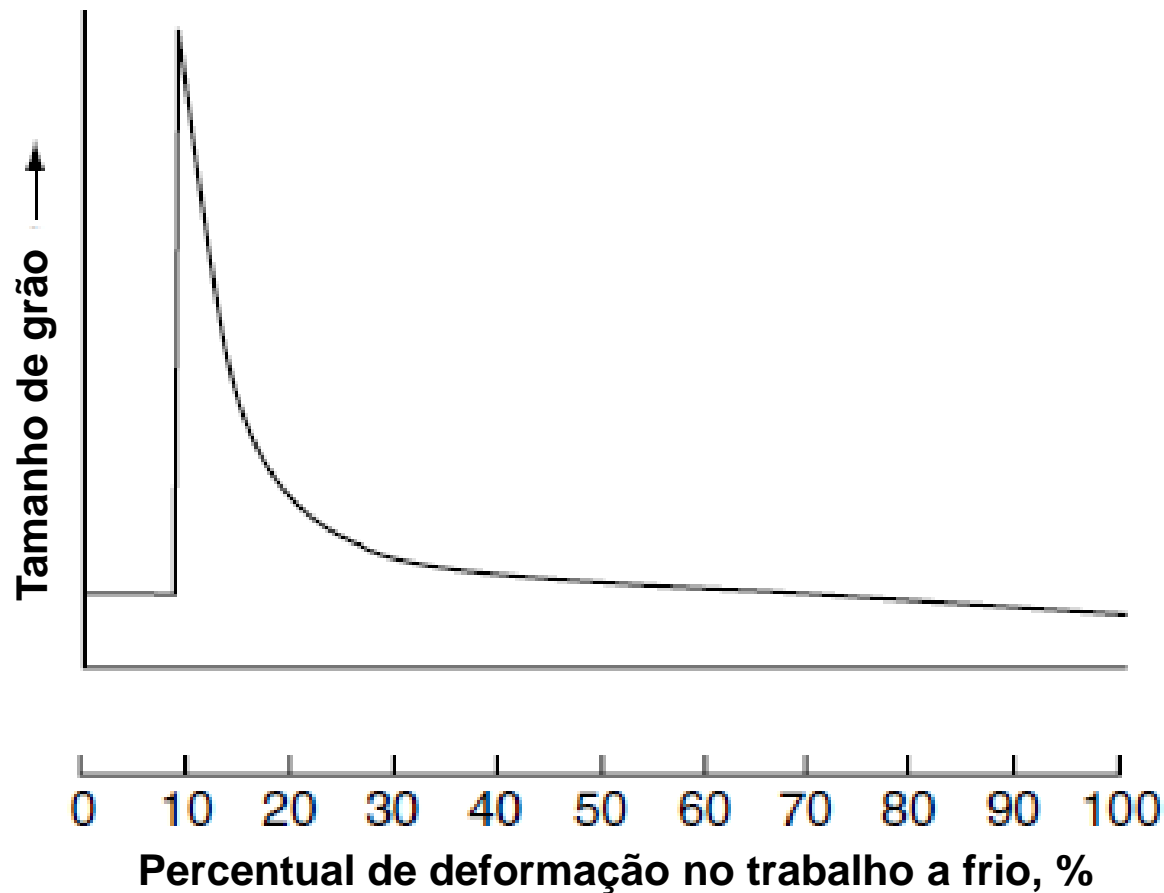
*Efeito da temperatura e do tempo para a recristalização.*

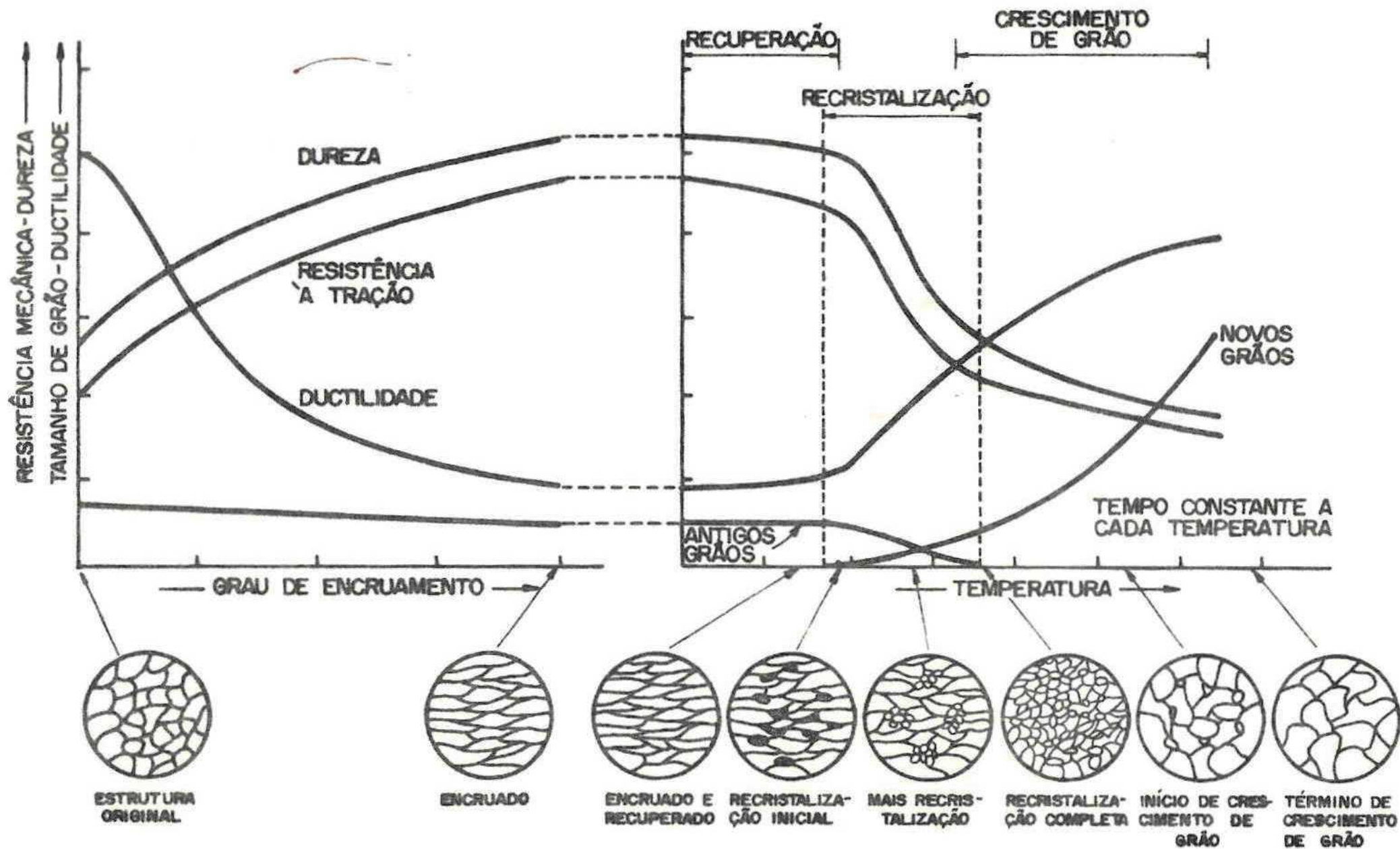




# Recozimento Subcrítico

*Efeito do Grau de trabalho a frio sobre o tamanho de grão de recristalização*







# **Têmpera e Revenido dos Aços**

## **Têmpera**

### **Definição:**

**Consiste em aquecer o aço até o campo austenítico, manter durante certo tempo (encharque) e, em seguida, resfriar rapidamente visando a transformação Martensítica.**

### **Objetivos:**

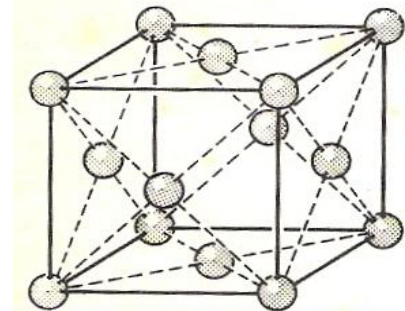
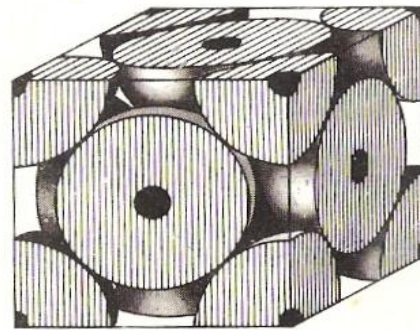
- Obter a máxima Resistência Mecânica para um determinado aço,**
- Elevar a Dureza dos aços,**
- Elevar a Resistência ao Desgaste e à Fadiga.**



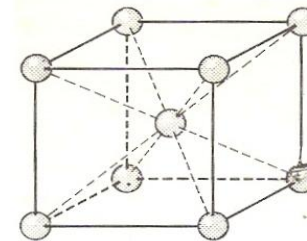
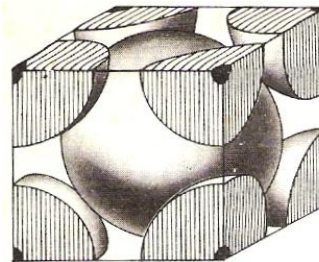
# Têmpera e Revenido dos Aços

## - Estrutura das Fases importantes do Ferro

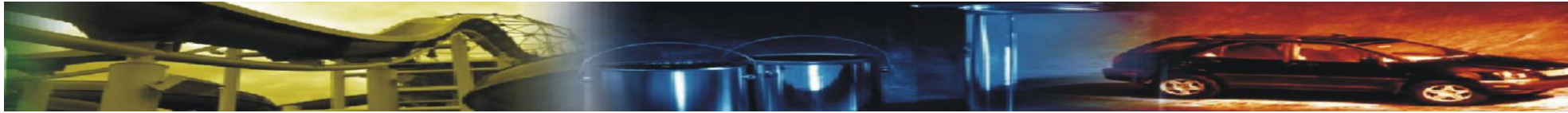
**Estrutura Cúbica de Faces Centradas  
(ferro Gama)**



**Estrutura Cúbica de Corpo Centrado  
(ferro Alfa)**



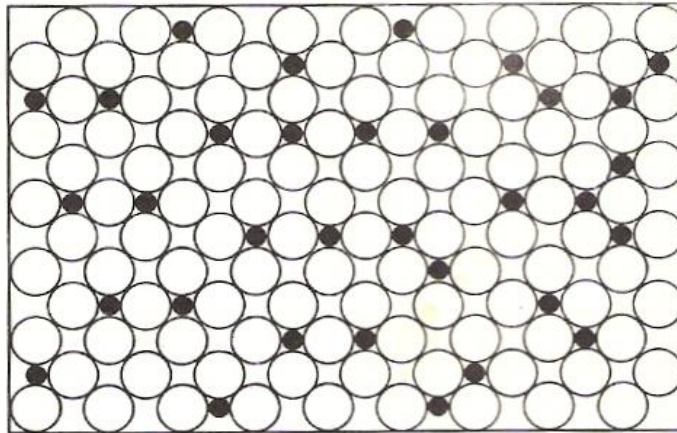




# Têmpera e Revenido dos Aços

## Soluções Sólidas

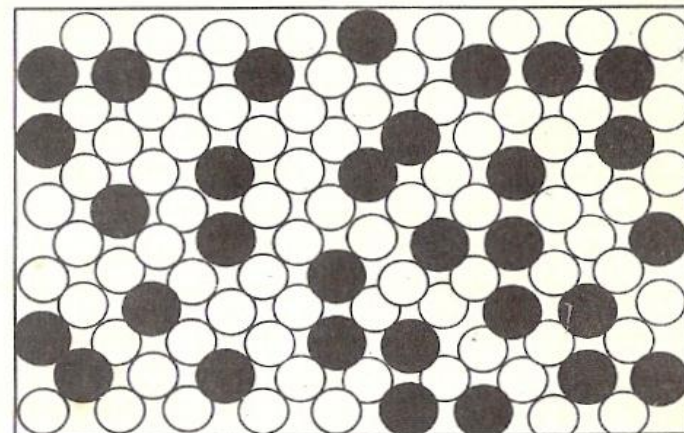
*Intersticiais*



● Carbono

○ Ferro

*Substitucionais ao Acaso*



● Cromo, Níquel, Molibdênio, outros

○ Ferro

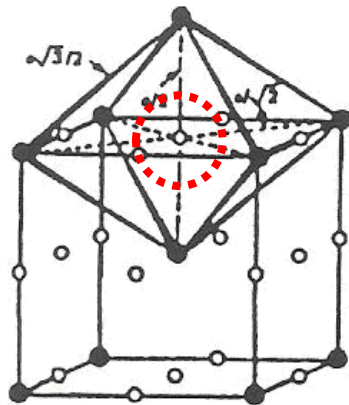


# Têmpera e Revenido dos Aços

## - Solubilidade de Carbono em Ferro

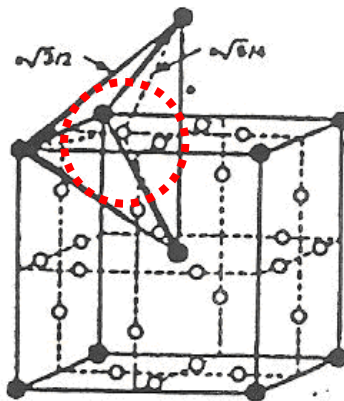
O **carbono é um elemento de pequeno raio atômico (0,77 Angstrons)** em relação ao Ferro. Desta forma, desenvolve solução sólida Intersticial, ou seja, o átomo de soluto (carbono) posiciona-se nos interstícios ou espaços vazios de suas estruturas cristalinas. Ferro  $\alpha$  e Ferro  $\gamma$  formam diferentes tipos de interstícios, os Interstícios Octaédricos (a) e os interstícios Tetraédricos (b):

*Interstícios da Estrutura do Ferro  $\alpha$*



(a)

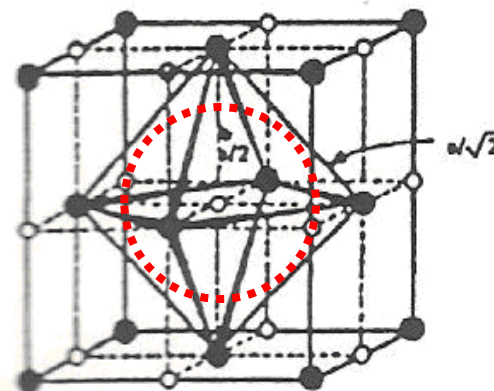
**Espaço  
Angstrons 0,19**



(b)

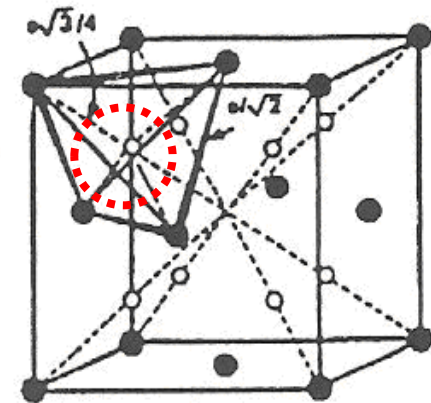
**0,36**

*Interstícios da Estrutura do Ferro  $\gamma$*



(a)

**0,52**



(b)

**0,29**

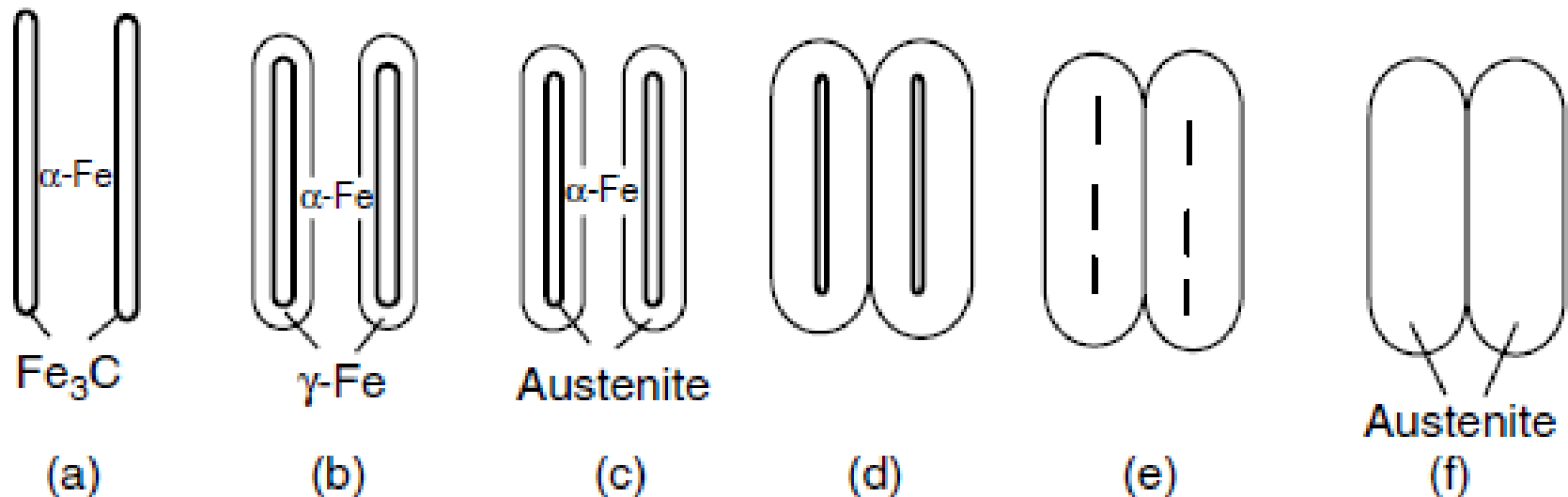


# Têmpera e Revenido dos Aços

## Sequência de transformação da perlita para austenita (austenitização)

Etapa 1: Formação de austenita a partir da ferrita na interface com a cementita.

Etapa 2: Dissolução das lamelas de cementita na austenita formada.







# Têmpera e Revenido dos Aços

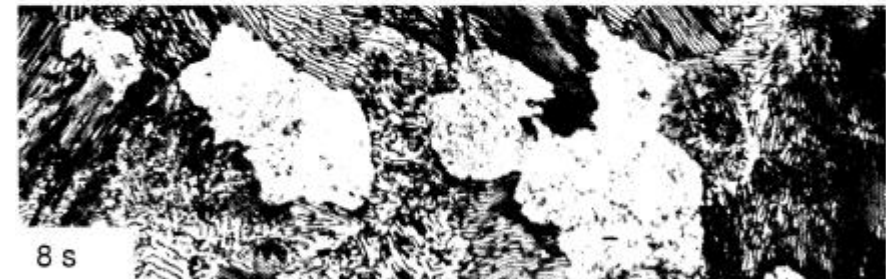
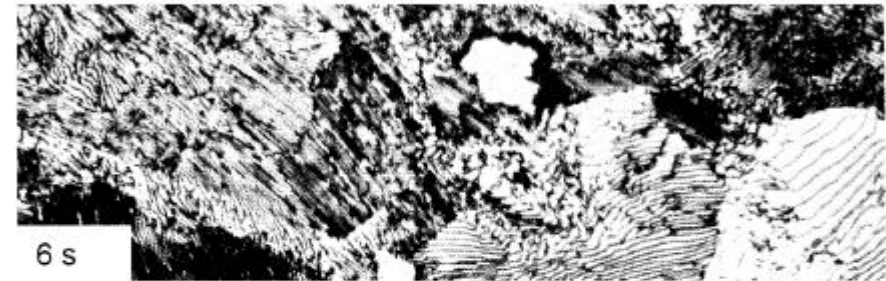
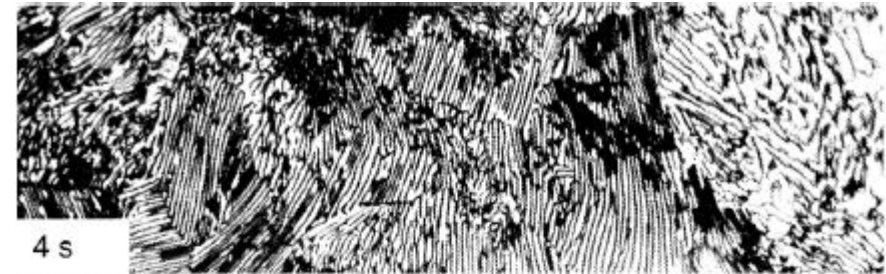
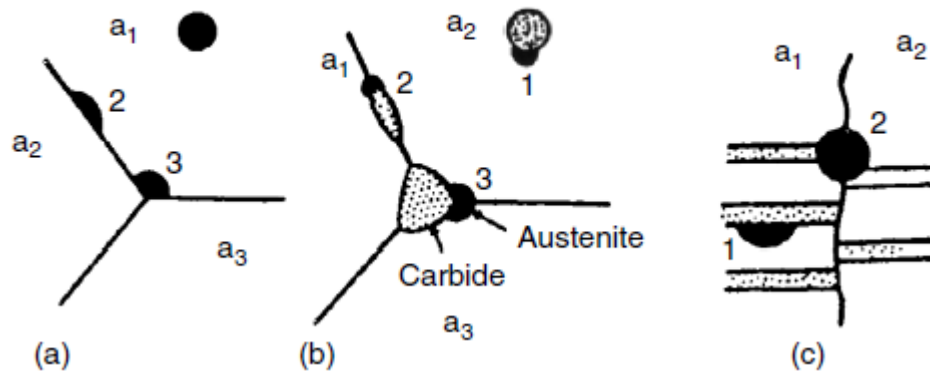
## Formação da austenita

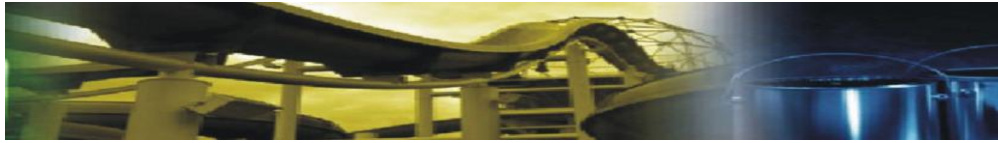
### Nucleação:

(a) A partir da ferrita

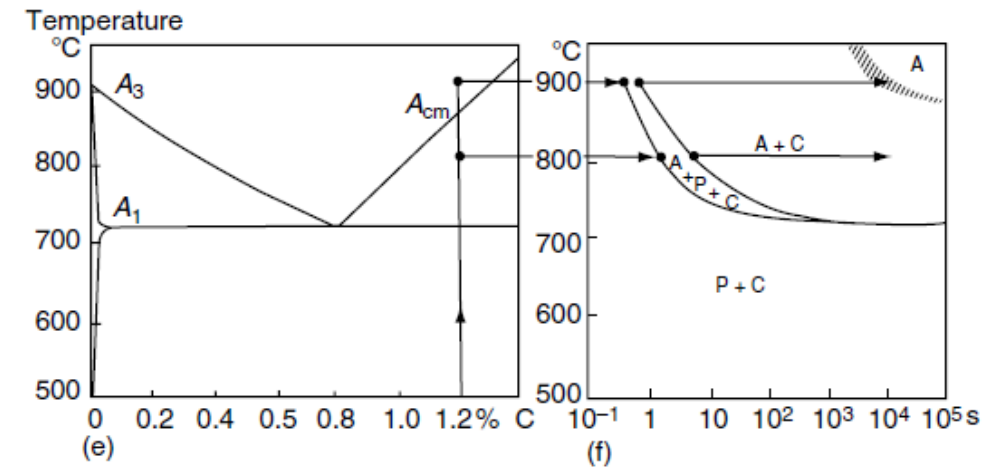
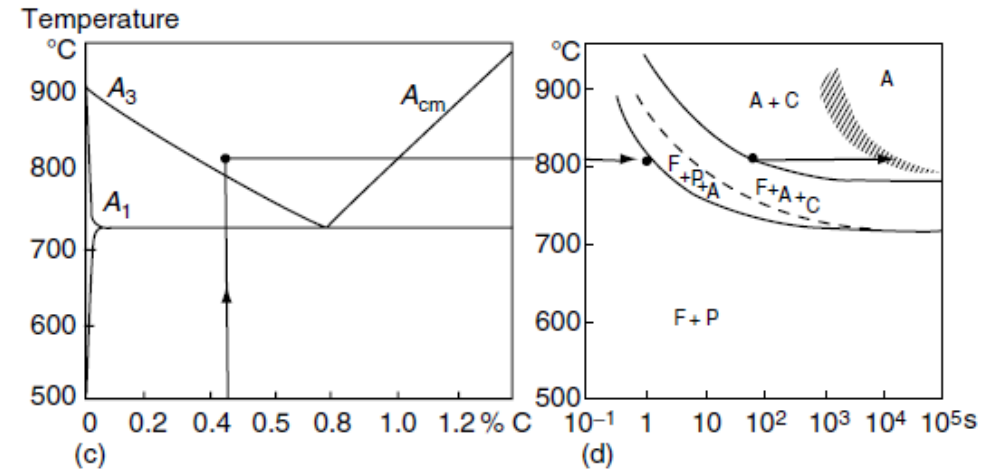
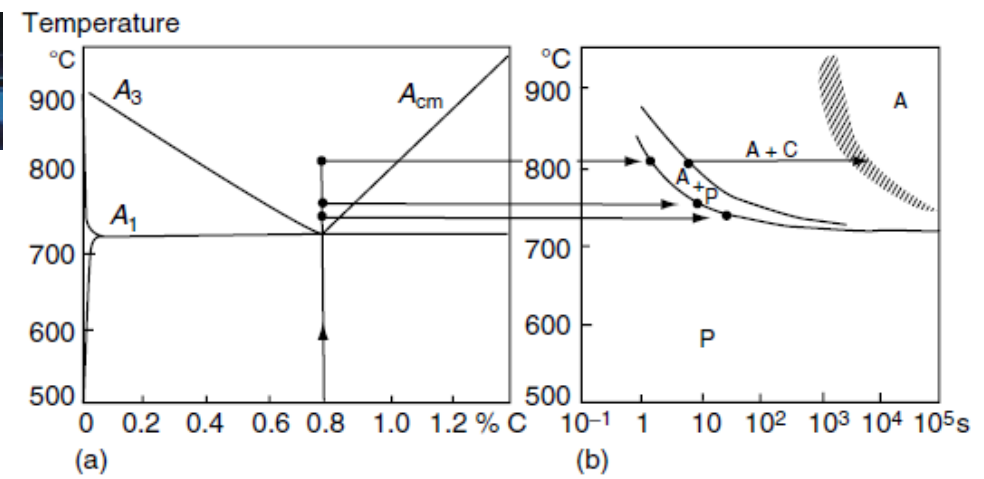
(b) A partir da Esferoidita

(c) A partir da perlita

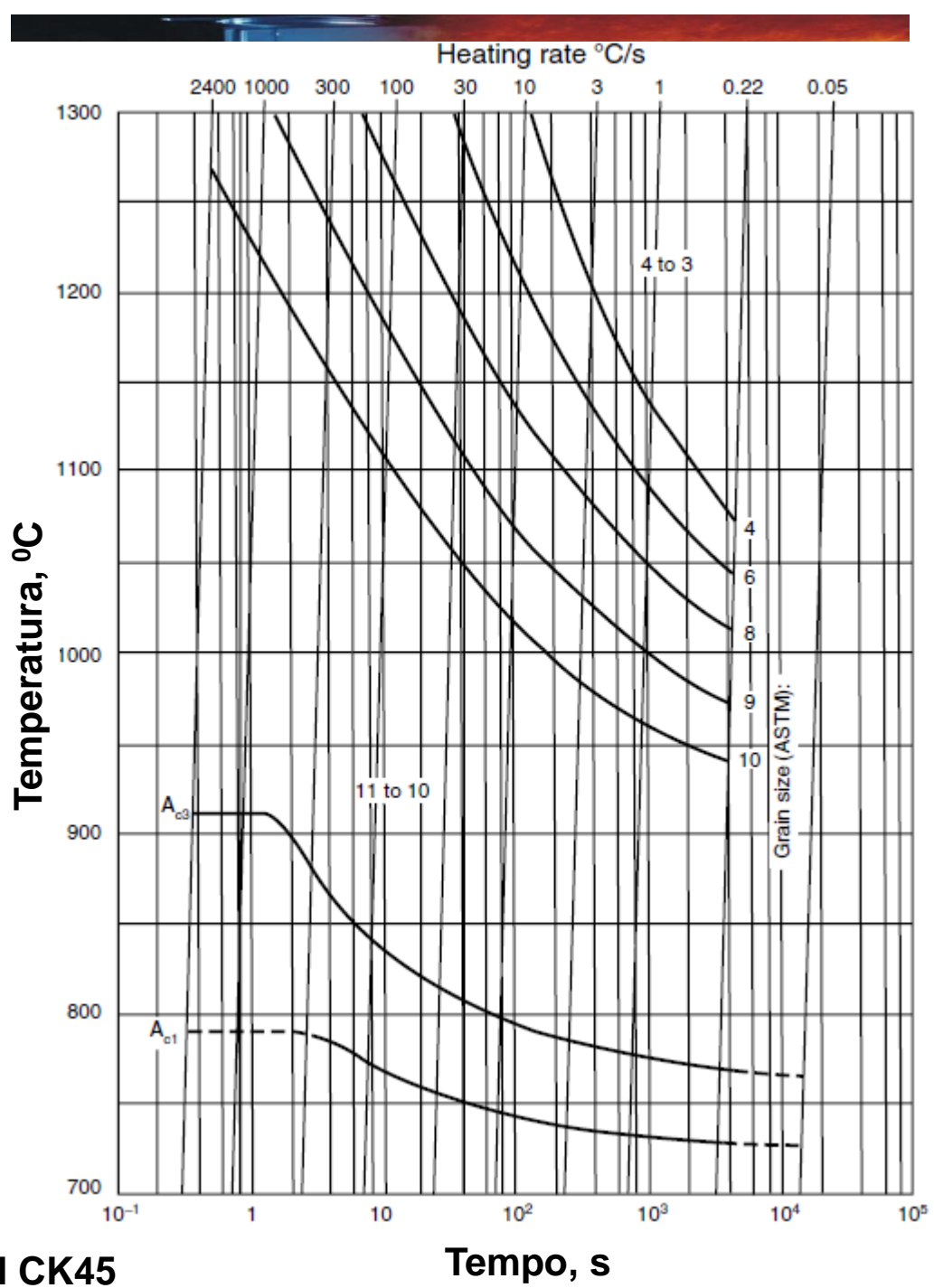
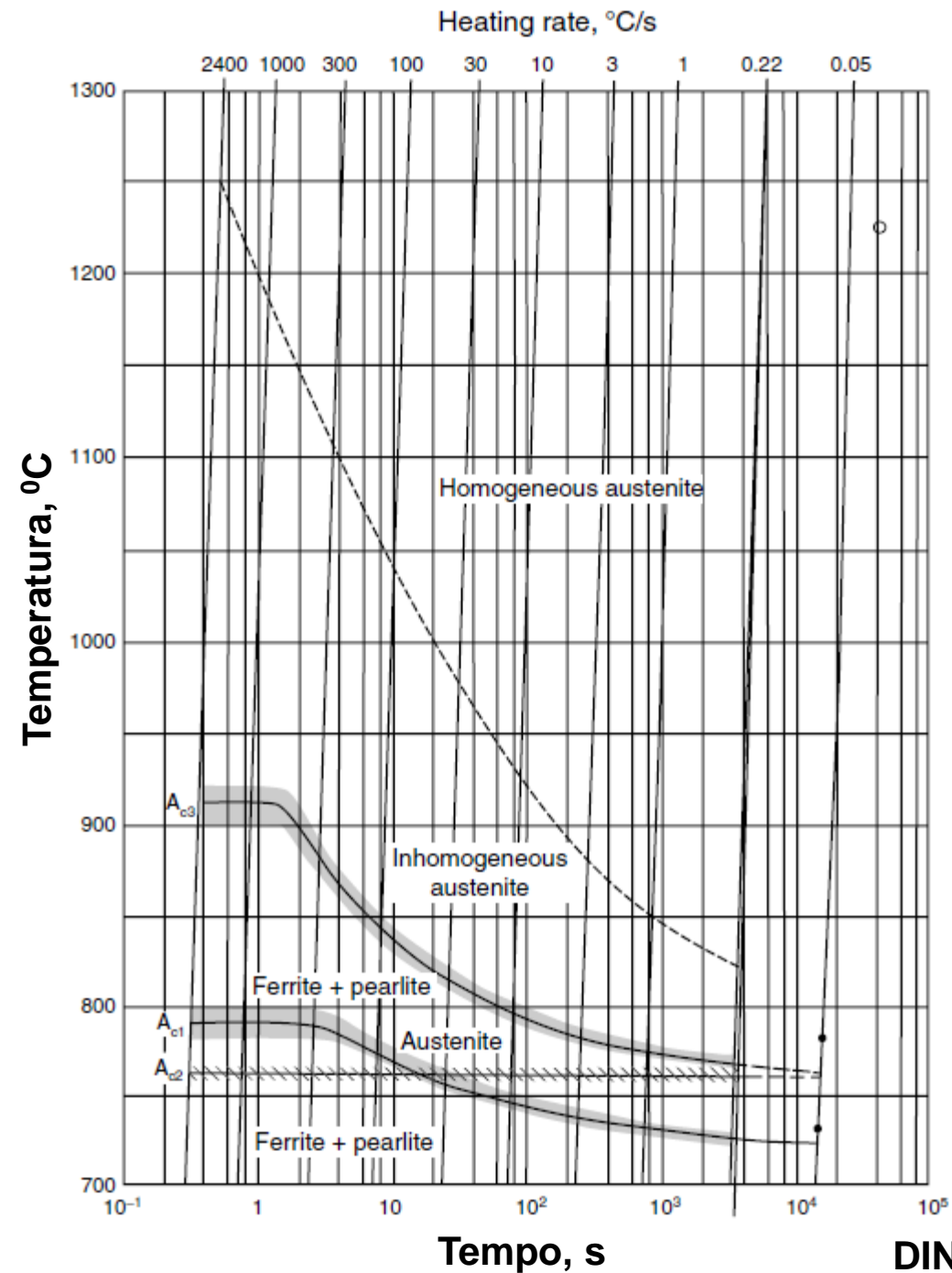


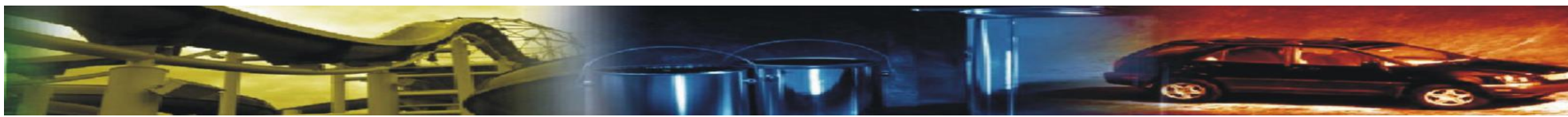


# Formação da austenita







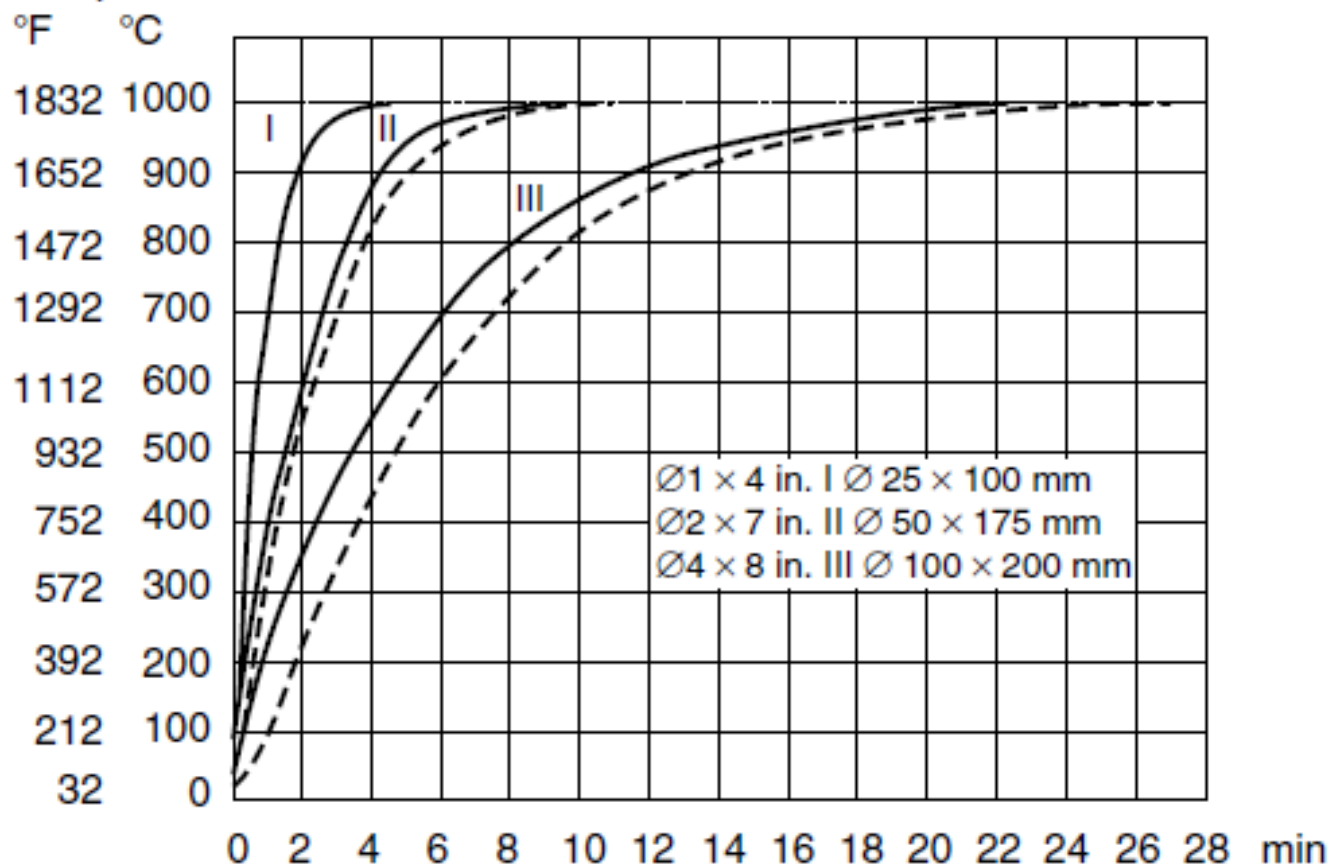


Os parâmetros mais importantes da austenitização são:

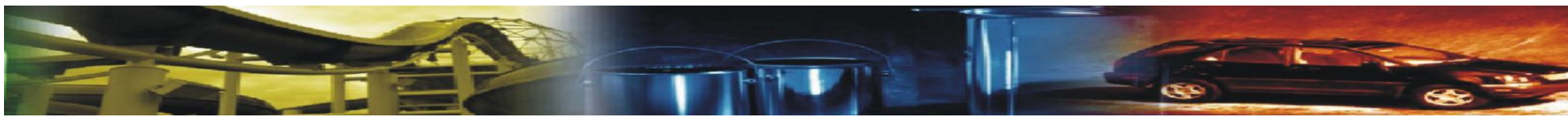
1- Temperatura de Austenitização,

2- A curva de aquecimento e o tempo de permanência na temperatura de austenitização.

*Temperatura*



*Curva de Aquecimento Banhos de sais a 1000°C*



## Faixa ótima de austenitização para a têmpera de aços carbono não ligados

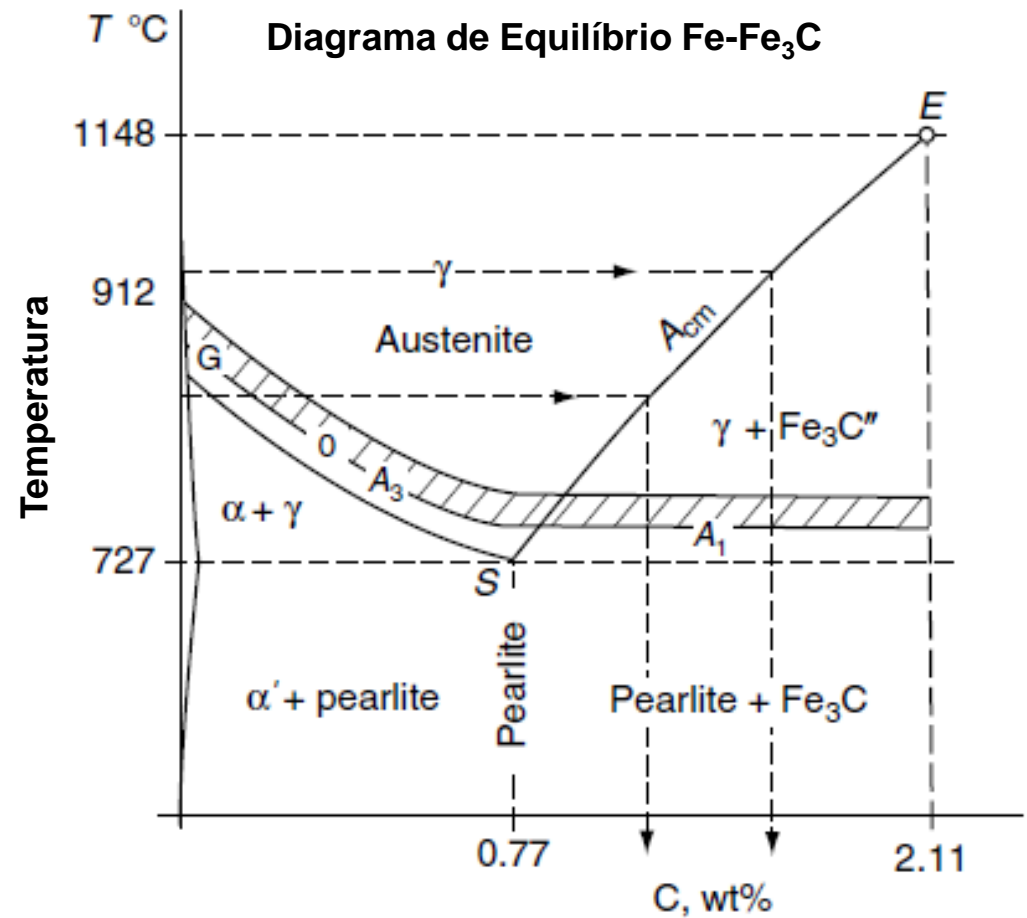
Efeito do aumento da temperatura de austenitização:

1- Eleva a Temperabilidade, como resultado do maior %C na austenita e maior tamanho de grão.

2- Maior teor de carbono na austenita promove a redução da temperatura Ms.

3- Deslocamento das curvas em C para a direita.

4- Aumento do teor de austenita retida.



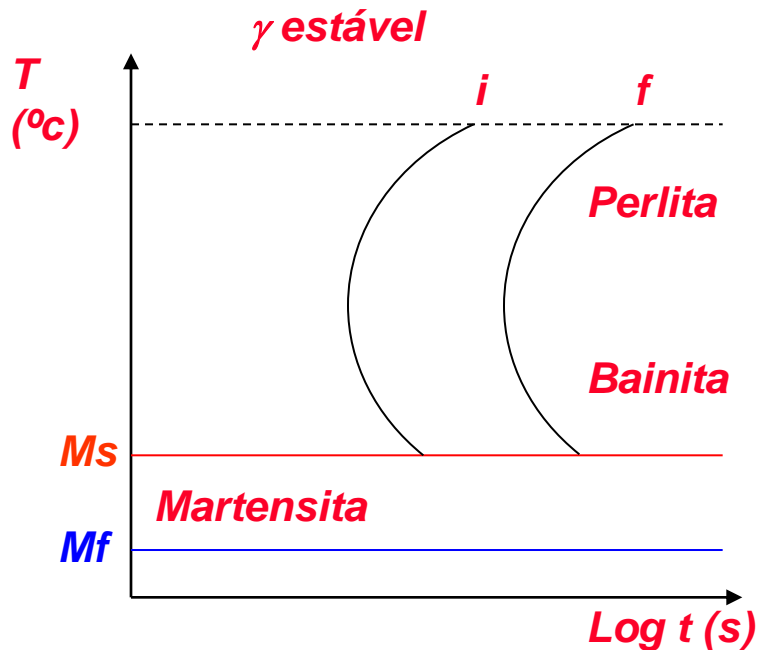
 Faixa de temperatura ótima para têmpera



# Têmpera e Revenido dos Aços

## - Diagramas Resfriamento Contínuo

Diagramas que relacionam a Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) e o Tempo (s), mantendo fixa a composição e apresentam todas as possíveis microestruturas que se formam em um determinado aço em função da velocidade de resfriamento.



### Pontos Importantes:

*i* – início da transformação em Perlita ou Bainita

*f* – final da transformação em Perlita ou Bainita

*Ms* – Isoterma de início de transformação Martensítica

*Mf* - Isoterma de final de transformação Martensítica.



# Têmpera e Revenido dos Aços

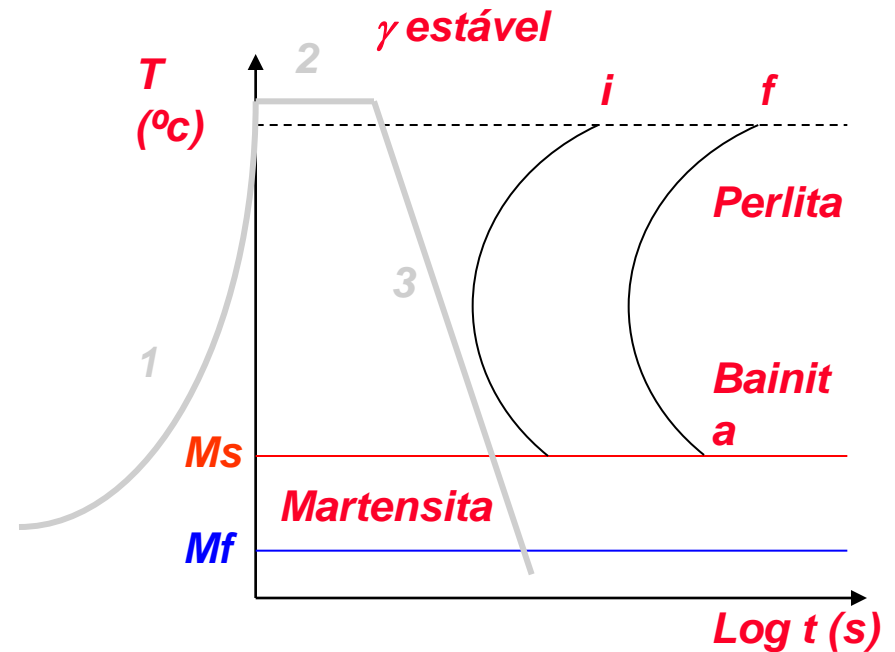
## Etapas da Têmpera (Geral)

As etapas à seguir resumem o ciclo de tratamento:

**Etapa 1:** Aquecer o aço até a temperatura dentro do campo austenítico do diagrama de fases ( $\gamma$  estável).

**Etapa 2:** Aguardar a homogeneização da temperatura e dissolução do carbono em ferro gama - encharque.

**Etapa 3:** Resfriar rapidamente a fim de evitar as transformações em Perlita e Bainita, visando a formação de Martensita.







# Têmpera e Revenido dos Aços

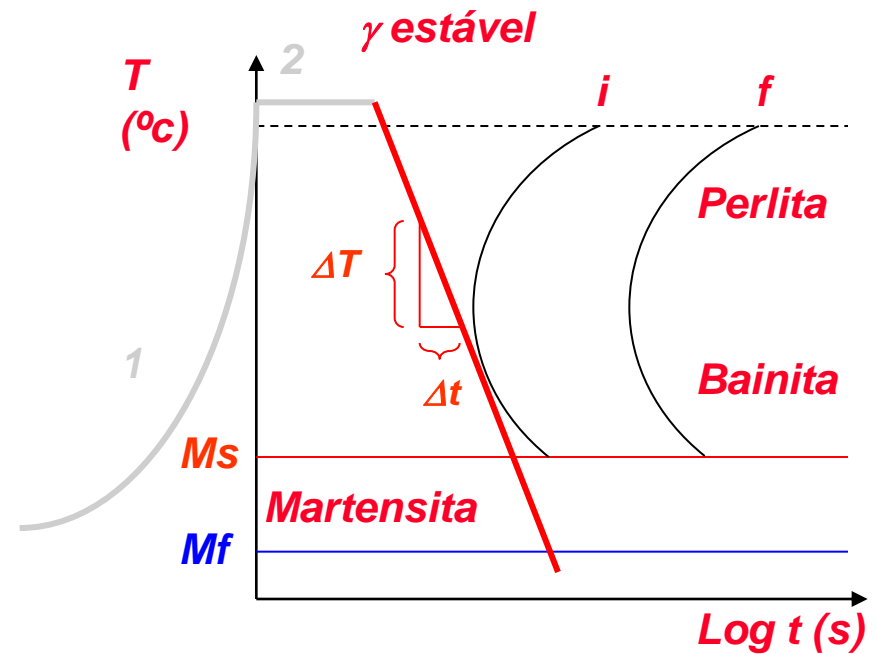
## Têmpera

Quais são as condições para a formação da Martensita?

A transformação Martensítica ocorrerá quando:

1- A taxa de resfriamento ( $\Delta T/\Delta t$ ) °C/s desde o campo austenítico for igual ou superior àquela que corresponde à tangente ao “nariz” da curva em  $C_i$ , conforme figura.

2- A transformação será completa somente após o cruzamento da isoterma  $M_f$ , que representa a formação de 100% de Martensita.





# Têmpera e Revenido dos Aços

## Têmpera

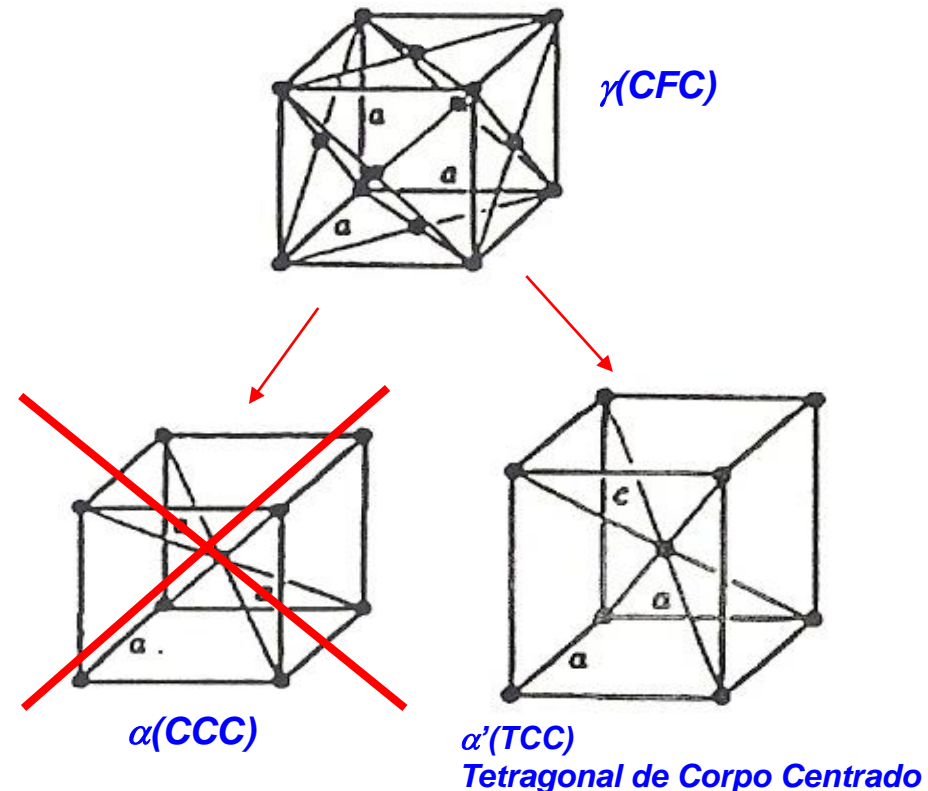
Qual é o mecanismo de formação de Martensita?

*Mecanismo:*

1- Com o resfriamento rápido, não há tempo para a difusão do carbono, sendo este mantido em solução.

2- À medida que a austenita está em temperatura menor que a eutetóide (723°C), surge uma força motriz para que a mudança alotrópica  $\gamma(\text{CFC}) \rightarrow \alpha(\text{CCC})$  ocorra.

3- Na tentativa do ferro passar a estrutura  $\alpha$  (CCC), o carbono em solução promoverá o cisalhamento da estrutura, dando origem à Martensita  $\alpha'$  (TCC), com estrutura Tetragonal de Corpo Centrado.





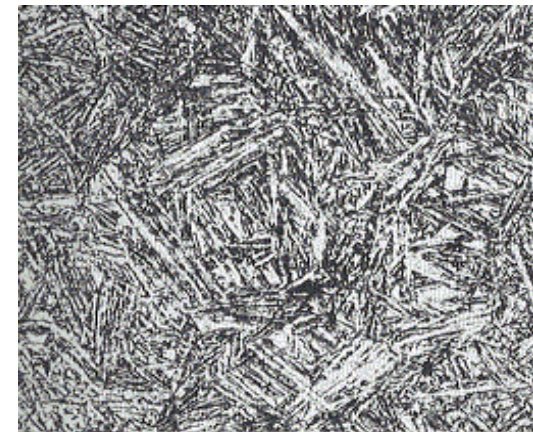
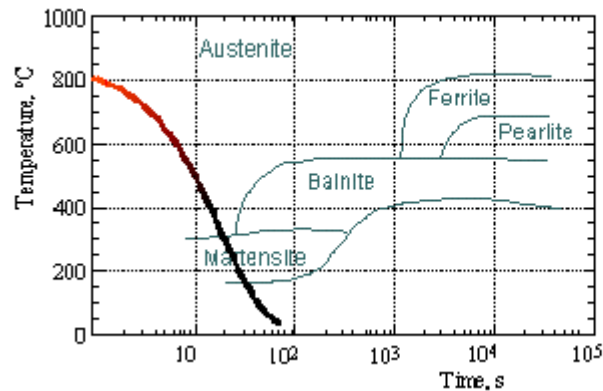
# Diagramas de Resfriamento Contínuo

## Diagrama Resfriamento Contínuo Real - Aço SAE 1040

**Martensita – Solução sólida supersaturada em carbono, com estrutura Tetragonal de Corpo Centrado.**

### Resfriamento Rápido:

#### Diagrama de Resfriamento Contínuo



#### COMPOSIÇÃO QUÍMICA

**C – 0,40 %, Mn – 1,50%**

**Microestrutura: Martensita**

**Dureza Desenvolvida: 45 - 55 HRC**



# Diagramas de Resfriamento Contínuo

## *Meios de Resfriamento utilizados na Têmpera:*

- a- Água e Soluções aquosas salinas,*
- b- Óleos,*
- c- Soluções aquosas de polímeros,*
- d- Banhos de sais,*
- e- Gases.*

## *Severidade de Têmpera – Fator de Grossmann (H)*

*A Severidade de Têmpera é definida por:*

*$H = h/2k$ , onde  $h$  é o coeficiente de transferência de calor na interface (convecção) e  $k$  é a condutividade térmica do metal*

*Quanto maior a Severidade de Têmpera (H), maior será a habilidade deste meio de extrair calor da superfície da peça que está sendo temperada.*

*H é função da temperatura, composição e agitação do meio de resfriamento.*



# **Têmpera e Revenido dos Aços**

## **Têmpera**

**Todos os Aços podem ser temperados?**

**Não!**

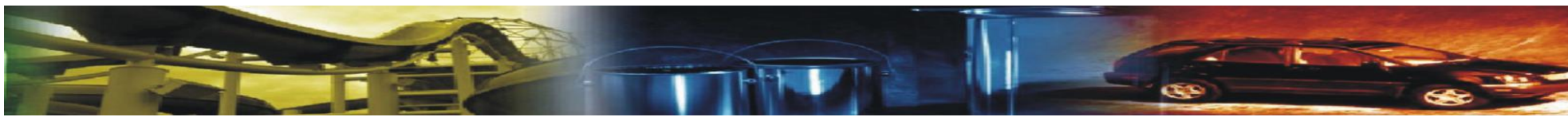
**Aços precisam de Temperabilidade, ou “Susceptibilidade de endurecimento frente a resfriamento rápido”.**

**Quais são os fatores que afetam a Temperabilidade de um Aço?**

**a- Teor de Carbono e tamanho de Grão,**

**b- Elementos de liga,**





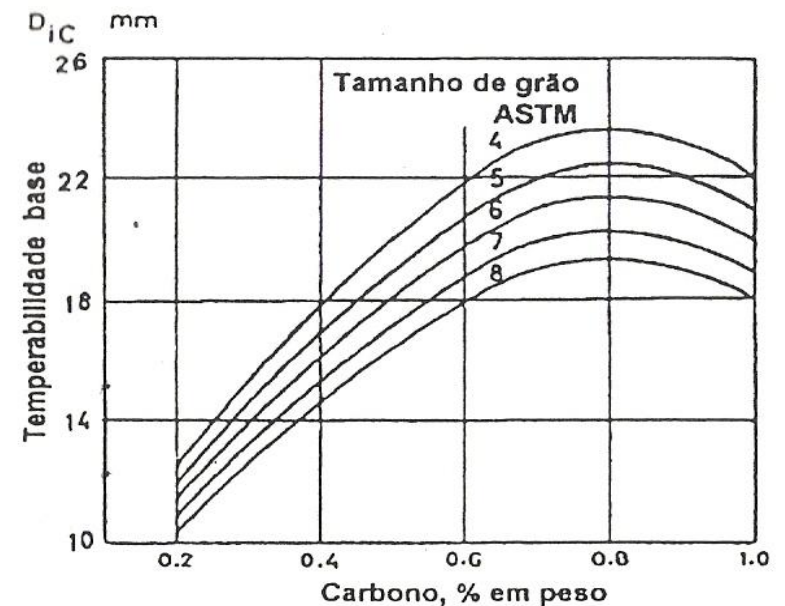
# Têmpera e Revenido dos Aços

## Fatores que Afetam a Temperabilidade

*a- Teor de Carbono e Tamanho de Grão*

*b- Elementos de liga, dificultam a difusão do carbono em ferro*

*Todos os elementos de liga, com exceção do Cobalto, aumentam a temperabilidade de aços, desde que não excedam o seu limite de solubilidade.*





# Têmpera e Revenido dos Aços

## Têmpera

Tensões geradas na têmpera:

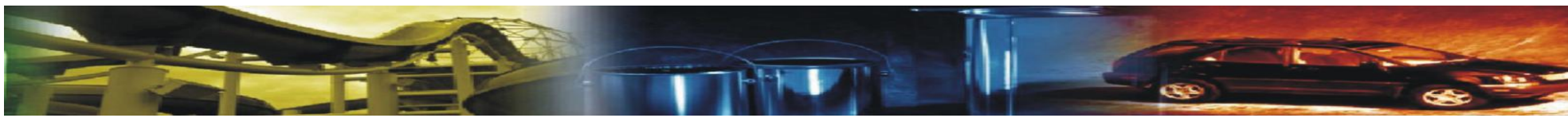
### *1- Tensões de resfriamento:*

Quando o aço é resfriado em um meio de têmpera, a superfície da peça apresenta velocidade de resfriamento diferente do centro do componente. Isto leva ao aparecimento de **tensões de origem térmica**.

### *2- Tensões de Transformação:*

Quando o aço é resfriado bruscamente desde o campo austenítico até a temperatura ambiente, induz o cisalhamento da estrutura cristalina, envolvendo variação de volume desde 0,5 até 4%, dependendo do teor de carbono. Estas tensões chamamos de **tensões de transformação**.

As tensões residuais (térmicas e de transformação) presentes no aço temperado, fazem com que o aço **nunca possa ser utilizado no estado temperado**.



# Têmpera e Revenido dos Aços

## Revenimento

### Definição:

Consiste em aquecer o aço temperado na faixa de 180 até 600°C, por tempo de cerca de uma hora.

### Objetivos:

- Reduzir a fragilidade das peças temperadas,
- Aliviar tensões,
- Conferir estabilidade dimensional,
- Estabilizar a microestrutura.

### Variáveis:

Temperatura, Tempo, Composição e Taxa de resfriamento.



# Têmpera e Revenido dos Aços

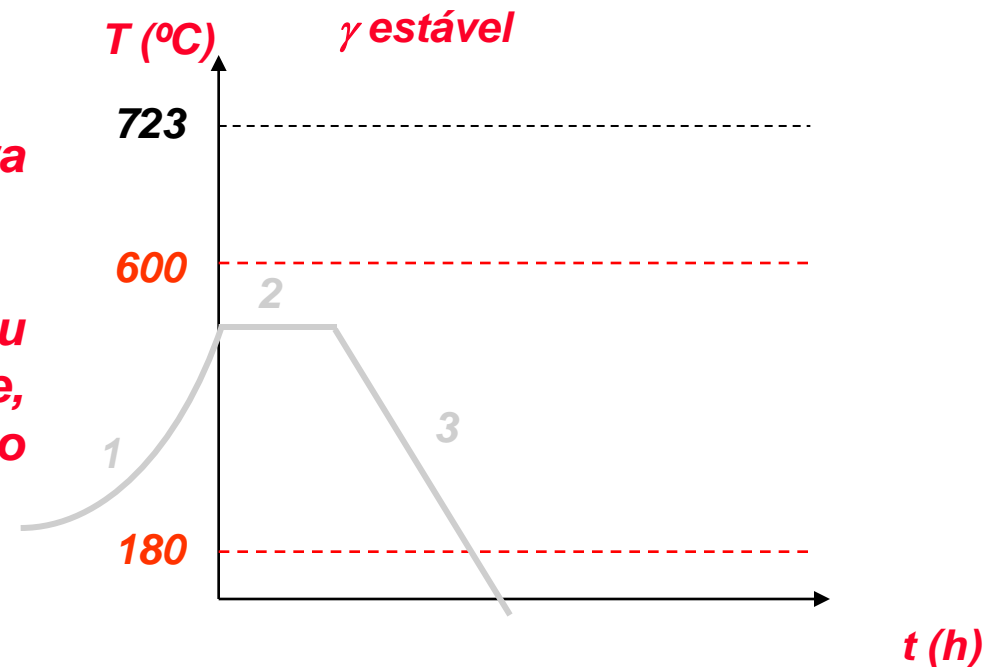
## Revenimento

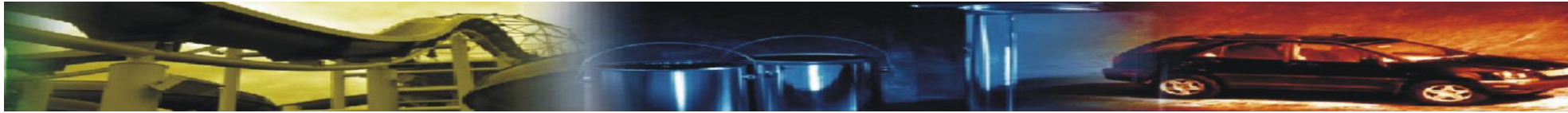
As etapas à seguir resumem o ciclo de revenimento:

**Etapa 1:** *Aquecer o aço até a temperatura abaixo da eutetóide do diagrama de fases ( $\gamma$  estável).*

**Etapa 2:** *Manter nesta temperatura durante cerca de 1h, encharque.*

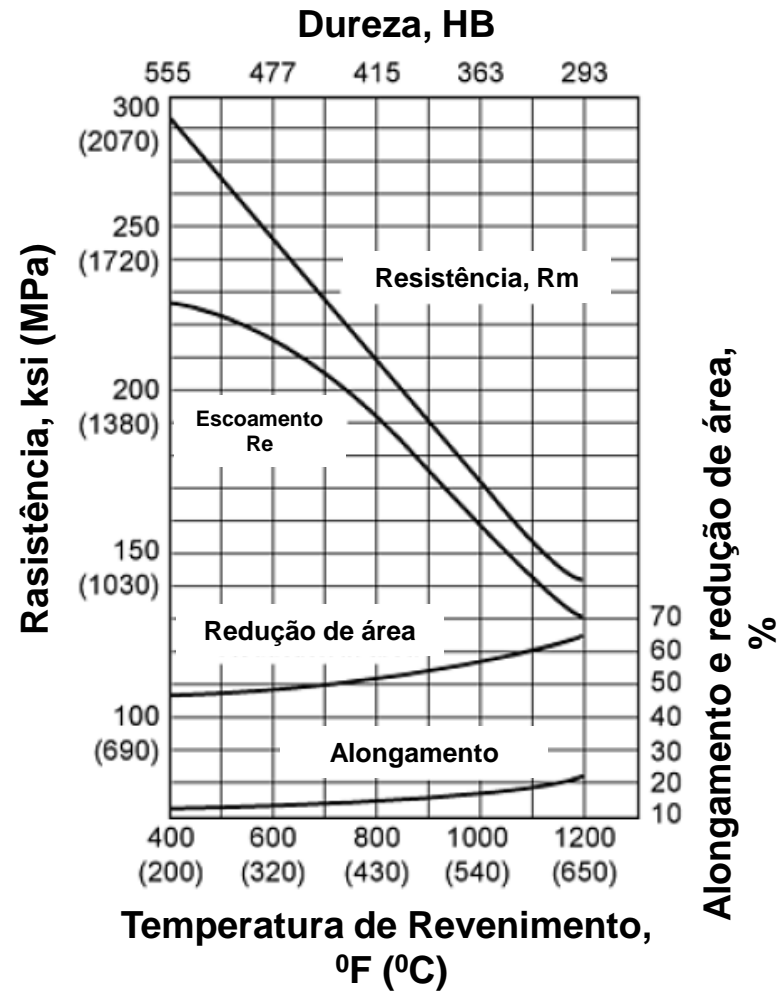
**Etapa 3:** *Resfriar rapidamente ou lentamente até a temperatura ambiente, visando evitar fenômenos de fragilização ao revenido (depende do tipo de aço).*



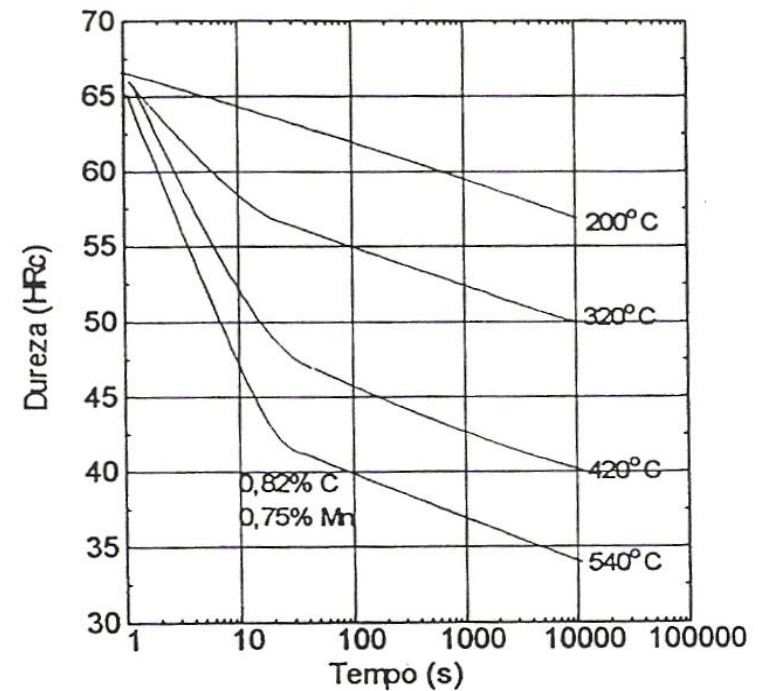


# Revenimento - Variáveis

## Temperatura



## Tempo



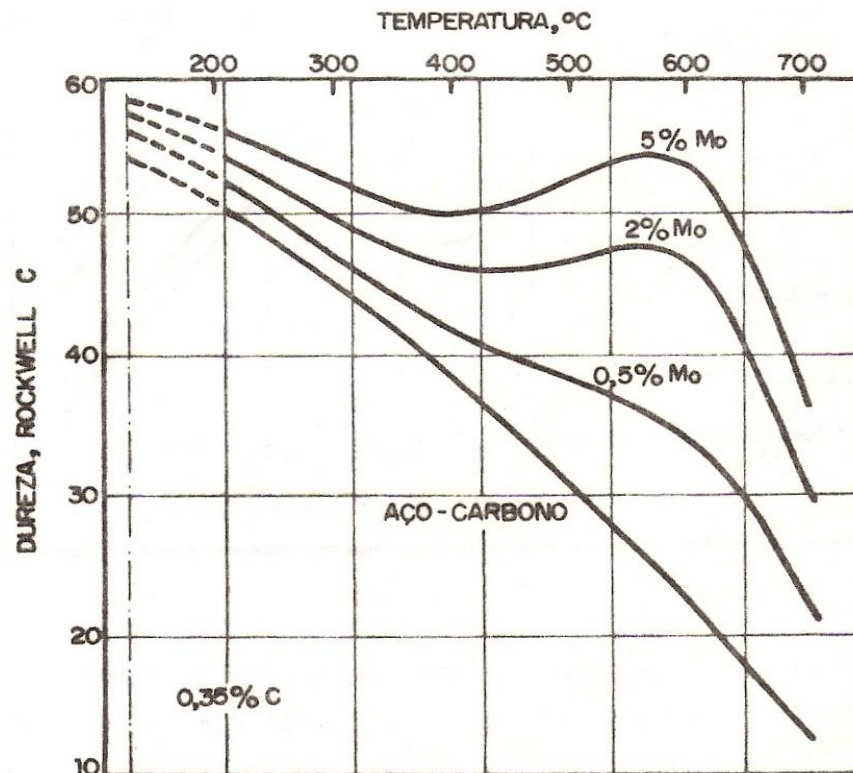




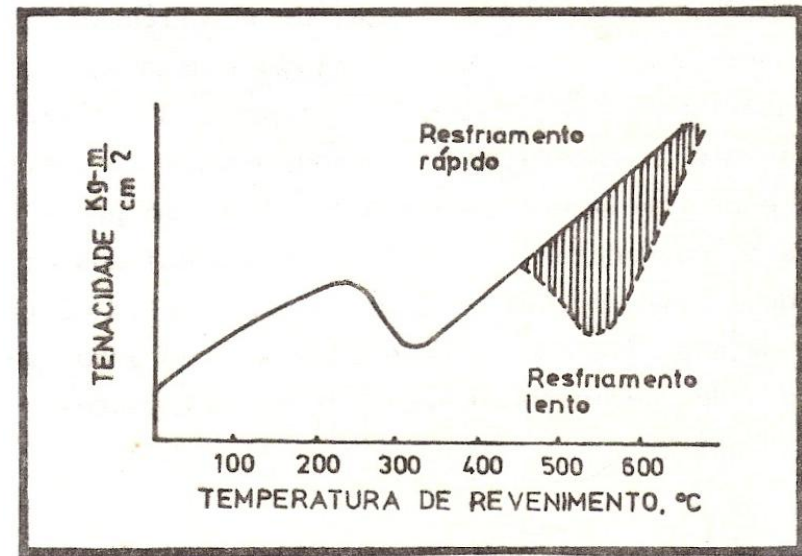
# Têmpera e Revenido dos Aços

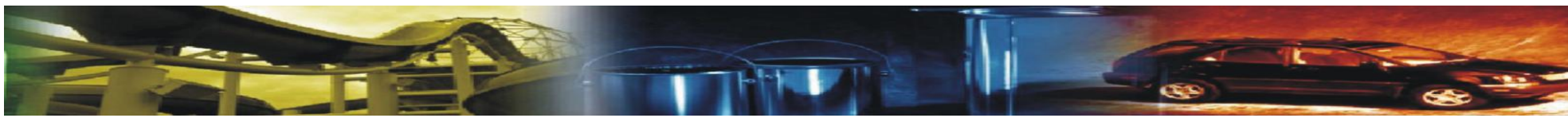
## Revenimento – Variáveis

### Composição



### Taxa de resfriamento





# **Têmpera e Revenido dos Aços**

## **Fragilização ao Revenido**

### **Fragilidade Azul:**

**Ocorre para aços carbono revenido em temperaturas ao redor de 300°C. É chamado de fragilidade Azul em decorrência da coloração azul de oxidação que os aços formam nesta temperatura.**

**Ocorre devido à endurecimento por precipitação do aço. Pode ser eliminada pela adição de Alumínio e Titânio ao aço, que exercerão efeito de aprisionamento do nitrogênio do aço, eliminando a ação deste sobre o envelhecimento do aço na temperatura mencionada.**



# **Têmpera e Revenido dos Aços**

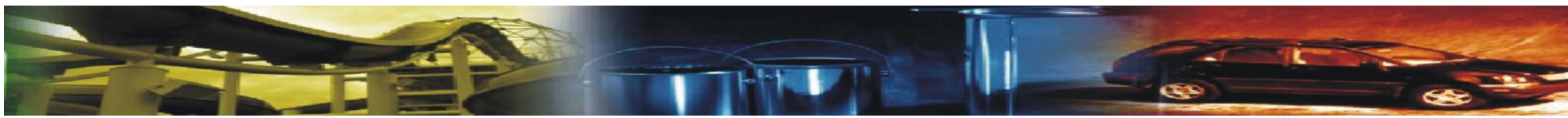
## **Fragilização ao Revenido**

### **Fragilidade ao Revenido:**

**Ocorre para aços baixa liga quando o revenimento ocorre entre 300 - 600°C) e o aço é resfriado lentamente nesta faixa de temperatura ao final do tratamento. É chamado de fragilidade ao revenido.**

**Ocorre devido à precipitação de elementos em contorno de grão austenítico, levando à fratura intergranular. Ocorre especialmente em aços contendo elementos de liga e impurezas como fósforo, estanho, antimônio e arsênio.**

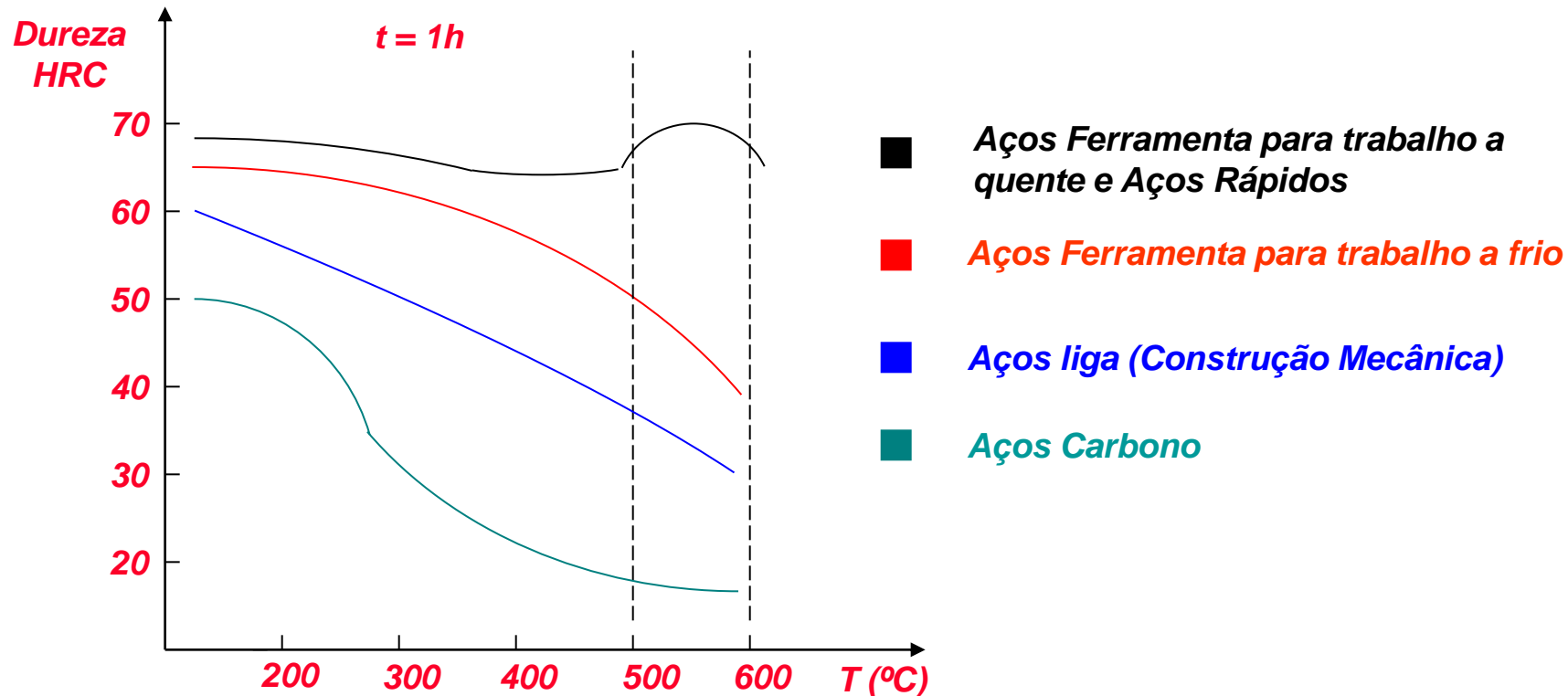
**Este tipo de fragilização pode ser eliminada pelo reaquecimento do aço na faixa descrita, submetendo-se o aço a resfriamento rápido. Este procedimento é dependente da seção do componente, sendo difícil para alguns aços de grande seção.**

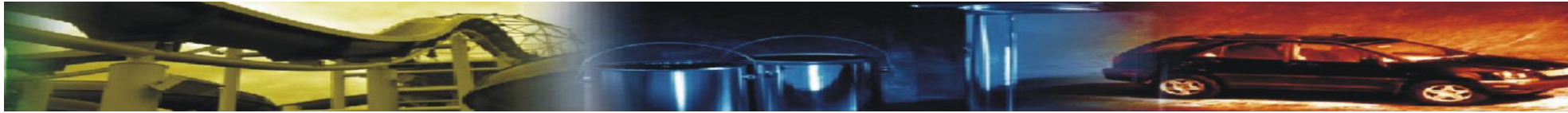


# Têmpera e Revenido dos Aços

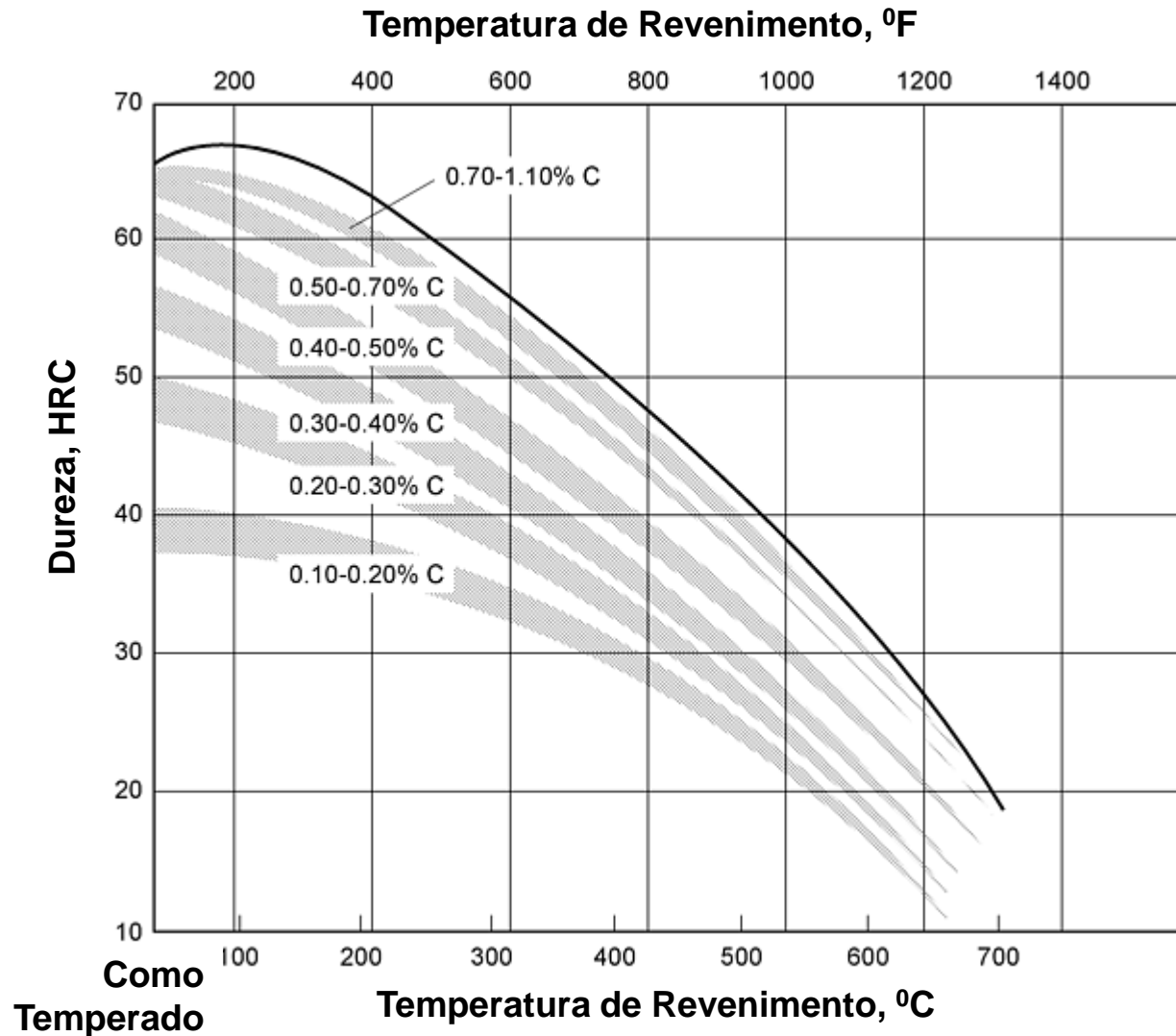
## Revenimento

Diagrama de Revenimento ESQUEMÁTICO para diversas classes de Aços





## Diagrama de Revenimento para aços carbono com variado teor de carbono, revenidos por 1h.

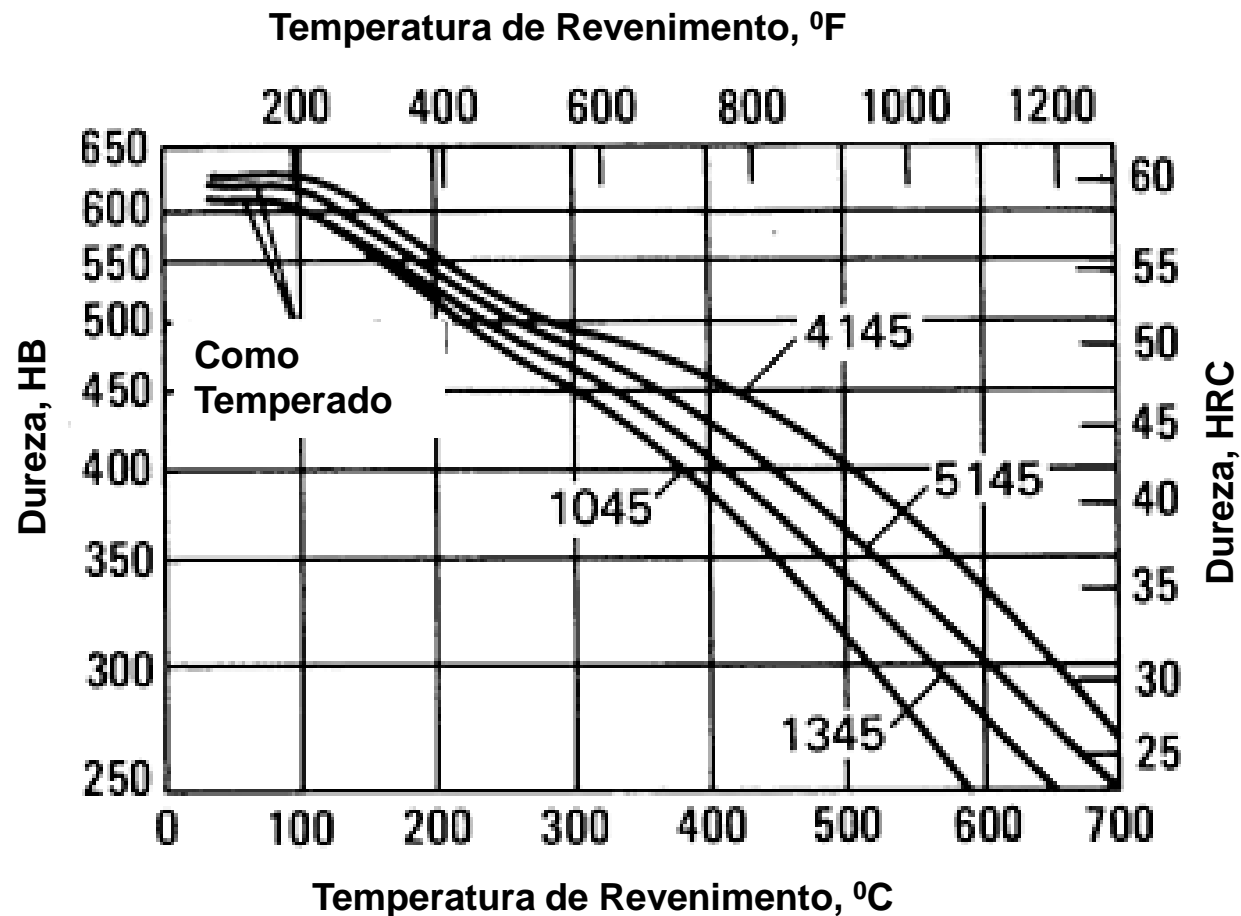


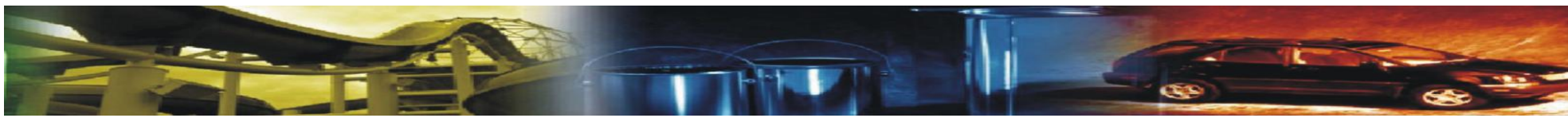




# Têmpera e Revenido dos Aços

Diagrama de Revenimento para aços carbono e aços liga contendo 0,45 wt% Carbono revenidos por 1h.





# Têmpera e Revenido dos Aços

## Revenimento

Transformações que ocorrem no Revenido em função da temperatura:

**100 – 250°C:** Formação de carbonetos epsilon e redução do teor de carbono da Martensita,

**200 – 300°C:** A austenita retida é transformada em Bainita,

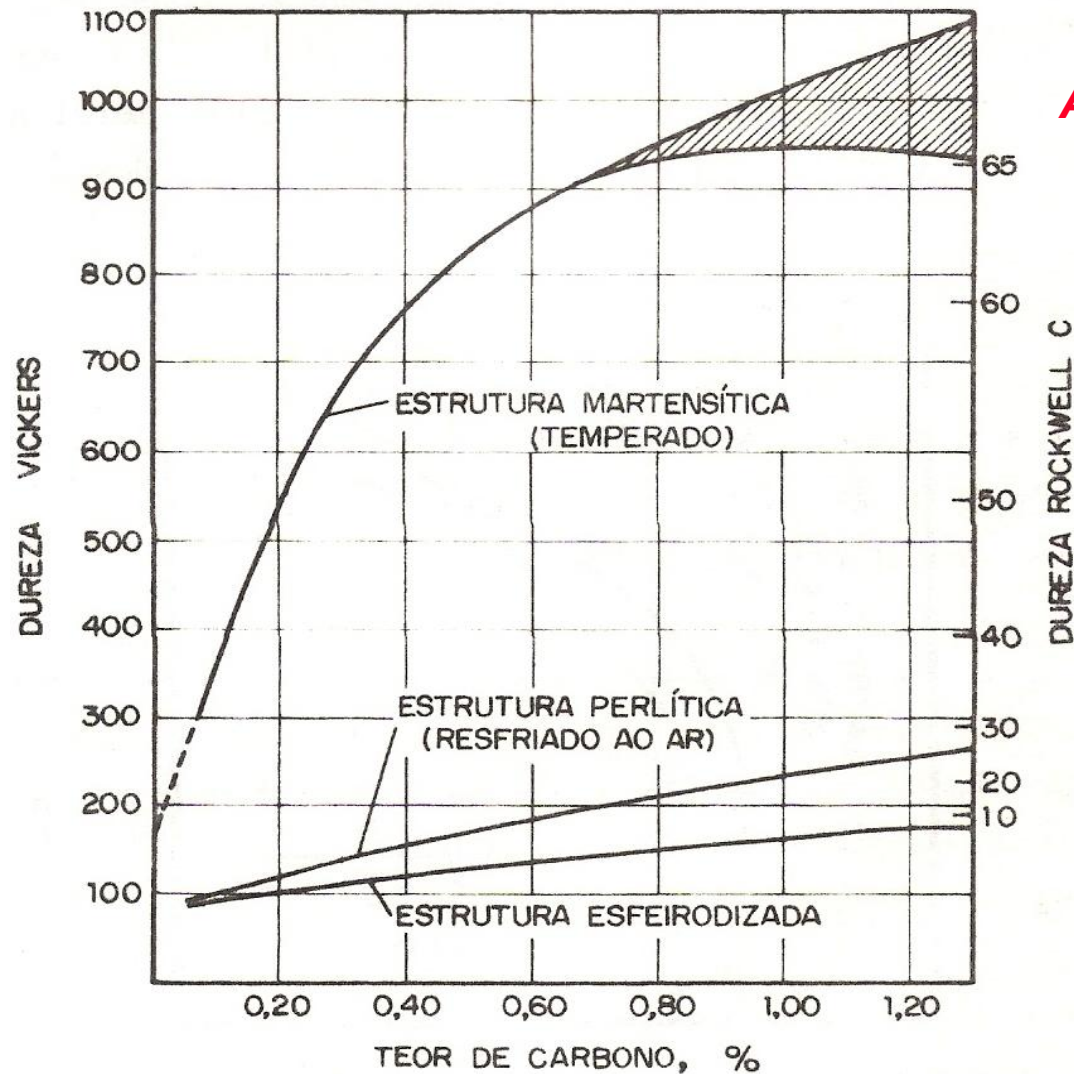
**250 – 350°C:** Transformação dos carbonetos épsilon e da Martensita de baixo carbono em cementita e ferrita,

**350 – 450°C:** Esferoidização da cementita,

**500 – 600°C:** Precipitação de carbonetos especiais (Cr / Mo) em alguns aços alta liga.



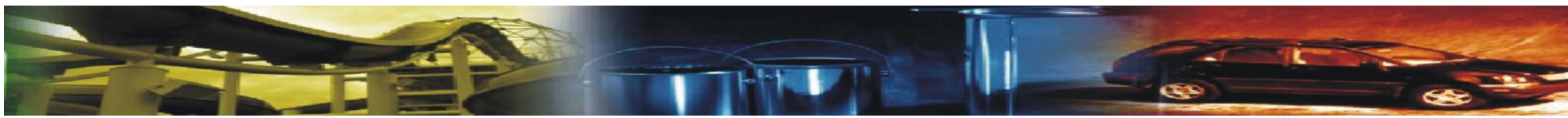
# Têmpera e Revenido dos Aços



**Aços Temperados e Revenidos**

**Aços Normalizados**

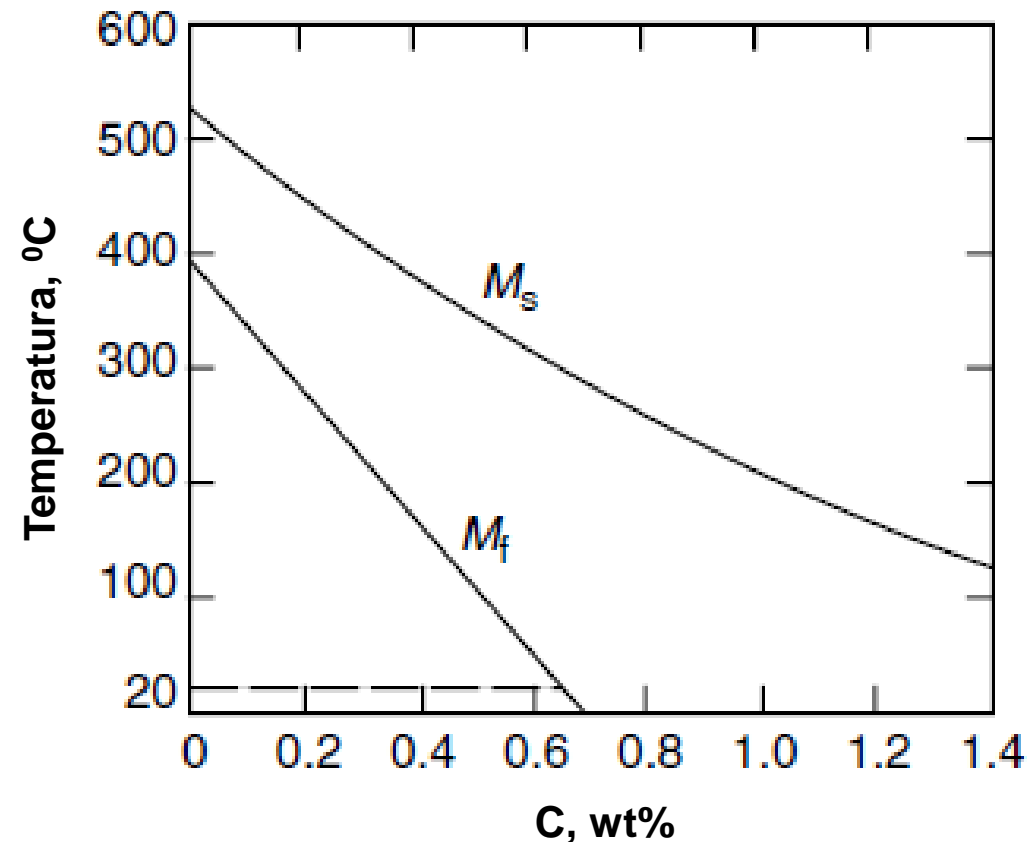
**Aços Esferoidizados**



# Têmpera e Revenido dos Aços

Tratamento Sub-zero (Eliminação da austenita retida)

A temperatura de  $M_s$  e  $M_f$  dependem do teor de carbono para aços não ligados.



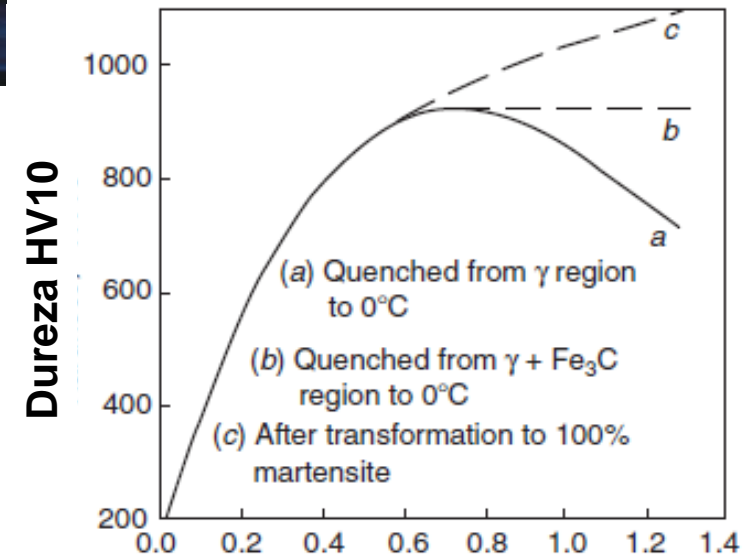


## Tratamento Sub-zero (Eliminação da austenita retida)

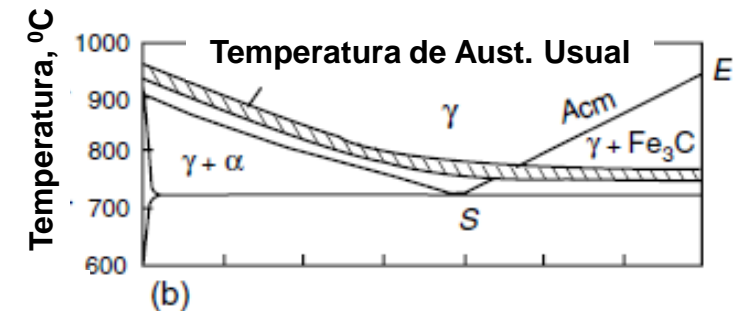
Efeito da Austenita retida na dureza de aços temperados.

A austenita retida é prejudicial para aplicações envolvendo desgaste por deslizamento, podendo gerar trincas prematuras.

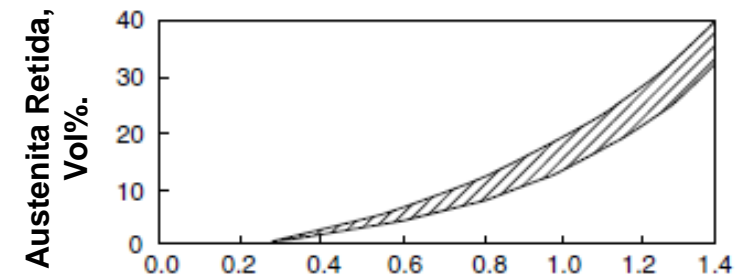
Alguns autores relatam melhora na tenacidade e ductilidade relacionada a esta fase.



(a)



(b)



(c) Teor de Carbono, wt%

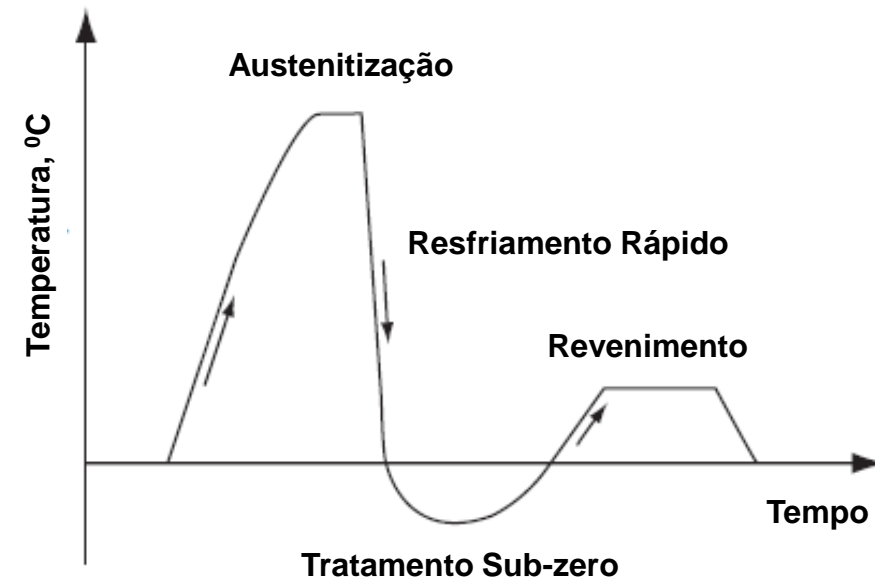


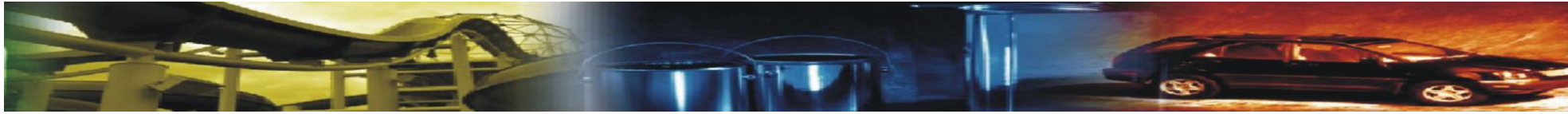


## Tratamento Sub-zero (Eliminação da austenita retida)

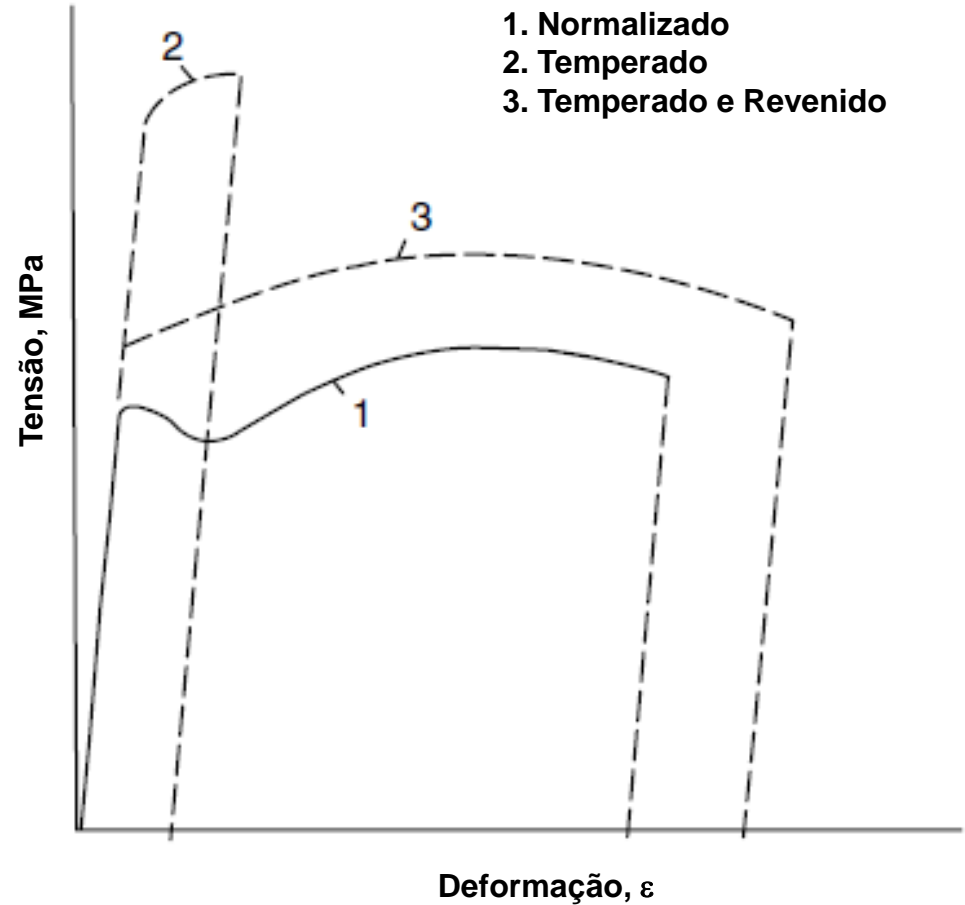
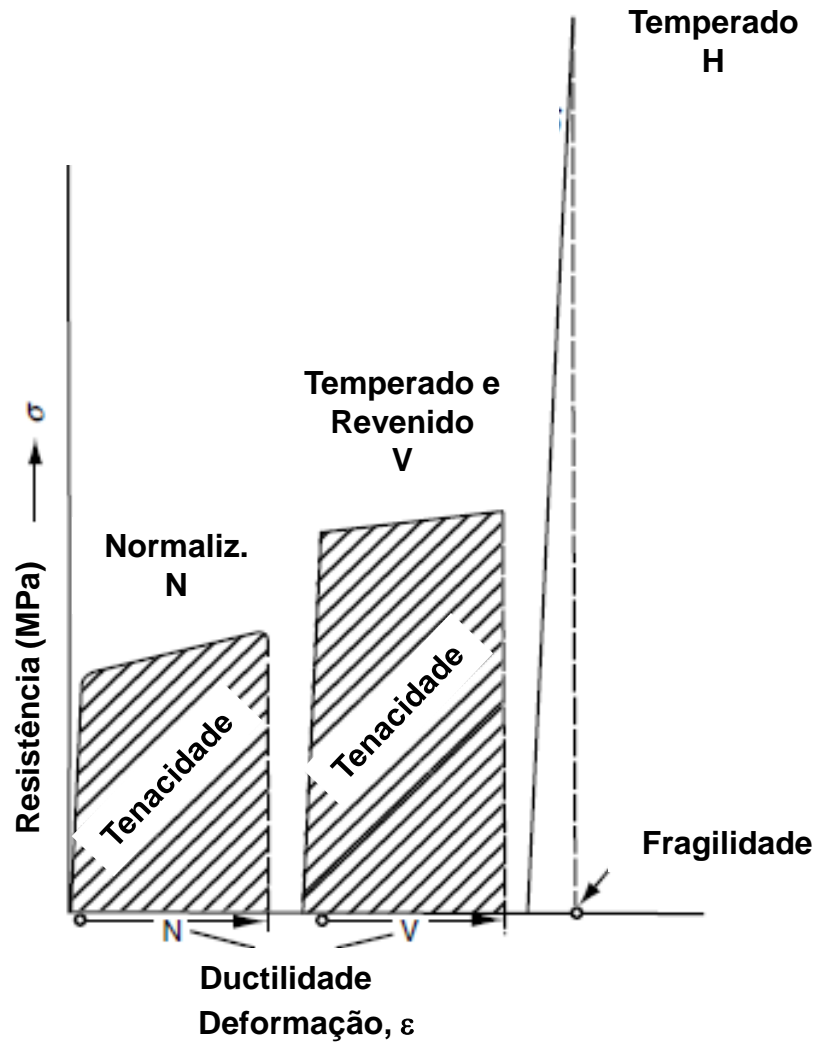
Traz benefícios já que:

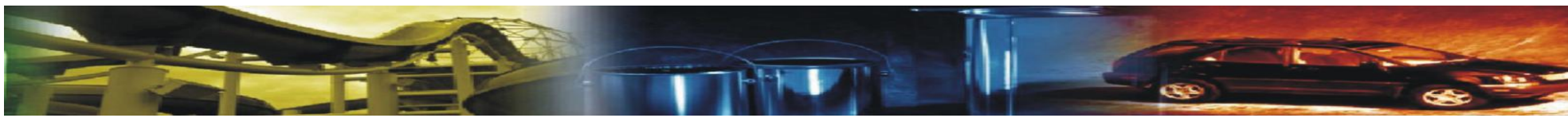
- 1- Eleva a dureza do aço,
- 2- Confere maior estabilidade dimensional,
- 3- Menor susceptibilidade ao trincamento em desgaste.





# Propriedades em função do tratamento térmico





# Martêmpera

## Definição:

Consiste em aquecer o aço até o campo austenítico, manter durante certo tempo (encharque) e, em seguida, resfriar rapidamente até pouco acima de  $M_s$ , permanecendo no patamar isotérmico por certo tempo e, em seguida, resfriar até a transformação da austenita em Martensita.

## Objetivos:

- Redução do gradiente térmico superfície-centro da peça, resultando em menor nível de empenamento,
- Redução do choque térmico no resfriamento,



# Martêmpera

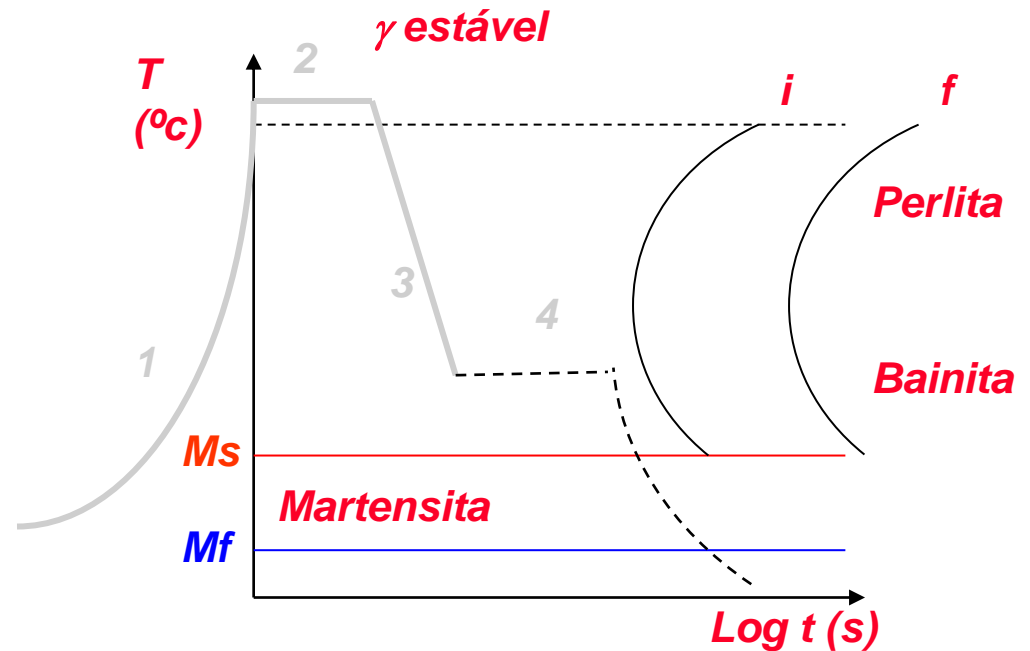
## Ciclo de Tratamento

**Etapa 1:** Aquecer o aço até a temperatura dentro do campo austenítico do diagrama de fases ( $\gamma$  estável).

**Etapa 2:** Aguardar a homogeneização da temperatura e dissolução do carbono em ferro gama - encharque.

**Etapa 3:** Resfriar rapidamente até o patamar Isotérmico.

**Etapa 4:** Manter no patamar por certo tempo e, antes da transformação em bainita, resfriar para formar martensita.

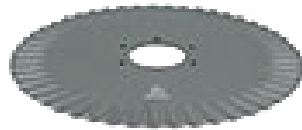




# Têmpera e Revenido dos Aços

## *Aplicações dos Aços Temperados e Revenidos*

### *Aços para Corte e Componentes Especiais*







# **Têmpera e Revenido dos Aços**

***Aplicações dos Aços Temperados e Revenidos***

***Aços para Construção Mecânica***





# Têmpera e Revenido dos Aços

## *Aplicações dos Aços Temperados e Revenidos*

*Aços para Ferramentas  
(Trabalho a Quente)*

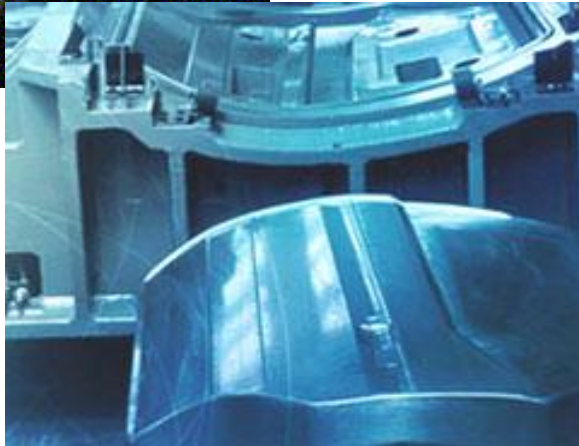
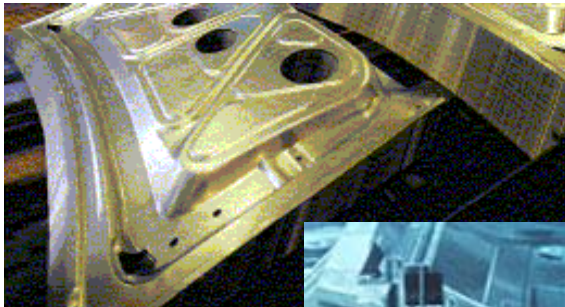




# Têmpera e Revenido dos Aços

## 4- Aplicações dos Aços Temperados e Revenidos

*Aços para Ferramentas  
(Trabalho a Frio)*



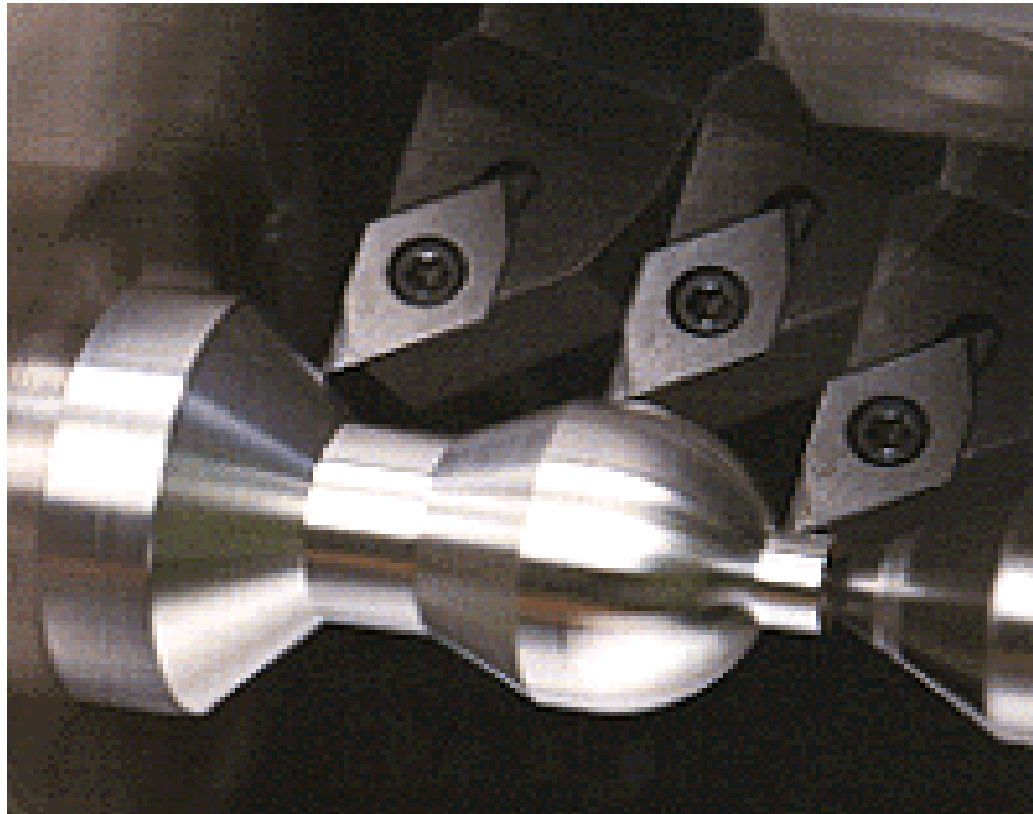




# Têmpera e Revenido dos Aços

## *Aplicações dos Aços Temperados e Revenidos*

*Aços para Ferramentas  
(Aços Rápidos)*





# Austêmpera

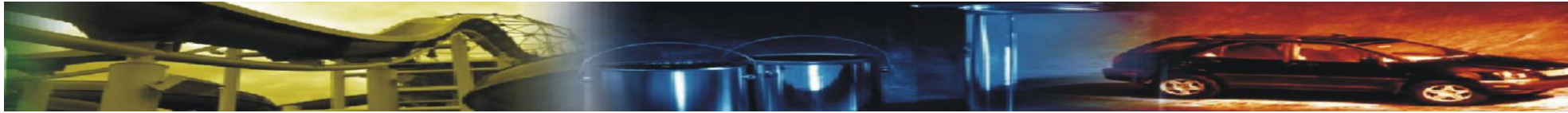
## Definição:

Consiste em aquecer o aço até o campo austenítico, manter durante certo tempo (encharque) e, em seguida, resfriar rapidamente até a faixa de 250 a 450<sup>o</sup>C, permanecendo no patamar isotérmico até a completa transformação da austenita em bainita.

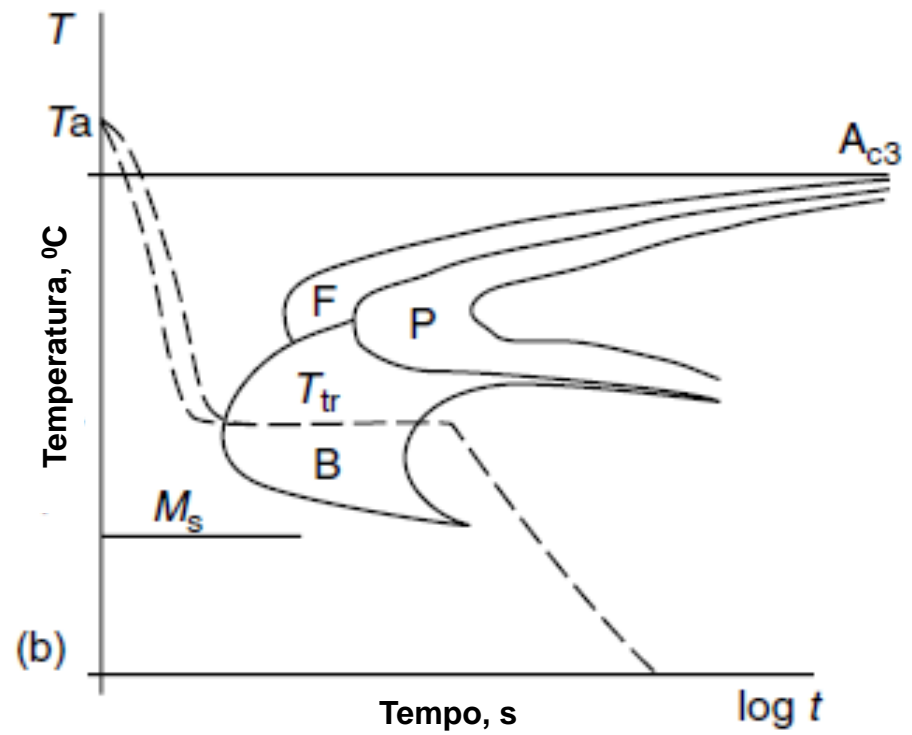
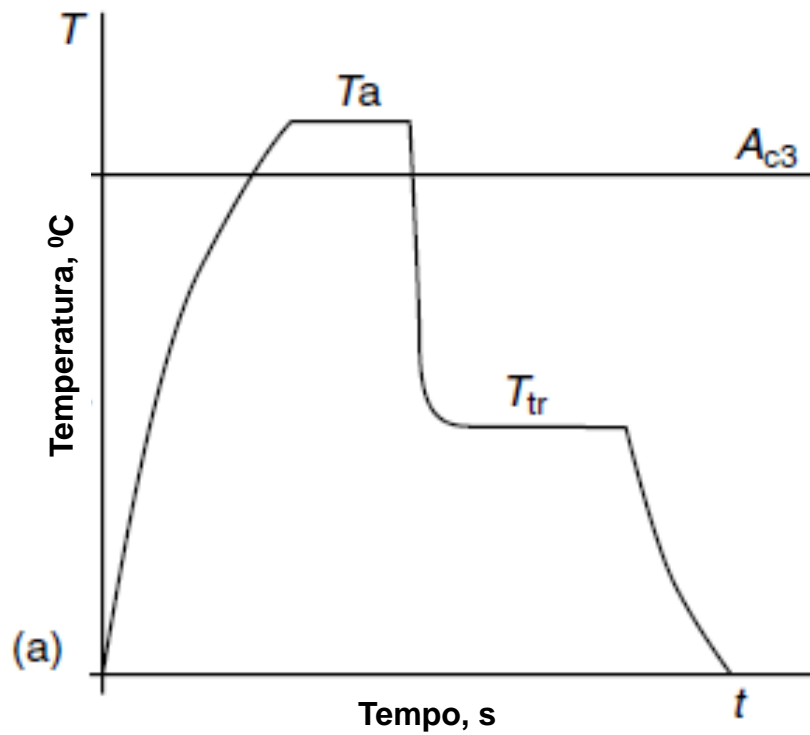
## Objetivos:

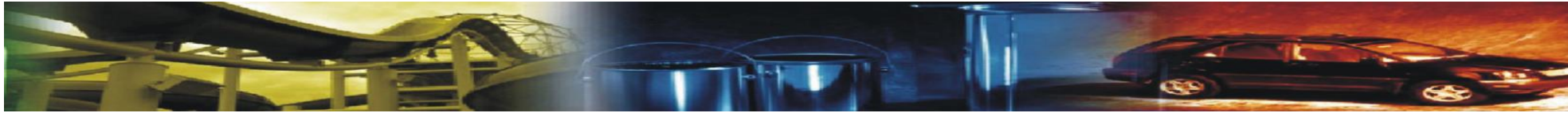
- Obter aços com maior ductilidade e tenacidade para uma dada faixa de dureza,
- Eliminar a etapa de revenimento,
- Reduzir o tensionamento de têmpera,
- Obter maior homogeneidade microestrutural.



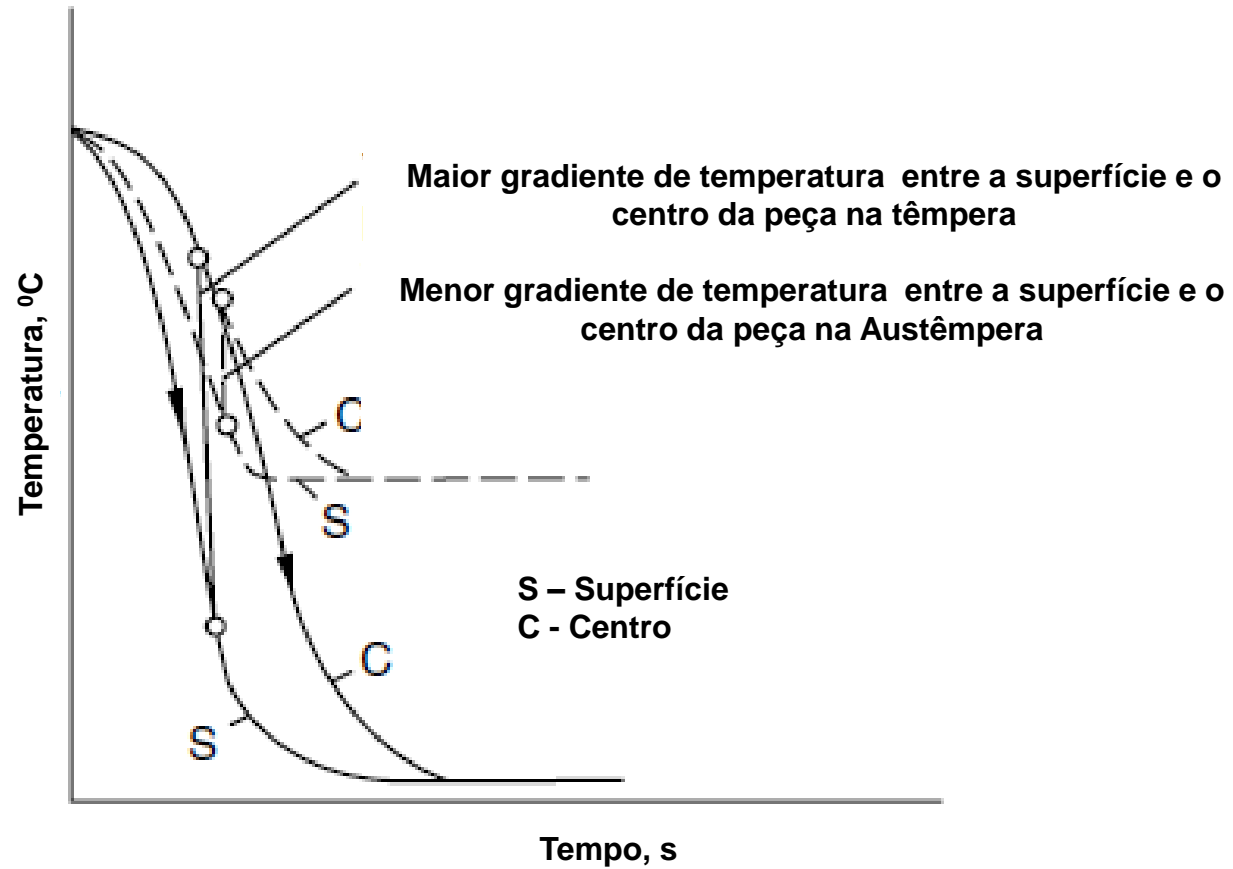


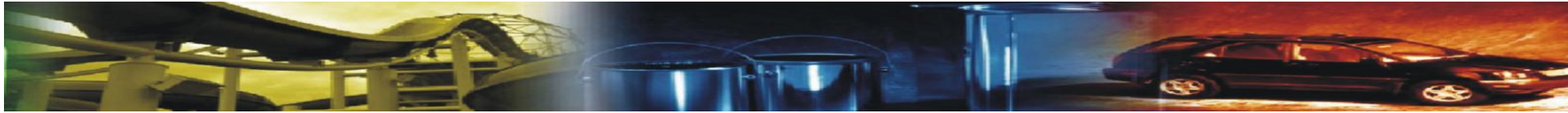
# Austêmpera



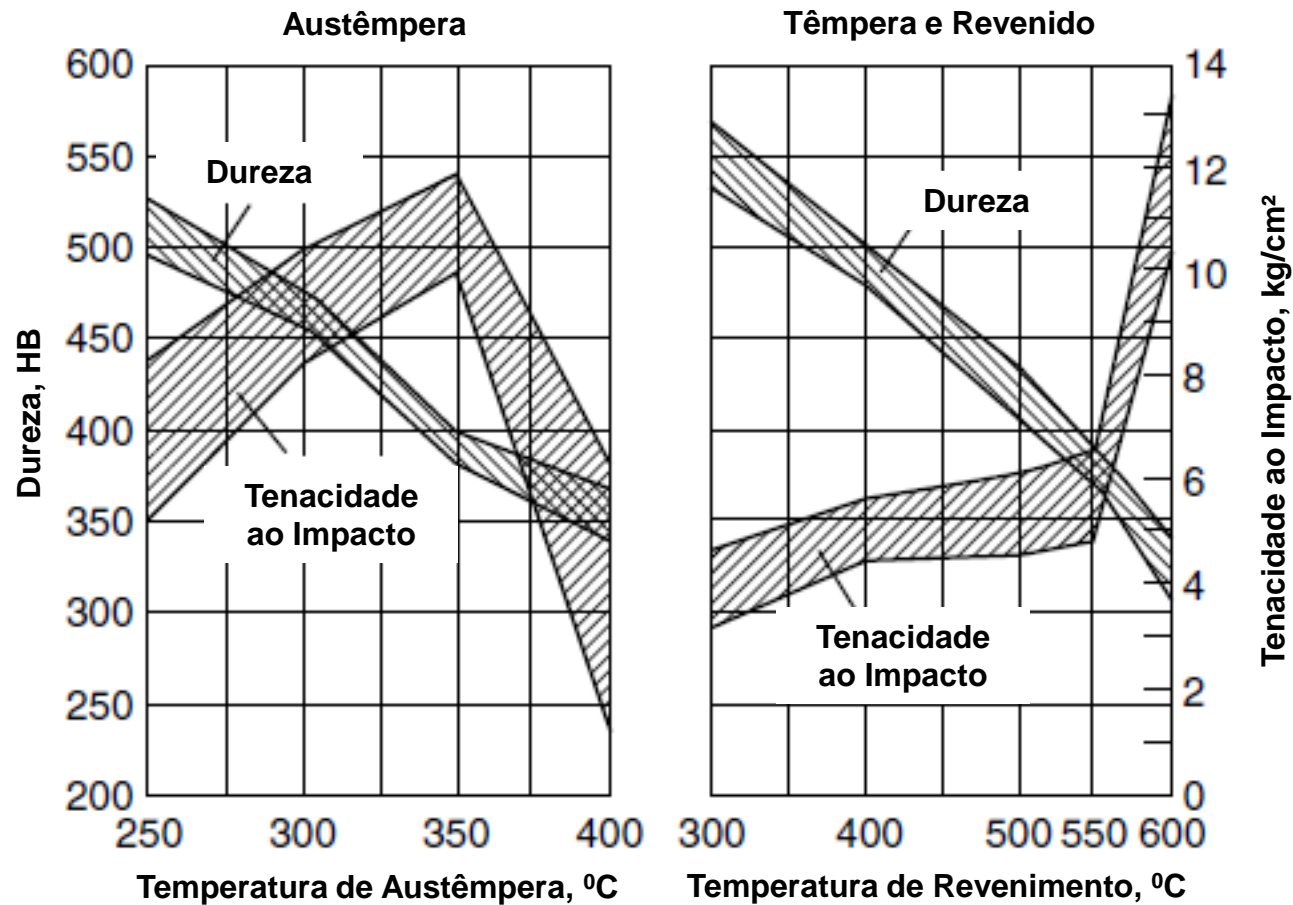


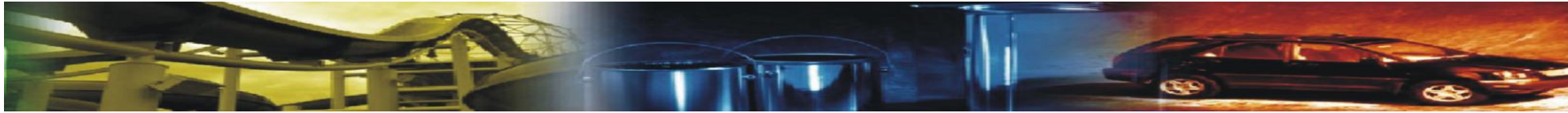
# Austêmpera





# Austêmpera





# Austêmpera

