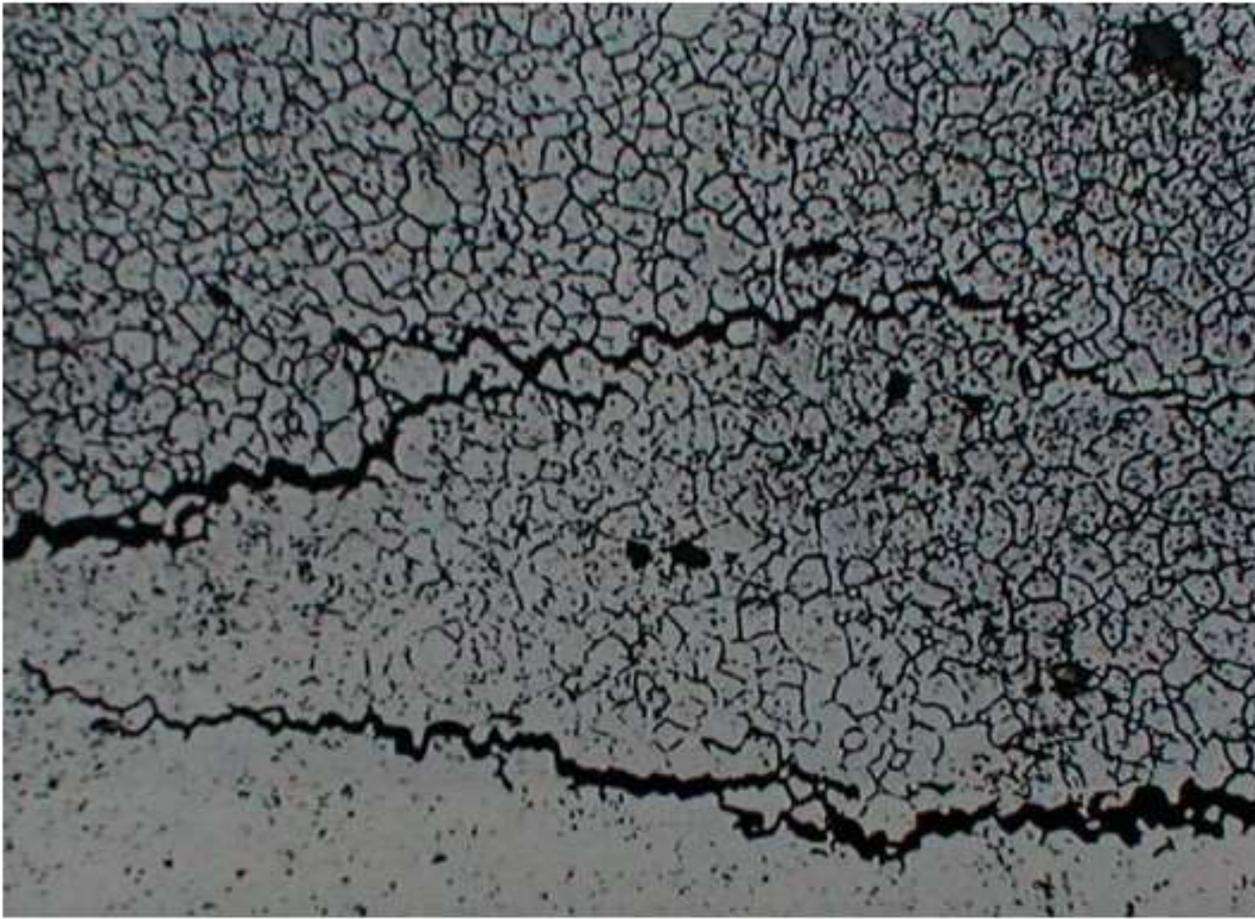


REVENIDO

Profa.Dra. Lauralice Canale





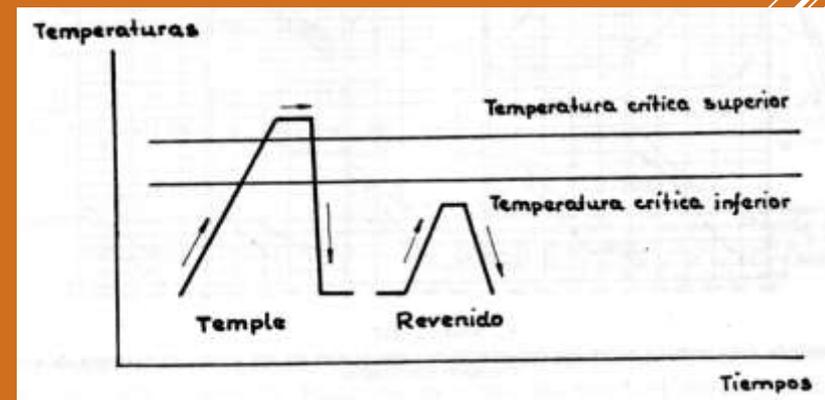
TRINCAS DE TÊMPERA



TRINCAS DE TÊMPERA

- ▶ No estado temperado, a martensita, além de ser mais dura, é tão frágil que não pode ser utilizada para a maioria das aplicações
- ▶ As tensões internas que possam ter sido introduzidas durante a têmpera tem um efeito de enfraquecimento
- ▶ A ductilidade e a tenacidade podem ser aprimoradas e as tensões internas aliviadas através um tratamento de revenido

O revenido é conseguido através do aquecimento de um aço martensítico até uma temperatura abaixo do eutetóide durante um intervalo de tempo específico



MARTENSITA REVENIDA



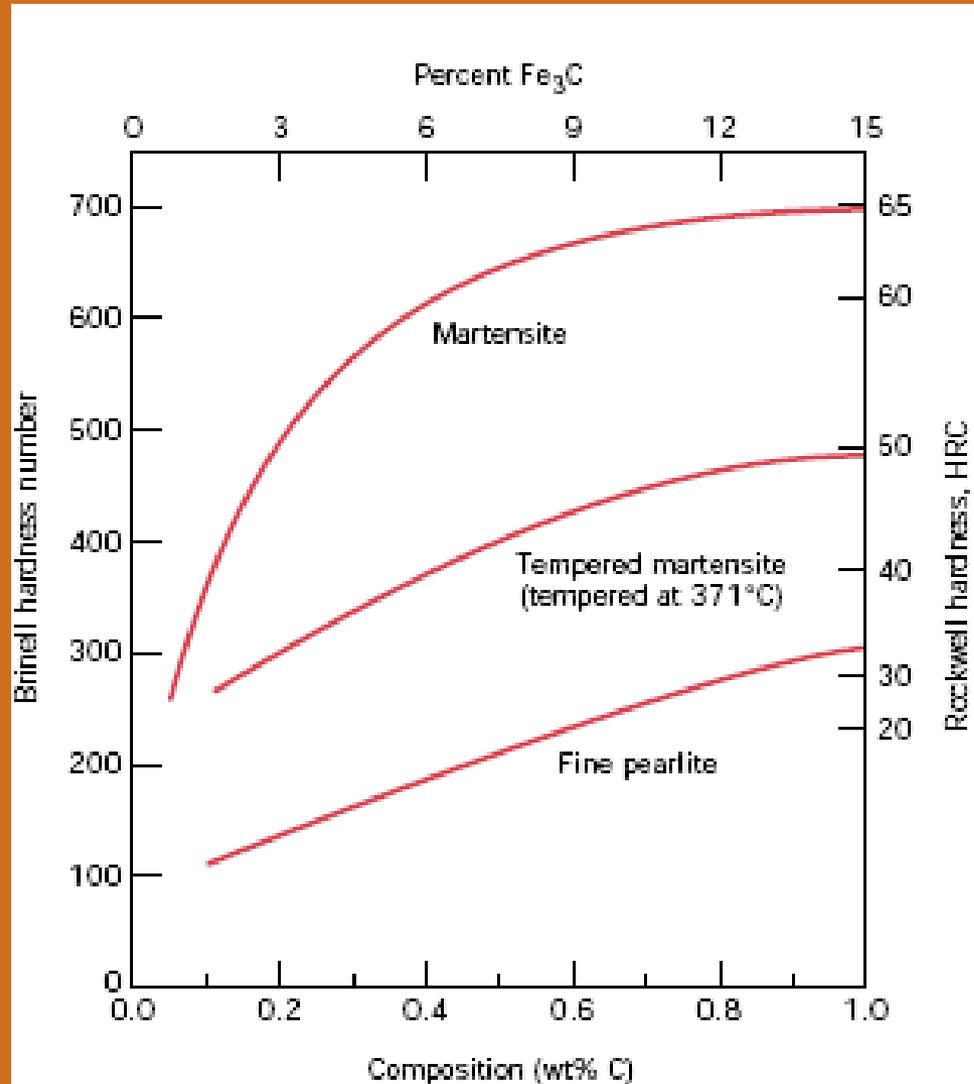
A martensita TCC monofásica, que está supersaturada em carbono se transforma em martensita revenida, composta por ferrita e cementita

A microestrutura da martensita revenida consiste em partículas de cementita extremamente pequenas e uniformemente distribuídas

PROPRIEDADES MECÂNICAS

- ▶ A martensita revenida pode ser quase tão dura e resistente quanto a martensita, porém com ductilidade e tenacidade aprimoradas
 - ▶ A fase cementita, dura, reforça a matriz de ferrita ao longo dos contornos e atuam como barreiras de discordâncias durante a deformação plástica
 - ▶ A fase ferrita, é muito dútil e relativamente tenaz, o que responde pela melhoria dessas duas propriedades na martensita revenida
- 

PROPRIEDADES MECÂNICAS



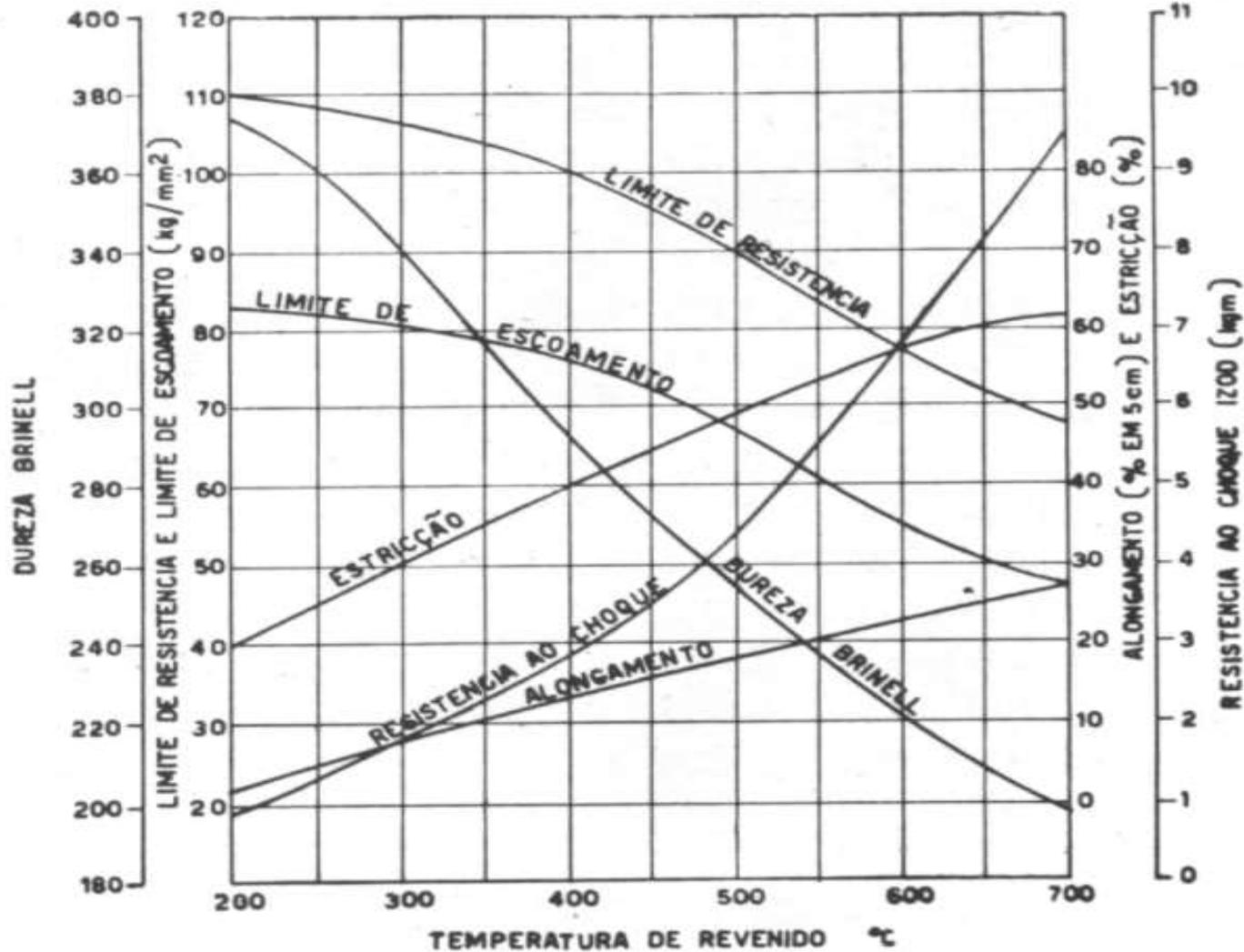
PROPRIEDADES MECÂNICAS

As variações de propriedades mecânicas são dependentes do tempo e temperatura do revenido

Como a difusão do carbono está ligada à formação de martensita revenida, o aumento de temperatura irá acelerar o processo de difusão, a taxa de crescimento das partículas de cementita e assim a taxa de amolecimento



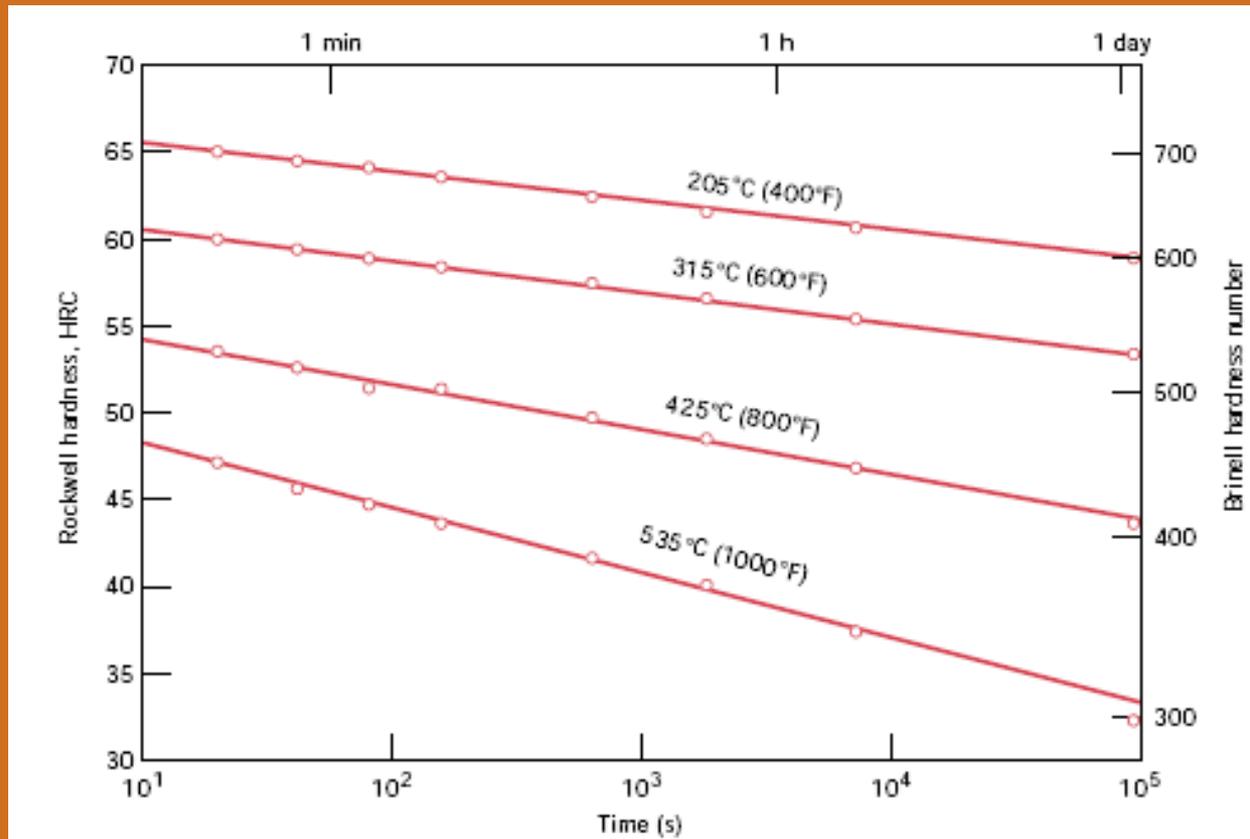
PROPRIEDADES MECÂNICAS



Com o aumento de tempo, a dureza diminui, o que corresponde ao crescimento e coalescência das partículas de cementita

O coalescimento é idêntico ao tratamento de esferoidização, por isso em tratamentos à temperaturas que se aproximam do eutetóide e após várias horas a estrutura será composta por cementita globulizada

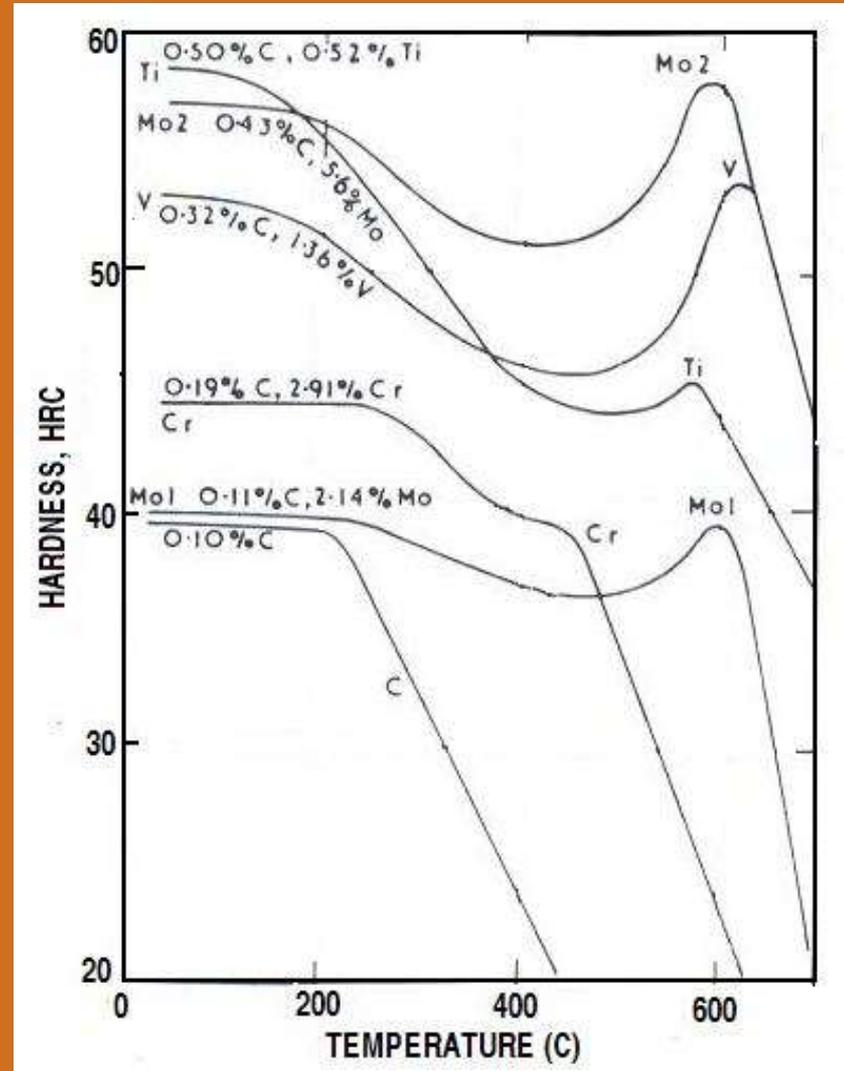
TEMPO X TEMPERATURA



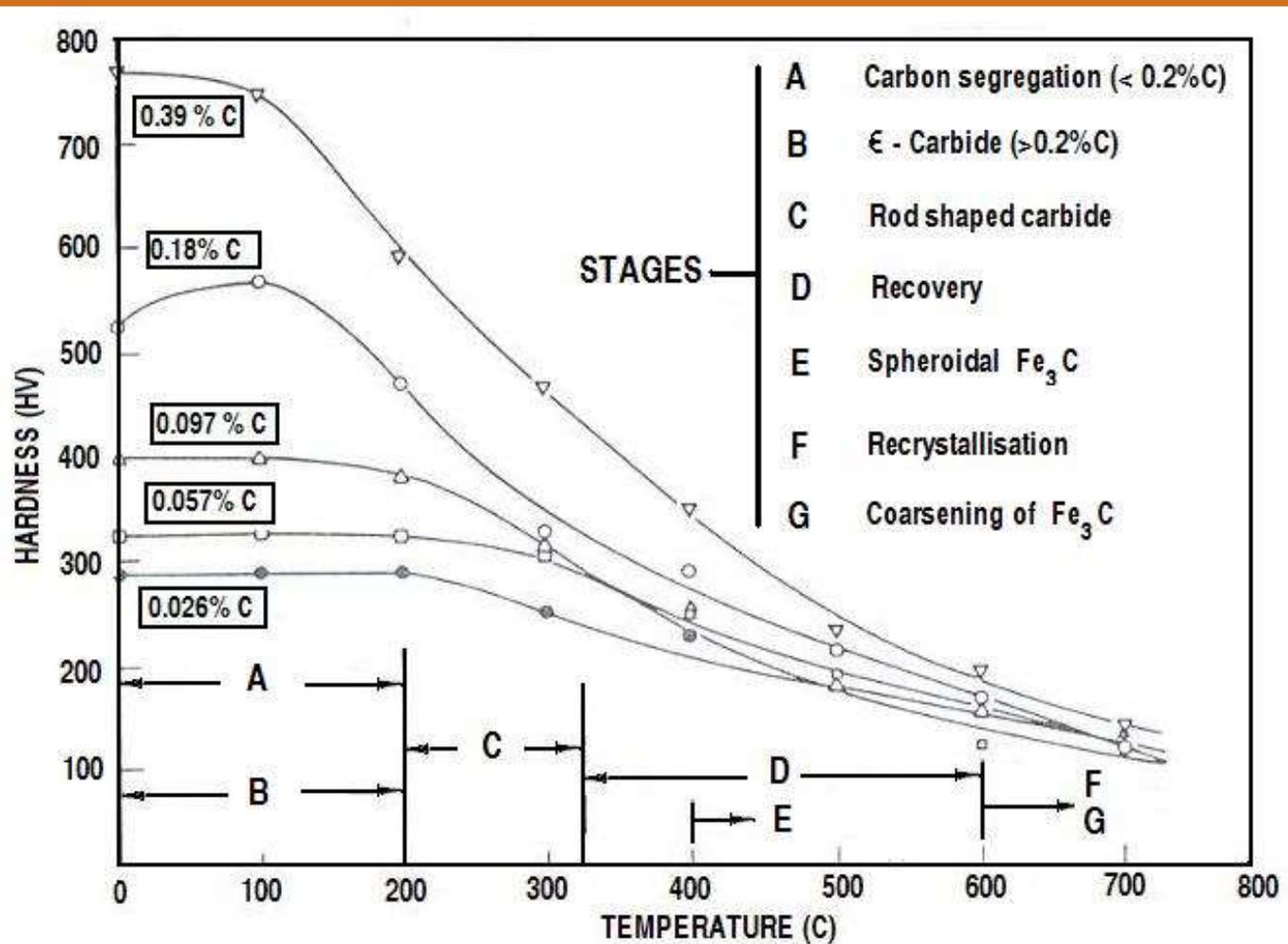
PROPRIEDADES MECÂNICAS

Aços com determinadas porcentagens de carbono e elementos de liga podem apresentar após a têmpera uma austenita residual que não se transformou

No tratamento de revenido a austenita retida se transforma em outros constituintes. Há também a precipitação de finíssimos carbonetos de liga, que promovem o chamado endurecimento secundário.



ESTÁGIOS DO REVENIDO



ETAPAS DO REVENIDO

- ▶ Sendo a martensita uma estrutura metaestável, o aquecimento facilita a busca do equilíbrio
- ▶ A metaestabilidade da martensita é caracterizada pela permanência de átomos de carbono nos interstícios em que se encontravam a austenita
- ▶ Com o aquecimento fornece-se energia para a difusão e o carbono sai da supersaturação, precipitando-se como carbonetos
- ▶ As reações que ocorrem no revenido acontecem em seqüência a medida que se aumenta o tempo e/ou a temperatura do tratamento

PRIMEIRA ETAPA

- ▶ Temperaturas entre 100/150°C até 200/250°C
- ▶ Também chamado de alívio de tensões, pois nenhuma mudança estrutural ocorre embora a tenacidade aumente
- ▶ Aços com teores menores que 0,25% de C – difusão do carbono na martensita, aglomerando-se nas discordâncias
- ▶ Aços com teores maiores que 0,25% de C – ocorre a precipitação de um carboneto metaestável, hexagonal compacto, o carboneto ϵ
- ▶ A precipitação de carbonetos provoca uma perda importante de C, que ao final dessa etapa perde parcialmente sua tetragonalidade e se transforma numa rede cúbica. Ainda permanece supersaturada em relação à ferrita

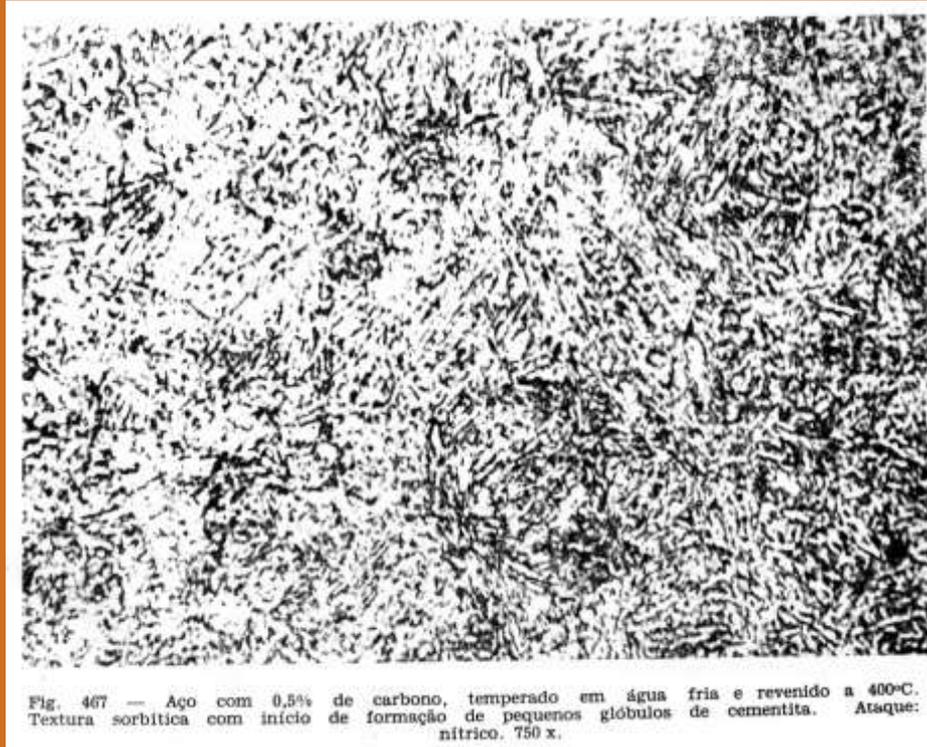
SEGUNDA ETAPA

- ▶ **Temperatura entre 200° C e 350° C**
 - ▶ **Essa etapa ocorre apenas quando há a presença de austenita retida, por isso é muito importante em aços com teores elevados de C e elementos de liga onde o teor de austenita retida é muito alto**
 - ▶ **Nessa etapa a austenita retida se transforma (bainita/martensita).**
- 

TERCEIRA ETAPA

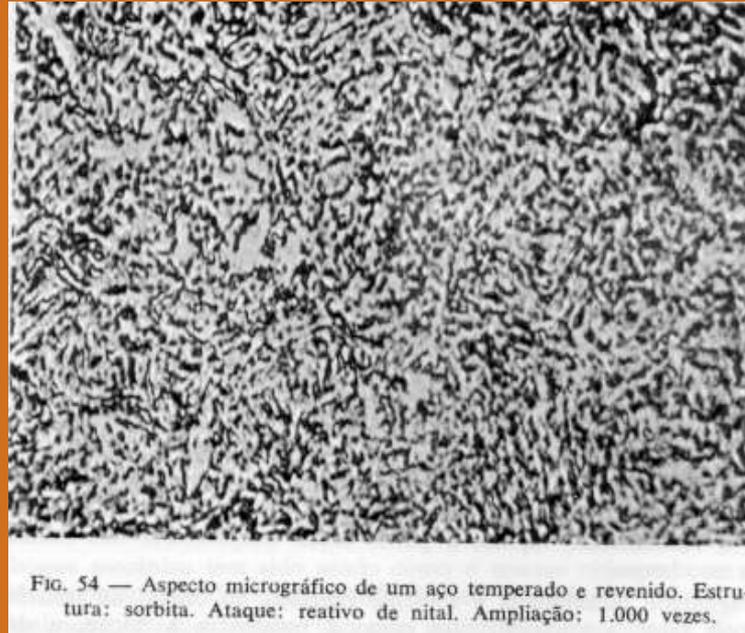
- ▶ O carboneto ϵ formado na primeira etapa transforma-se em cementita
- ▶ Aumentando a temperatura forma-se um precipitado de cementita nos limites das agulhas de martensita e em seu interior
- ▶ Com o aumento de temperatura se redissolve a cementita do interior das agulhas, engrossando a cementita, que envolve a martensita
- ▶ Com o aumento da temperatura essa cementita vai tornando-se descontínua nos limites das agulhas de martensita
- ▶ Estrutura: martensita revenida

TERCEIRA ETAPA: MARTENSITA REVENIDA



**Para temperaturas abaixo de 400° C ocorre o início da formação de pequenos glóbulos de cementita
Esse aspecto é o típico da martensita revenida.**

TERCEIRA ETAPA

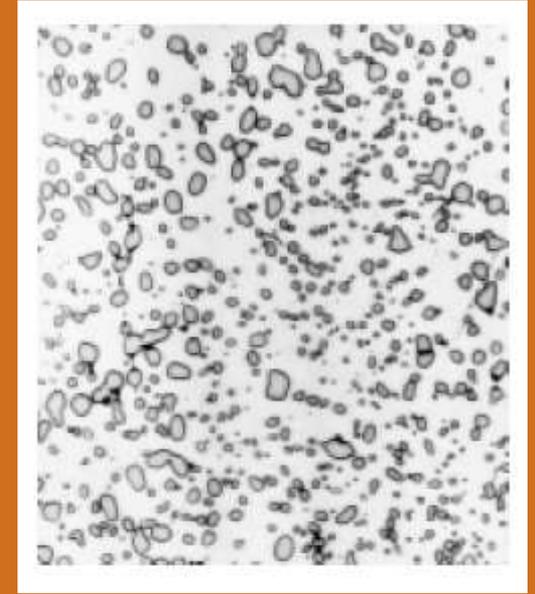


Entre 400°C e 600°C a cementita tende a se globulizar e perde a coerência com a matriz

O aço apresenta-se agora com uma estrutura constituída de pequenas partículas de cementita, geralmente tendendo para a forma esferoidal em um fundo de ferrita. Essa textura característica era denominada sorbita

TERCEIRA ETAPA: ESTRUTURA ESFEROIDIZADA

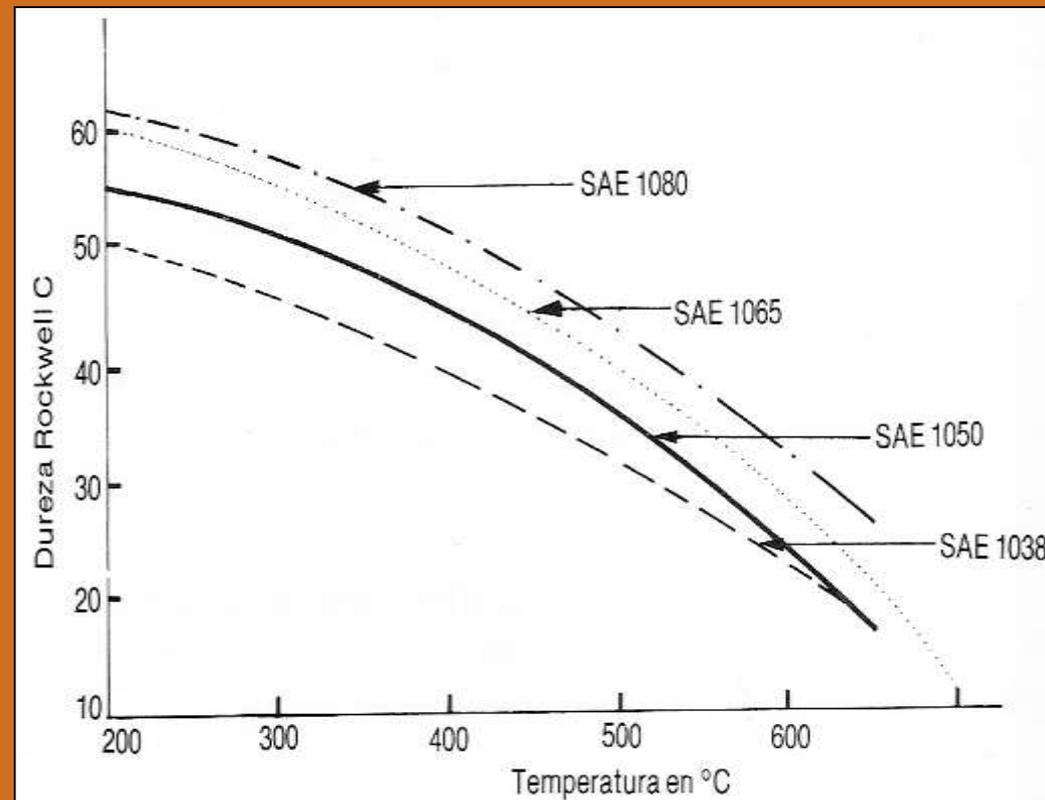
- ▶ **Acima de 600°C a matriz recristaliza com a formação de novos grãos ferríticos**
- ▶ **A continuação do processo é um coalescimento contínuo das partículas de cementita. Essa estrutura é típica também do recozido de esferoidização**
- ▶ **É a estrutura mais estável de todos os agregados de ferrita e cementita**



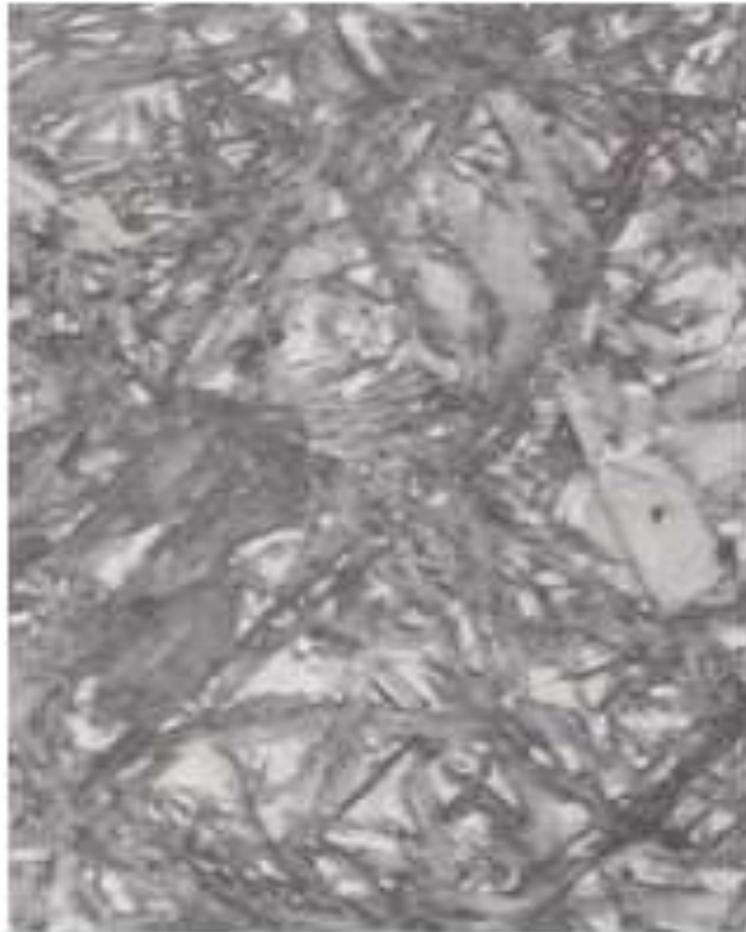
REVENIMENTO

CURVA DE REVENIMENTO

- ▶ **Consiste:**
Reaquecimento das peças temperadas, a temperaturas abaixo da linha A_1 , a temperatura será ajustada de acordo com as propriedades mecânicas desejadas.



TÊMPERADO
SAE 1095 100x

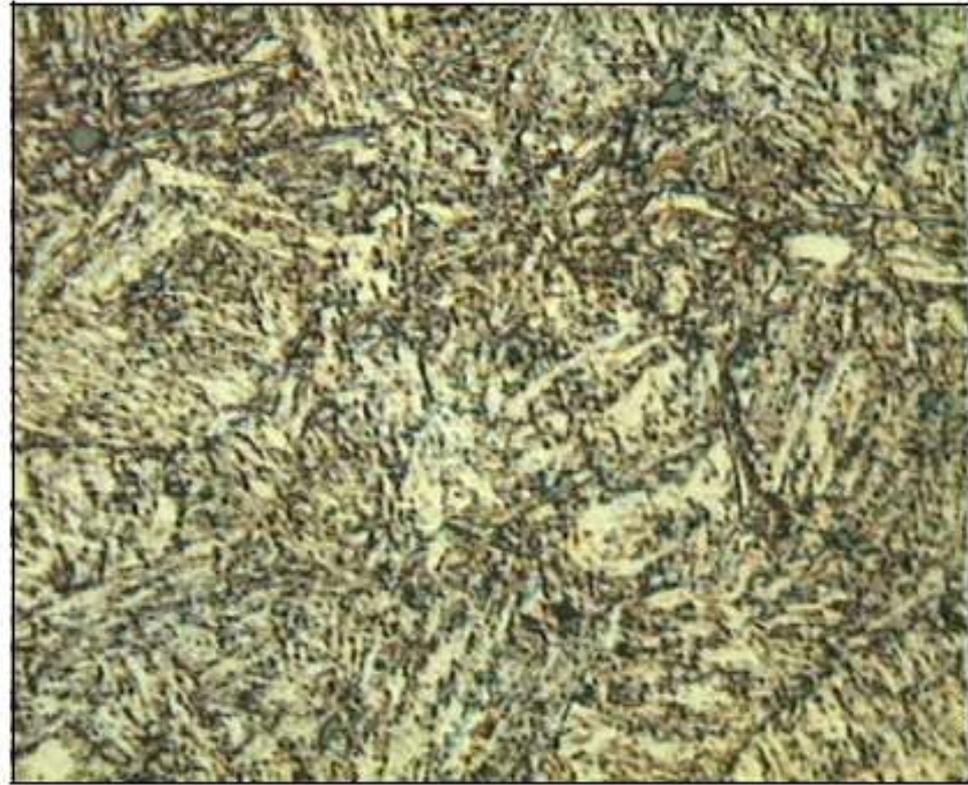


TÊMPERADO E REVENIDO
SAE 1095 100x





Martensita



Martensita Revenida

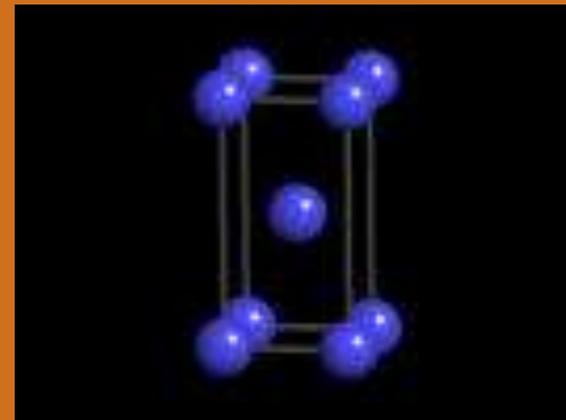
ETAPAS DO REVENIDO – OUTROS AUTORES

Etapa 1, até 250°C – precipitação de carboneto de ferro - ϵ ; perda parcial da tetragonalidade.

Etapa 2, entre 200 e 300°C – decomposição da austenita retida

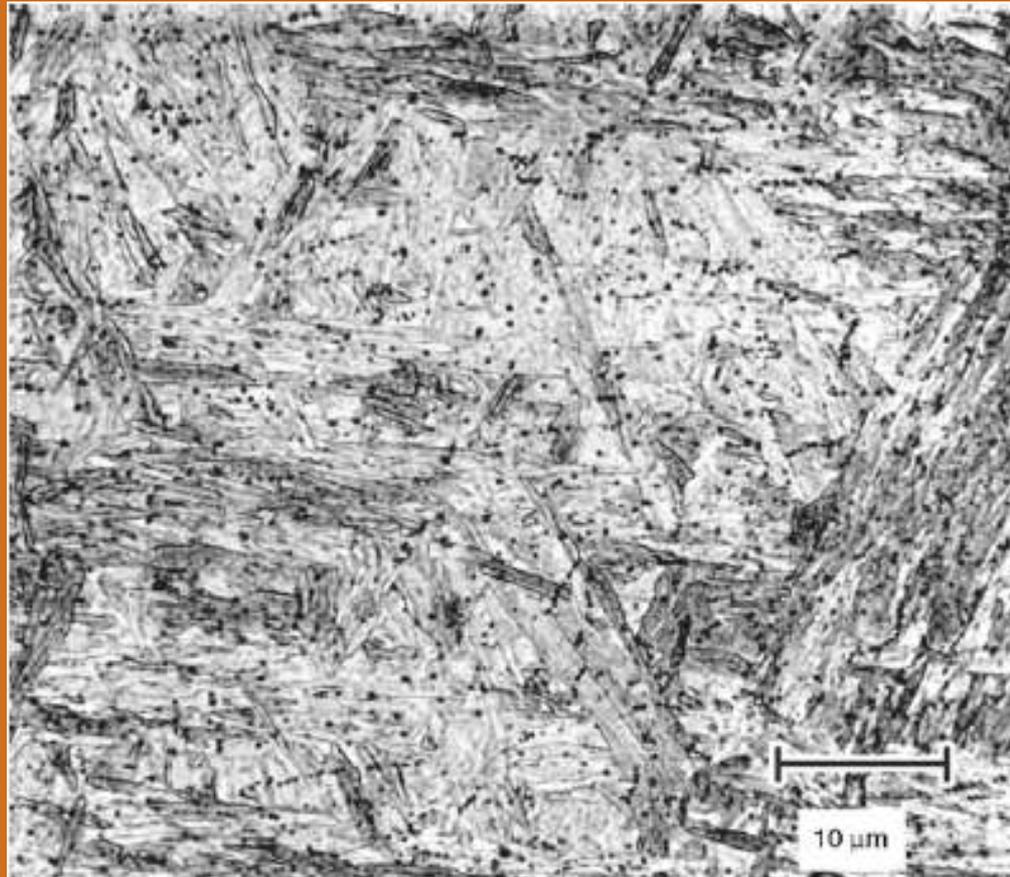
Etapa 3, entre 300 e 350°C – substituição do carboneto de ferro - ϵ pela cementita; a martensita perde a tetragonalidade

Etapa 4, acima de 350°C – a cementita engrossa e esferoidiza; recristalização da ferrita



REVENIMENTO DOS AÇOS

MARTENSITA EM AÇO 0,2%C E APÓS REVENIMENTO A 550°C



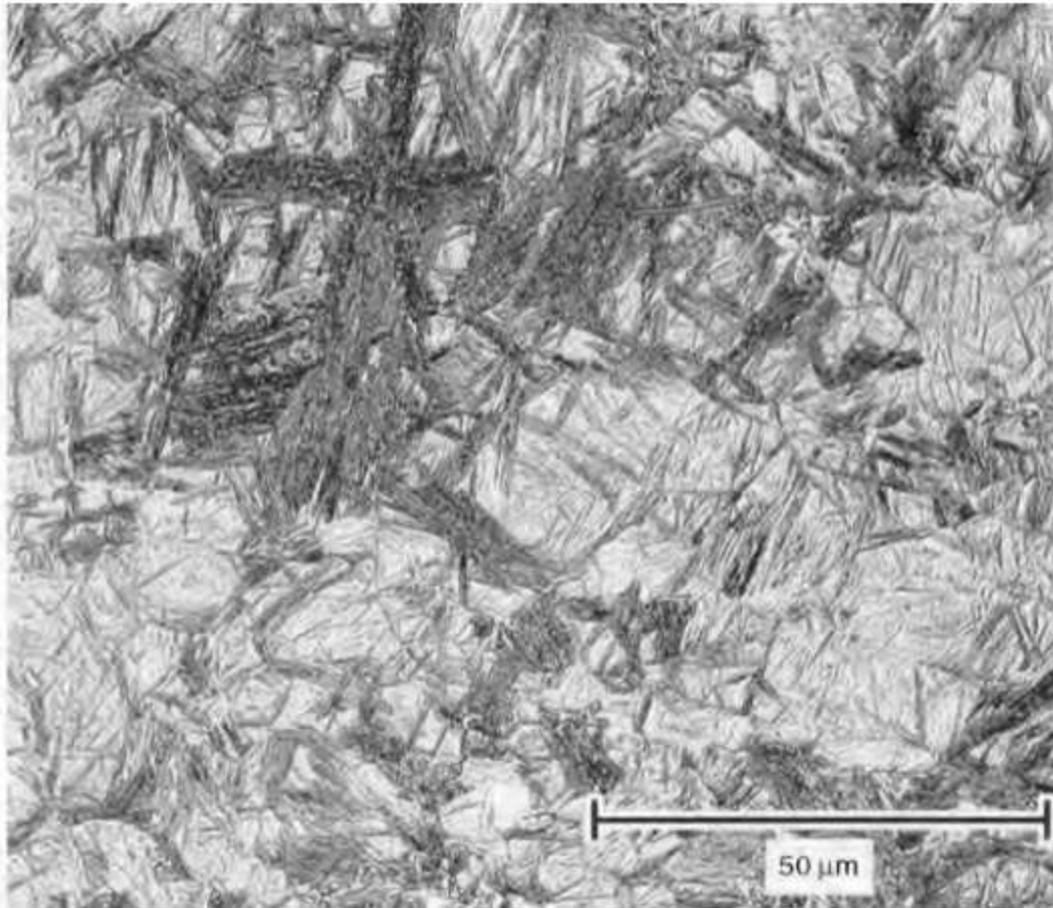


Fig. 9.37 Microstructure of quenched and tempered low-alloy UNS G43400 steel showing a mixture of bainite (dark etching constituent) and martensite (lighter gray). 4% picral + 2% nital etch. Original magnification 500x

AUSTENITA RETIDA

- ▶ Quando na microestrutura dos aços aparece austenita retida as transformações no revenido tornam-se um pouco mais complexas
- ▶ Inicialmente há a transformação de martensita tetragonal em martensita cúbica e a precipitação de carbonetos o que se manifesta com um escurecimento da martensita.
- ▶ O fundo branco sobre o qual se destaca o reticulado martensítico é a austenita que não se transformou

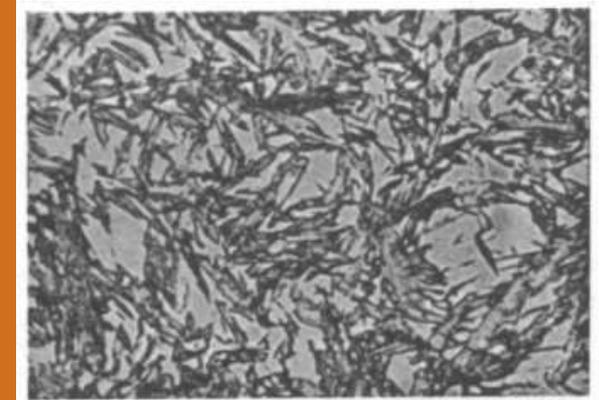


FIGURA 243
Templado y revenido a 175°



FIGURA 244
Templado y revenido a 200°.

AUSTENITA RETIDA

- ▶ A partir de 225°C começa a decomposição da austenita
- ▶ Há um gradual desaparecimento do fundo branco de austenita e um escurecimento progressivo de toda a estrutura
- ▶ No caso desse aço a transformação de austenita em outros constituintes ocorre entre 225°C e 375°C



FIGURA 246

Templado y revenido a 300° .

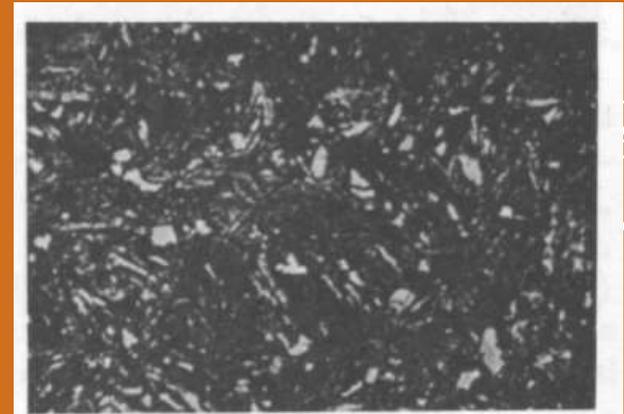


FIGURA 247

Templado y revenido a 350° .

AUSTENITA RETIDA

- ▶ No caso desse aço ele atinge o máximo de escurecimento da estrutura em 400°C
- ▶ Após essa temperatura começam a surgir partículas claras de cementita e sua esferoidização que se completa em temperaturas mais elevadas

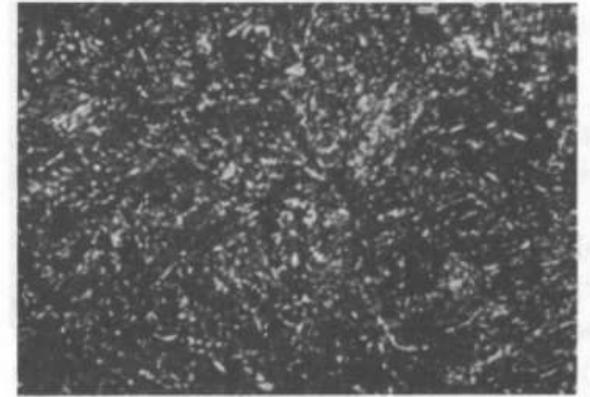


FIGURA 248

Templado y revenido a 375°.

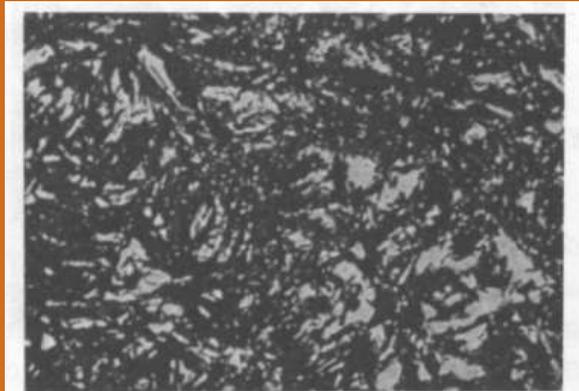


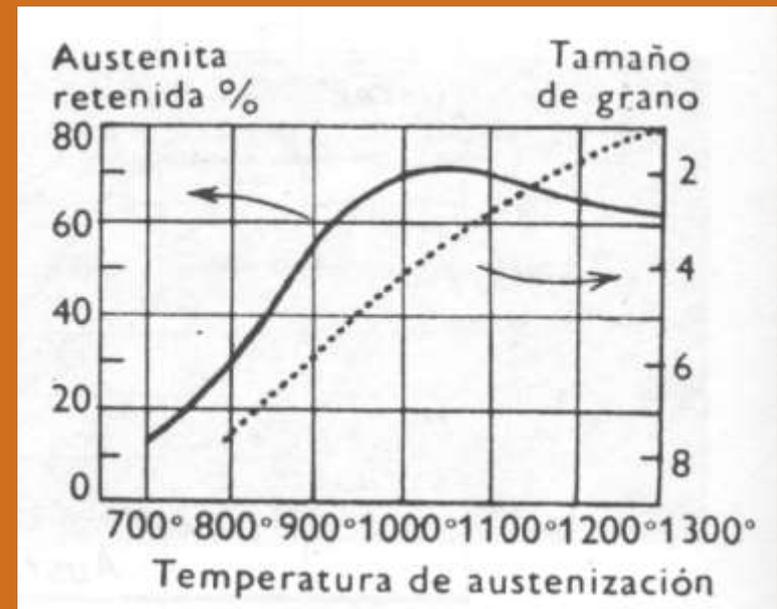
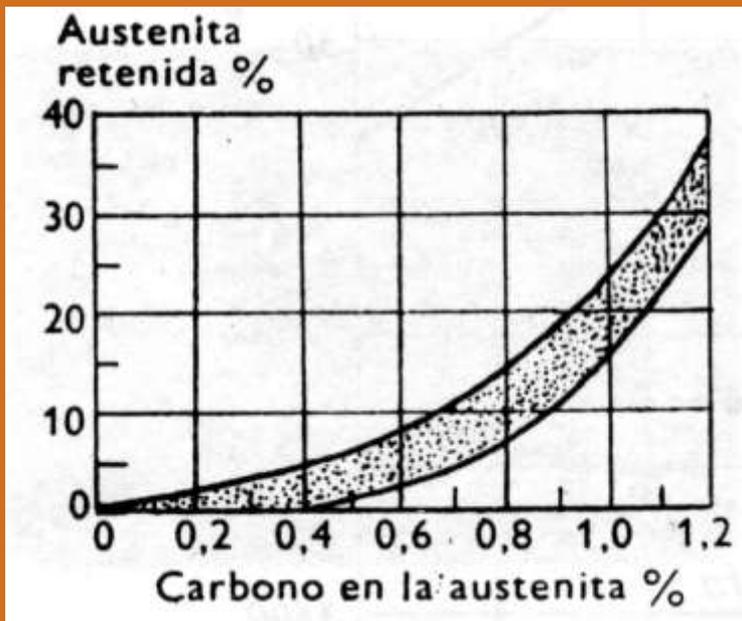
FIGURA 249

Templado y revenido a 450°.

A quantidade de austenita retida presente nos aços temperados depende de fatores como: composição, temperatura de austenitização, etc.

As figuras mostram a relação da porcentagem de carbono e da temperatura de austenitização com a quantidade de austenita retida

A própria transformação da austenita retida durante o revenido é influenciado pelo teor de carbono



AUSTENITA RETIDA

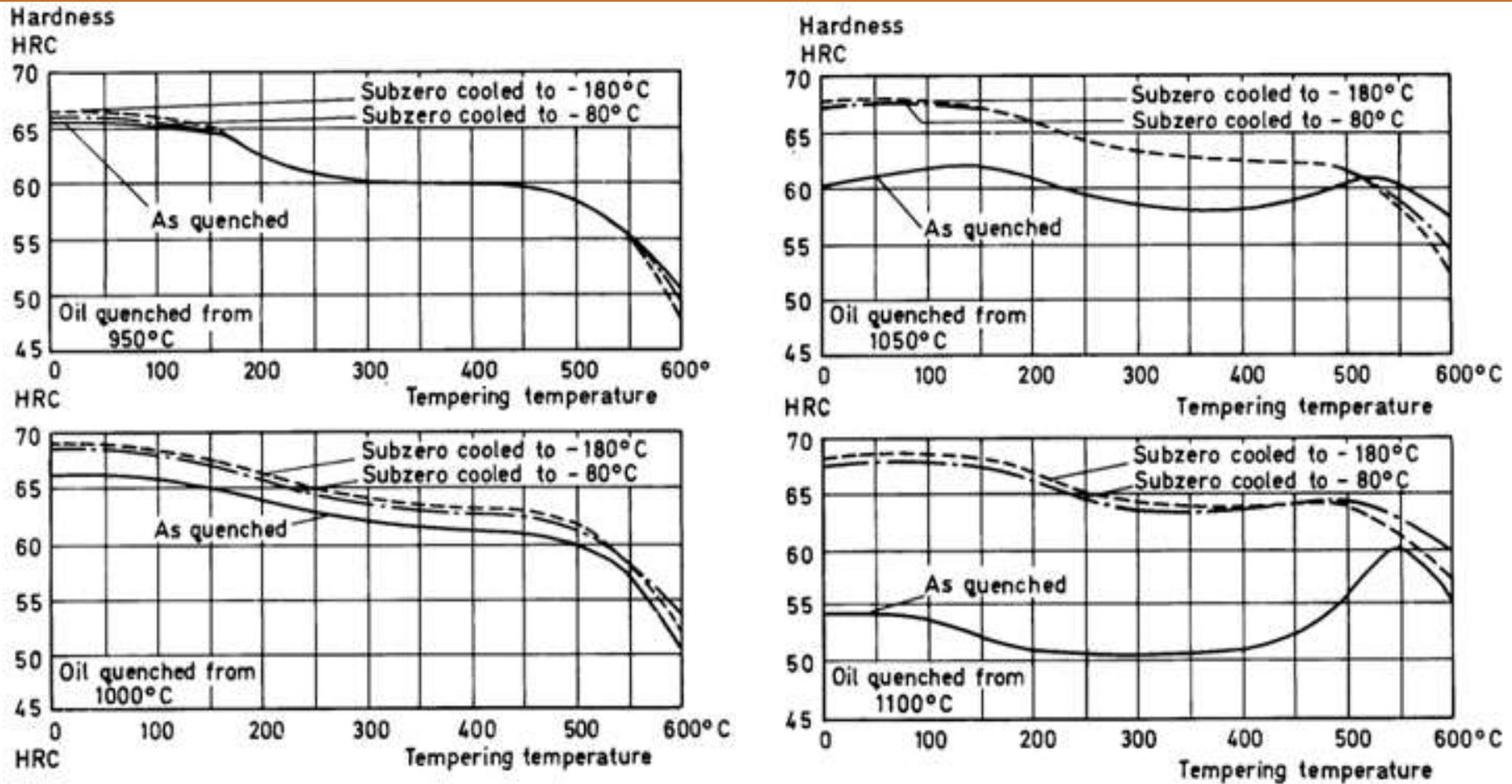


Figure 6.22 Steel D 6. Influence of tempering temperature on hardness of specimens (i) after oil quenching from various temperatures, and (ii) after oil quenching followed by subzero treatments at -80°C and -180°C , respectively. Specimens 30 mm diameter. Holding time: at hardening temperature, 30 min; at tempering temperatures, 1 h

DUPLO REVENIDO

- ▶ Em aços em que a austenita leva um tempo muito grande para se transformar, embora ela não se transforme, a austenita sofre modificações com a precipitação de carbonetos diminuindo a supersaturação em carbono e elementos de liga
- ▶ A saída desses elementos desestabiliza austenita, aumenta M_s e no resfriamento subsequente essa austenita se transforma em martensita
- ▶ Dessa forma tem-se martensita revenida e essa nova martensita formada sem revenir
- ▶ Essa situação induz uma certa fragilidade, portanto torna-se necessário mais um revenido
- ▶ Em aços de alto C e alta liga são feitos 4 revenidos

FRAGILIDADE DO REVENIDO

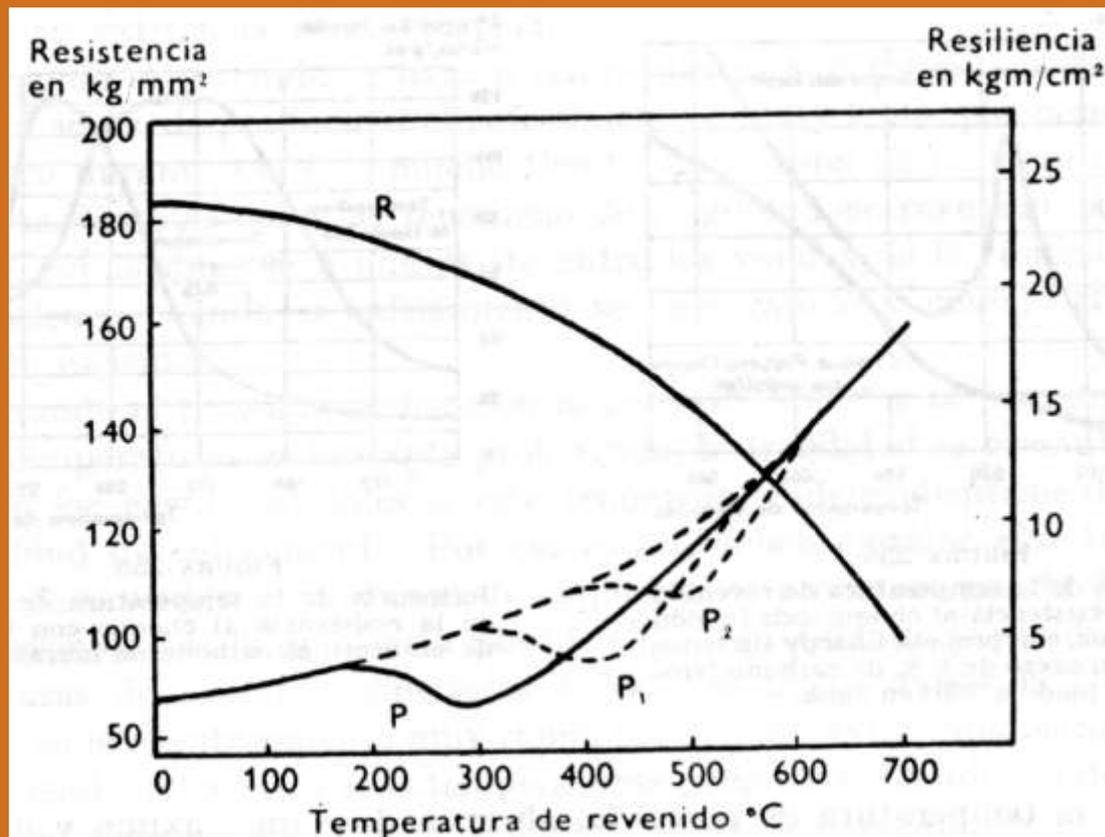
O objetivo do revenido é aumentar a tenacidade, entretanto em alguns casos, o revenido pode ter efeito contrário, fragilizando o material

Quando se efetua o revenido em temperaturas entre 230° C e 370° C em algumas classes de aços há uma diminuição de tenacidade

Essa fragilidade ocorre devido à formação de uma rede ou película que envolve as agulhas de martensita e tem a ver também com a quantidade de fósforo presente na composição

FRAGILIDADE DO REVENIDO

Pode ser minimizada mantendo-se baixo o teor de fósforo e eliminada empregando-se composições com alto teor de Si, pois inibe o início de precipitação de carbonetos.



FRAGILIDADE KRUPP

- ▶ Outro tipo de fragilidade, chamada Fragilidade Krupp se apresenta quando no revenido os aços são mantidos por algum tempo, ou resfriados lentamente a temperaturas entre 400 e 550° C
- ▶ Essa fragilidade causa uma descoesão dos grãos e está relacionada com a presença de impurezas no aço que segregam próximo aos contornos dos grãos na austenitização
- ▶ Essas impurezas próximas aos antigos contornos assumem uma configuração fragilizante nessa faixa de temperatura
- ▶ A susceptibilidade a esta fragilidade aumenta com a presença dos elementos de liga Mn, Cr e Ni e é representada pela letra S

AÇOS SUSCEPTÍVEIS À FRAGILIDADE

- ▶ 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

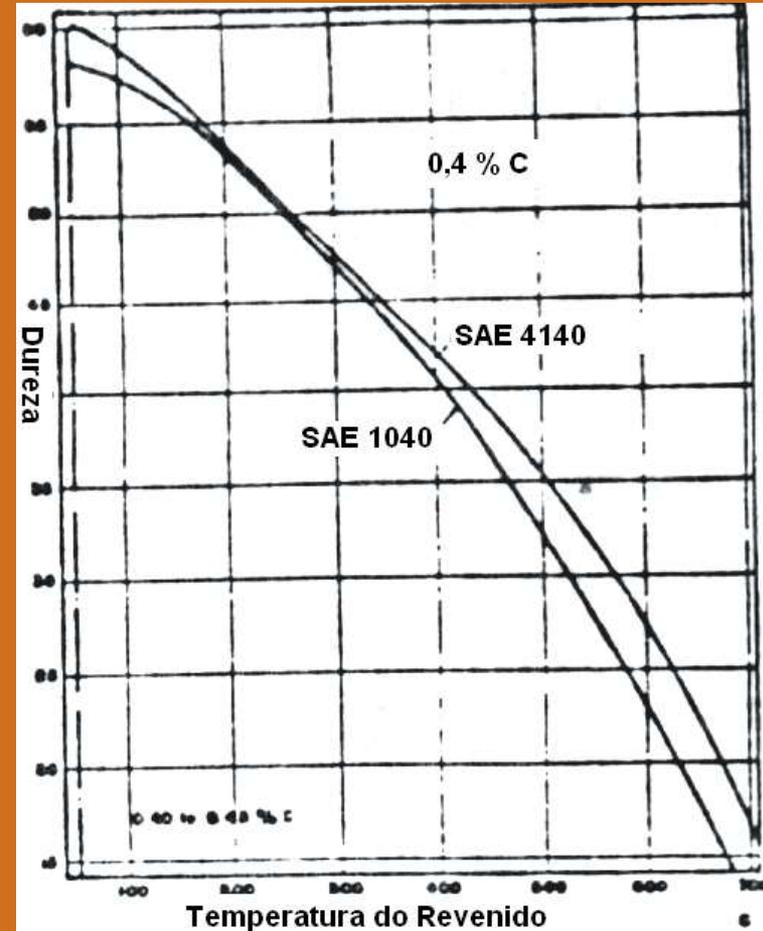
* Antimônio é o mais prejudicial

COMO MINIMIZAR A FRAGILIDADE DO REVENIDO

- ▶ Manter os teores de P abaixo de 0,005% e S menor 0,01%
- ▶ A adição de Mo em porcentagens de 0,15 a 0,5% de C é muito efetiva em evitar tal fragilidade
- ▶ Um aço fragilizado pode ter sua tenacidade restaurada reaquecendo - o a uma temperatura maior que 550 °C seguido de resfriamento rápido para evitar a permanência prolongada no aço nas temperaturas onde há fragilidade .

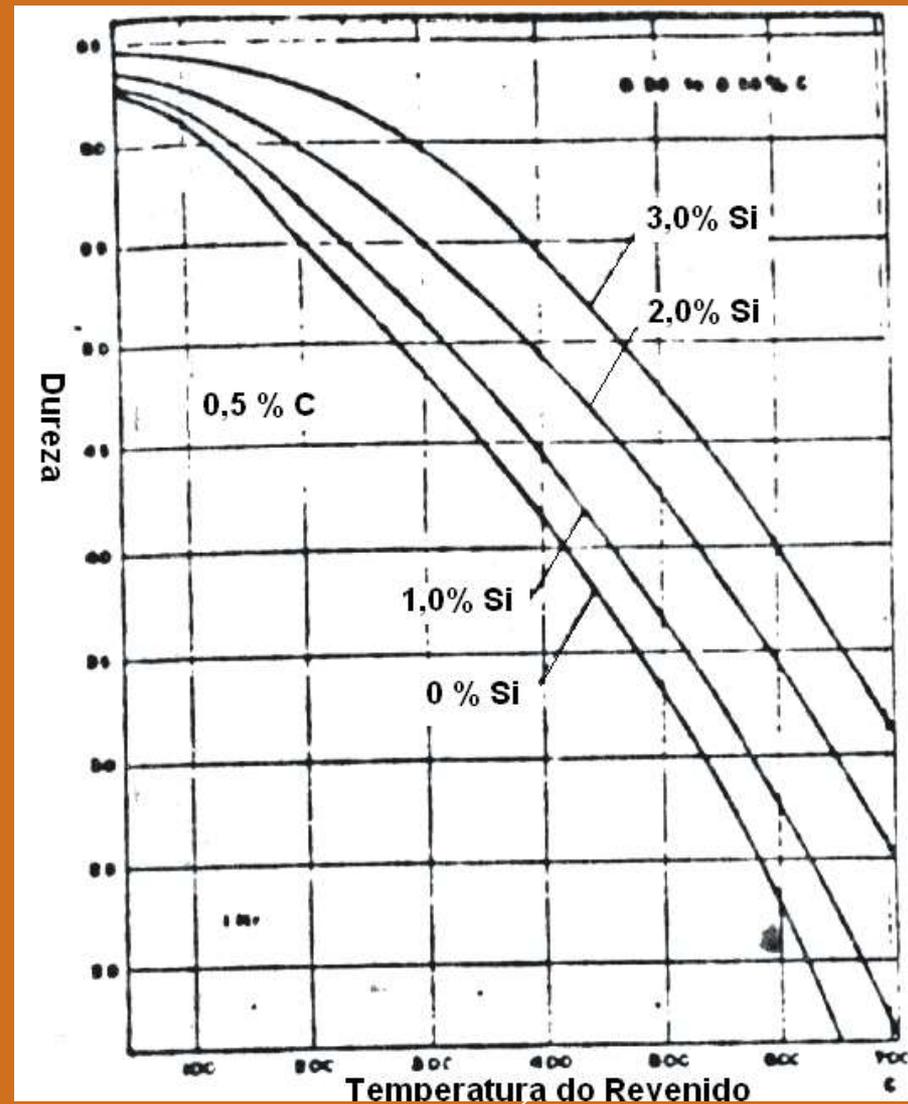
REVENIDO NOS AÇOS LIGADOS

- ▶ Quando há a presença de elementos de liga nos aços as reações de revenido mudam sensivelmente principalmente na presença de elementos com tendência a formar carbonetos
- ▶ Para elementos sem esta tendência há um atraso das reações que confere uma maior resistência ao amolecimento



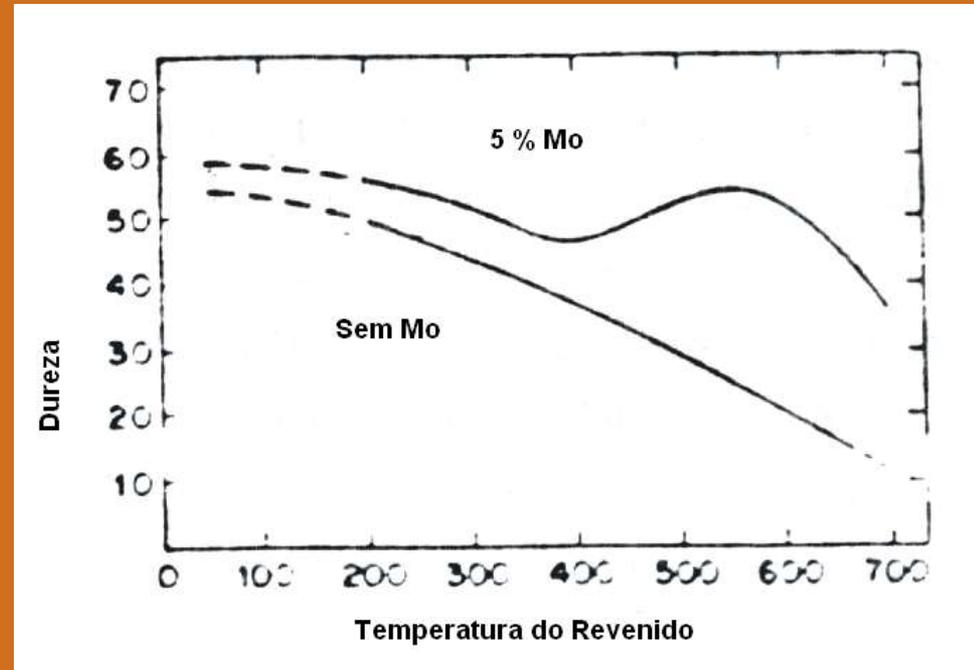
REVENIDO NOS AÇOS LIGADOS

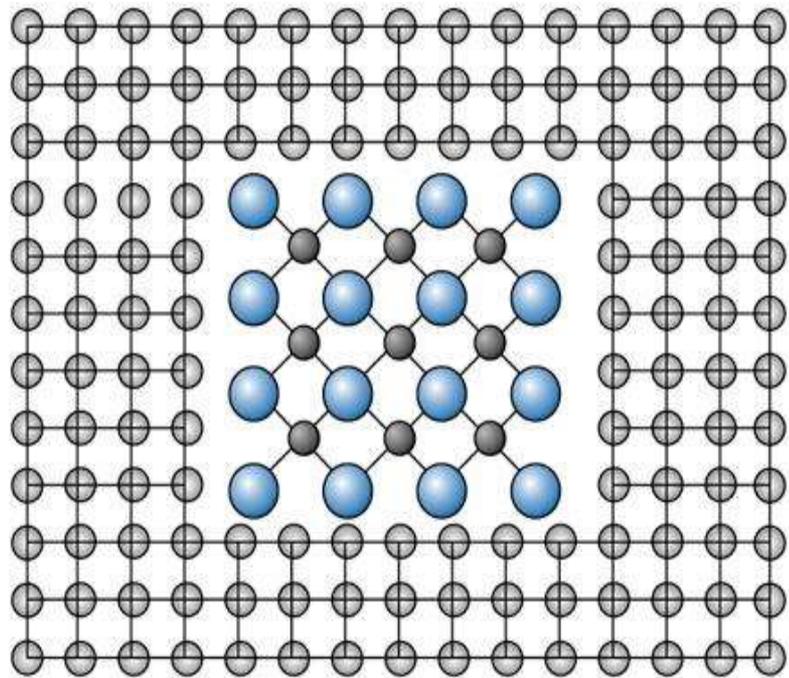
- ▶ O Si tem um efeito endurecedor de ferrita por solução sólida, por isso há uma grande variação da dureza com teores crescentes de Si
- ▶ A adição de Si evita também a fragilização do revenido
- ▶ Tanto o Si como outros elementos com tendência a formar carbonetos (Cr, Mo, W, V, Ti, Ni, Mn, Nb) retardam a perda da tetragonalidade da martensita e atrasam a esferoidização e engrossamento das agulhas de martensita



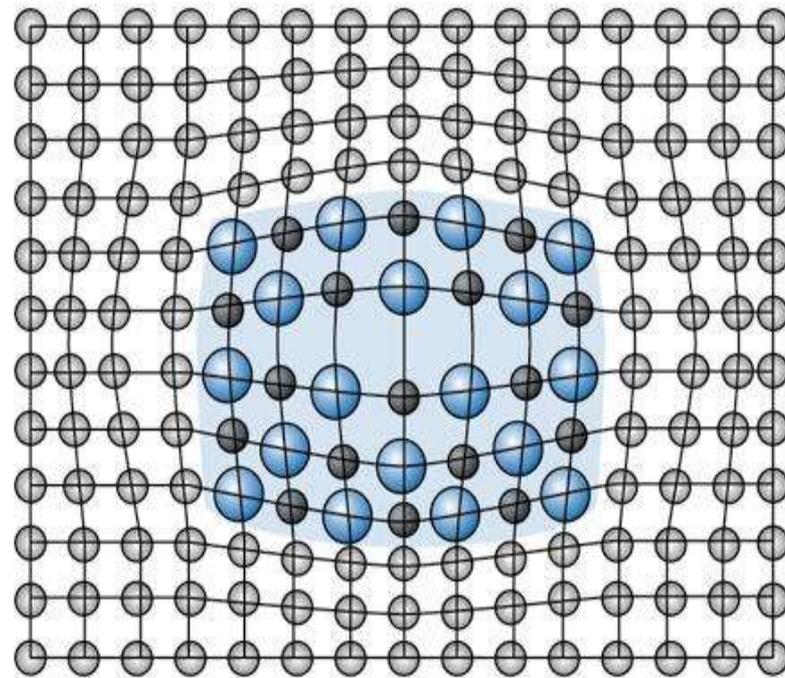
REVENIDO NOS AÇOS LIGADOS

- ▶ Acima de 500° C os aços contendo fortes formadores de carbonetos precipitam outros carbonetos às custas da dissolução da cementita, essa etapa é considerada a 4ª etapa do revenido
- ▶ Nessa etapa os carbonetos se formam de maneira bastante dispersa na matriz. Se forem coerentes com a matriz formam o chamado endurecimento secundário, como o encontrado em aços ferramentais





(a)



(b)

Tempering resistance

Resistência ao revenido:

Após a têmpera os aços são submetidos ao revenimento para obter as melhores combinações de propriedades.

O mecanismo envolve uma parcial degeneração da martensita via difusão dos átomos de C fora da solução sólida para formar finos carbonetos.

Tempering resistance

Se o revenido for feito a altas temperaturas e por tempos longos, a degeneração da martensita pode ser completa e a microestrutura será formada por ferrita e glóbulos de cementita (globulização).

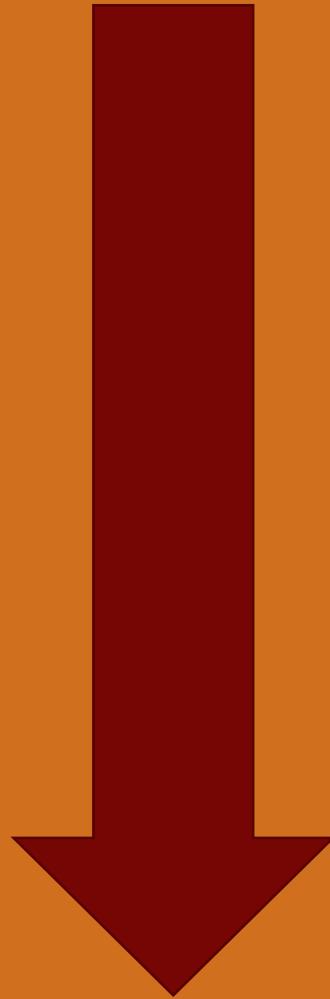
Elementos de liga afetam este processo, retardando ou suprimindo a formação da cementita ou estabilizado o carboneto ϵ .

Tempering resistance

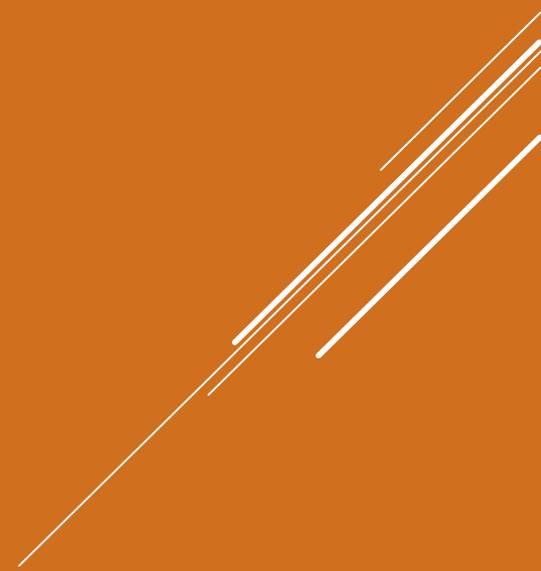
Assim elementos de liga fornecem a possibilidade de revenir a mais altas temperaturas a fim de obter mais ductilidade para um dado nível de resistência.

Além disso, possibilita que o componente trabalhe em temperaturas mais altas sem amolecimento

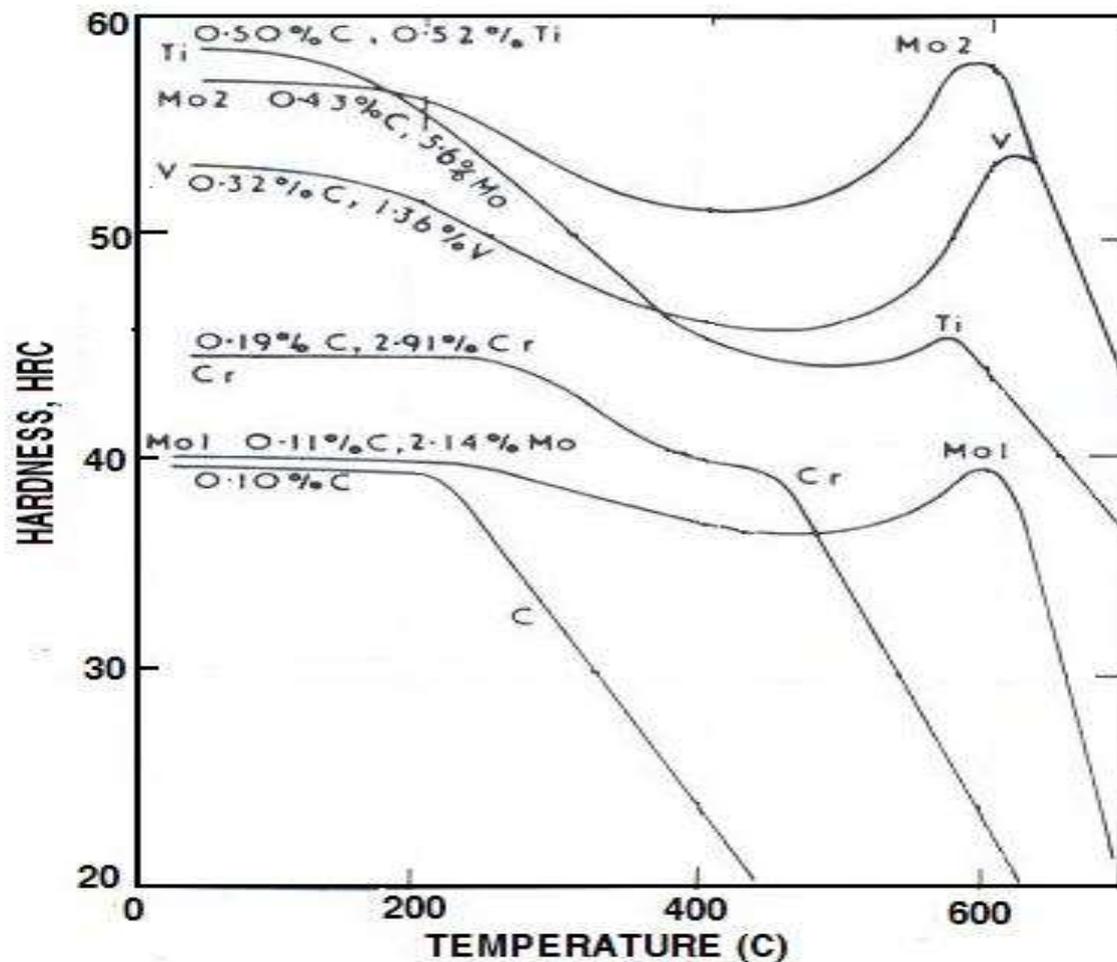
Vanádio
Molibdênio
Cromo
Manganês
Silício
Cobre
Níquel



Efeito
decrecente



Níveis mais altos desses elementos promovem o endurecimento secundário



REGRAS ÚTEIS

- Realizado tão logo o aço tenha resfriado até 50-75 graus C . Dependendo do aço pode trincar se atingir a temperatura ambiente.
- Aços ferramenta (complexos) devem ser aquecidos vagarosamente.
- Aços não ligados dá pra controlar a temperatura pela cor

REGRAS ÚTEIS

Table 5.5

<i>Temperature</i> °C	<i>Temper colour</i>	<i>Temperature</i> °C	<i>Temper colour</i>
220	Straw yellow	310	Light blue
240	Light brown	325	Grey
270	Brown	350	Grey–purple
285	Purple	375	Grey–blue
295	Dark blue	400	Dull grey

REGRAS ÚTEIS

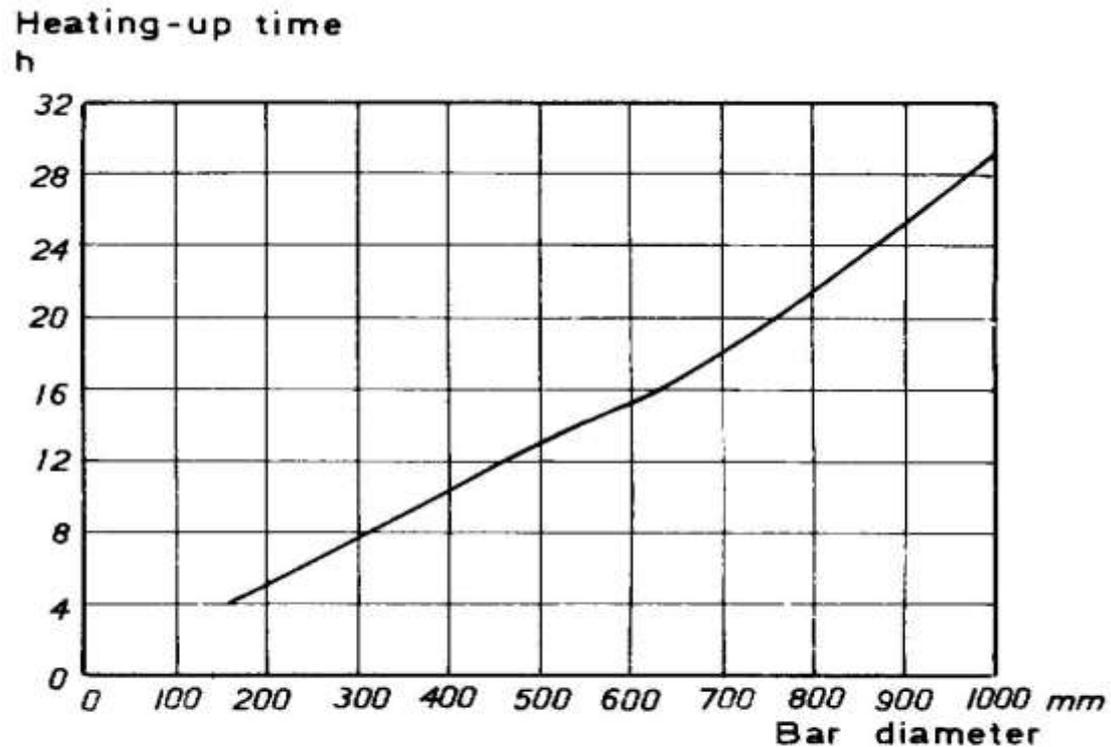


Figure 5.93 Time for heating from 100 to 500°C for bars of various diameters. Bar length = 2 × diameter

REGRAS ÚTEIS

Tempo de permanência:

Depois de atingir a temperatura, deixar de 1 ou 2 horas para cada polegada de espessura.

Até 400 graus C tempo tem pouca influência na dureza do aço.

Para temperaturas maiores tempo é muito importante

REGRAS ÚTEIS

- ▶ Duplo revenido. O segundo deve ser realizado de 10 a 30 C abaixo do primeiro revenido

Auto revenido:

Aços com teor de C menor do que 0,3% ($M_s=400$ C e $M_f=100$ C) serão revenidos durante resfriamento a temperatura ambiente. Podem em algumas situações ter o revenido posterior dispensado

Estabilização da austenita retida:

Se após a têmpera o aço é mantido na temperatura ambiente por algum tempo ou é feito um revenimento a baixas temperaturas, ocorre a estabilização da austenita retida, o que significa que fica difícil transformá-la por posterior tratamento subzero.