

PGMEC – EME774

Tratamentos Térmicos dos Aços

Prof. Scheid



1- Revisão

Aços:

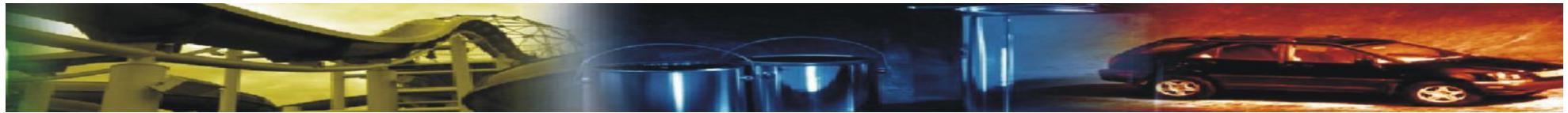
Ligas contendo ferro e carbono entre 0 e 2.11% em peso, podendo conter elementos de ligas adicionados intencionalmente e ainda impurezas.

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:

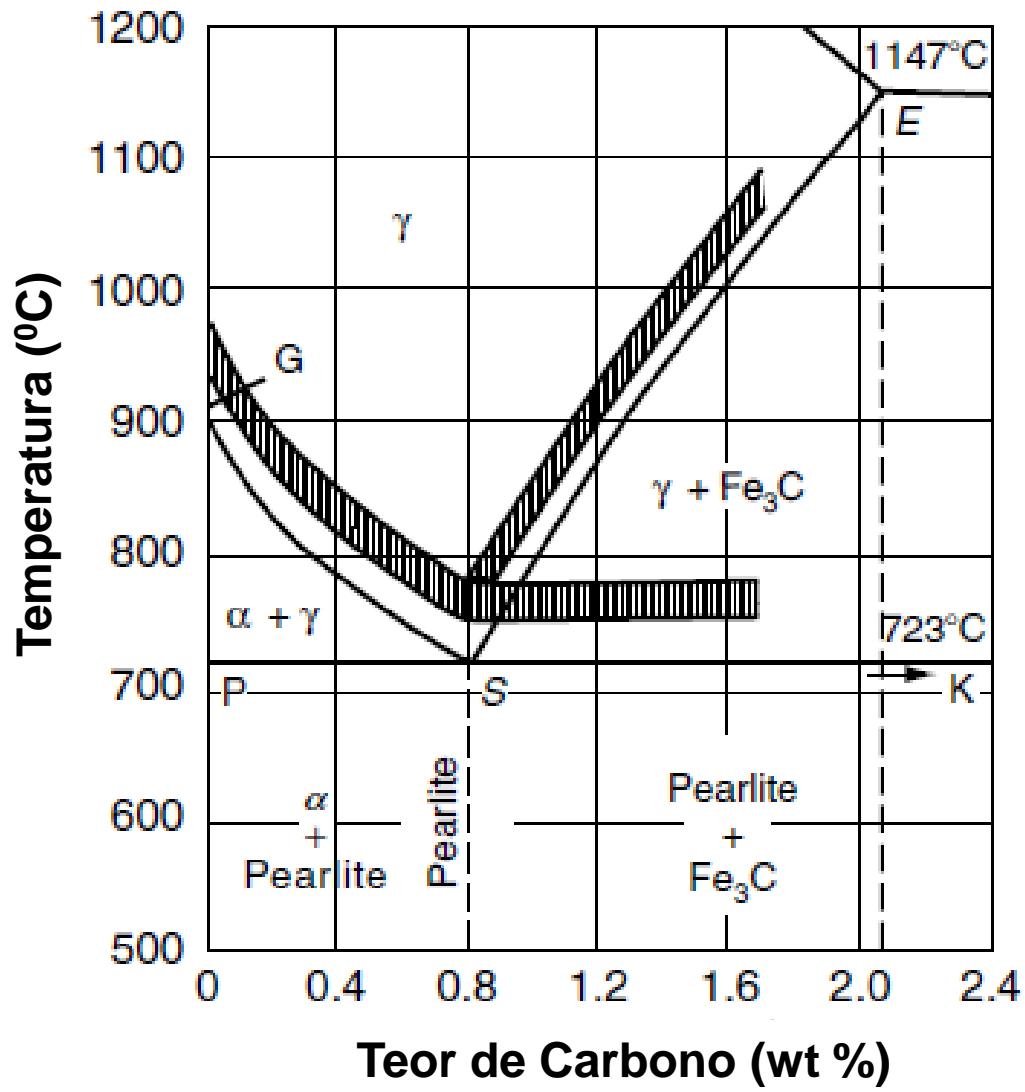
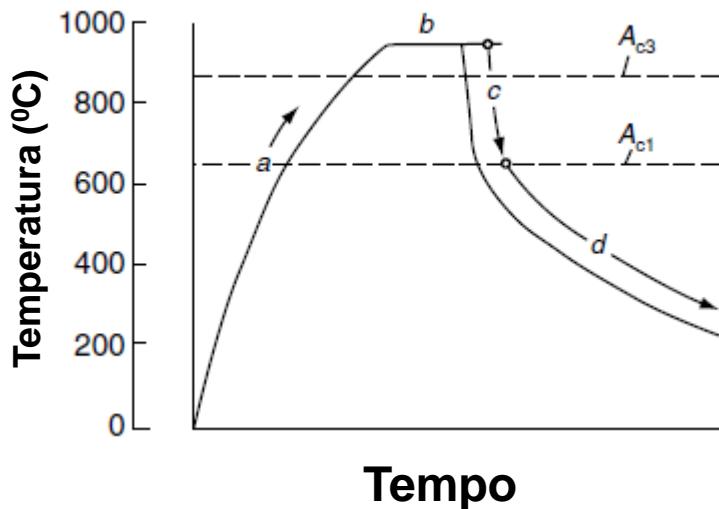
- Melhorar a usinabilidade de aços de baixo carbono,*
- Refinamento da estrutura em forjados e fundidos,*
- Homogeneização da estrutura em forjados e fundidos,*
- Alívio de tensões residuais.*



Normalização

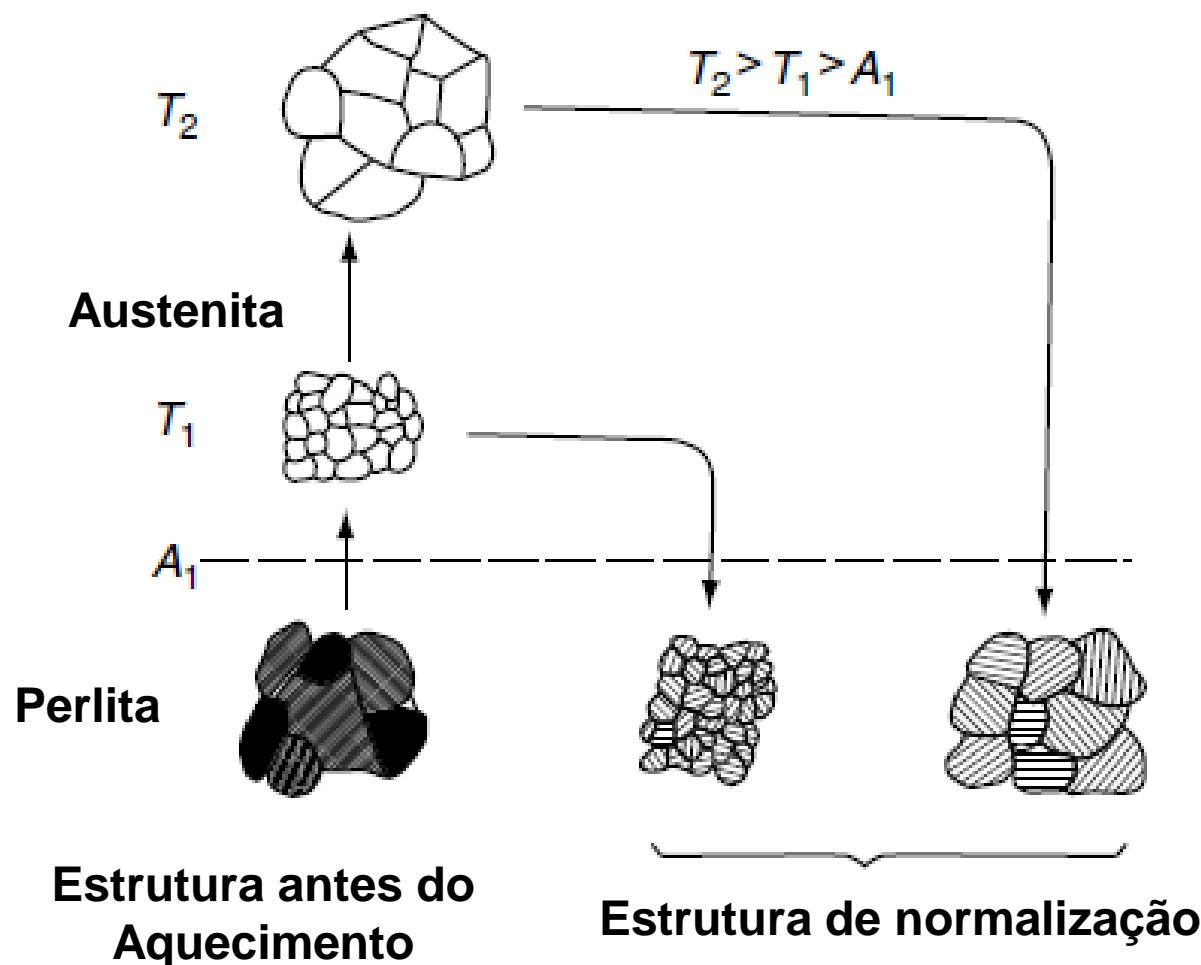
Faixas de Austenitização
Acima de SE:
Austenitização visando
Dissolução total dos
carbonetos

Ciclo de Normalização:



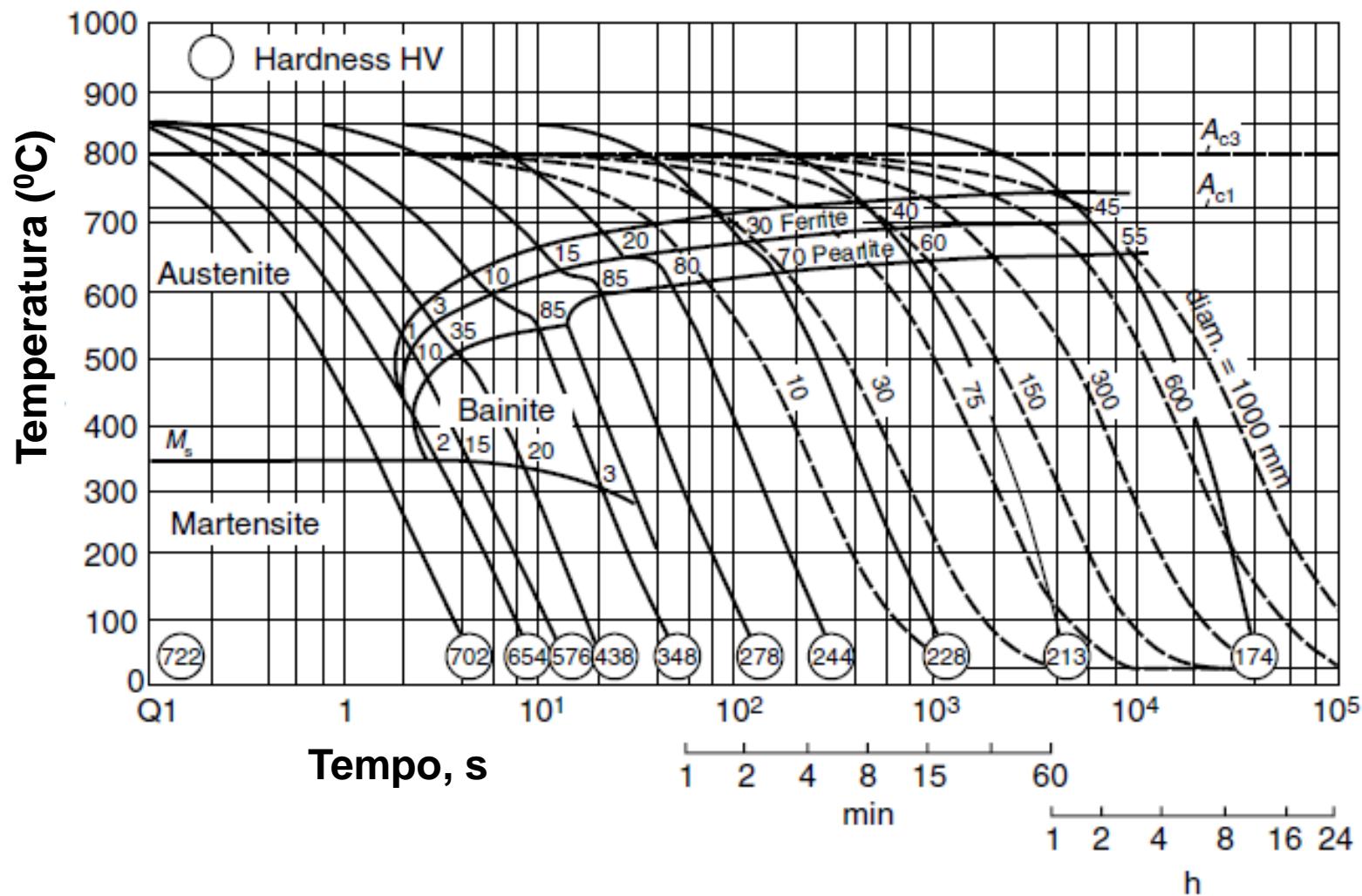


Efeito da temperatura de austenitização sobre o tamanho de grão obtido ao final da normalização. Aço Eutetóide.



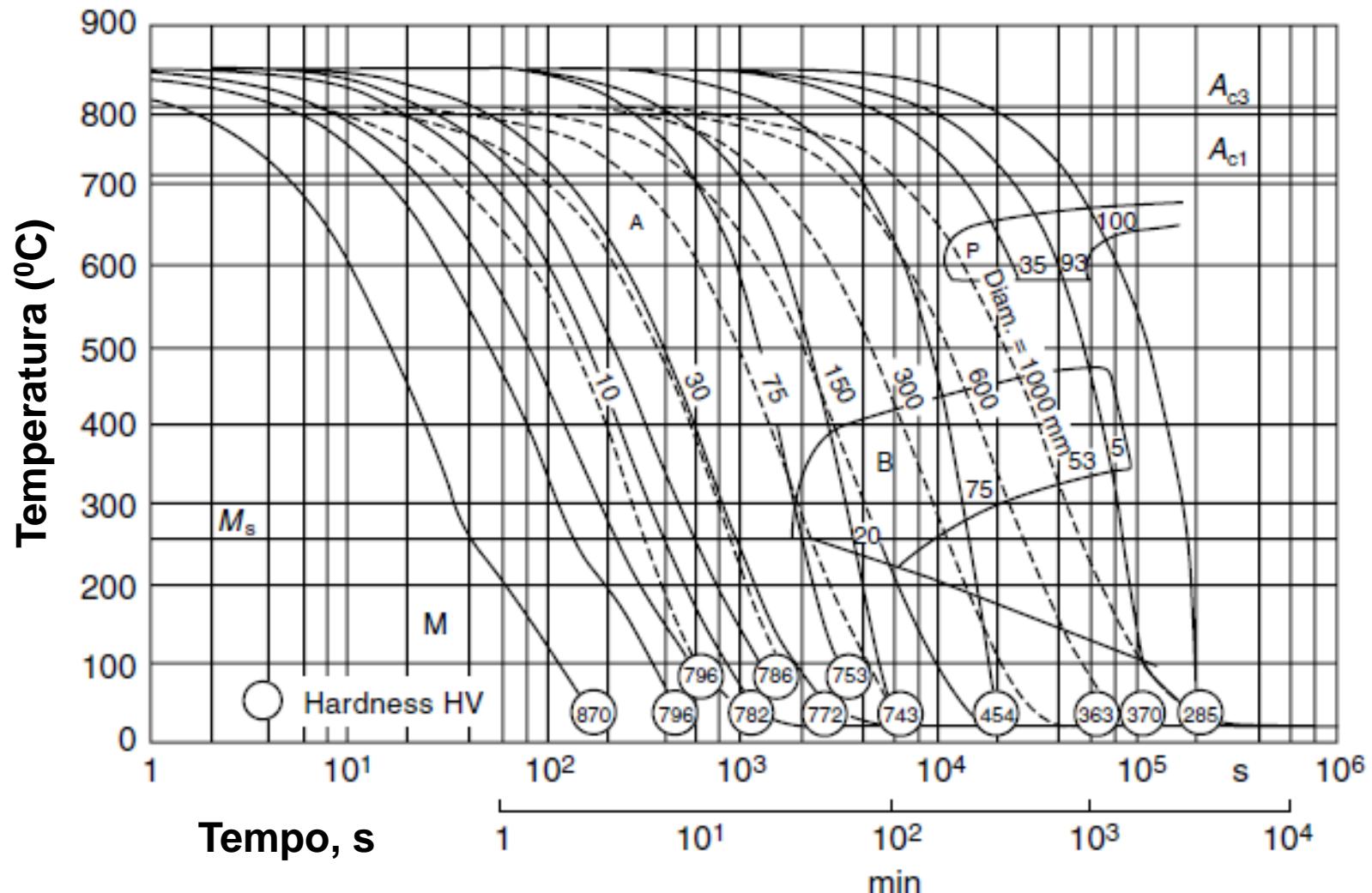


Efeito da velocidade de resfriamento na microestrutura de barras de DIN ck45 resfriado com diversas taxas de resfriamento.





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



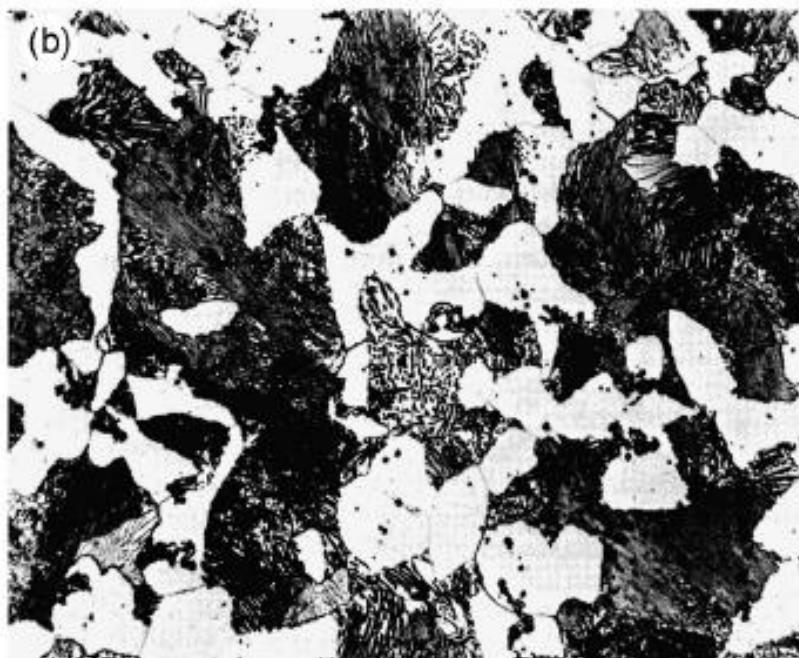


Normalização

Normalização de aço SAE 1050 Forjado:

(a) Como forjado

(b) Forjado e Normalizado



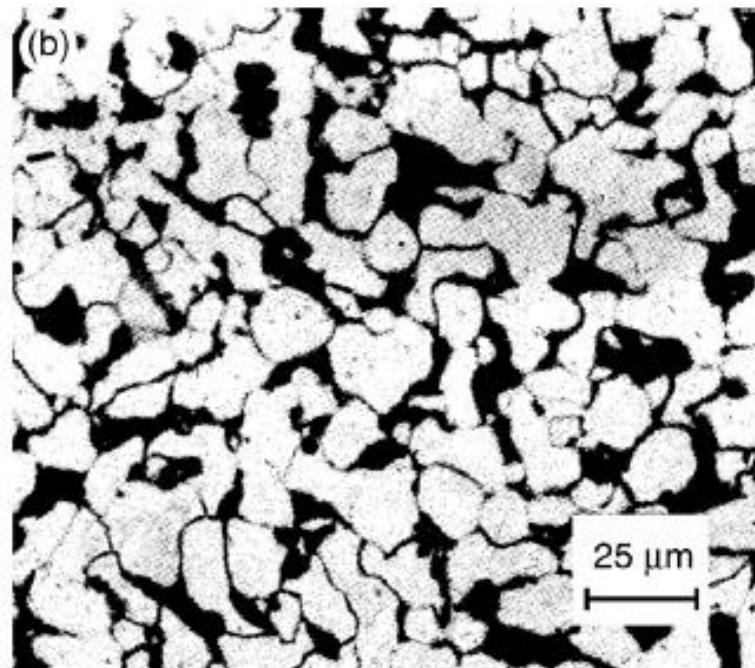
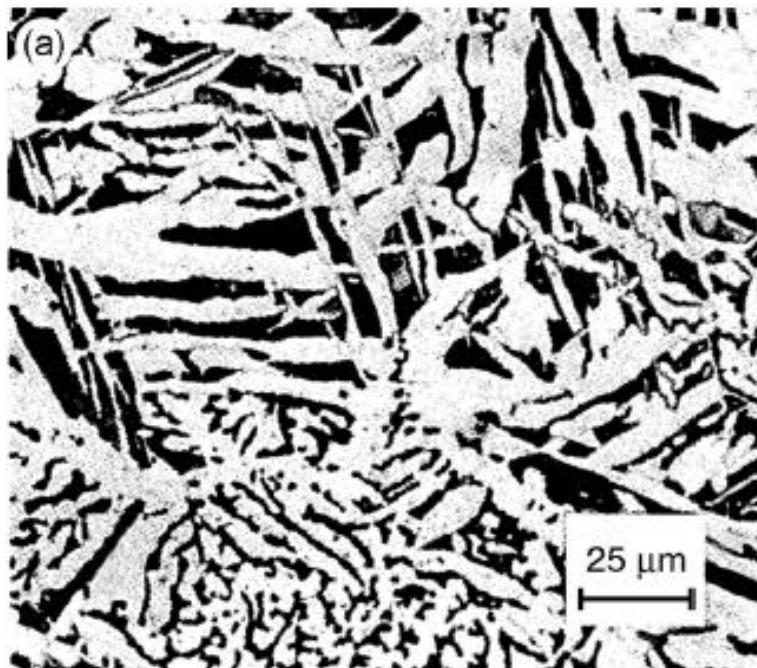


Normalização

Normalização de aço carbono fundido:

(a) Como fundido

(b) Fundido e Normalizado



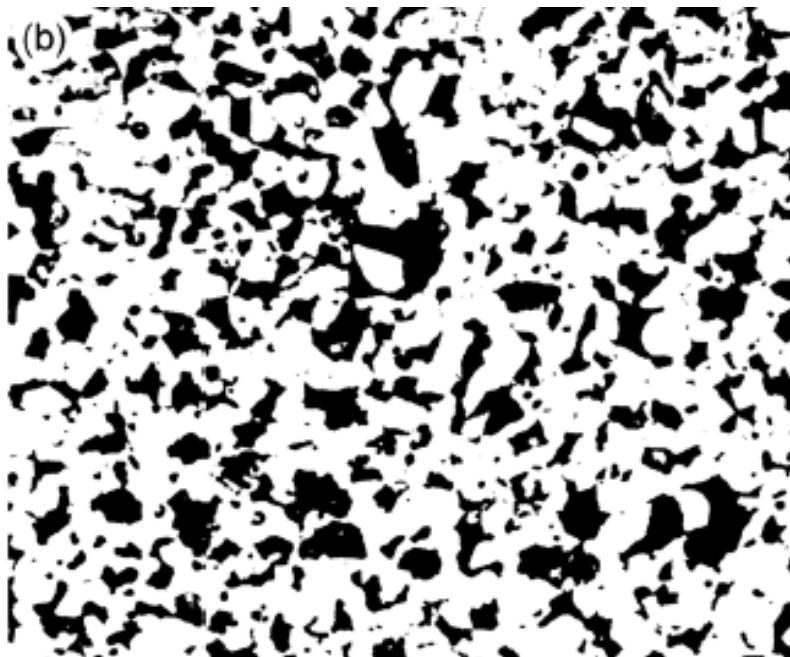


Normalização

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 Ac1 e manter nesta temperatura até a completa transformação da austenita.

Objetivos:

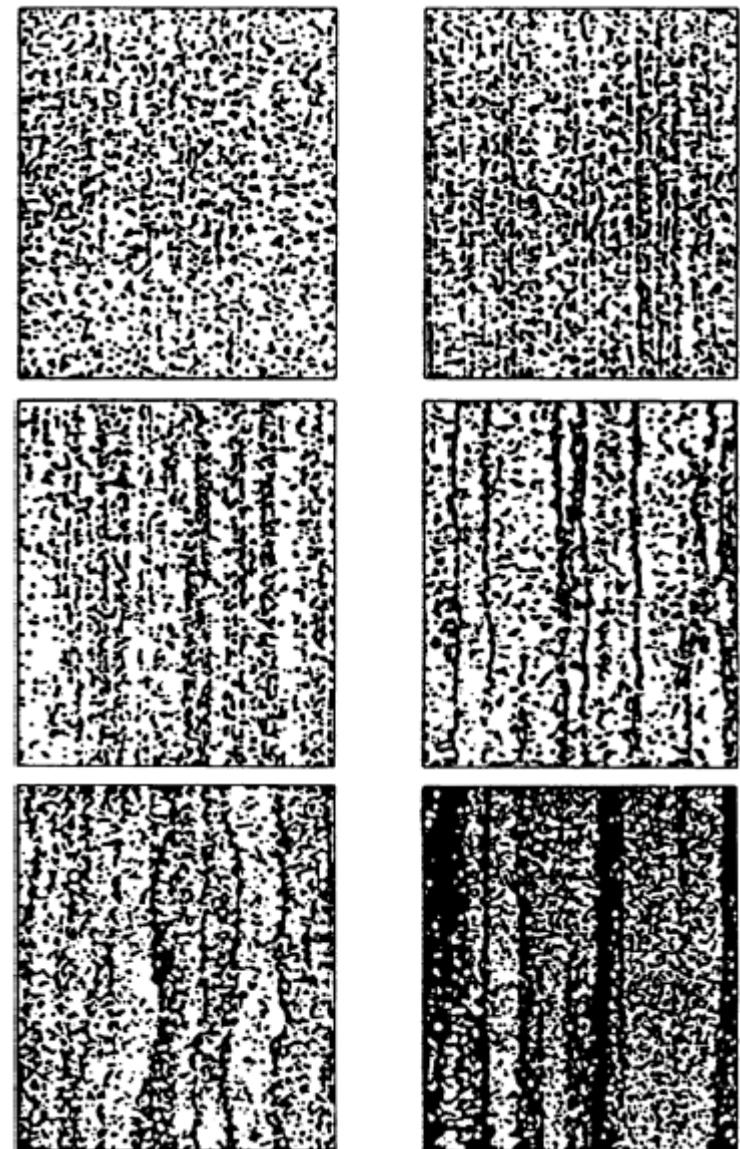
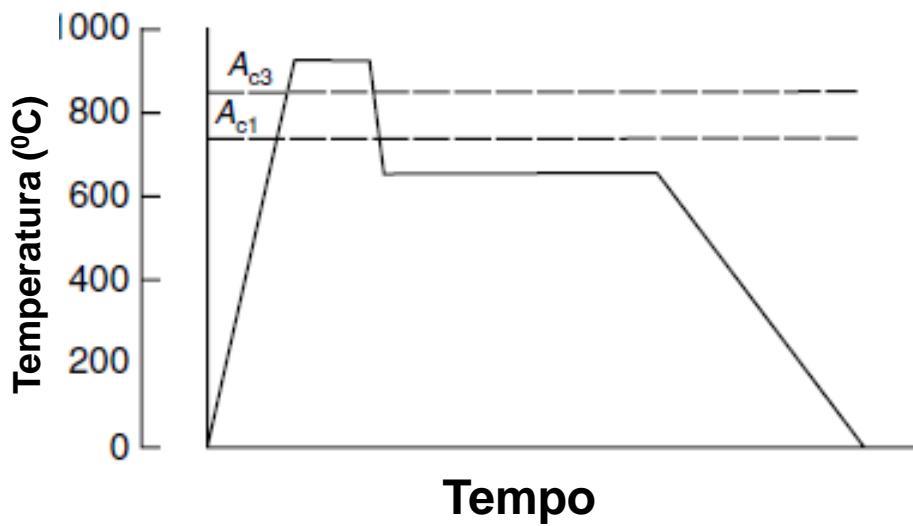
- *Redução do custo de tratamento térmico,*
- *Redução do tempo de tratamento.*



Recozimento Isotérmico

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

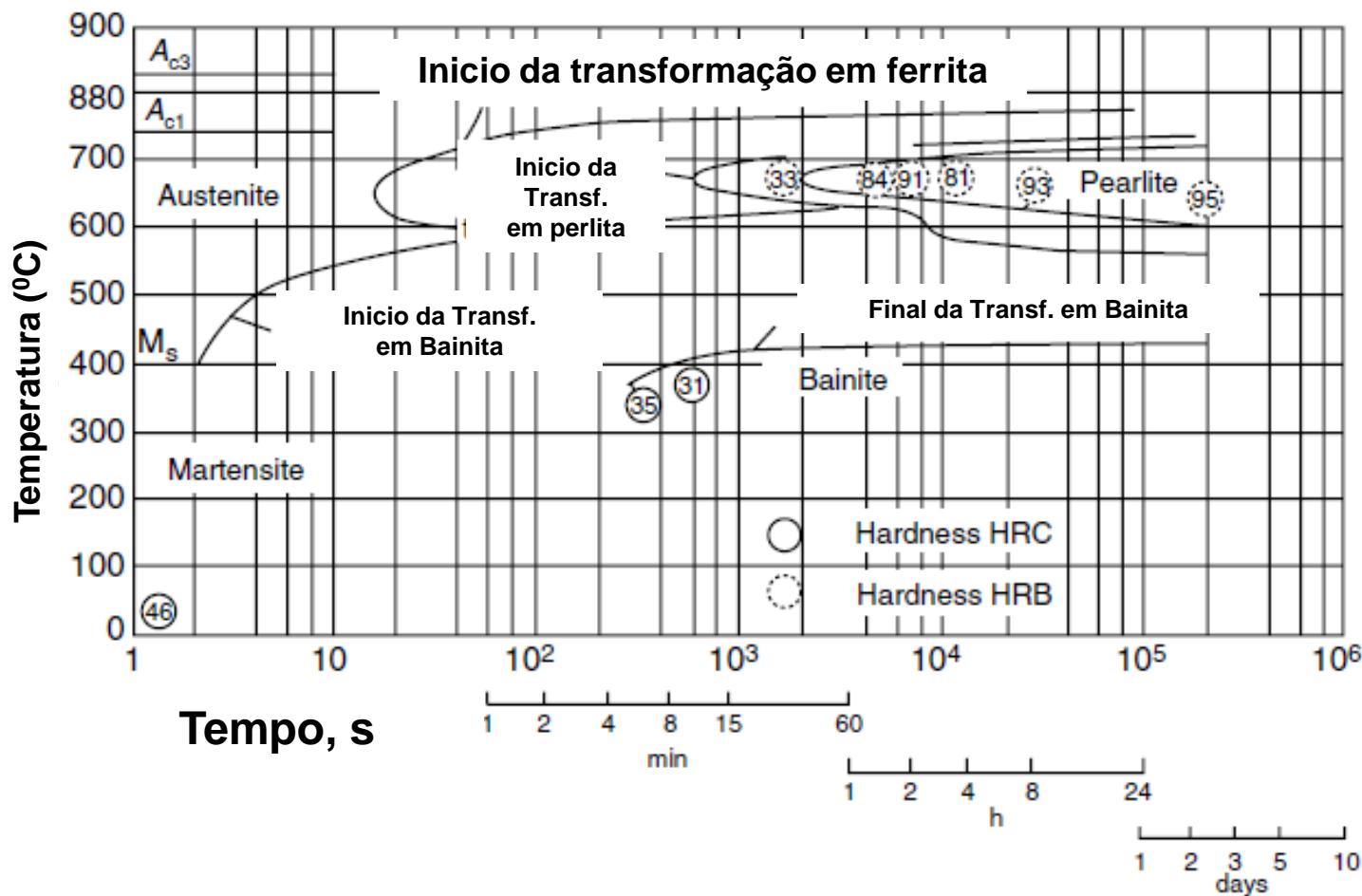
Deve-se cuidar para não resfriar a ponto de formar bainita.





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:

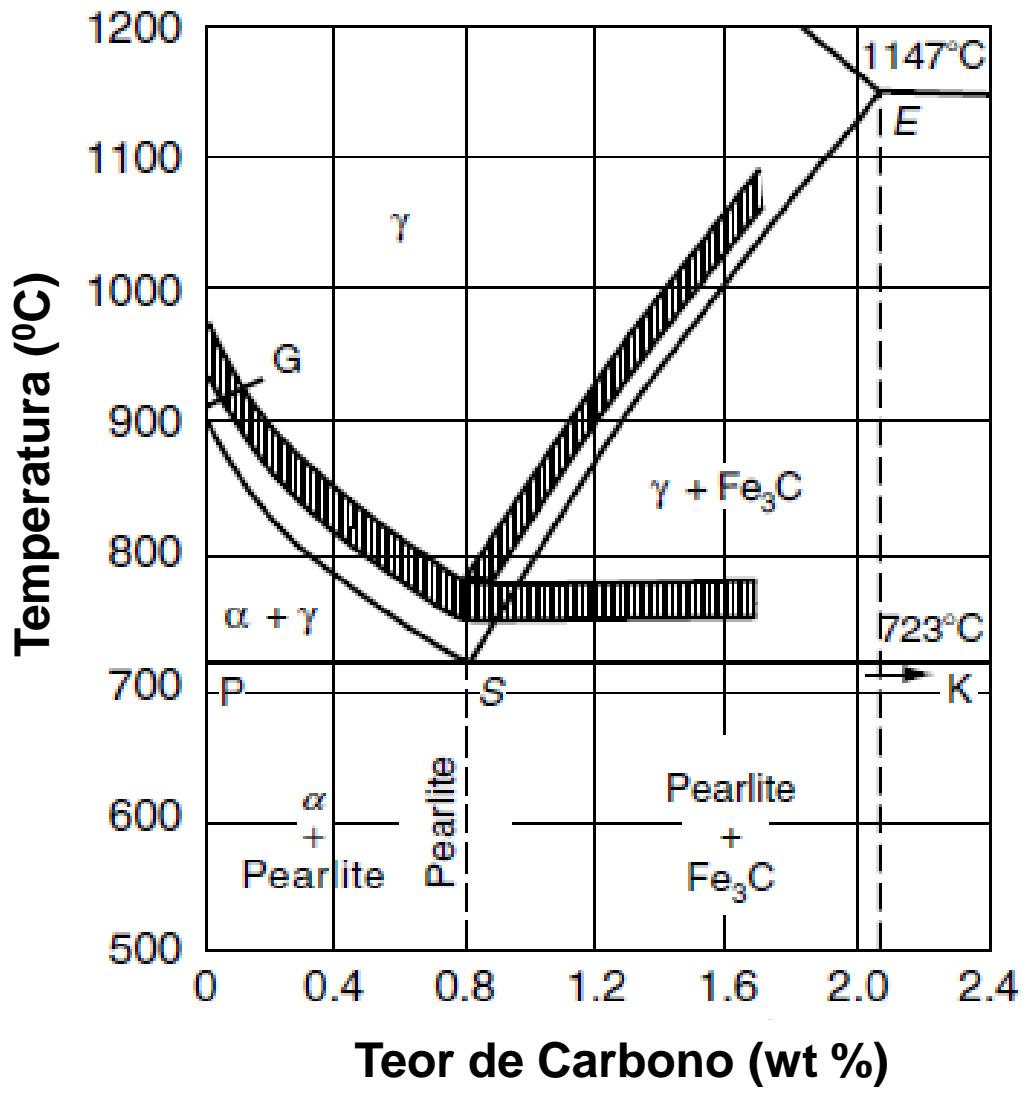
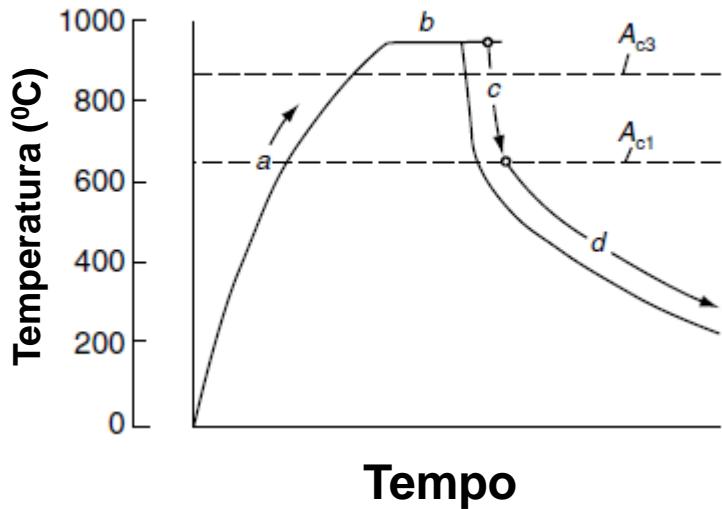
- Melhorar a usinabilidade de aços de médio e alto carbono,*
- Homogeneizar a estrutura e a distribuição de carbono nas peças.*



Recozimento Pleno

**Faixa de Austenitização:
Região intercritica SK.**

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



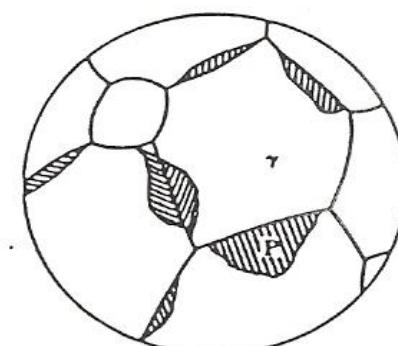
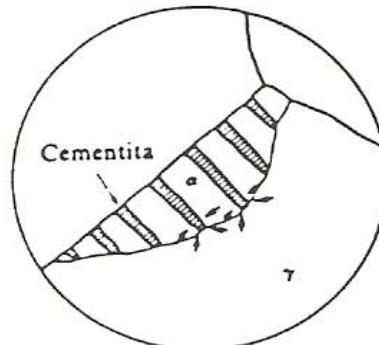
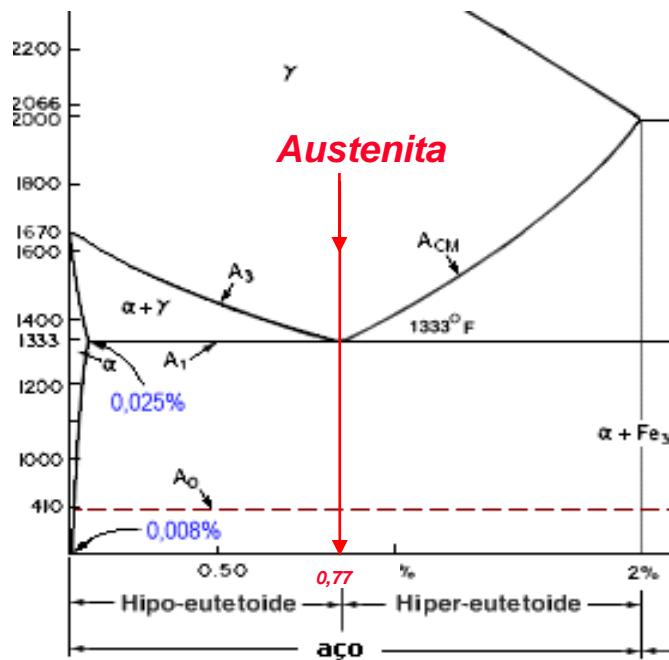


Recozimento Pleno ~ Condições Equilíbrio

- Diagrama de Fase - Fe-Fe₃C

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 Ac1 (723°C).

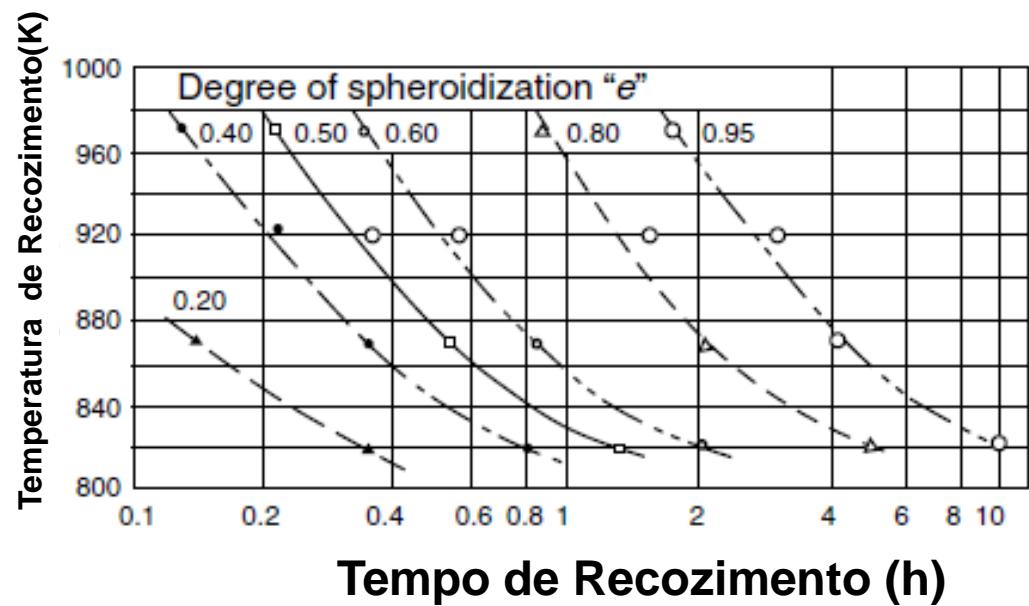
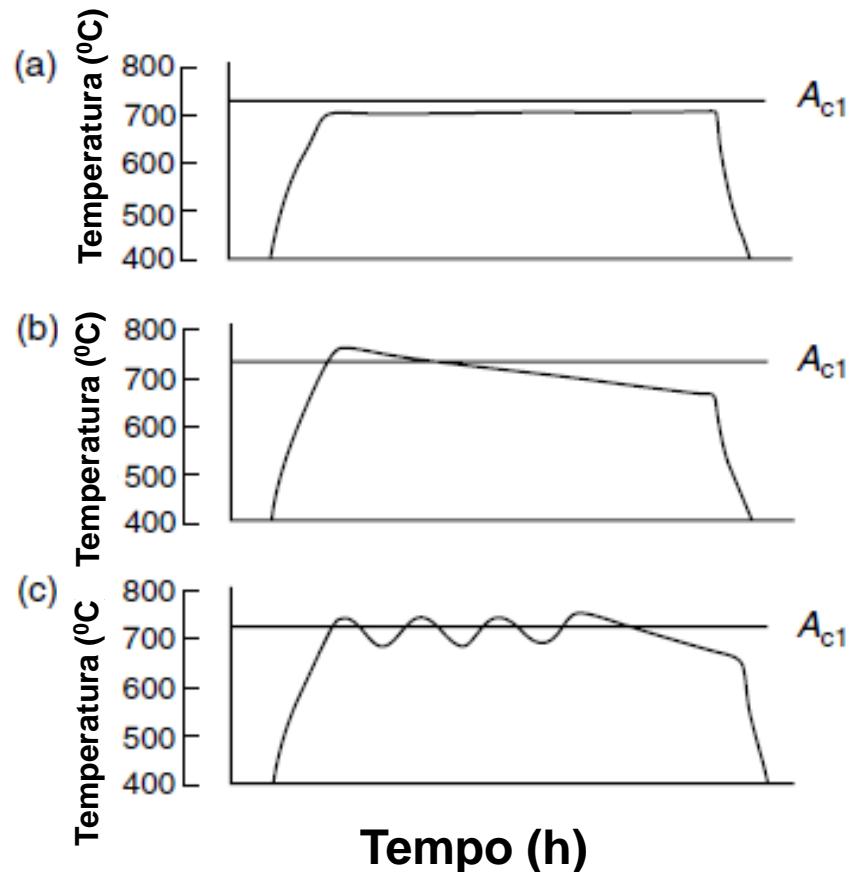
Objetivos:

- *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

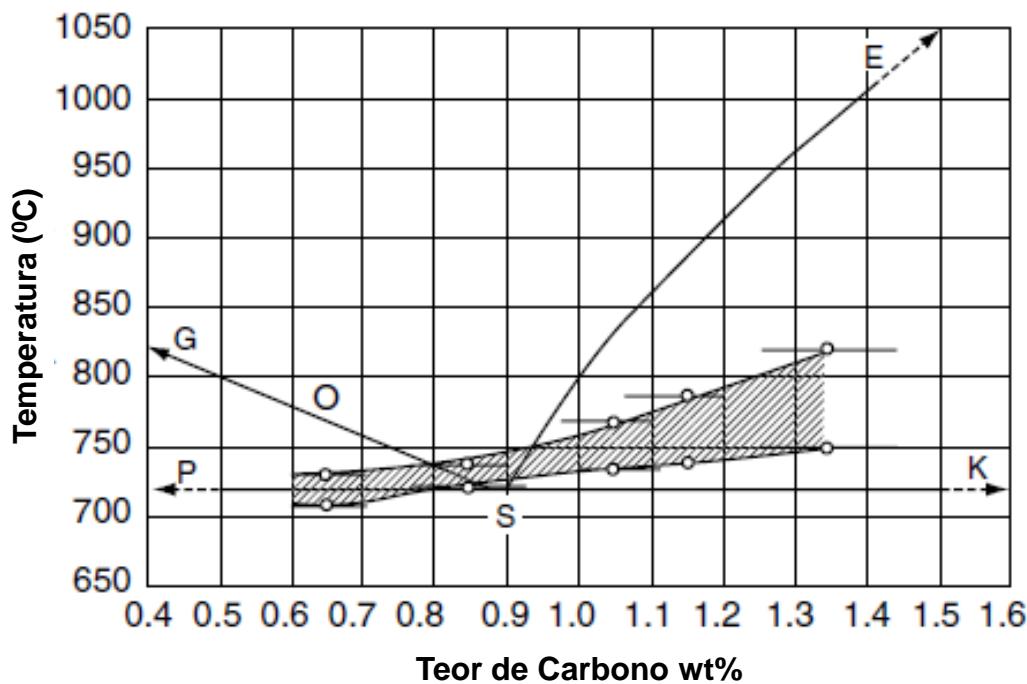




Recozimento de Esferoidização

Faixa de Temperatura Esferoidização

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

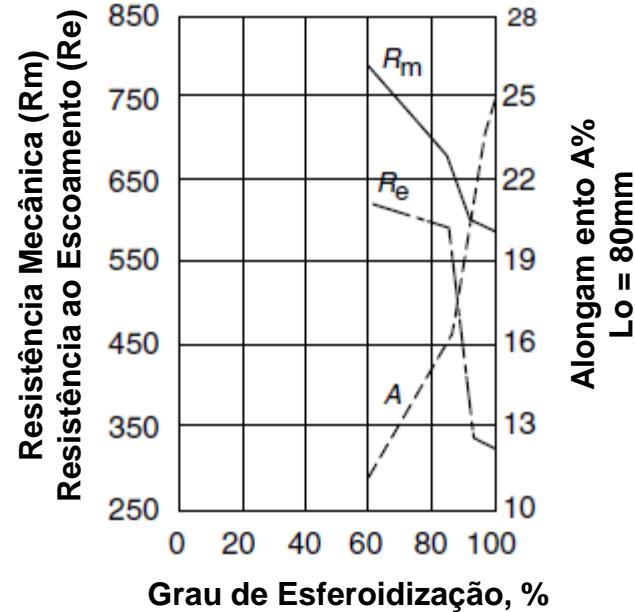
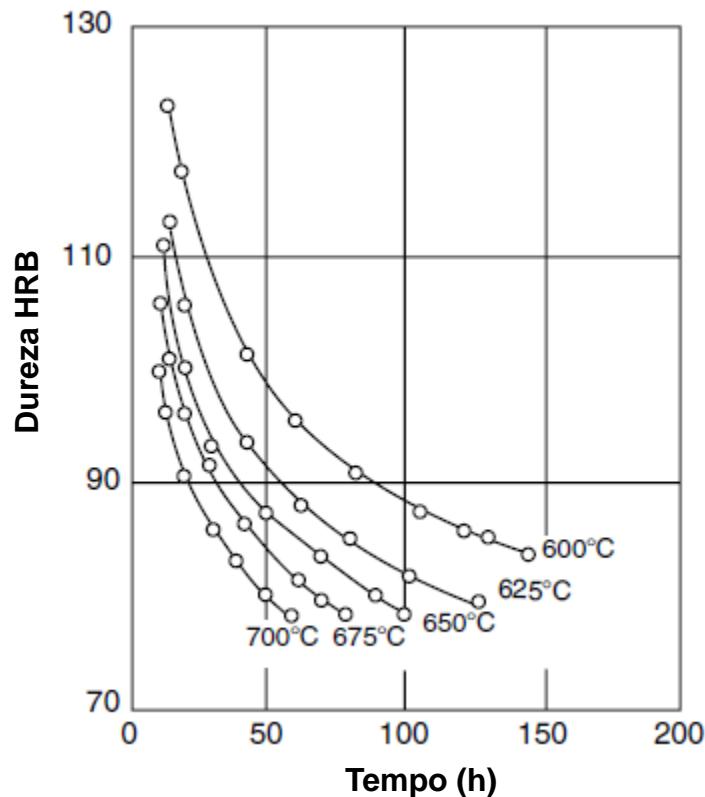




Recozimento de Esferoidização

Propriedades dos aços esferoidizados:

SAE 1090



DIN C75



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.

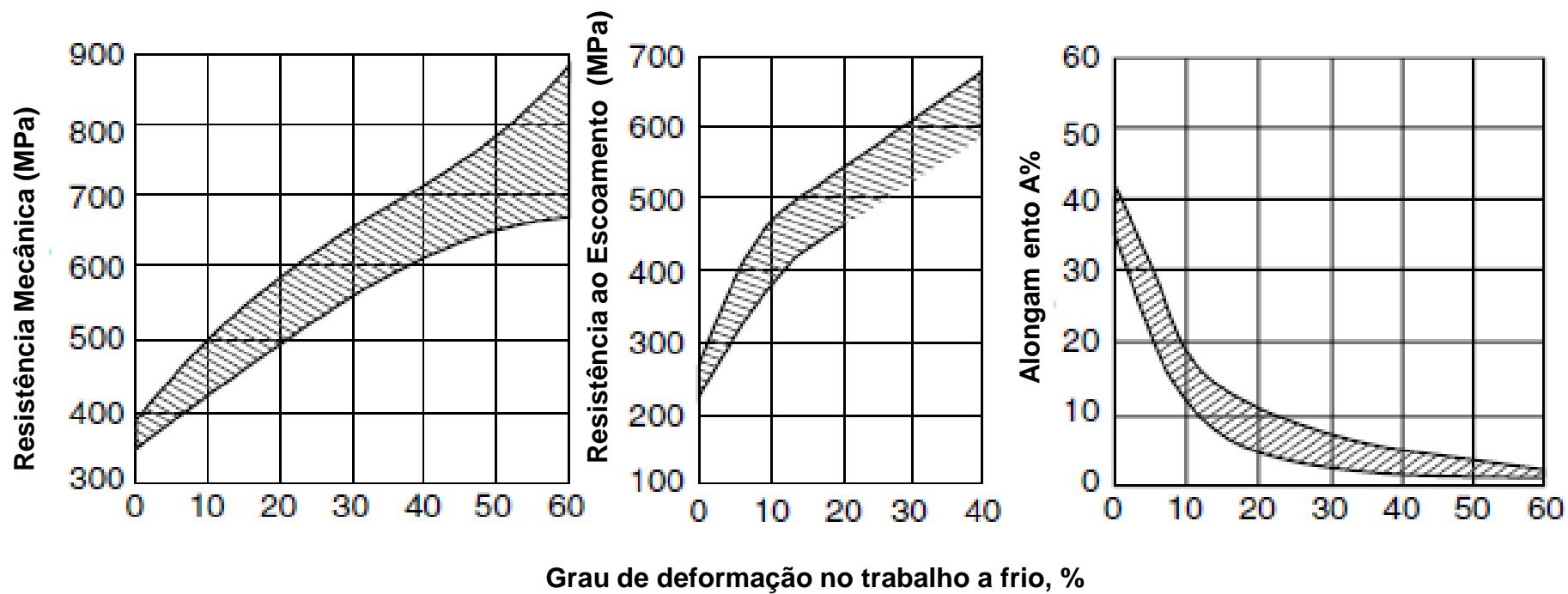
Objetivos:

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



Recozimento Subcrítico

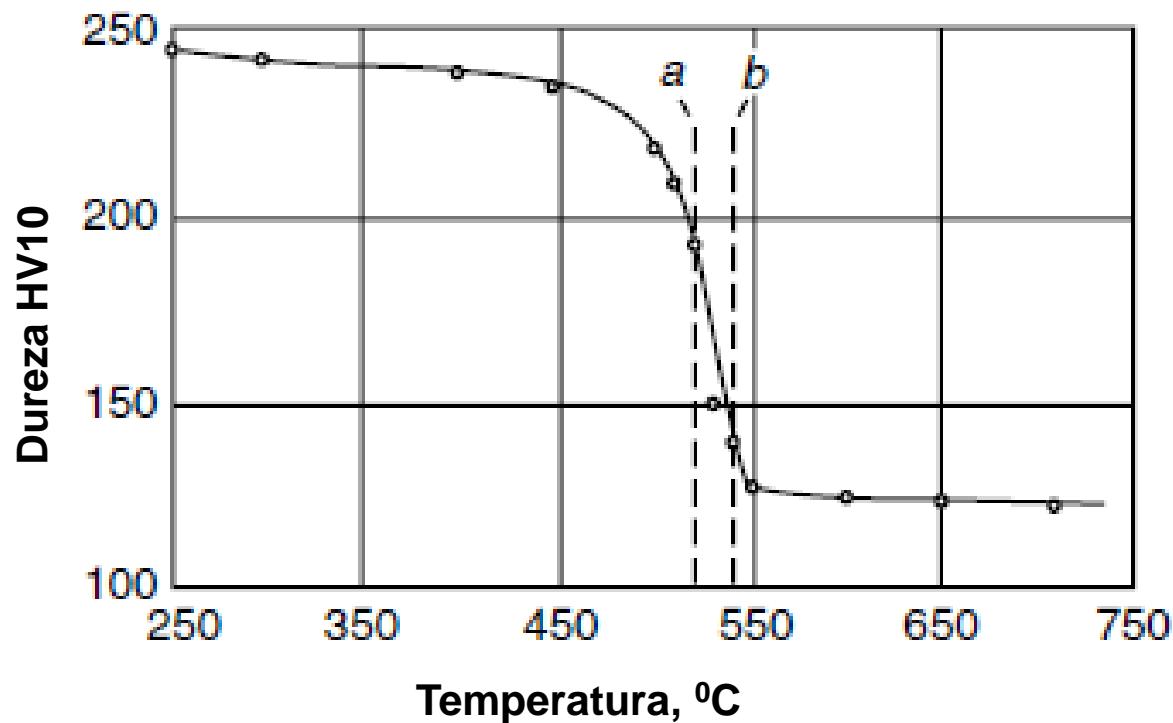
Características de aços com trabalho a frio.





Recozimento Subcrítico

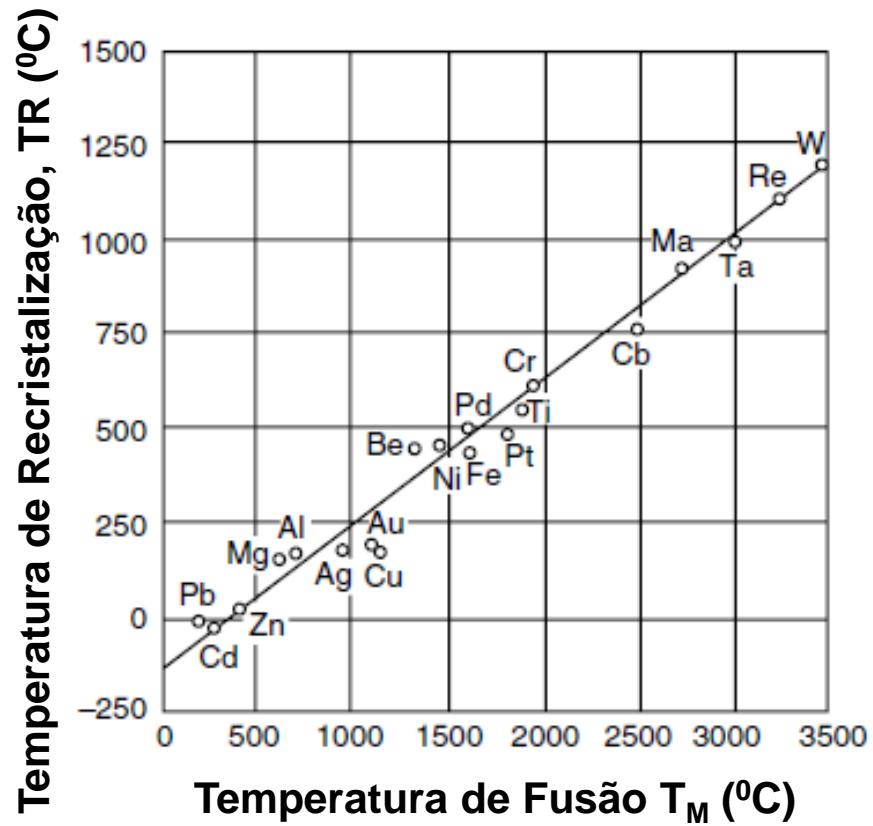
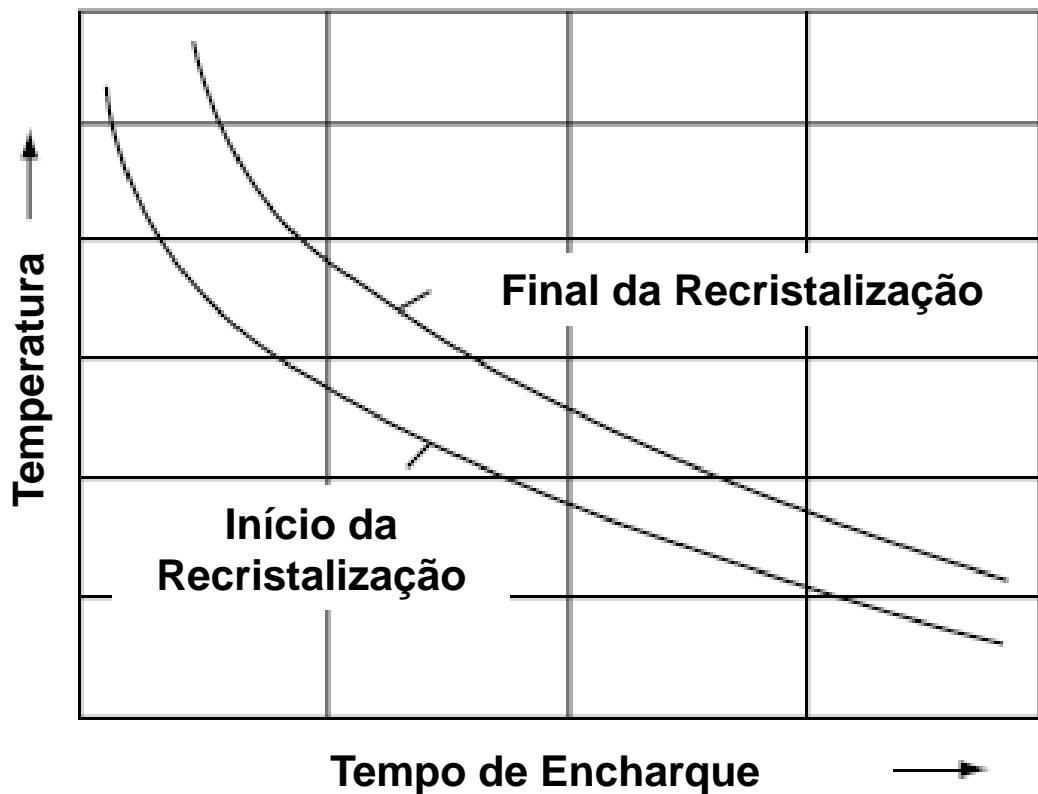
Aço com 0,03 wt% carbono, 0,54 wt% Si e 0,20 wt% Mn, encruado 80% em Laminação a frio. a: início da formação de novos grãos, b: final da formação dos novos grãos.





Recozimento Subcrítico

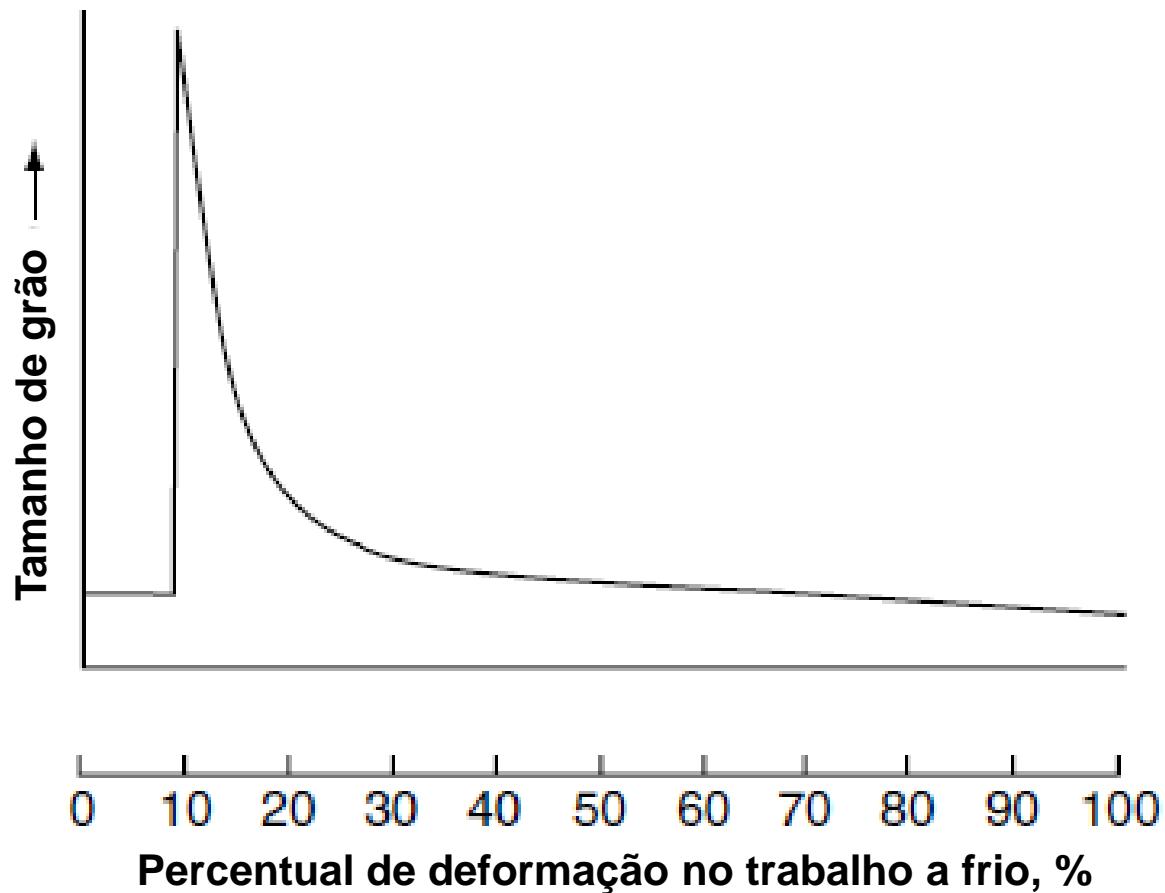
Efeito da temperatura e do tempo para a recristalização.

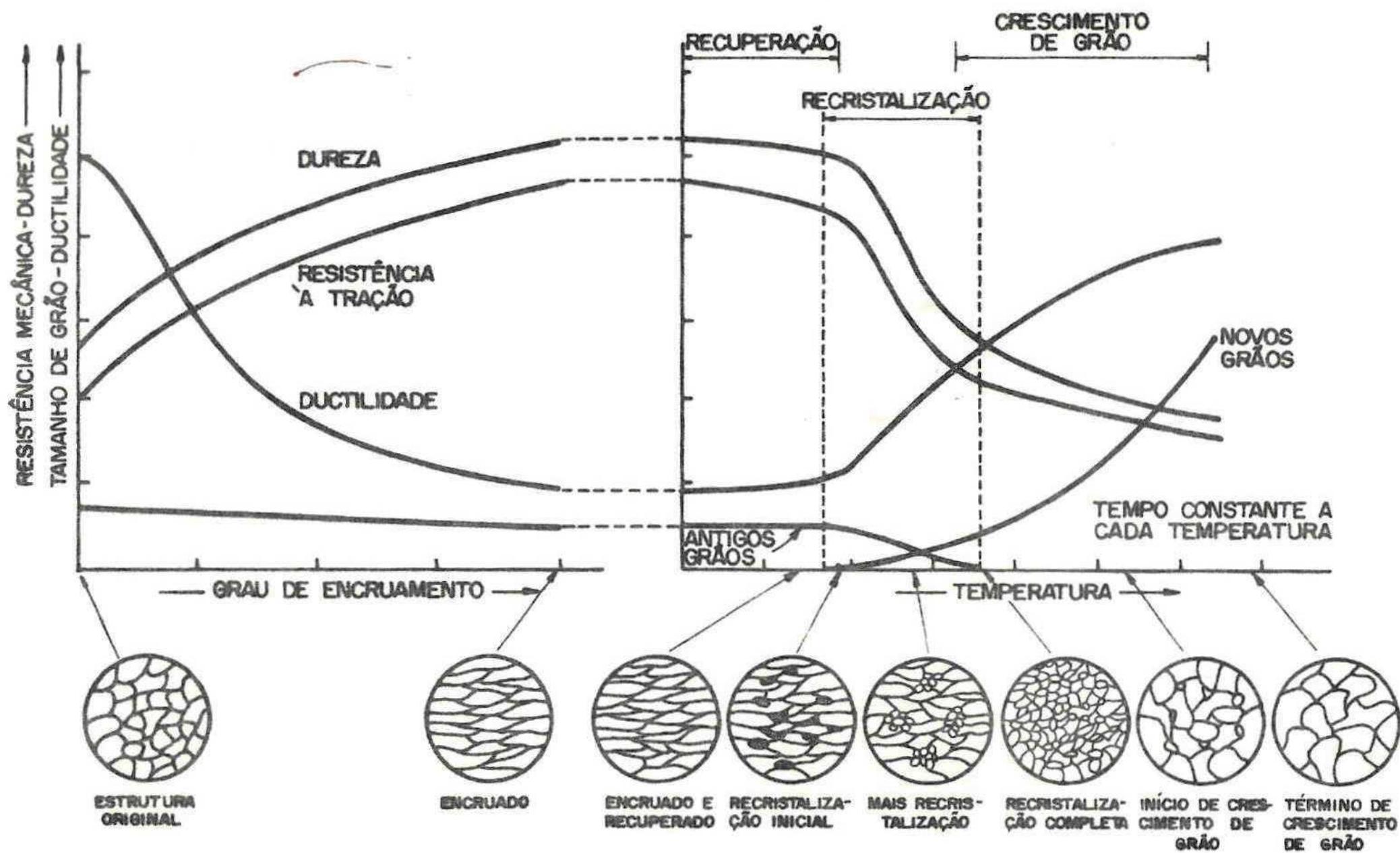




Recozimento Subcrítico

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:

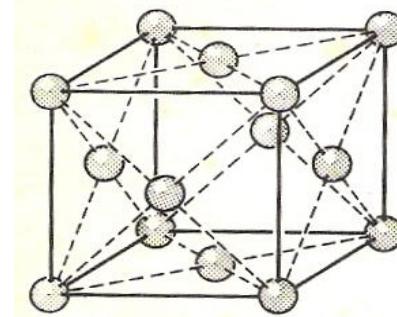
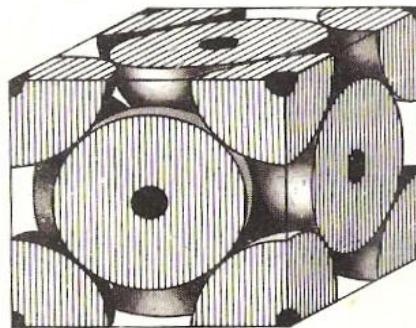
- Obter a máxima Resistência Mecânica para um determinado aço,
- Elevar a Dureza dos aços,
- Elevar a Resistência ao Desgaste e à Fadiga.



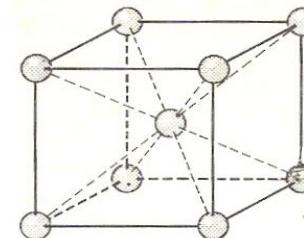
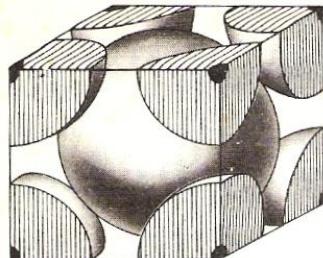
Têmpera e Revenido dos Aços

- Estrutura das Fases importantes do Ferro

Estrutura Cúbica de Faces Centradas
(ferro Gama)



Estrutura Cúbica de Corpo Centrado
(ferro Alfa)

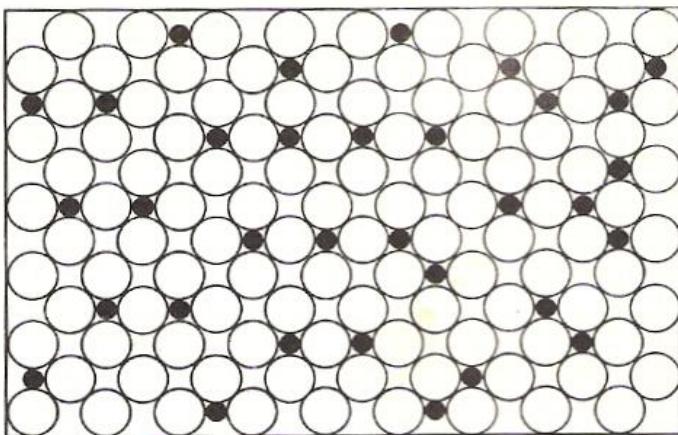




Têmpera e Revenido dos Aços

Soluções Sólidas

Intersticiais

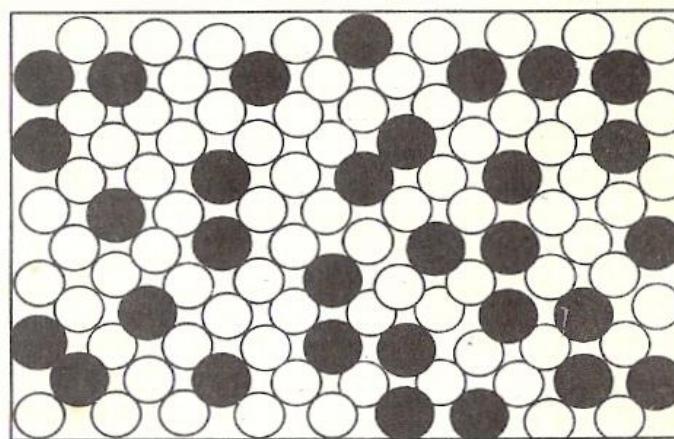


● Carbono



Ferro

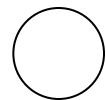
Substitucionais ao Acaso



● Cromo, Níquel, Molibdênio, outros



Ferro



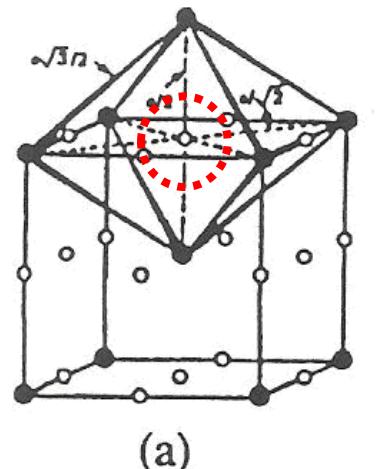


Têmpera e Revenido dos Aços

- Solubilidade de Carbono em Ferro

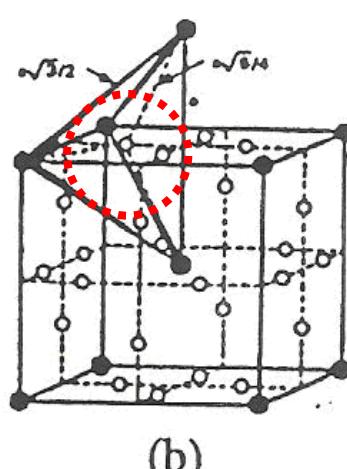
O carbono é um elemento de pequeno raio atômico (0,77 Angstrons) em relação ao Ferro. Desta forma, desenvolve solução sólida Intersticial, ou seja, o átomo de soluto (carbono) posiciona-se nos interstícios ou espaços vazio de suas estruturas cristalinas. Ferro α e Ferro γ formam diferentes tipos de interstícios,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

Interstícios da Estrutura do Ferro α

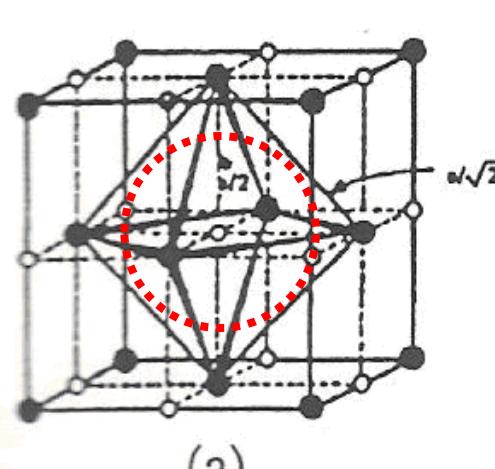


*Espaço
Angstrons* 0,19

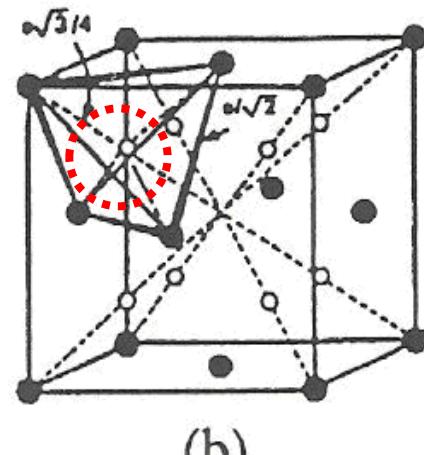
Interstícios da Estrutura do Ferro γ



0,36



0,52



0,29

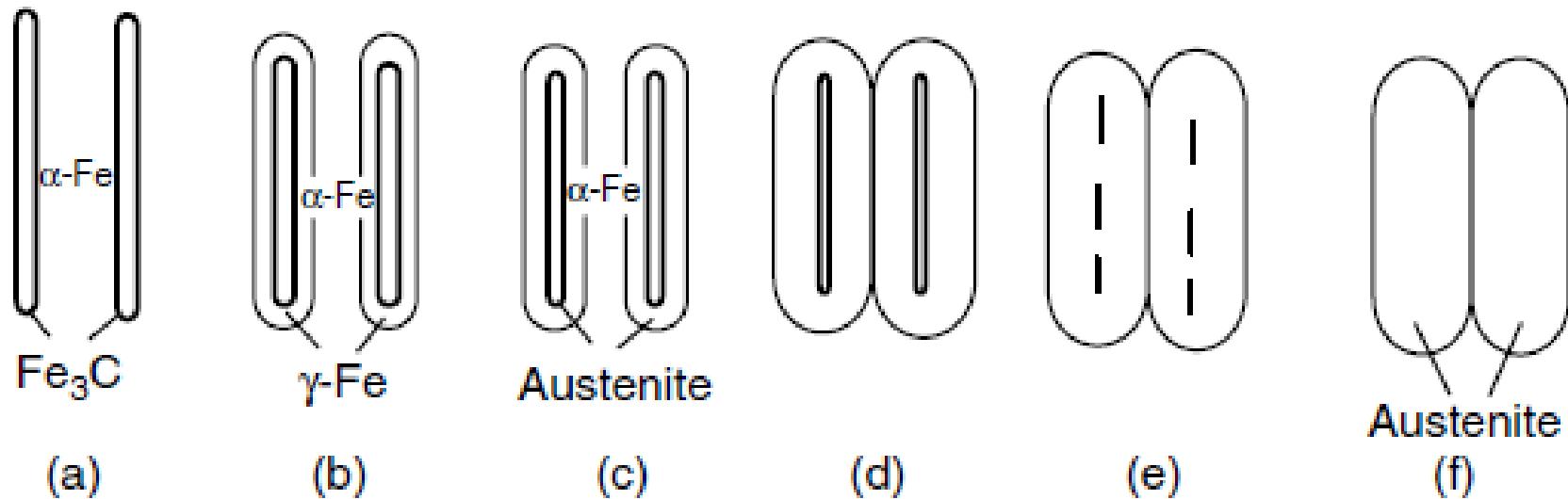


Têmpera e Revenido dos Aços

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.



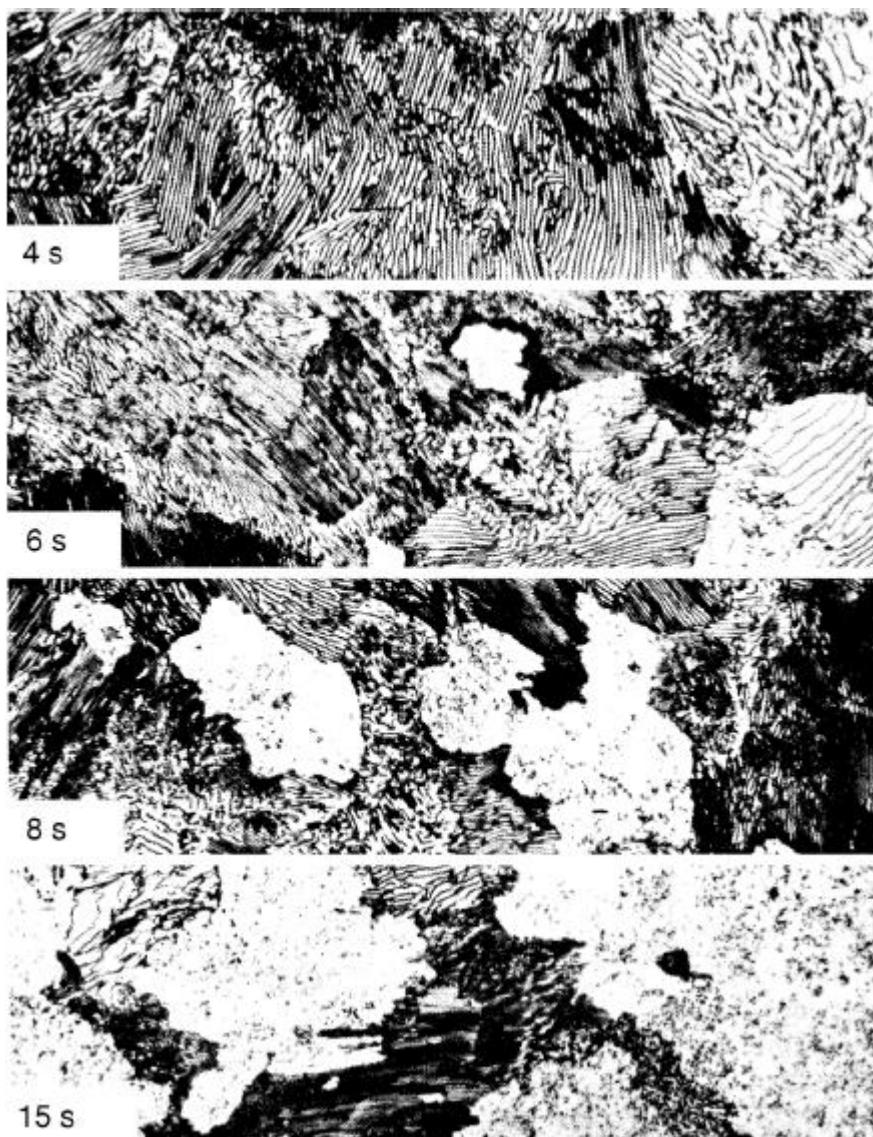
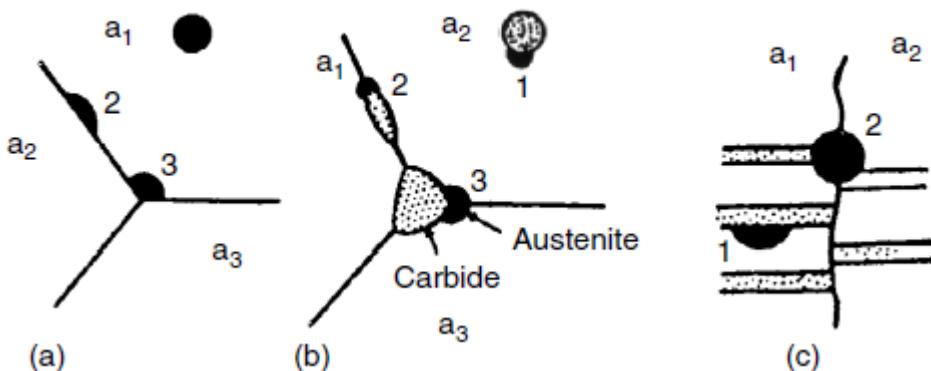


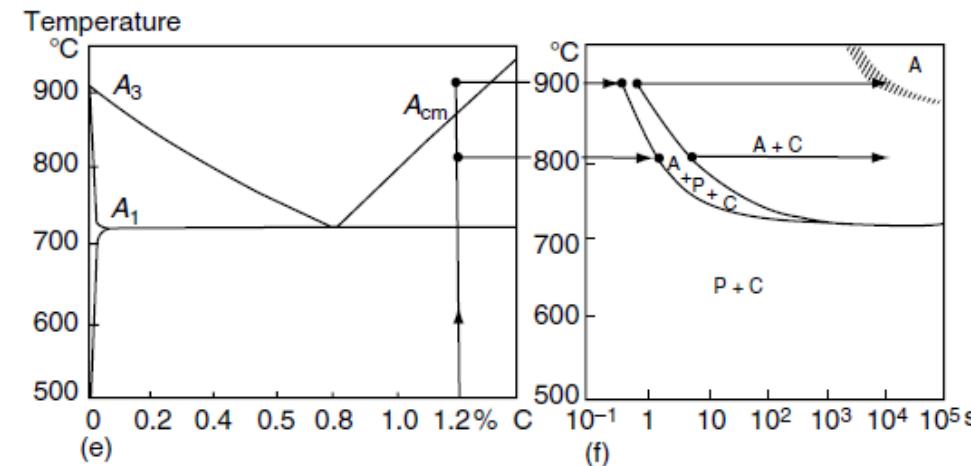
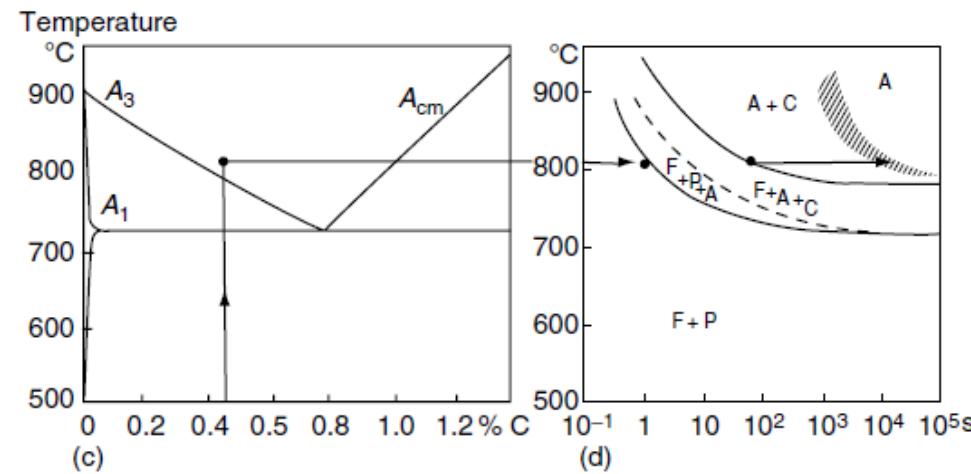
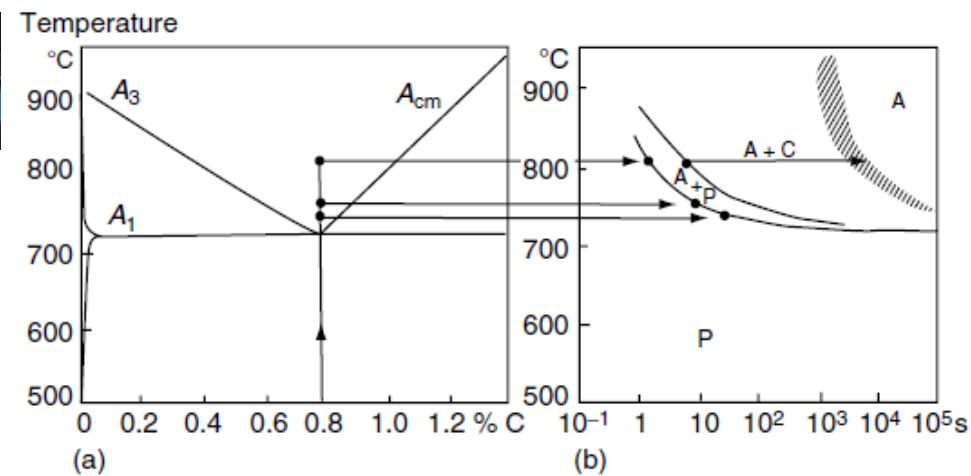
Têmpera e Revenido dos Aços

Formação da austenita

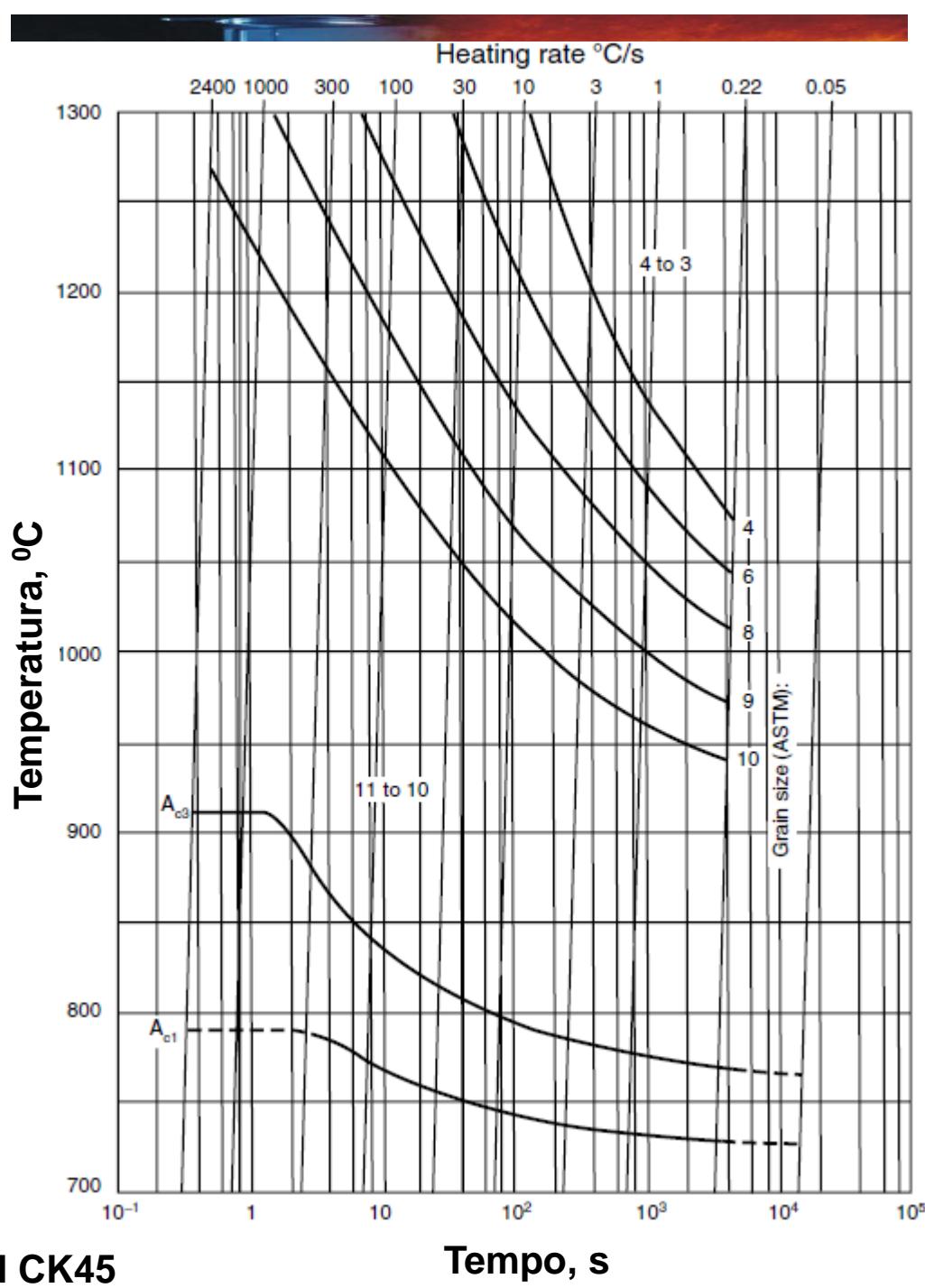
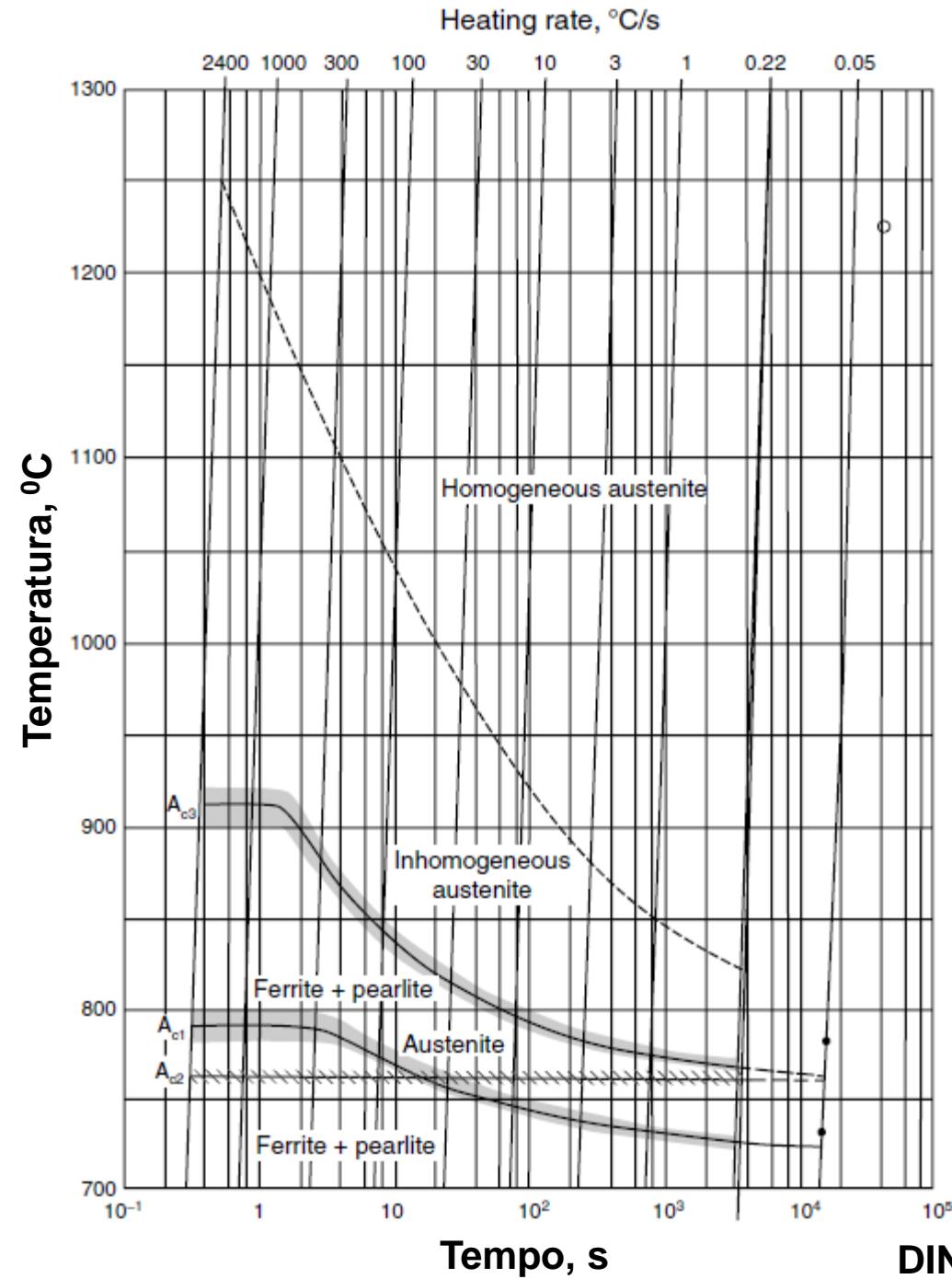
Nucleação:

- (a) A partir da ferrita
- (b) A partir da Esferoidita
- (c) A partir da perlita





Formação da austenita



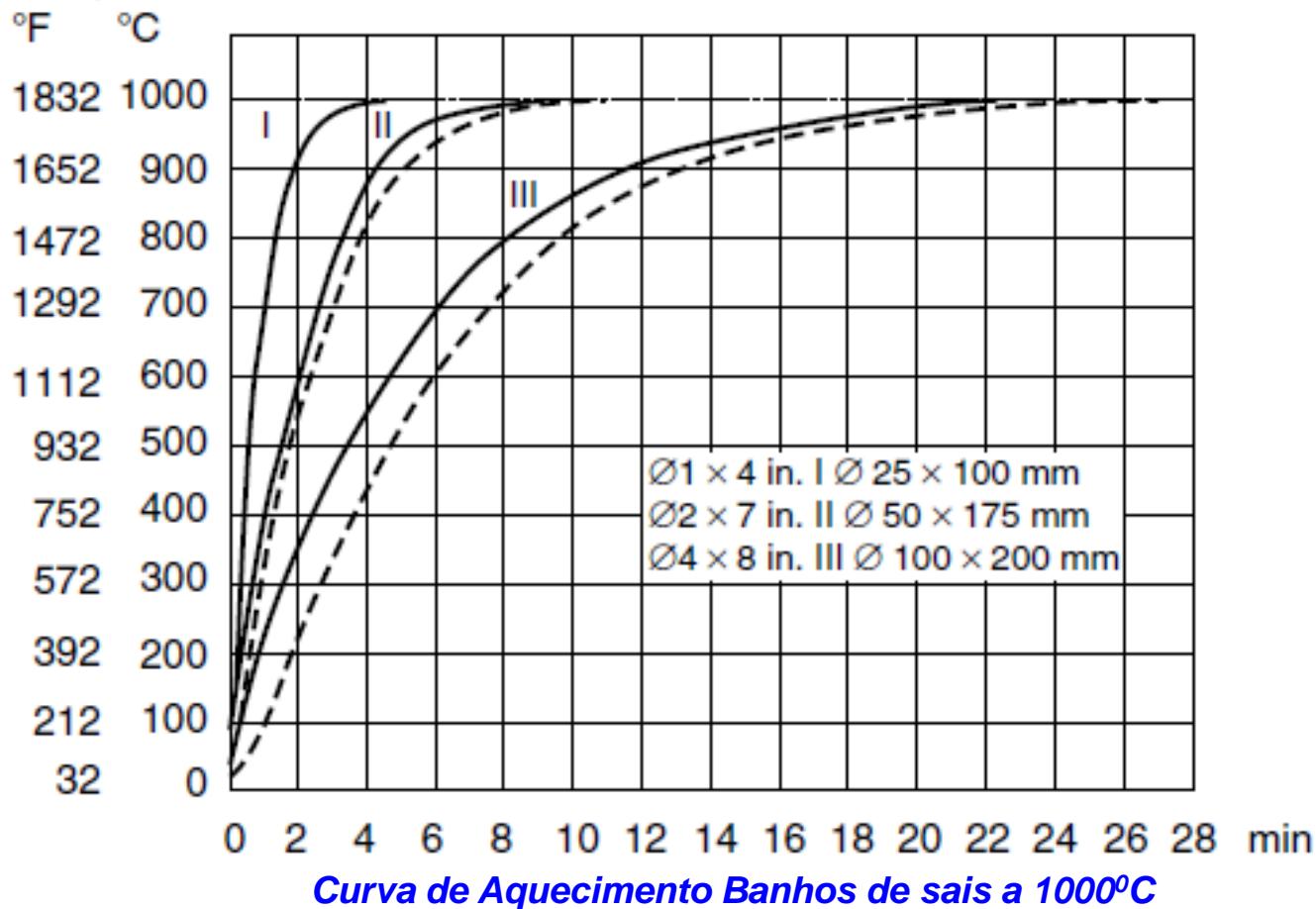


Os parâmetros mais importantes da austenitização são:

1- Temperatura de Austenitização,

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

Temperatura

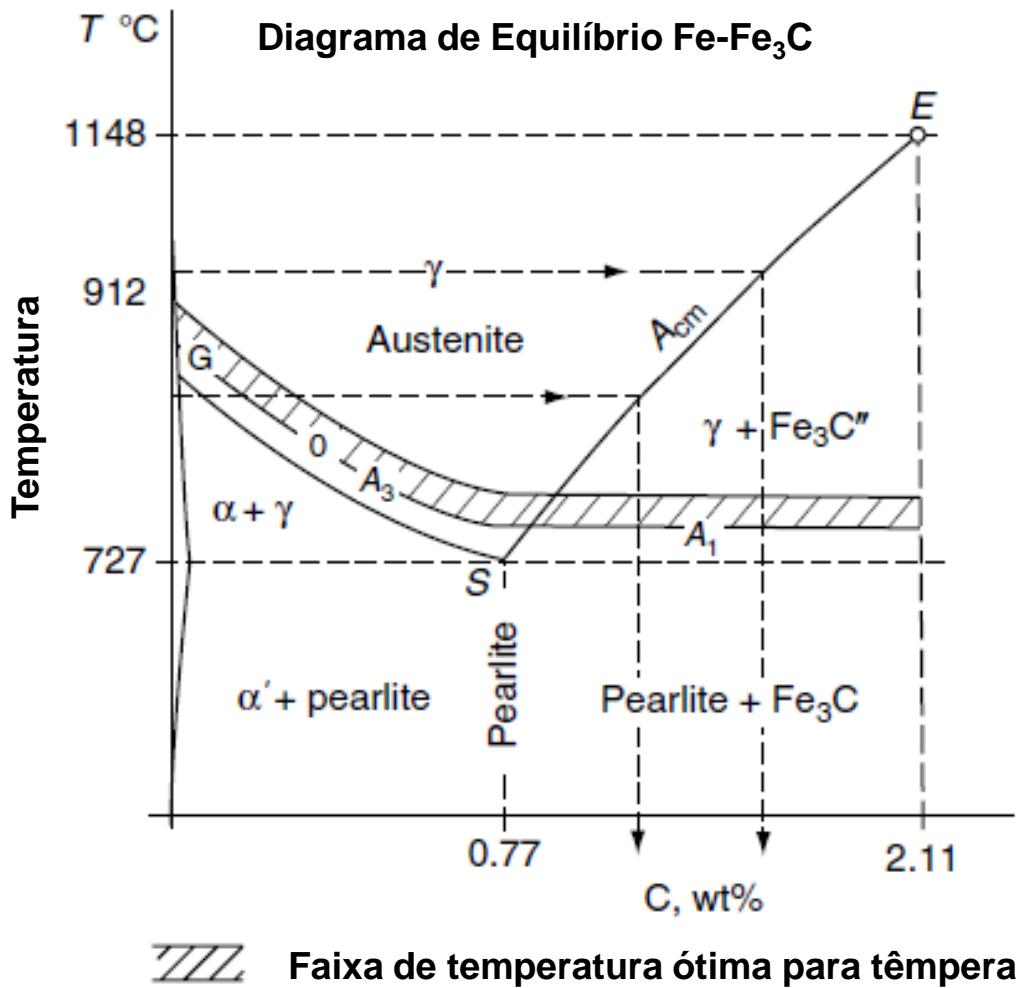




Faixa ótima de austenitização para a têmpera de aços carbono não ligados

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 M_s .
- 3- Deslocamento das curvas em C para a direita.
- 4- Aumento do teor de austenita retida.

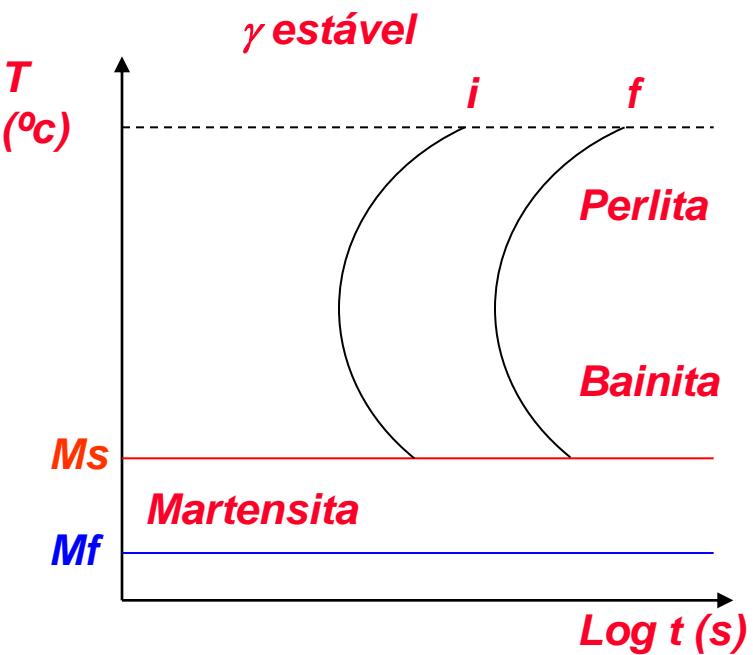




Têmpera e Revenido dos Aços

- 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

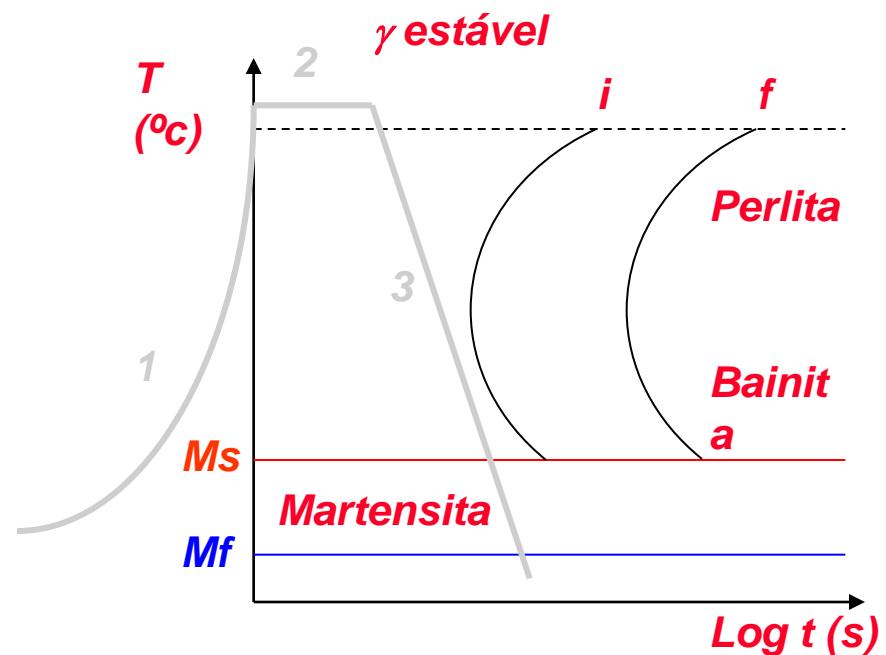
Etapas da Têmpera (Geral)

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 (γ 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

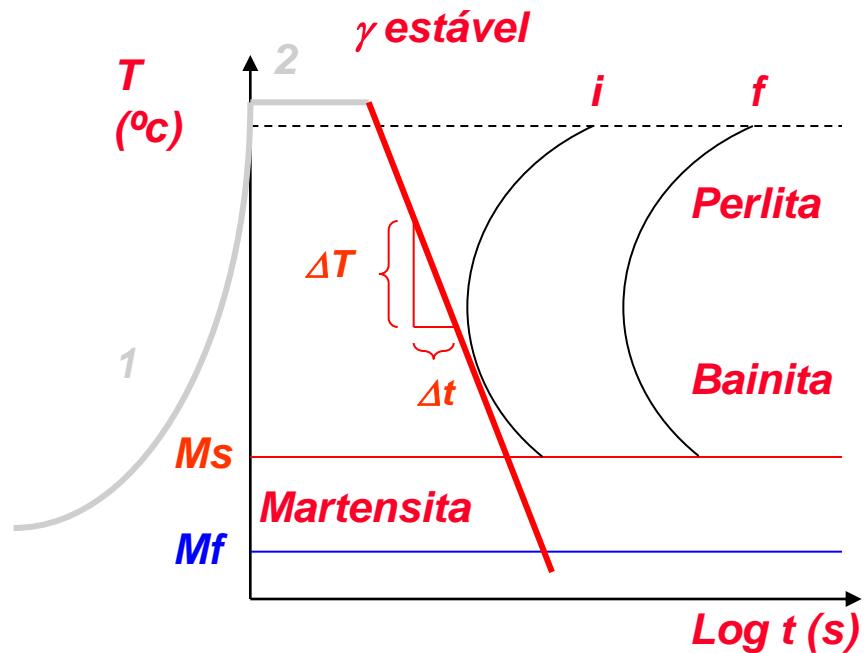
Têmpera

Quais são as condições para a formação da Martensita?

A transformação Martensítica ocorrerá quando:

1- A taxa de resfriamento ($\Delta T/\Delta t$) $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 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

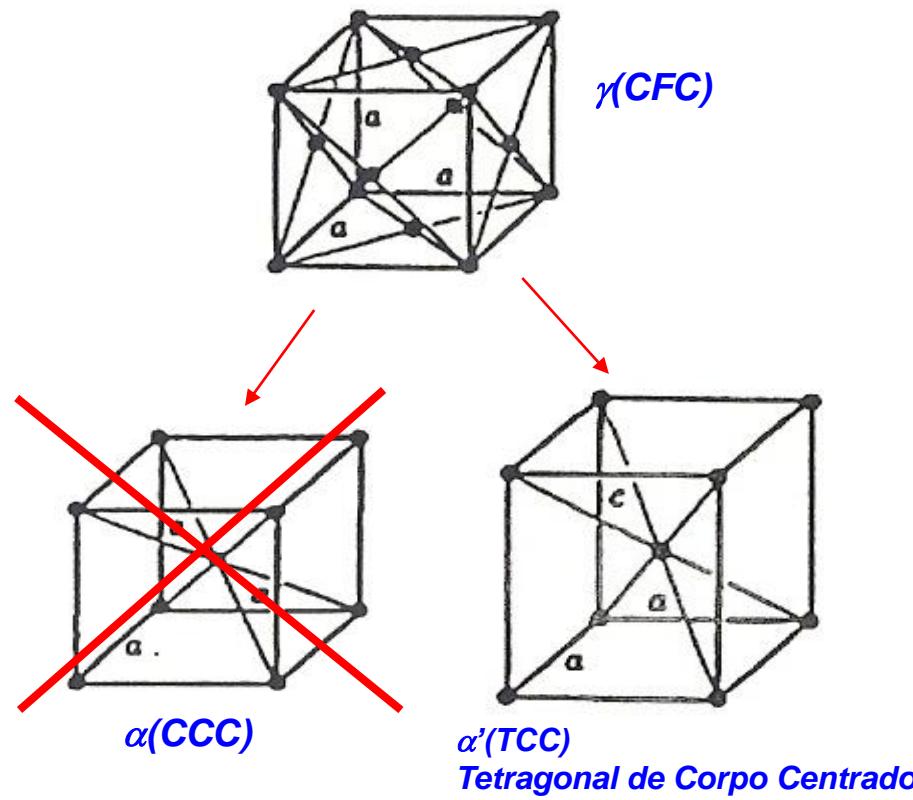
Qual é o mecanismo de formação de Martensita?

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 α (CCC), o carbono em solução promoverá o cisalhamento da estrutura, dando origem à Martensita $\alpha'(\text{TCC})$, com estrutura Tetragonal de Corpo Centrado.





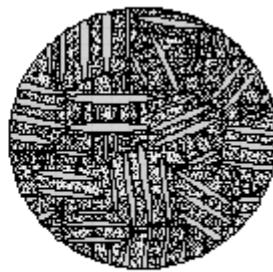
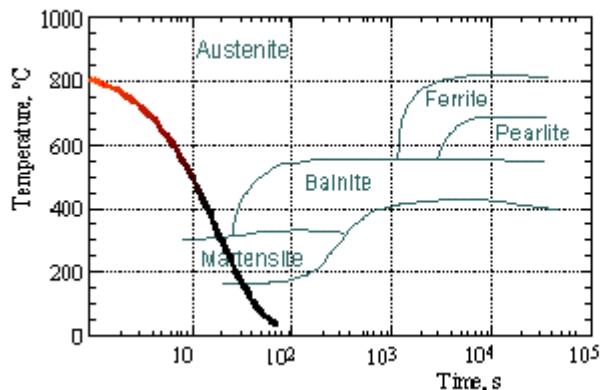
Diagramas de Resfriamento Contínuo

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,



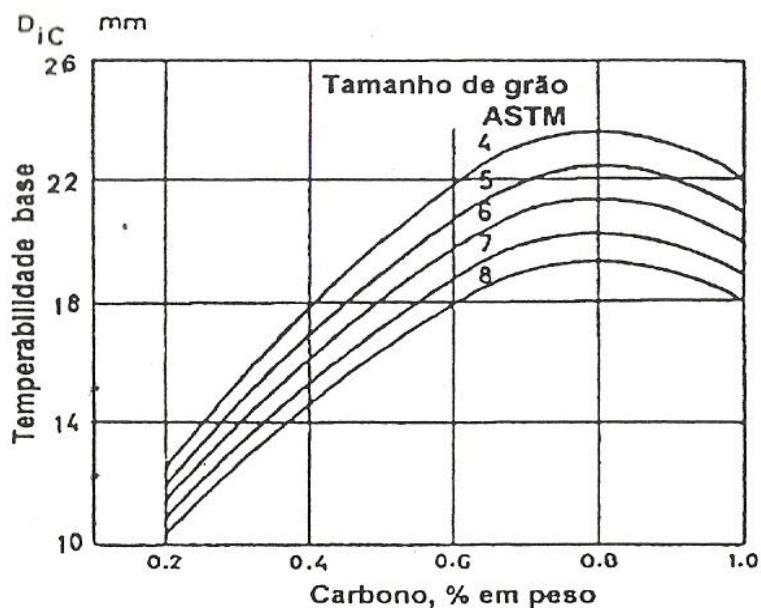
Têmpera e Revenido dos Aços

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

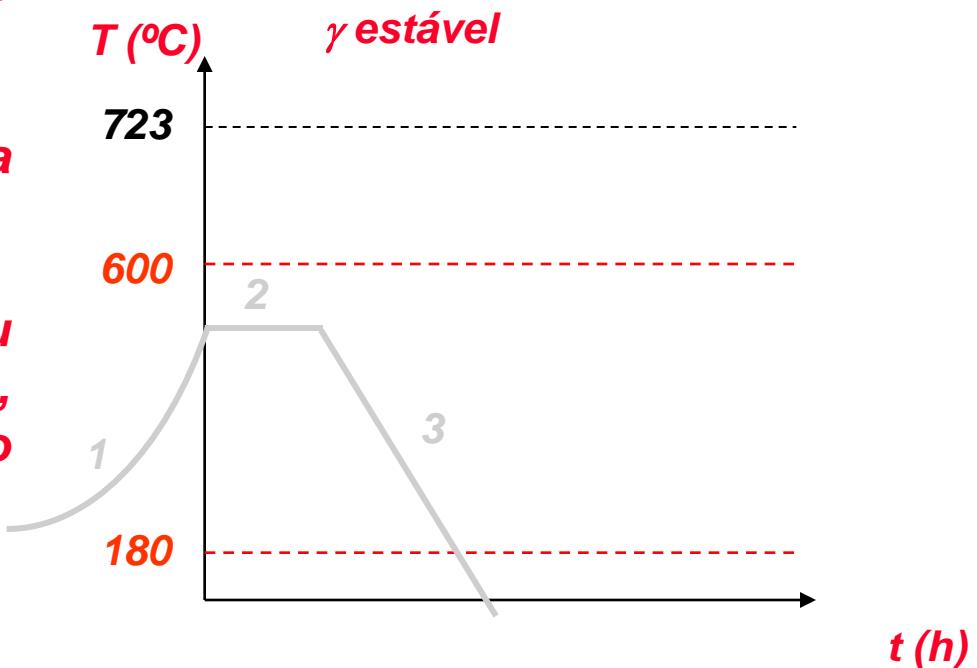
Revenimento

As etapas à seguir resumem o ciclo de revenimento:

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

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

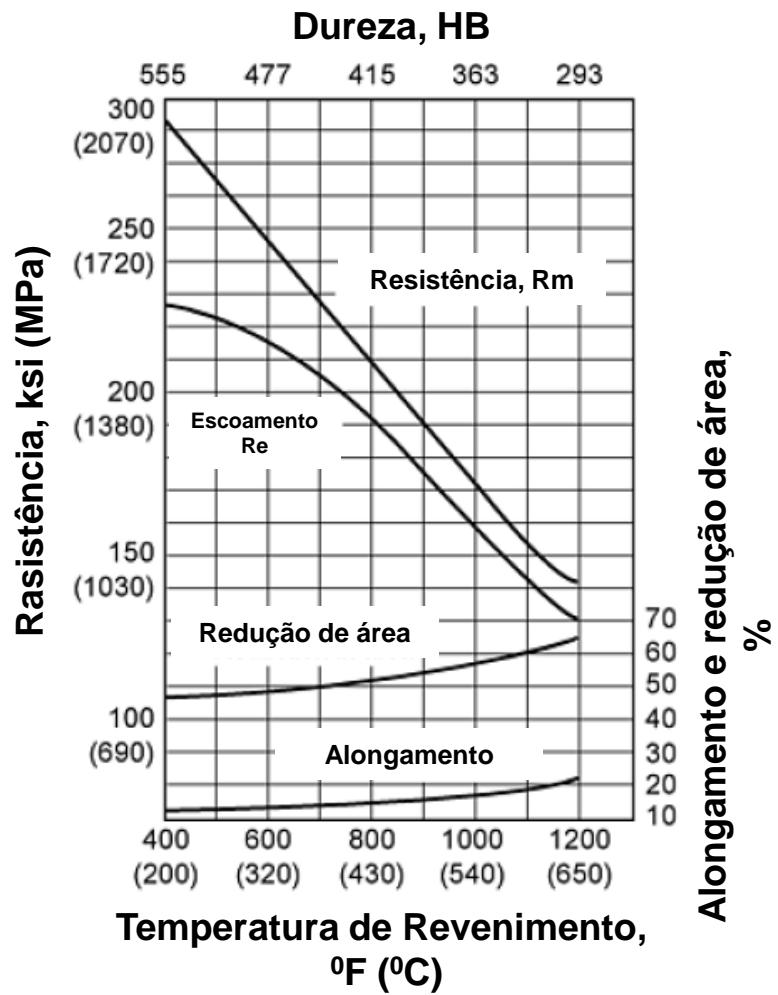
Etapa 3: Resfriar rapidamente ou lentamente até a temperatura ambiente, visando evitar fenômenos de fragilização ao revenido (depende do tipo de aço).



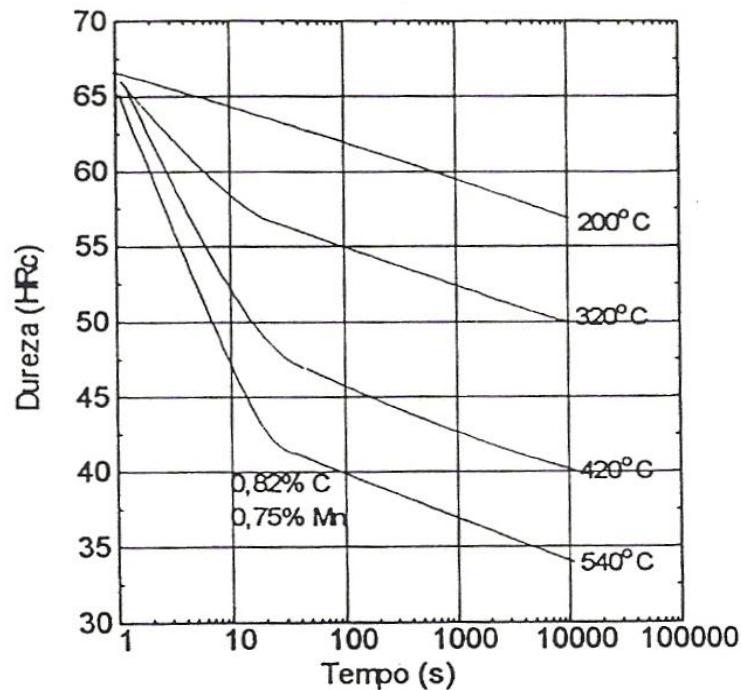


Revenimento - Variáveis

Temperatura



Tempo

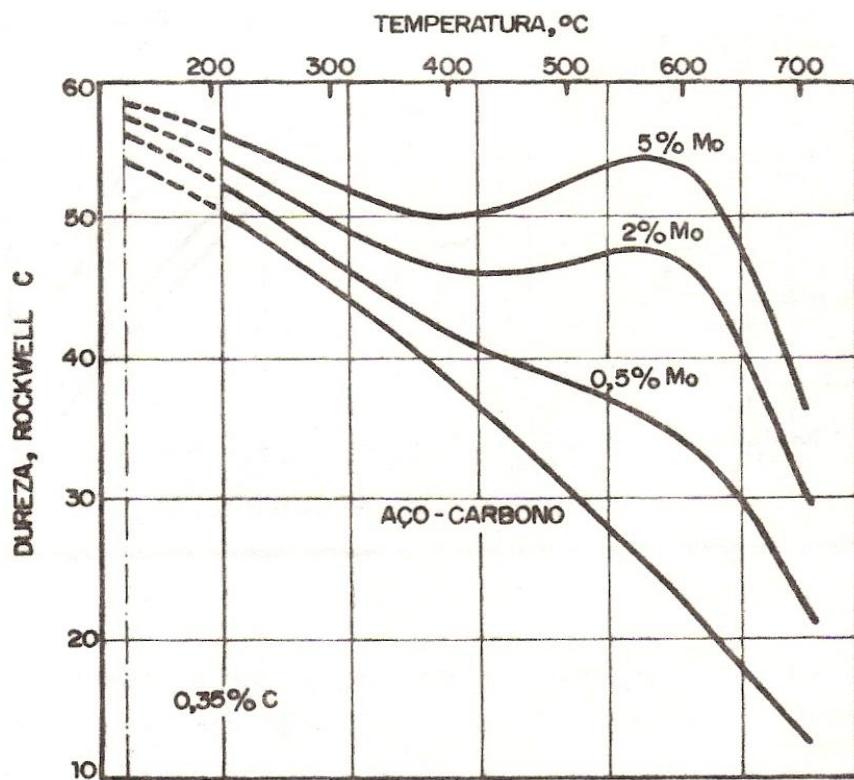




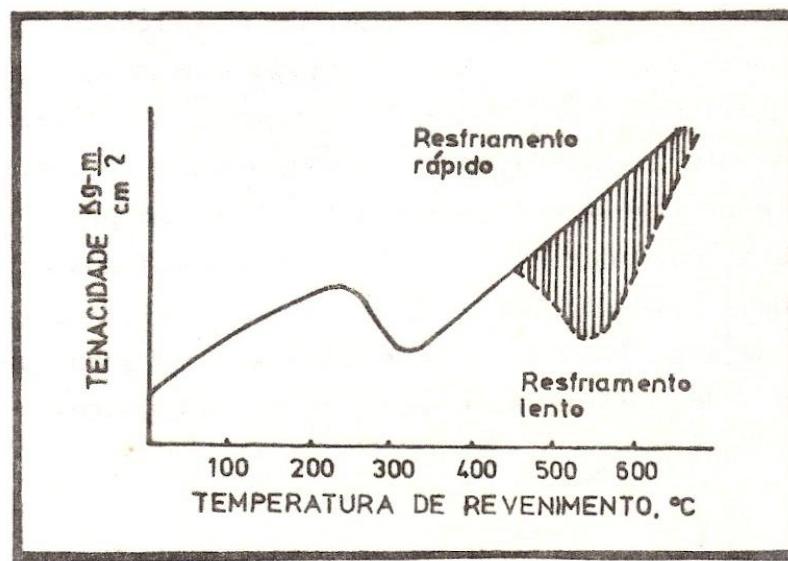
Têmpera e Revenido dos Aços

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

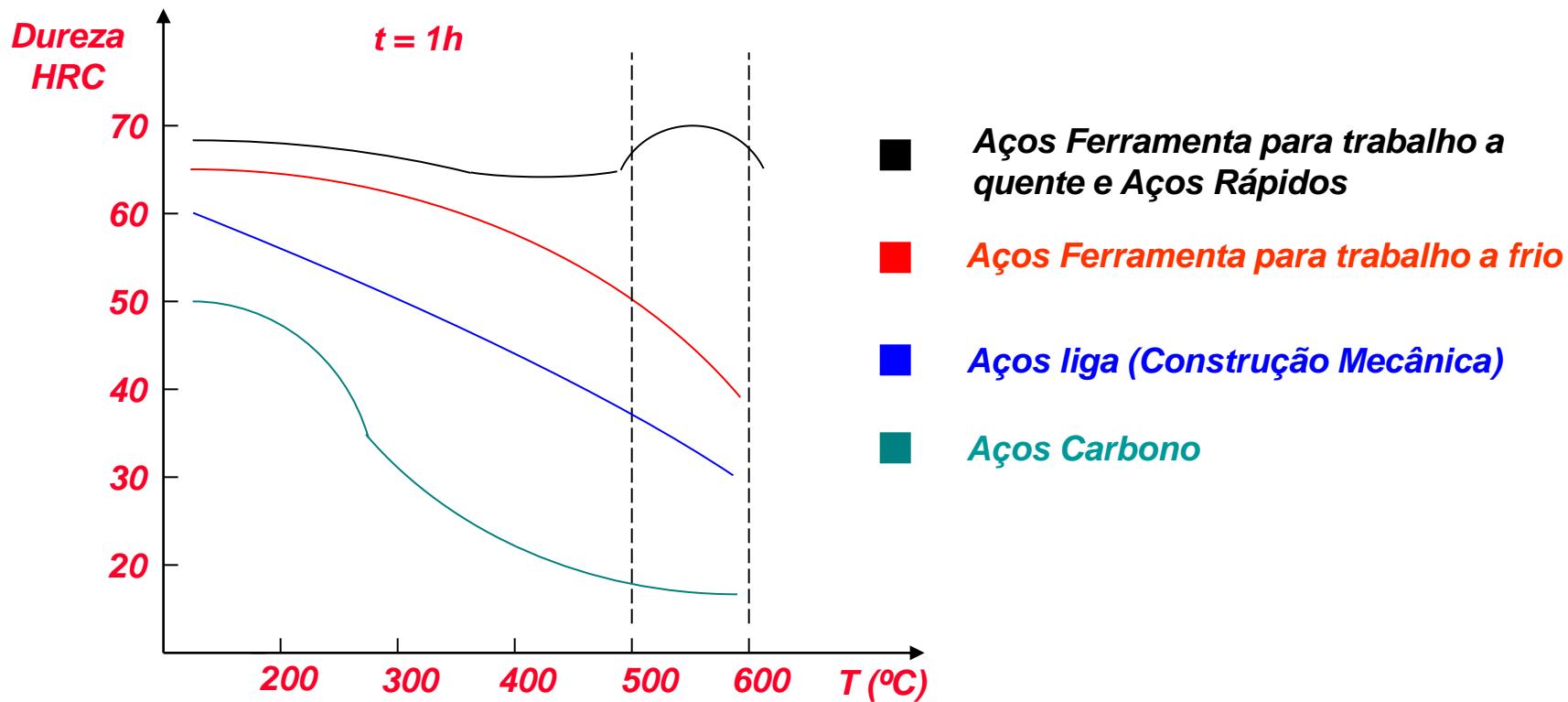
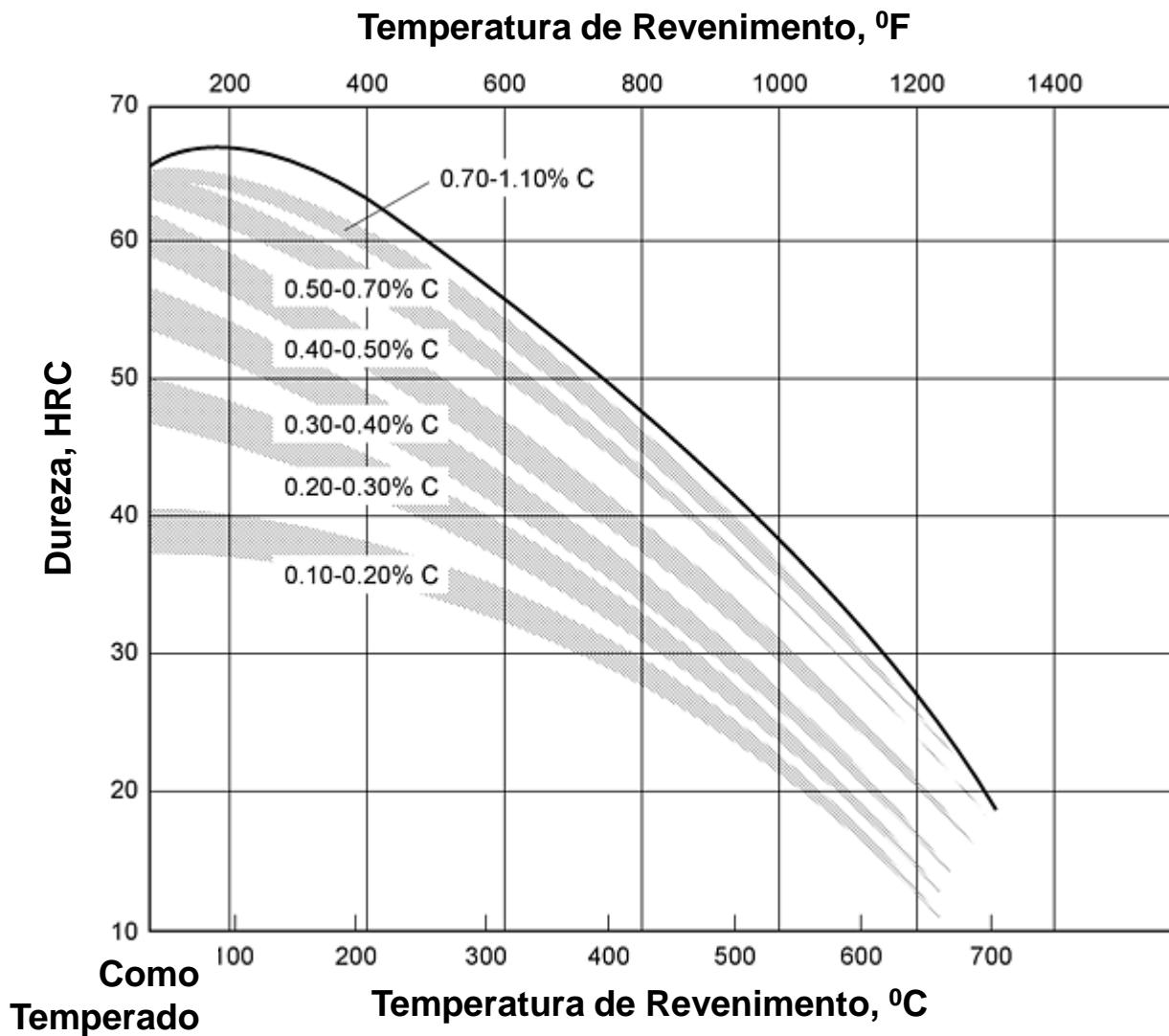




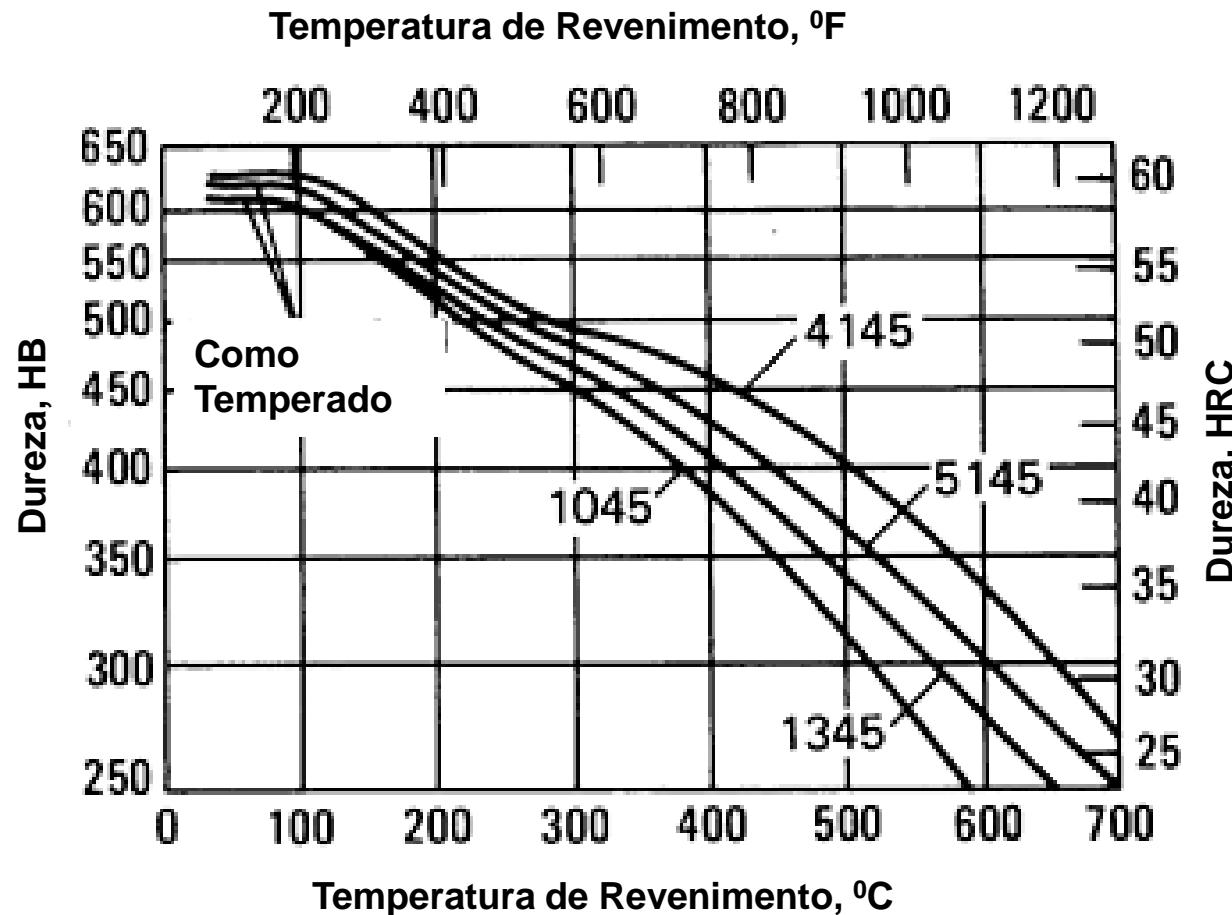
Diagrama de Revenimento para aços carbono com variado teor de carbono, revenidos por 1h.





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,

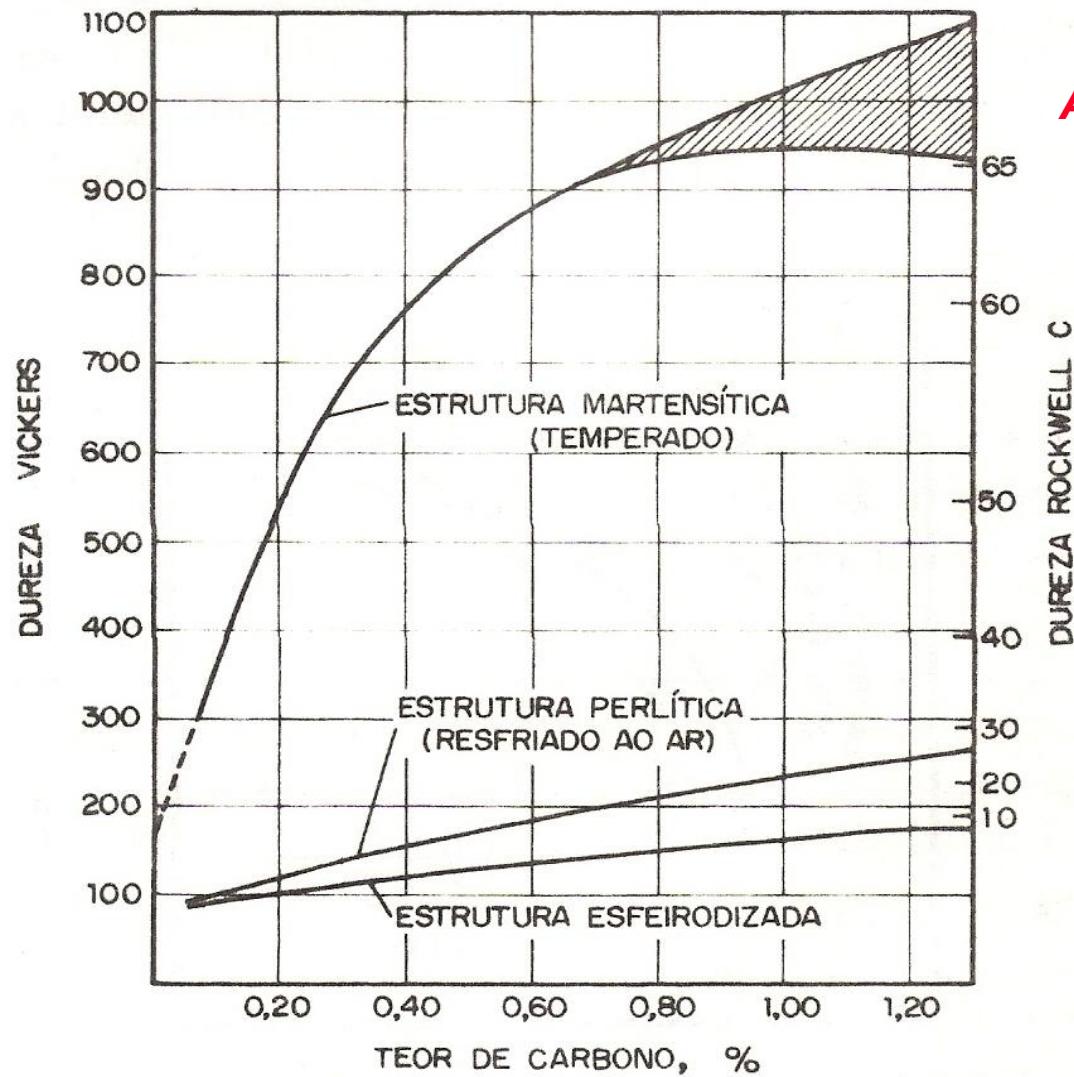
250 – 350°C: Transformação dos carbonetos épsilon e da Martensita de baixo carbono em cementita e ferrita,

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

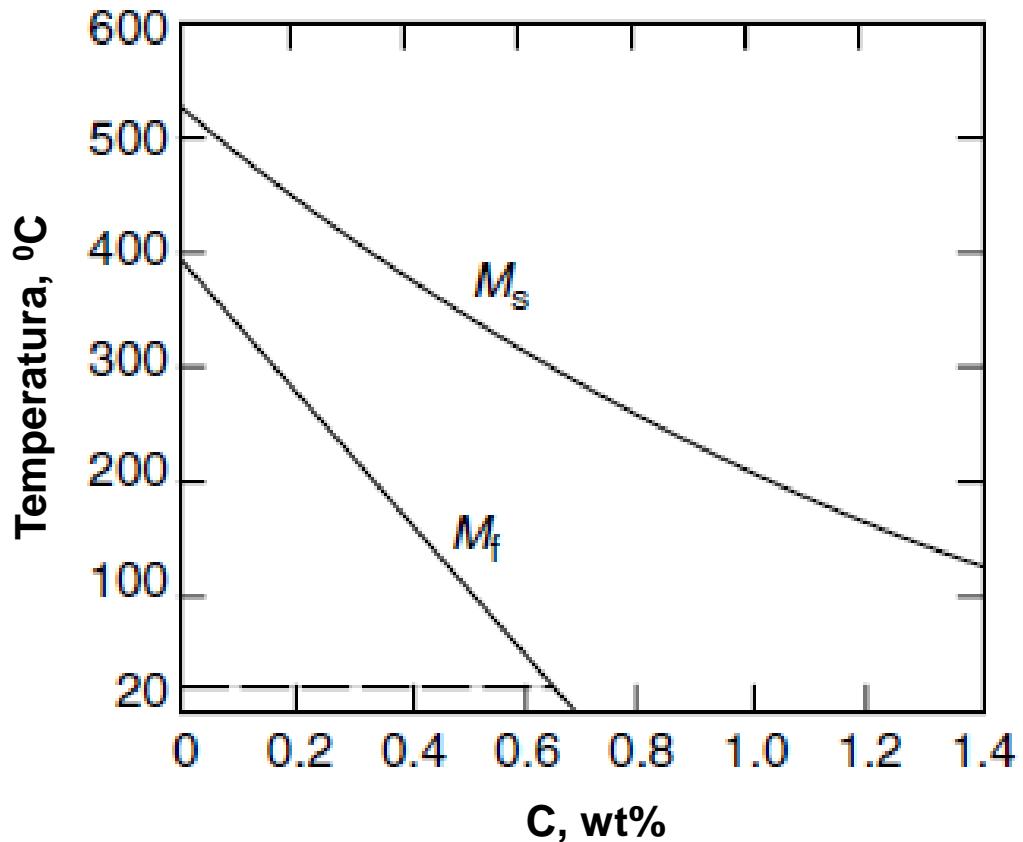
Aços Esferoidizados



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.



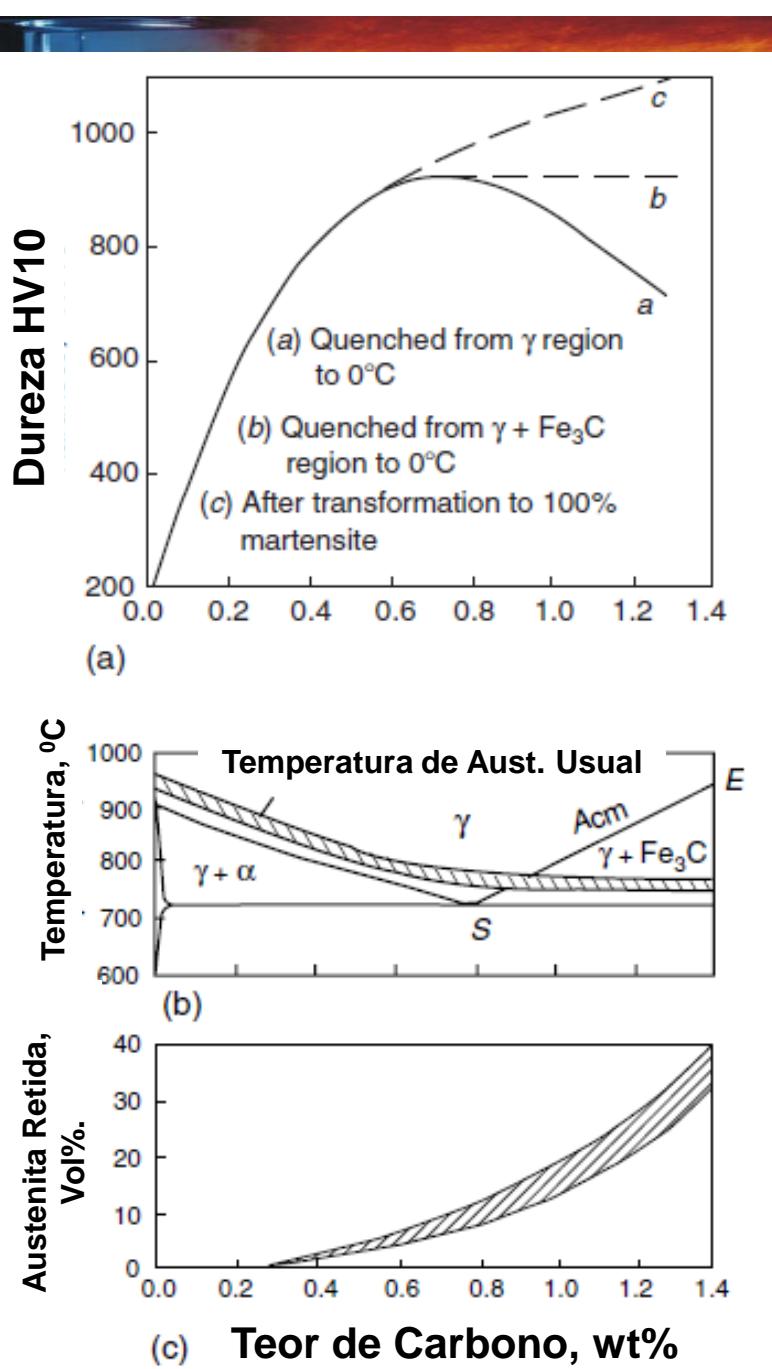


Tratamento Sub-zero (Eliminação da austenita retida)

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.





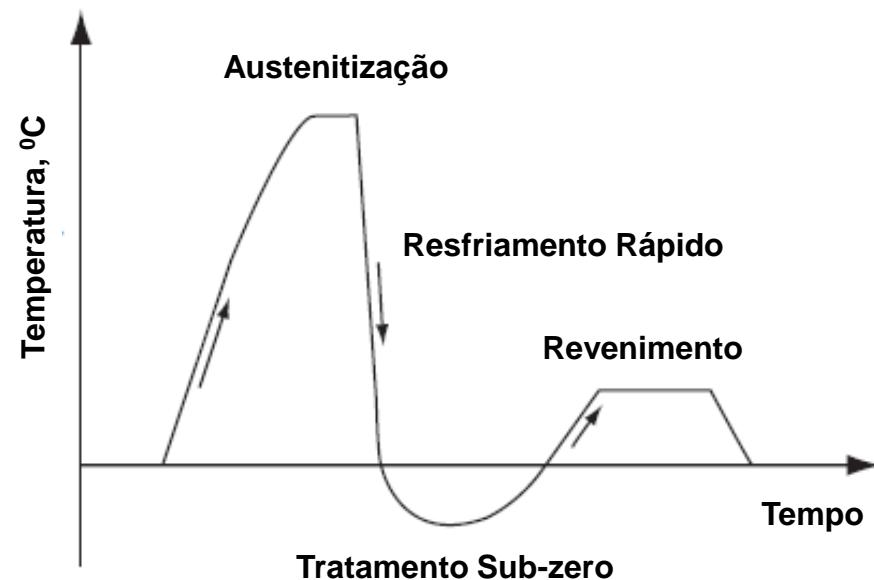
Tratamento Sub-zero (Eliminação da austenita retida)

Traz benefícios já que:

1- Eleva a dureza do aço,

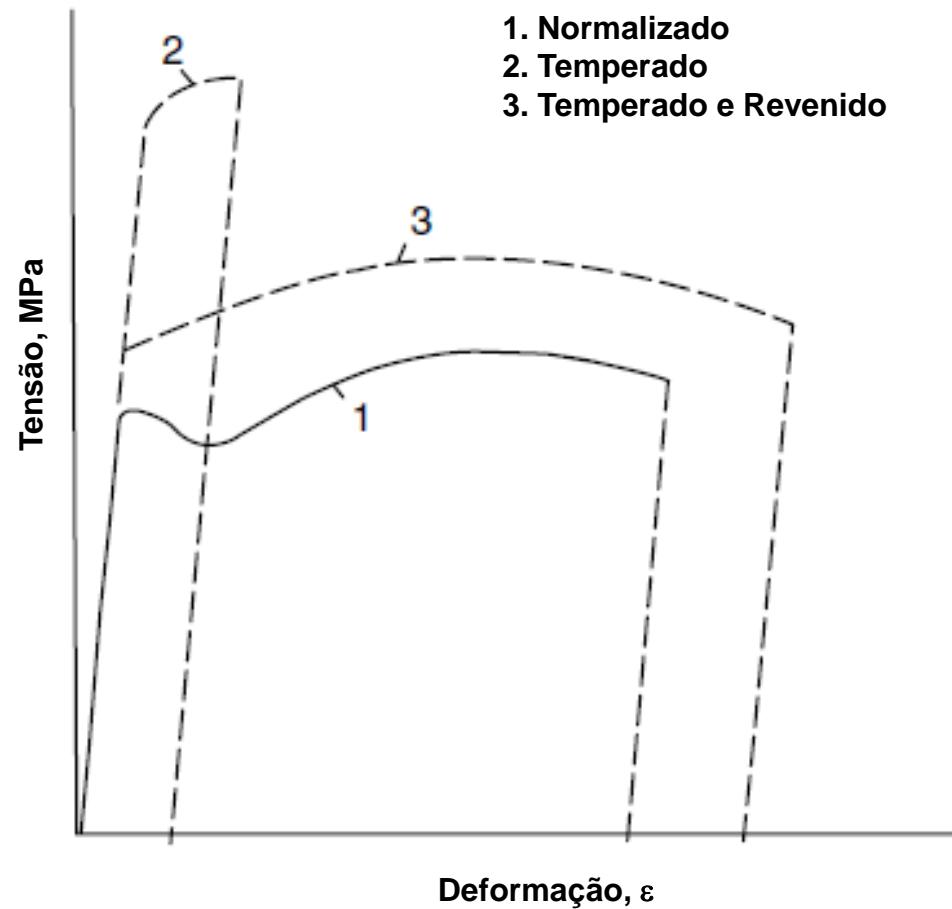
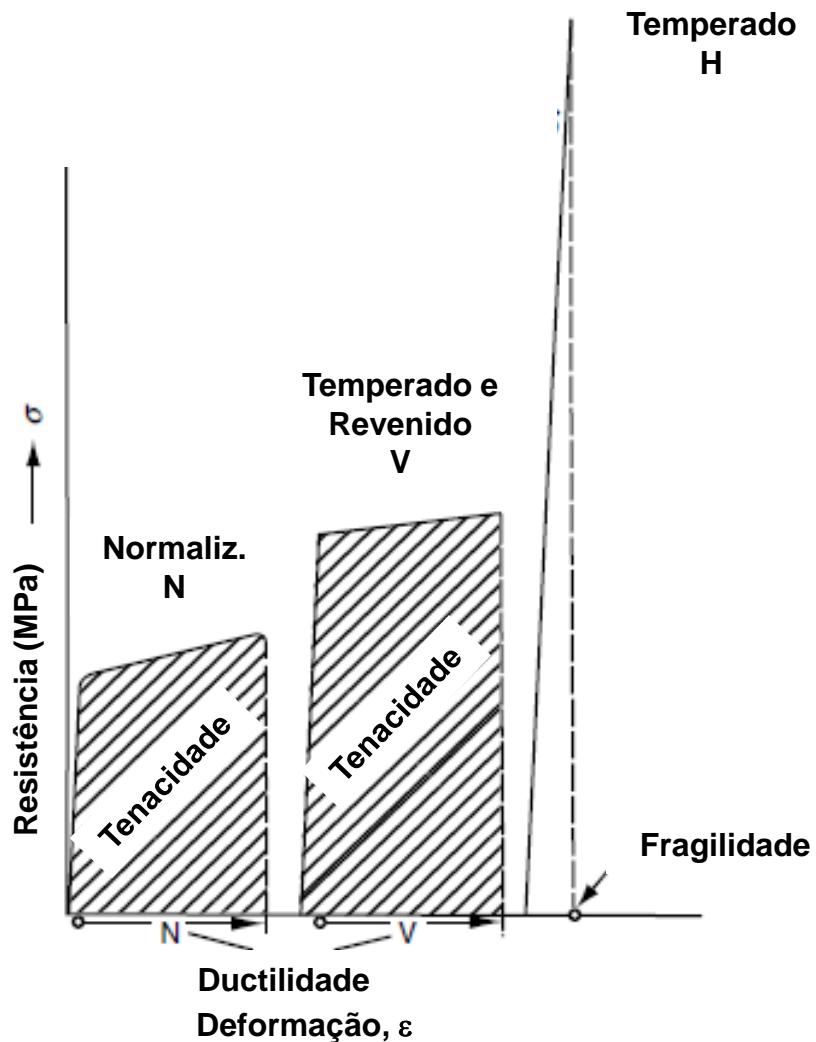
2- Confere maior estabilidade dimensional,

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 Ms , 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

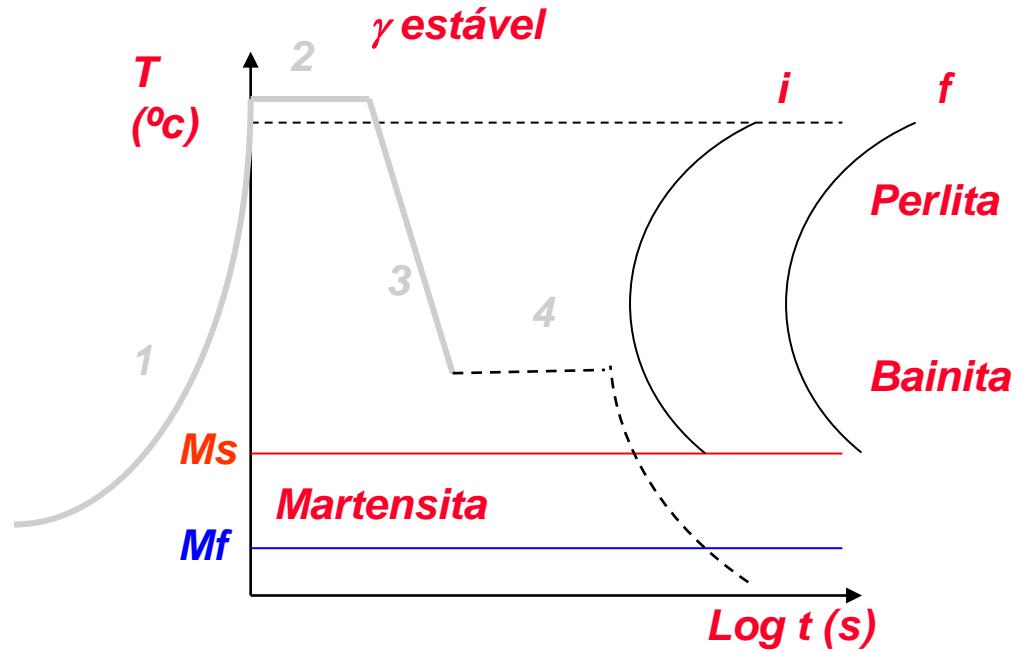
Ciclo de Tratamento

Etapa 1: Aquecer o aço até a temperatura dentro do campo austenítico do diagrama de fases (γ 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)**

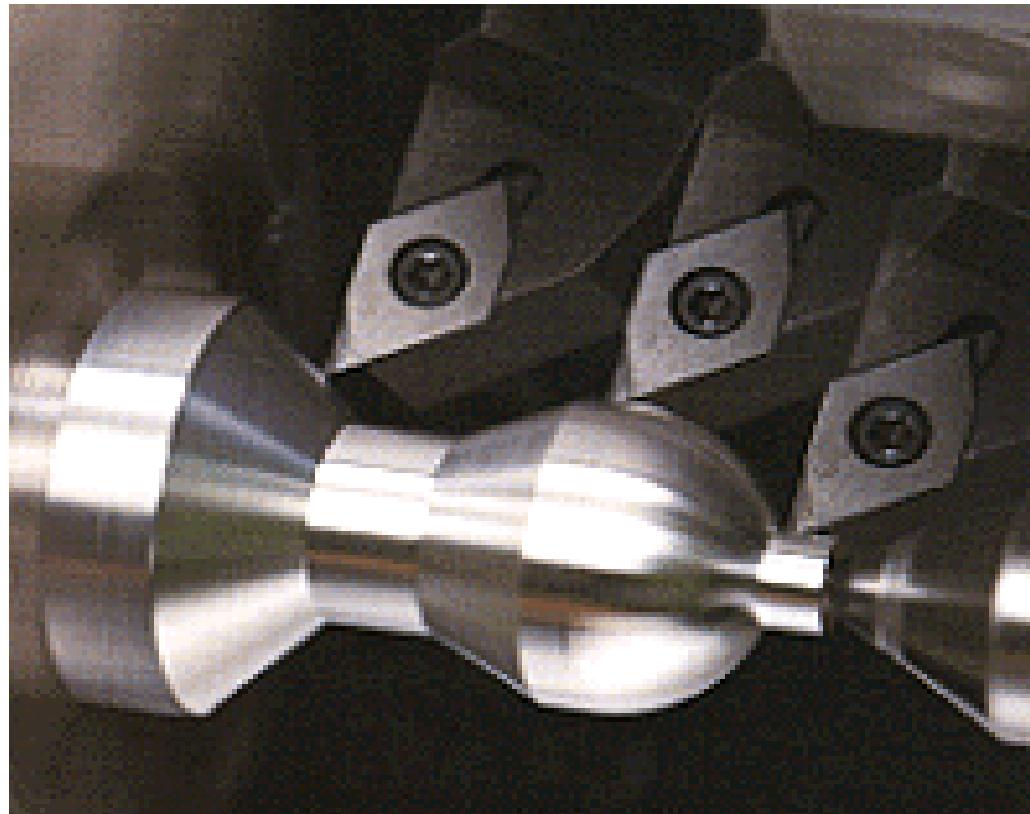




Têmpera e Revenido dos Aços

Aplicações dos Aços Temperados e Revenidos

*Aços para Ferramentas
(Aços Rápidos)*





Austêmpera

Definição:

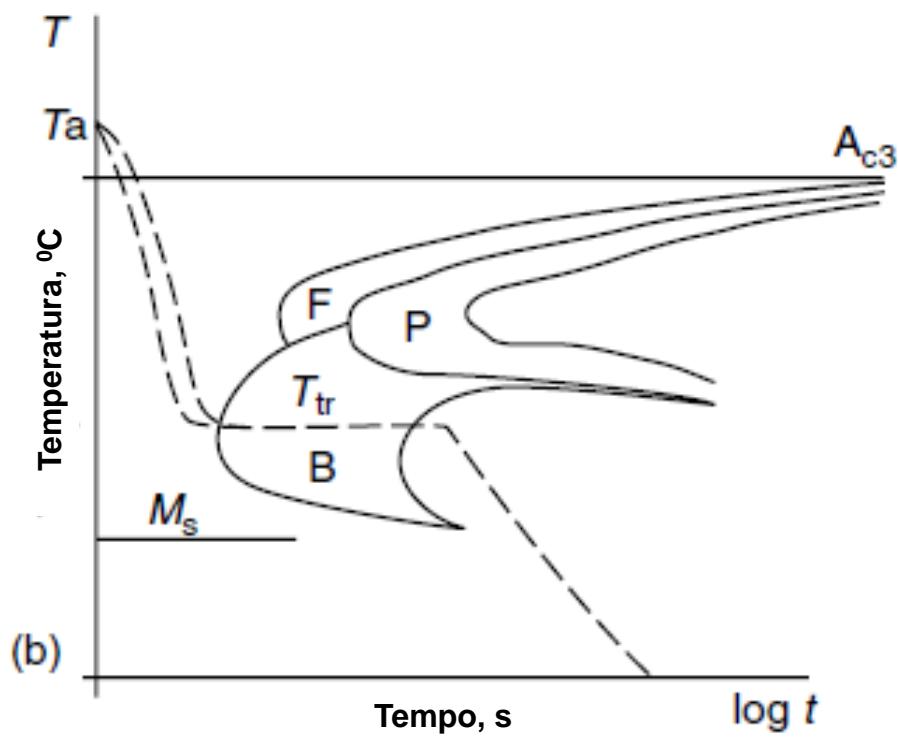
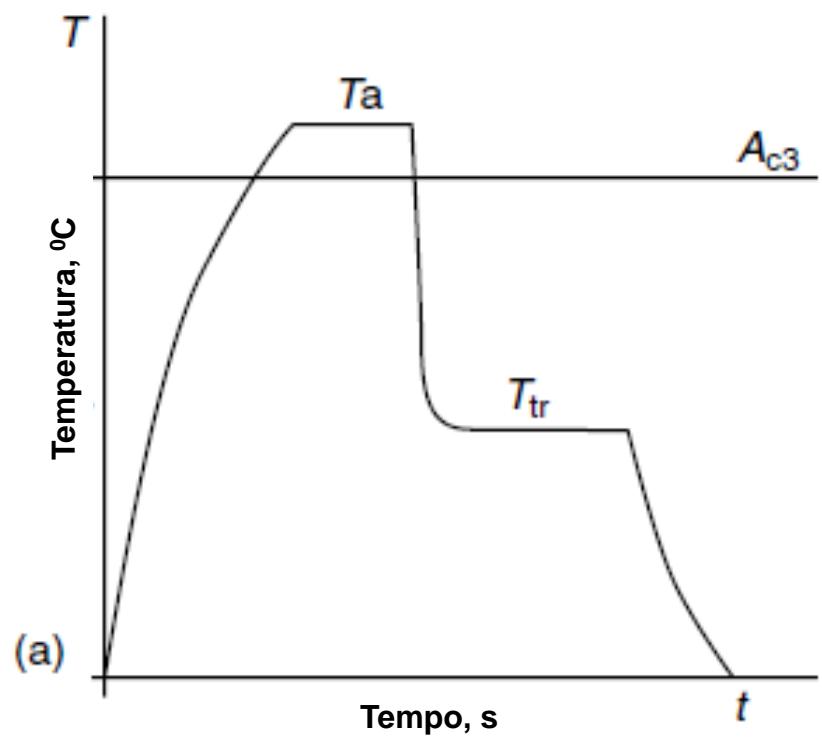
Consiste em aquecer o aço até o campo austenítico, manter durante certo tempo (encharque) e, em seguida, resfriar rapidamente até a faixa de 250 a 450°C, permanecendo no patamar isotérmico até a completa transformação da austenita em bainita.

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.

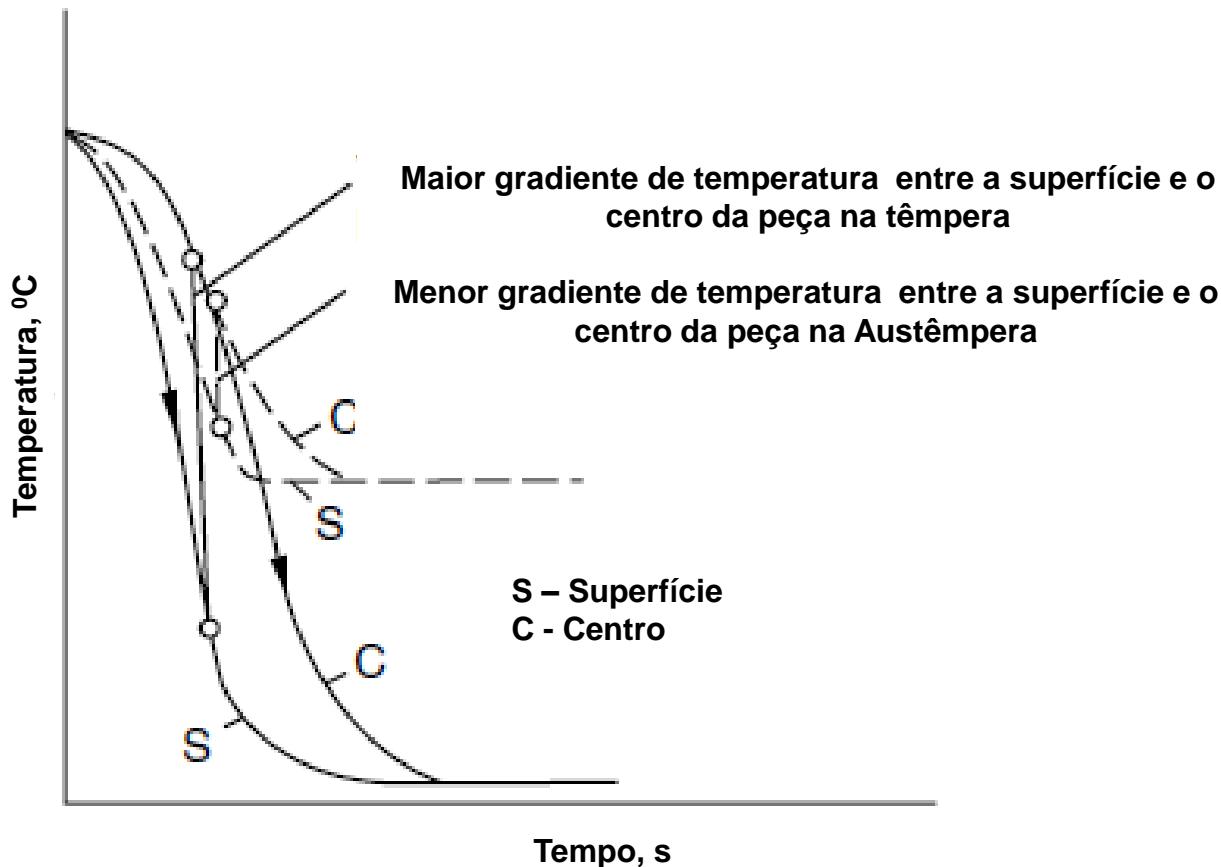


Austêmpera



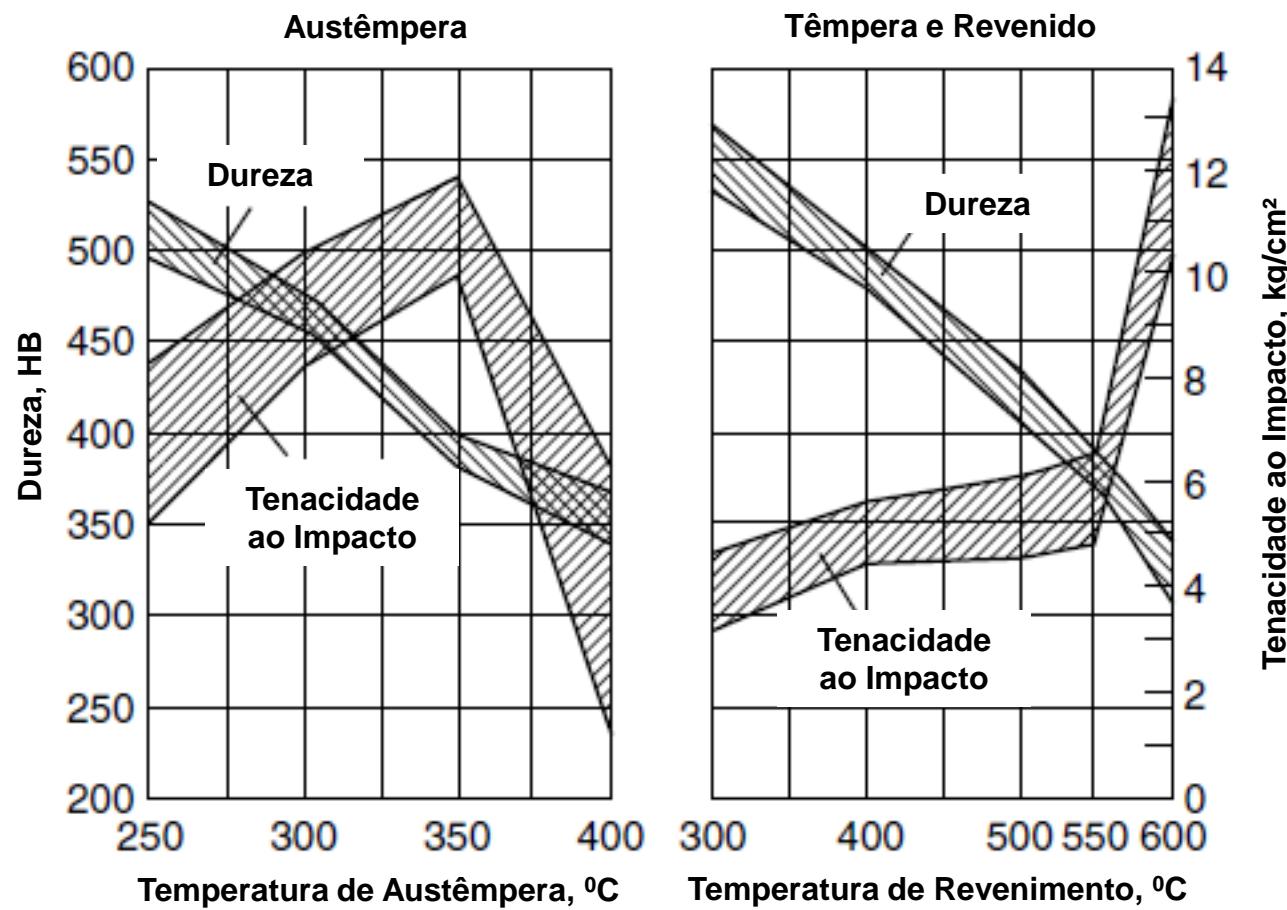


Austêmpera





Austêmpera





Austêmpera

