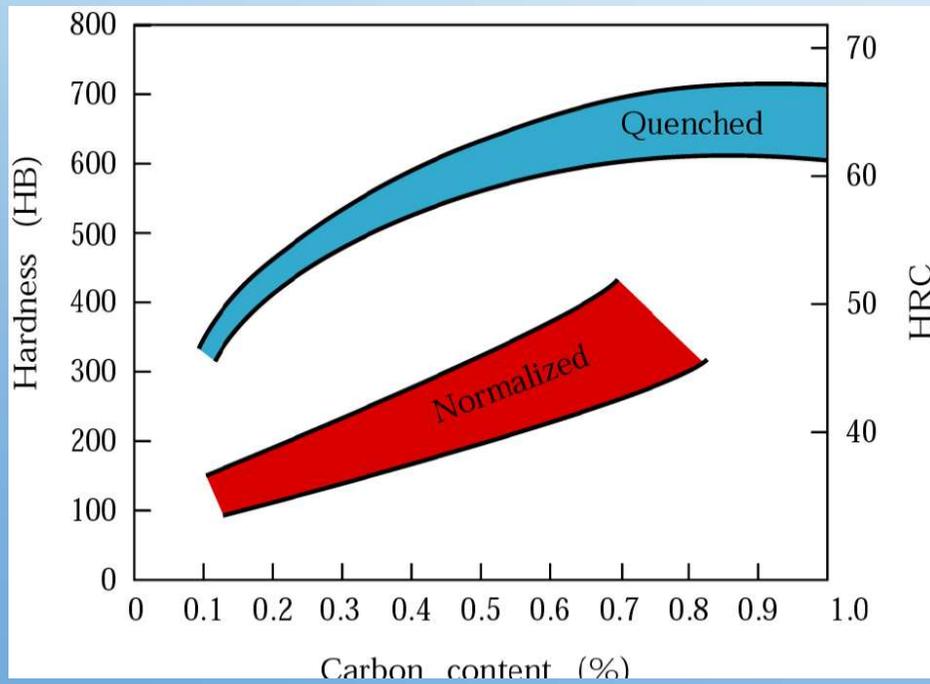
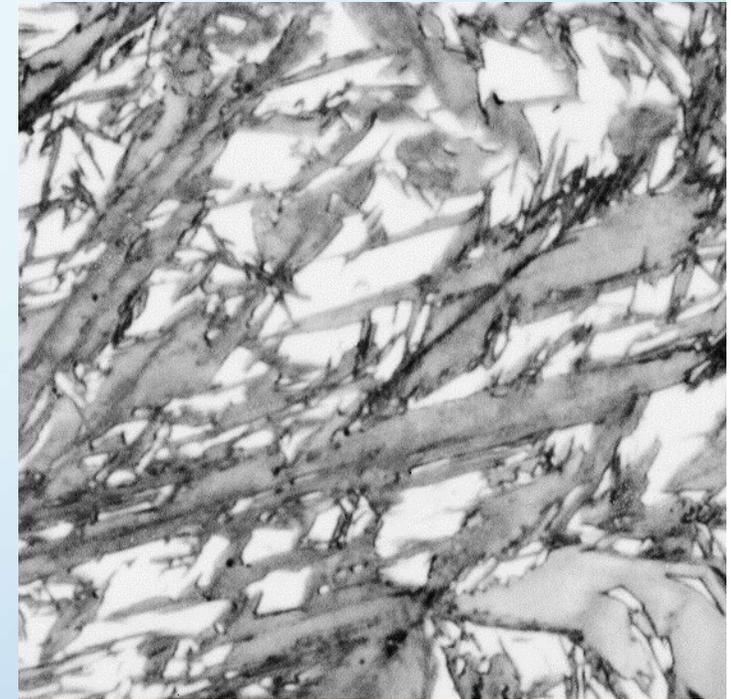
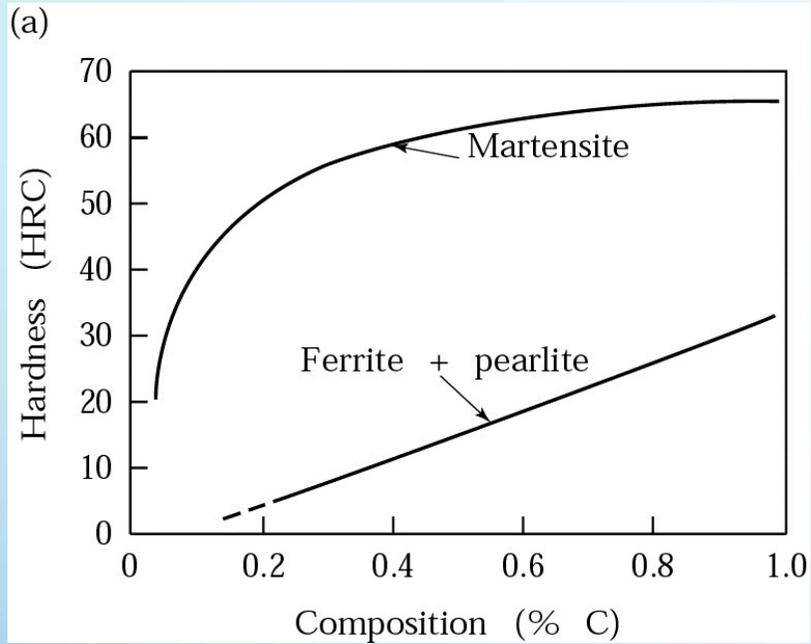
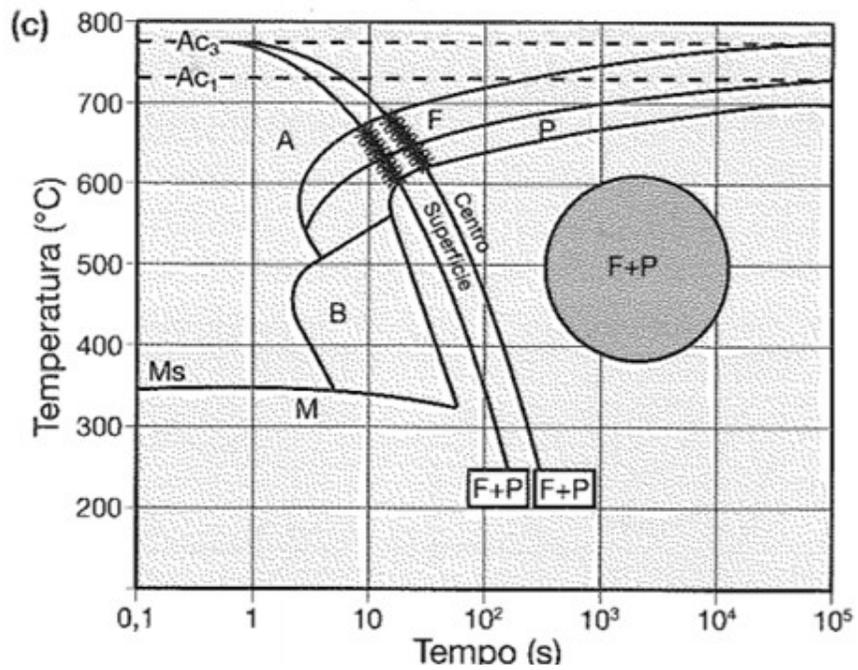
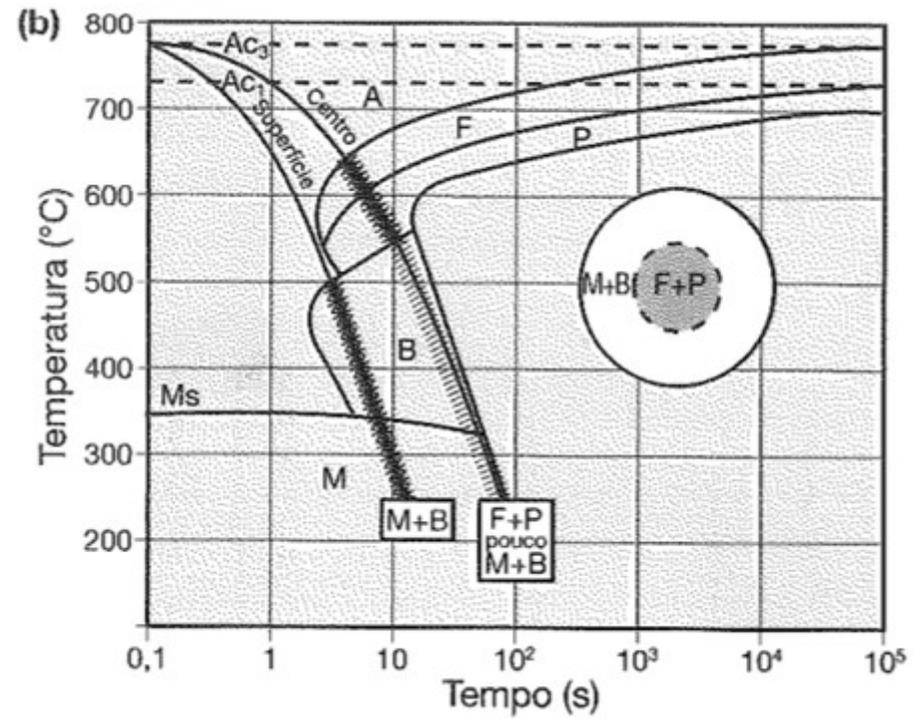
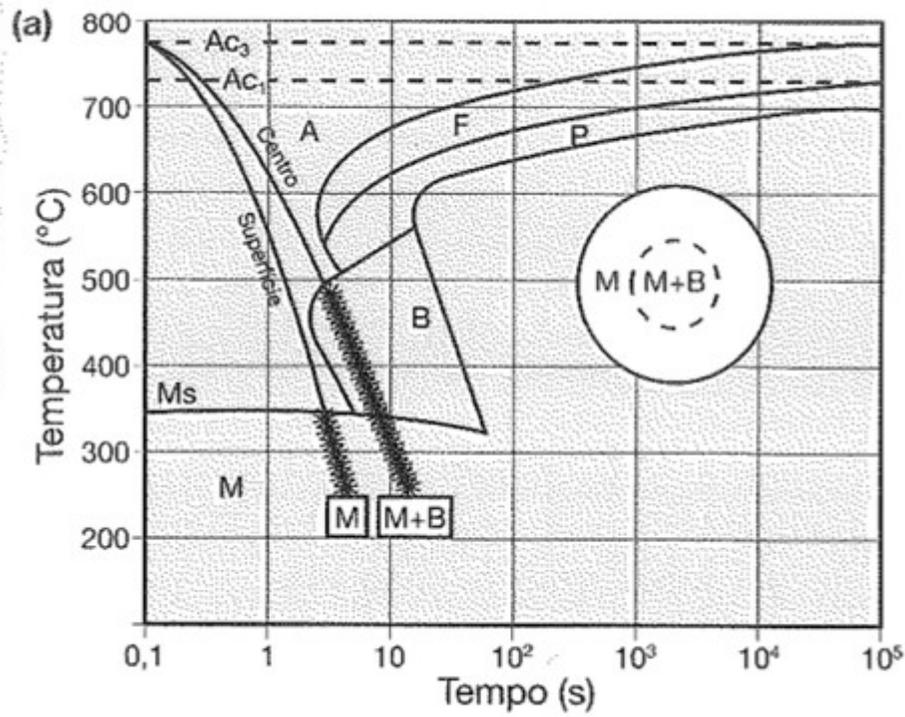


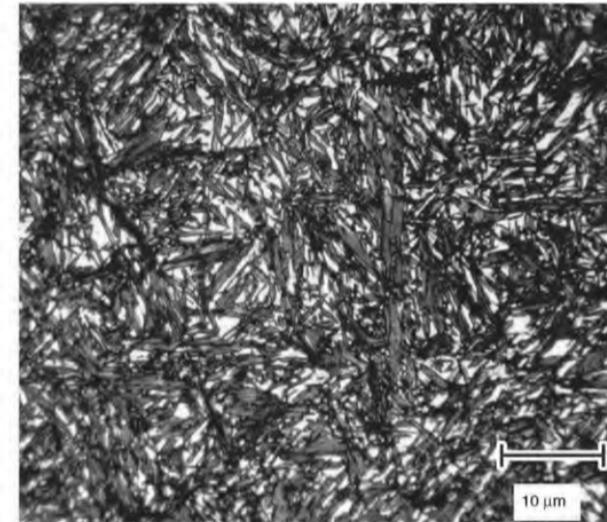
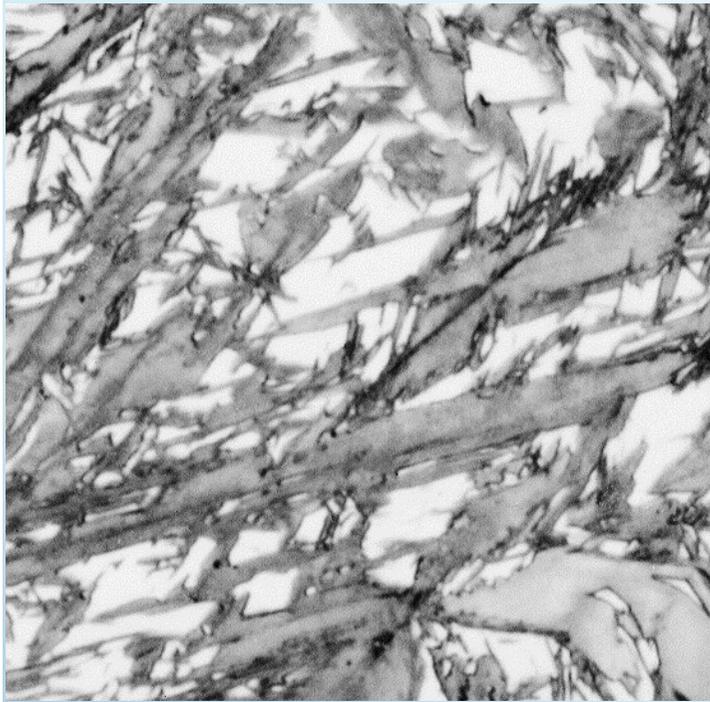
# TÊMPERA E REVENIDO

LAURALICE CANALE

# MARTENSITA





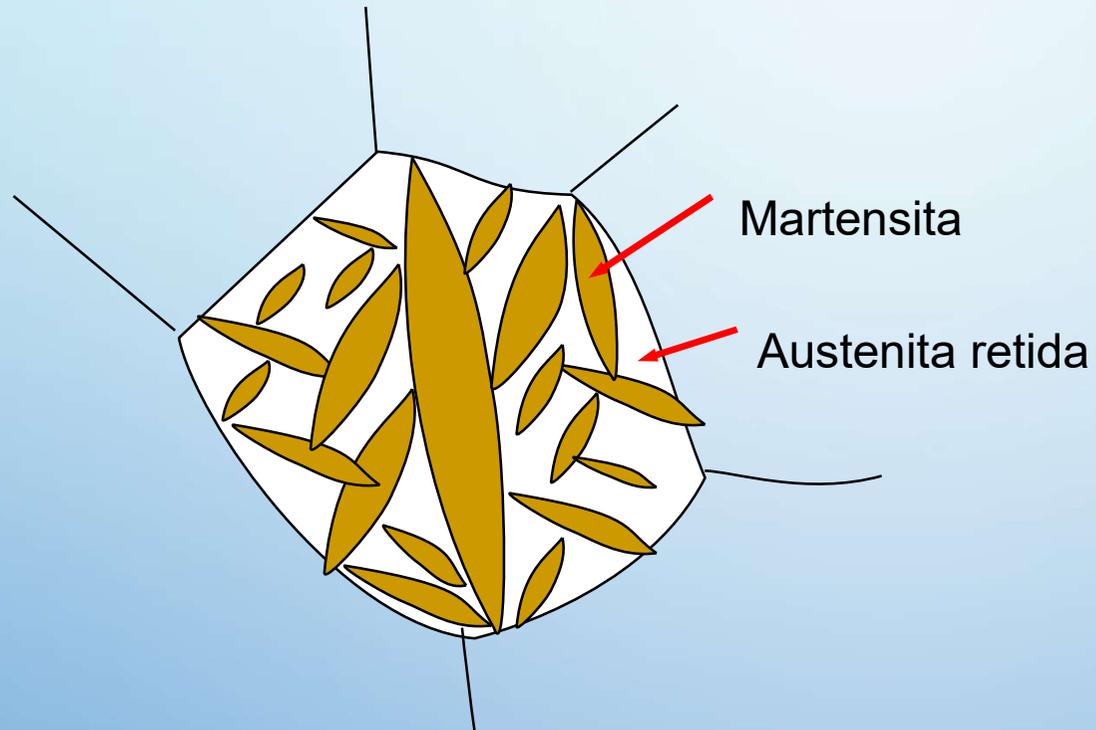


**Fig. 9.14** Plate martensite in water-quenched eutectoid (~0.8% C) steel (UNS G10800) The light regions between the martensite plates are retained austenite. 10% sodium metabisulfite etch. Original magnification 1000×. Source: Ref 9.6



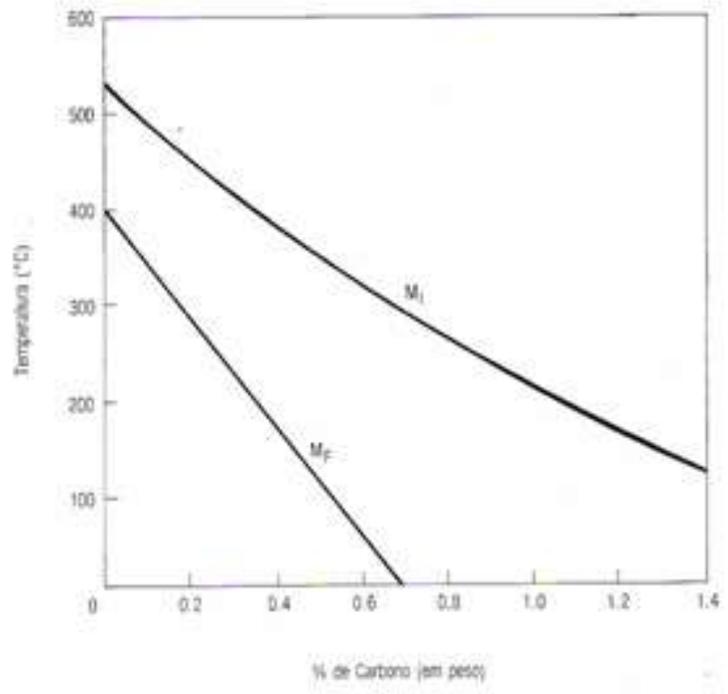
**Fig. 9.15** Lath martensite in water-quenched low-alloy steel. 2% nital etch. Original magnification 500× Source: Ref 9.6

# MARTENSITA

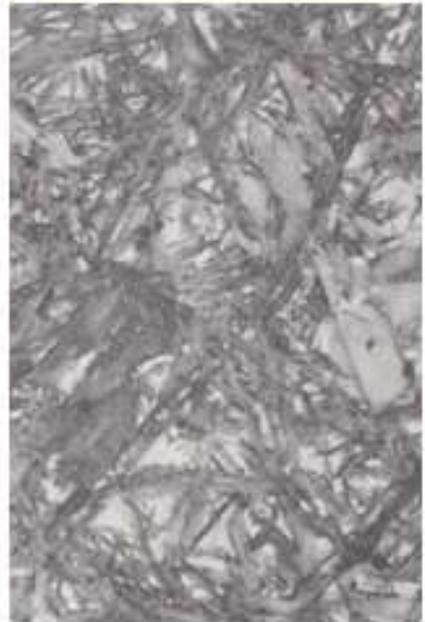


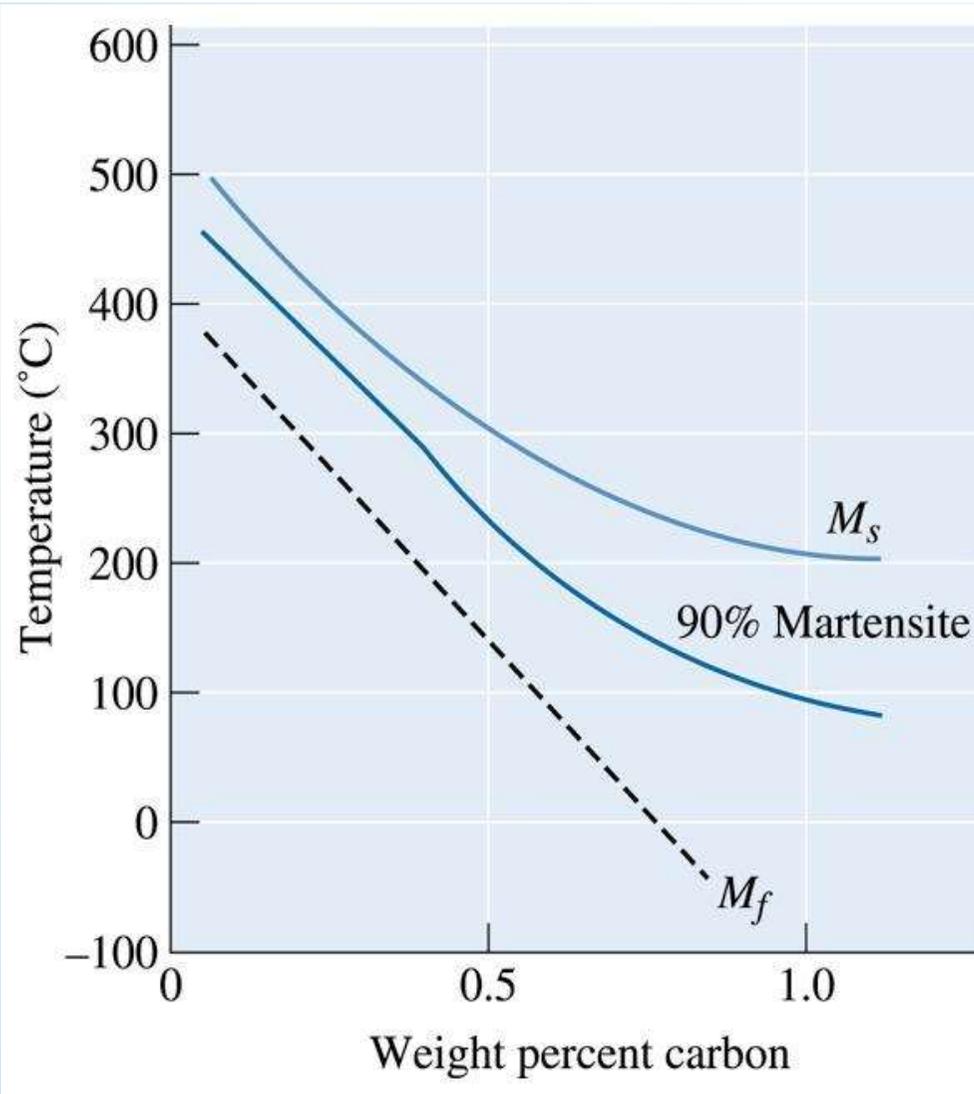
Martensita formada por escorregamento na austenita

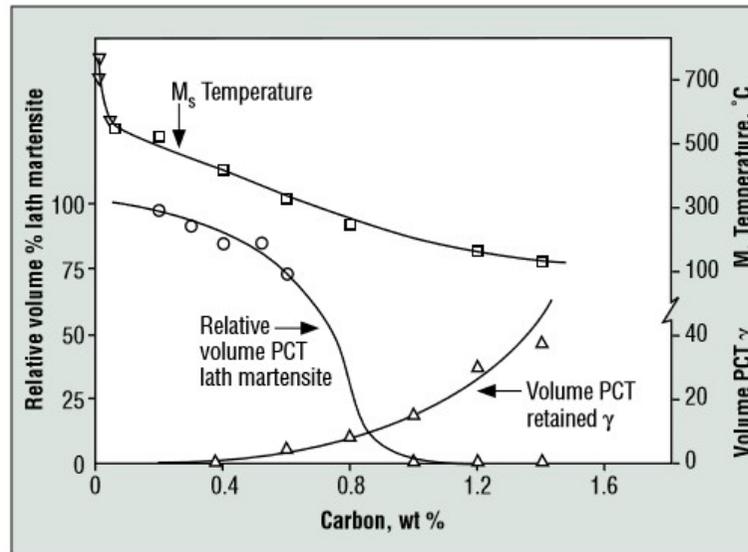
**INFLUÊNCIA DO CARBONO NO INÍCIO E FIM DE TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA**



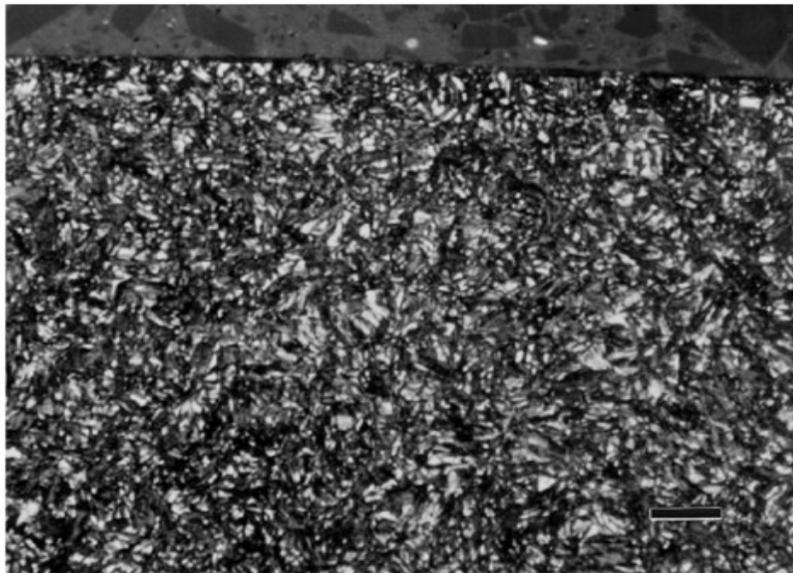
**MARTENSITA + AUSTENITA RETIDA**



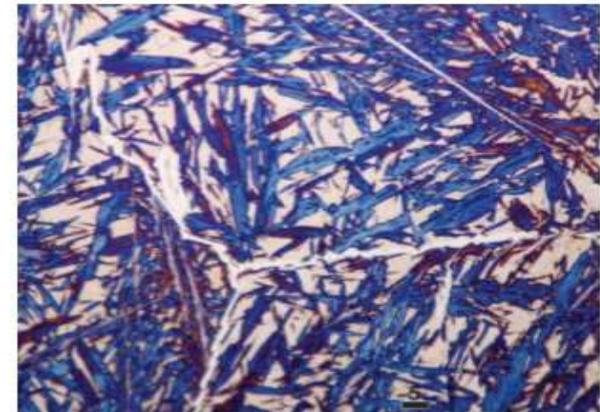




**Fig. 7.** Influence of carbon content of the austenite on the percentages of lath (or plate) martensite,  $M_s$  temperature and percentage of retained austenite<sup>[5]</sup>



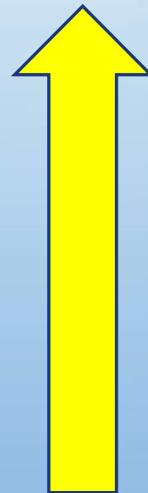
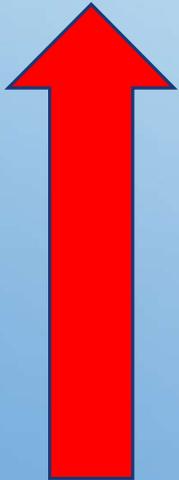
**Fig. 8.** Surface of a carburized 8720 alloy-steel railroad-cone bearing etched with nital plus 1% zephiran chloride. Image analysis yielded 13.3% retained austenite vs 25.4% by XRD (1000x).



**Fig. 6.** High-carbon plate martensite (blue and brown), retained austenite (white), plus intergranular and intragranular cementite in a carburized specimen of 9310 alloy steel etched with Beraha's reagent (100 mL water, 10 g  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  and 3 g  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ) at 1000x (marker bar is 5  $\mu\text{m}$  long).

Differences in **cooling rate** also affect martensite transformation kinetics. Slower **cooling** rates lower the **rate** of martensite transformation **and** result in higher amounts of **retained austenite** on **cooling** to a given temperature. Table 8-6 shows the effect of

Temperatura de austenitização  
também interfere na austenita retida



Pode ser atribuído ao mecanismo da transformação de fase. Se o movimento das discordâncias é o principal mecanismo da transformação da fase martensítica, as discordâncias captam alguns átomos de carbono da matriz e, conseqüentemente, a concentração de carbono na interface austenita / martensita aumenta.

Os átomos de carbono entre as camadas de martensita, portanto, fixam as discordâncias e atuam como obstáculos aos seus movimentos.

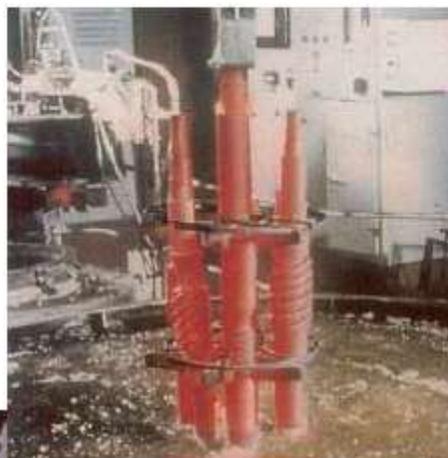
Como resultado, alguma austenita permanecerá entre as camadas de martensita, uma vez que a transformação é interrompida quando essas discordâncias são fixadas por átomos de carbono.

## **SUB ZERO**

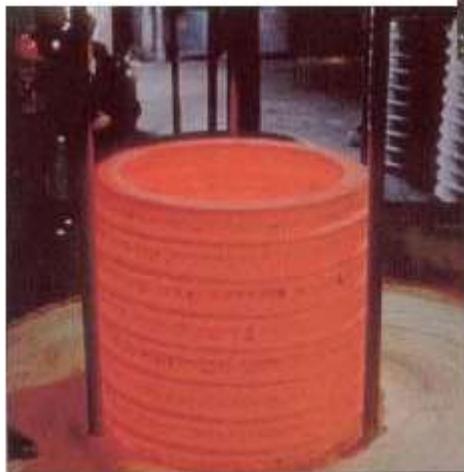
- **CONSISTE EM RESFRIAR AS PEÇAS APÓS A TÊMPERA EM TEMPERATURAS ABAIXO DE 0°C, COMO: NITROGÊNIO LÍQUIDO  $\cong -176^\circ\text{C}$ , GELO SECO  $\cong -68^\circ\text{C}$  OU HÉLIO LÍQUIDO  $\cong -268^\circ\text{C}$ .**
- **PROPICIANDO TEMPERATURAS INFERIORES A MF OCORRENDO A TRANSFORMAÇÃO DA AUSTENITA RETIDA EM MARTENSITA.**

## ***Exemplos de têmpera de peças***

Eixo sem-fim



Roda de trem



Cilindro de gás

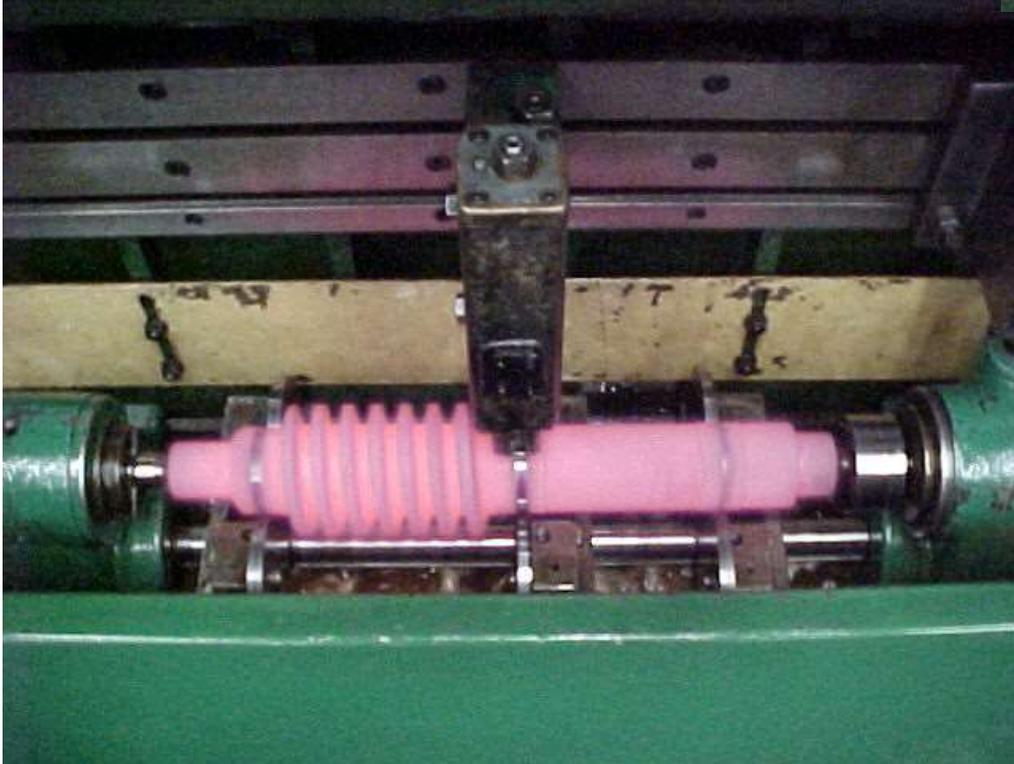
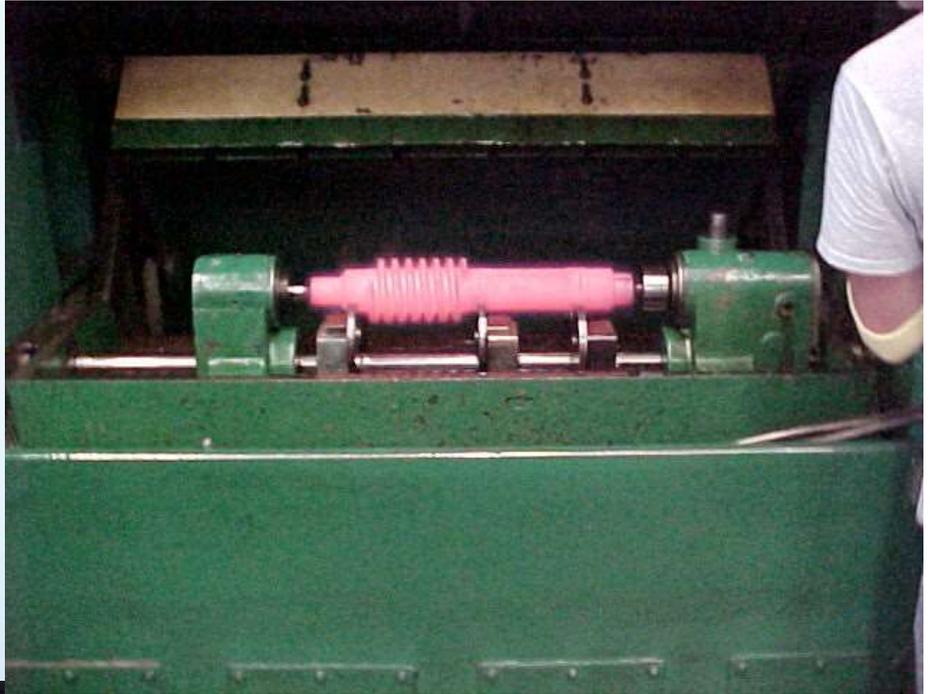


*Posição das peças no resfriamento para têmpera*



# PRESS QUENCHING





# TÊMPERA AO AR



# Warping of soft steel cylinder through repeated water quenching

J. H. Whiteley, "Note on the Warping of Steel through Repeated Quenching", J. Iron & Steel Inst., Vol. 98, 1918, p211-215.

Initial shape



After 200 quenchings



After 800 quenchings



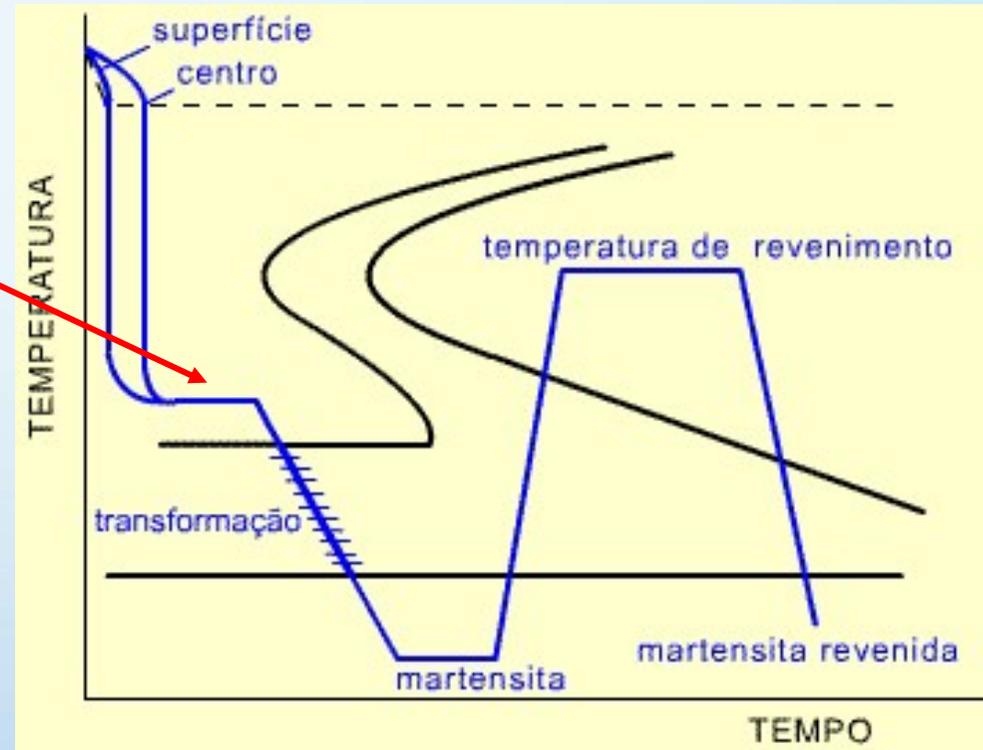
- Dimension: 3.5in (88.9mm) diameter.
- Heated blood-red heat (700C to 850C)

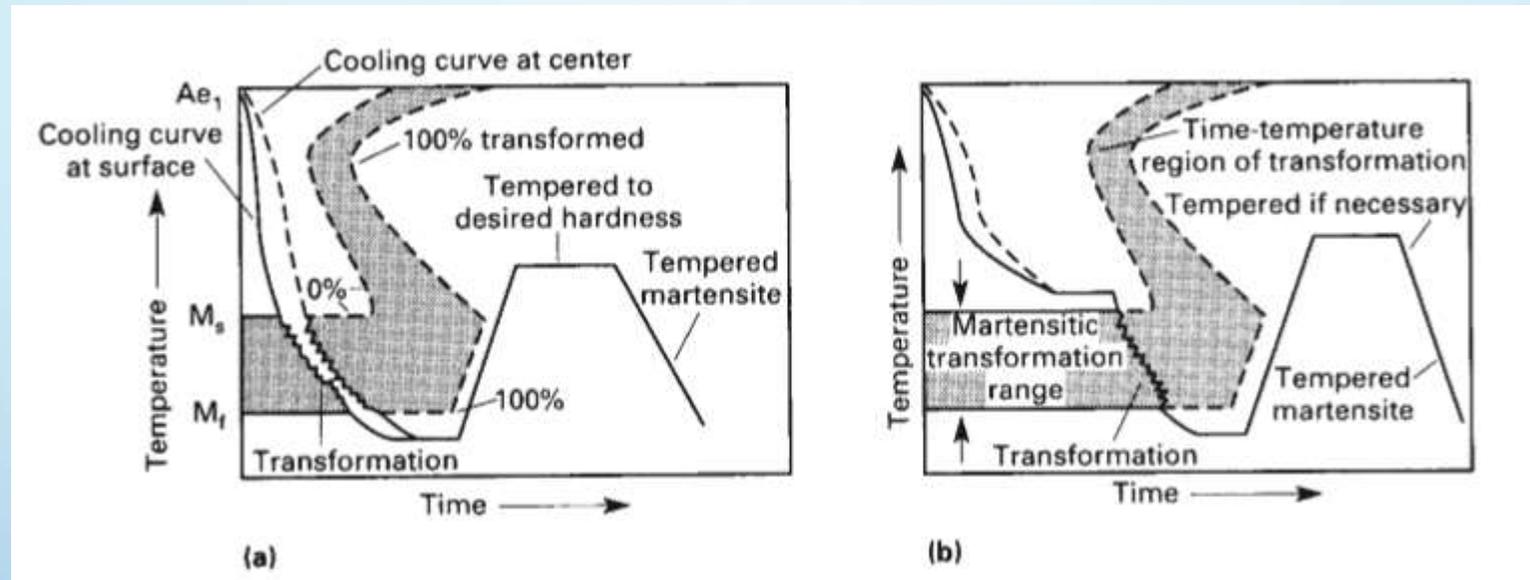
# AUSTEMPERA E MARTEMPERA

- **PROBLEMAS PRÁTICOS NO RESFRIAMENTO CONVENCIONAL E TÊMPERA**
- A PEÇA/ PARTE PODERÁ APRESENTAR EMPENAMENTO OU FISSURAS DEVIDOS AO RESFRIAMENTO NÃO UNIFORME. A PARTE EXTERNA ESFRIA MAIS RAPIDAMENTE, TRANSFORMANDO-SE EM MARTENSITA ANTES DA PARTE INTERNA. DURANTE O CURTO TEMPO EM QUE AS PARTES EXTERNA E INTERNA ESTÃO COM DIFERENTES MICROESTRUTURAS, APARECEM TENSÕES MECÂNICAS CONSIDERÁVEIS. A REGIÃO QUE CONTÉM A MARTENSITA É FRÁGIL E PODE TRINCAR.
- OS TRATAMENTOS TÉRMICOS DENOMINADOS DE MARTEMPERA E AUSTEMPERA VIERAM PARA SOLUCIONAR ESTE PROBLEMA

# MARTEMPERA

- O RESFRIAMENTO É TEMPORARIAMENTE INTERROMPIDO, CRIANDO UM **PASSO ISOTÉRMICO**, NO QUAL TODA A PEÇA ATINGA A MESMA TEMPERATURA. A SEGUIR O RESFRIAMENTO É FEITO LENTAMENTE DE FORMA QUE A MARTENSITA SE FORMA UNIFORMEMENTE ATRAVÉS DA PEÇA. A DUCTILIDADE É CONSEGUIDA ATRAVÉS DE UM REVENIDO FINAL.



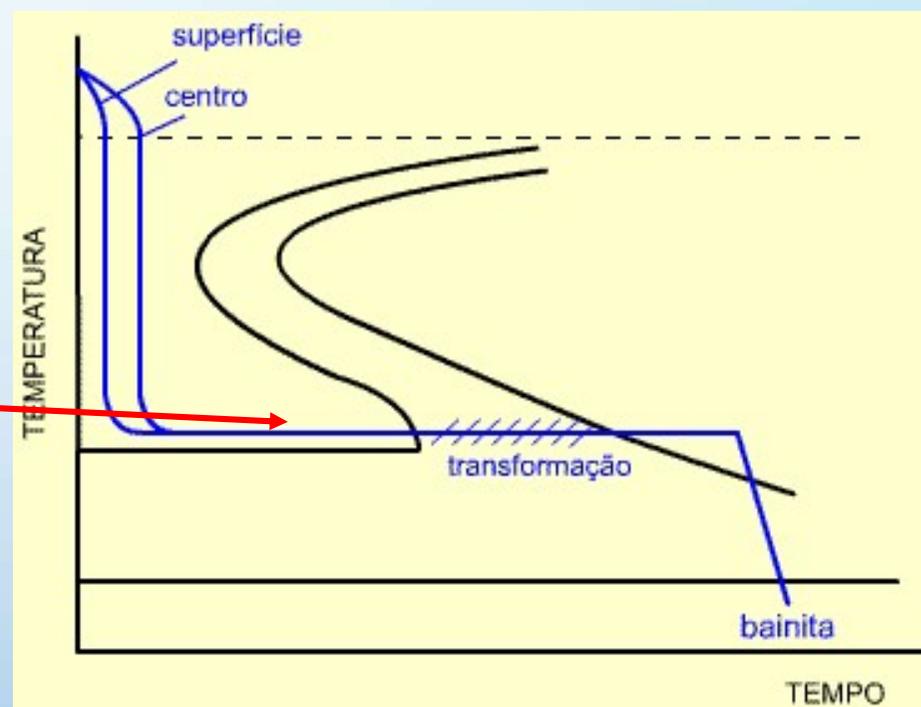


Têmpera convencional, que usa óleo, polímero, água ou soluções salinas.

Martêmpera que usa sal ou óleo quente.

# AUSTEMPERA

- OUTRA ALTERNATIVA PARA EVITAR DISTORÇÕES E TRINCAS É O TRATAMENTO DENOMINADO AUSTÊMPERA, ILUSTRADO AO LADO
- NESTE PROCESSO O PROCEDIMENTO É ANÁLOGO À MARTÊMPERA. ENTRETANTO A **FASE ISOTÉRMICA** É PROLONGADA ATÉ QUE OCORRA A COMPLETA TRANSFORMAÇÃO EM BAINITA. COMO A MICROESTRUTURA FORMADA É MAIS ESTÁVEL (ALFA+FE<sub>3</sub>C), O RESFRIAMENTO SUBSEQUENTE NÃO GERA MARTENSITA. NÃO EXISTE A FASE DE REAQUECIMENTO, TORNANDO O PROCESSO MAIS BARATO.



Austêmpera: Sal ou óleo quente

The background of the slide is a light blue gradient with several realistic water droplets of various sizes scattered across it. The droplets have highlights and shadows, giving them a three-dimensional appearance.

# REVENIDO

ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS I

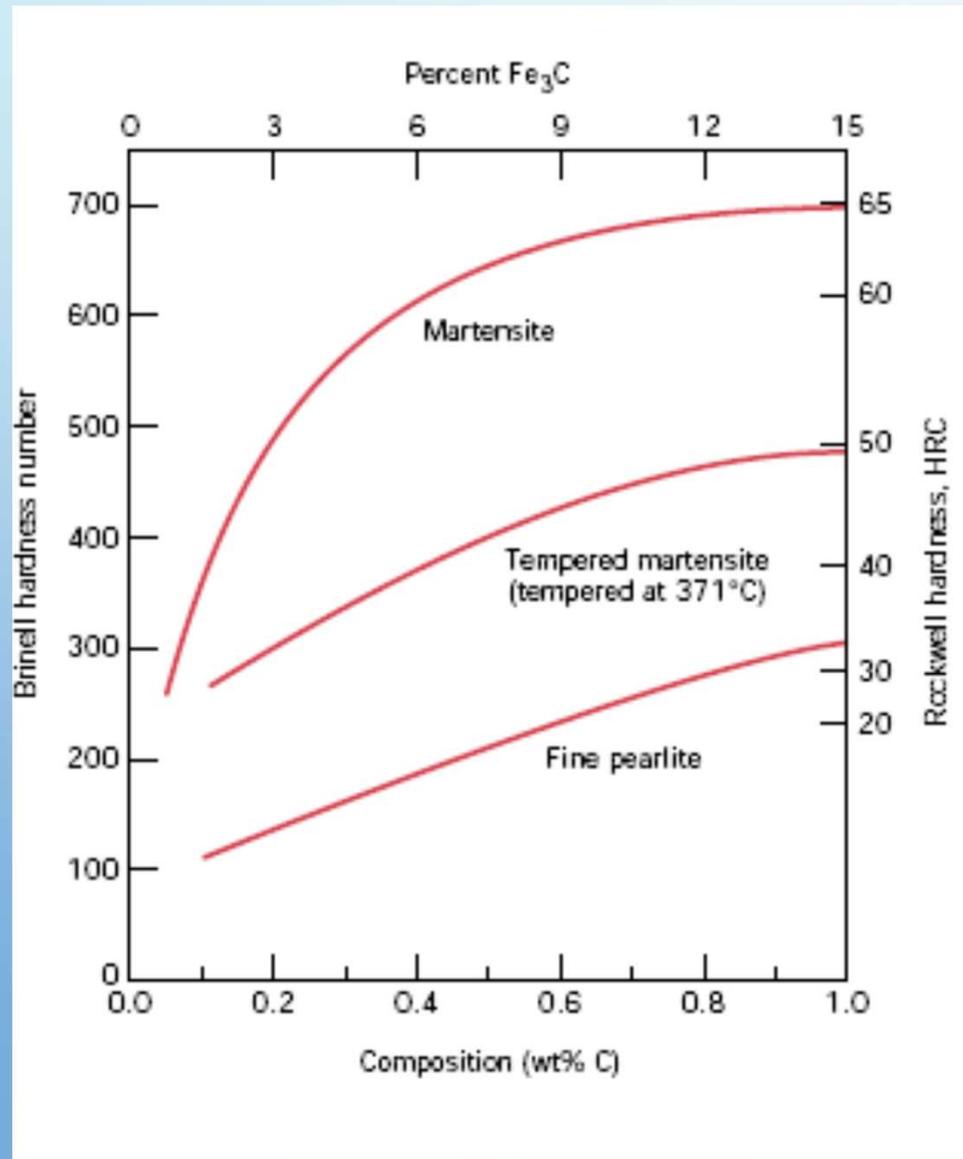
PROFA.DRA. LAURALICE CANALE

# REVENIDO

- 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

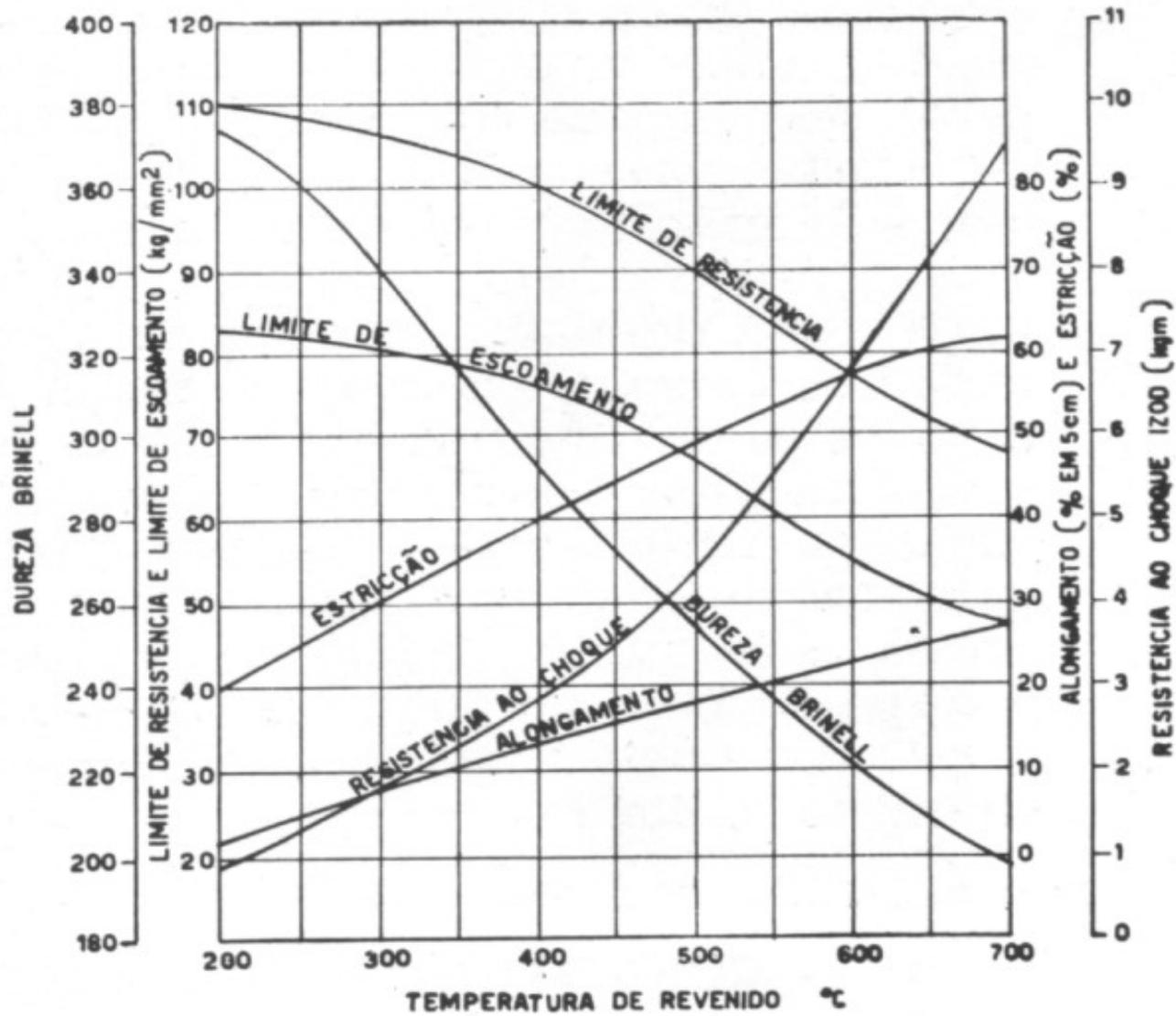
- O REVENIDO É CONSEGUIDO ATRAVÉS DO AQUECIMENTO DE UM AÇO MARTENSÍTICO ATÉ UMA TEMPERATURA ABAIXO DO EUTETÓIDE DURANTE UM INTERVALO DE TEMPO ESPECÍFICO
- A MARTENSITA TCC MONOFÁSICA, QUE ESTÁ SUPERSATURADA EM CARBONO SE TRANSFORMA EM MARTENSITA REVENIDA, COMPOSTA POR FERRITA E CEMENTITA
- A MICROESTRUTURA DA MARTENSITA REVENIDA CONSISTE EM PARTÍCULAS DE CEMENTITA EXTREMAMENTE PEQUENAS E UNIFORMEMENTE DISTRIBUÍDAS

# PROPRIEDADES MECÂNICAS



# 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

# 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 ABAIXO DE 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 E
- 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 PARTE DA AUSTENITA RETIDA SE TRANSFORMA EM BAINITA. ESSA BAINITA NA TERCEIRA ETAPA SOFRE UMA PRECIPITAÇÃO DE CARBONETO DE FERRO TRANSFORMANDO-SE AO FINAL EM CEMENTITA E FERRITA. PARTE SE TRANSFORMA EM MARTENSITA NO RESFRIAMENTO ATÉ A TEMPERATURA AMBIENTE.

# TERCEIRA ETAPA

- O CARBONETO E 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 DECONTÍNUA NOS LIMITES DAS AGULHAS DE MARTENSITA
- ESTRUTURA: MARTENSITA REVENIDA

# TERCEIRA ETAPA: MARTENSITA REVENIDA

- Para temperaturas abaixo de  $400^{\circ}\text{C}$  ocorre o início da formação de pequenos glóbulos de cementita
- Esse aspecto é o típico da martensita revenida.

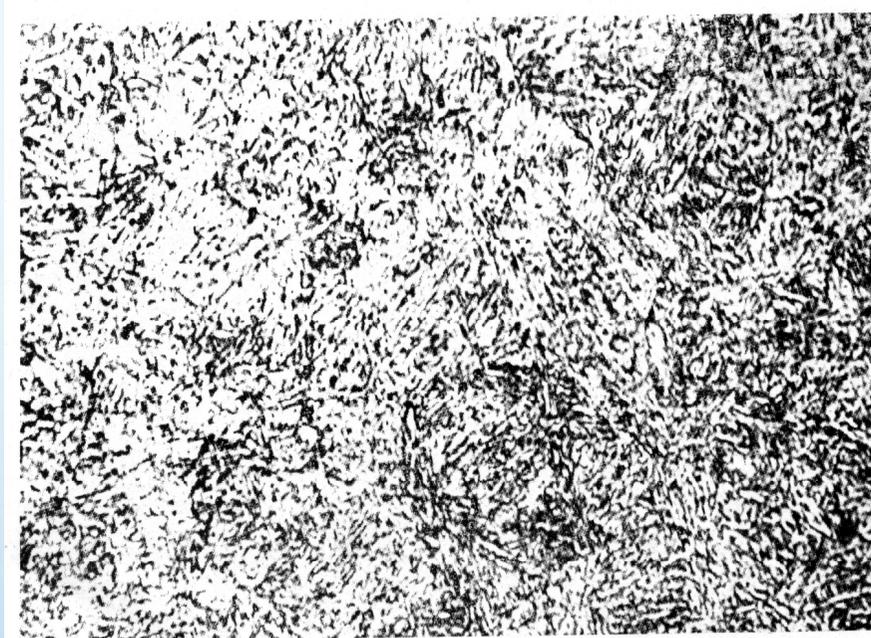


Fig. 467 — Aço com 0,5% de carbono, temperado em água fria e revenido a  $400^{\circ}\text{C}$ . Textura sorbitica com início de formação de pequenos glóbulos de cementita. Ataque: nítrico. 750 x.

## 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

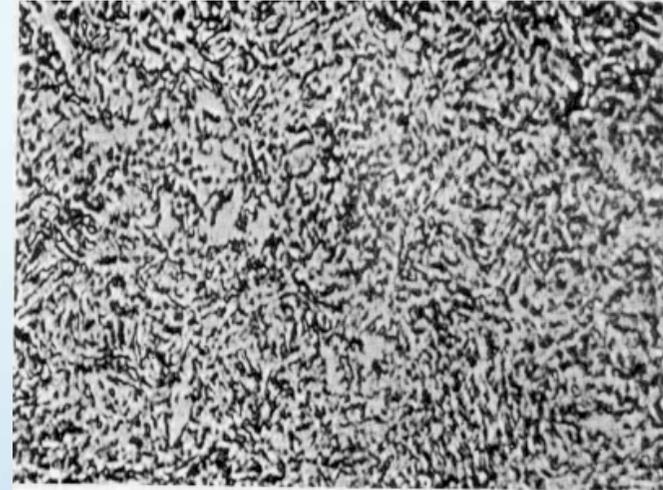
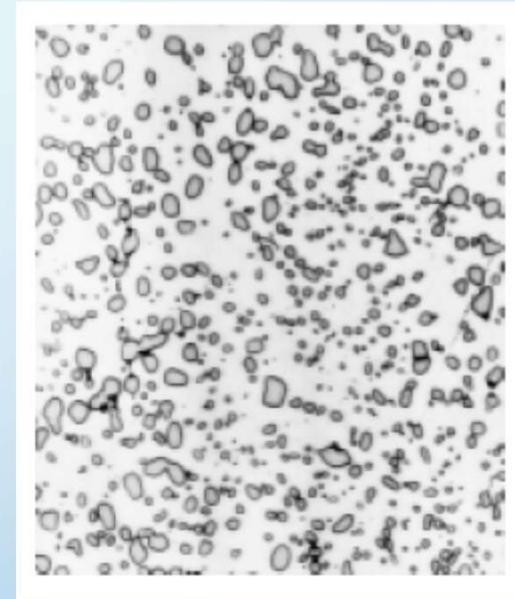


FIG. 54 — Aspecto micrográfico de um aço temperado e revenido. Estrutura: sorbita. Ataque: reativo de nital. Ampliação: 1.000 vezes.

# 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



# 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

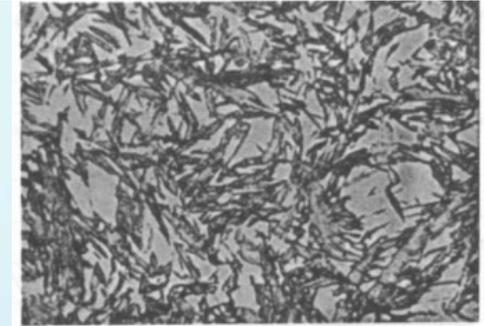


FIGURA 243  
Templado y revenido a 175°



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°

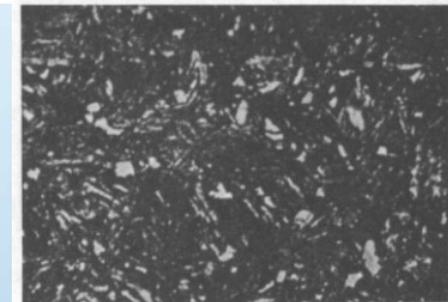


FIGURA 247

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

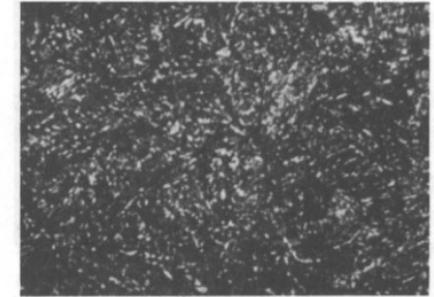


FIGURA 248

Templado y revenido a 375°.

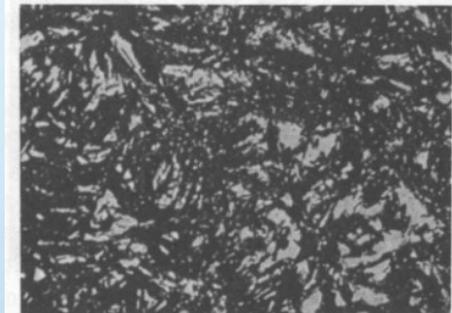
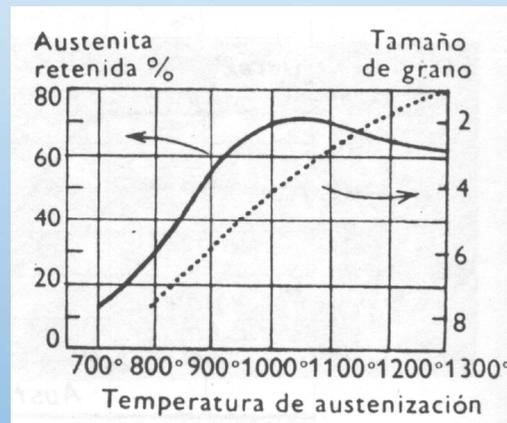
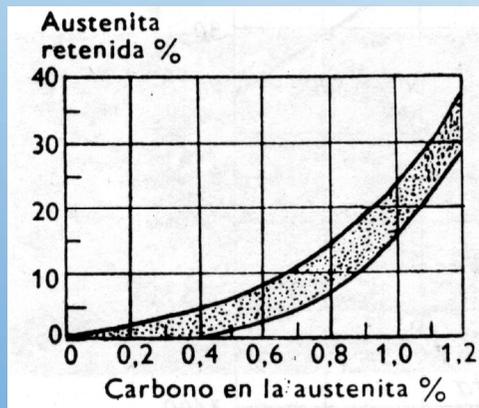


FIGURA 249

Templado y revenido a 450°.

# TRANSFORMAÇÃO DA AUSTENITA RETIDA

- A quantidade de austenita retida presente nos aços temperados depende de fatores como: composição, temperatura de austenitização, meio de resfriamento, 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

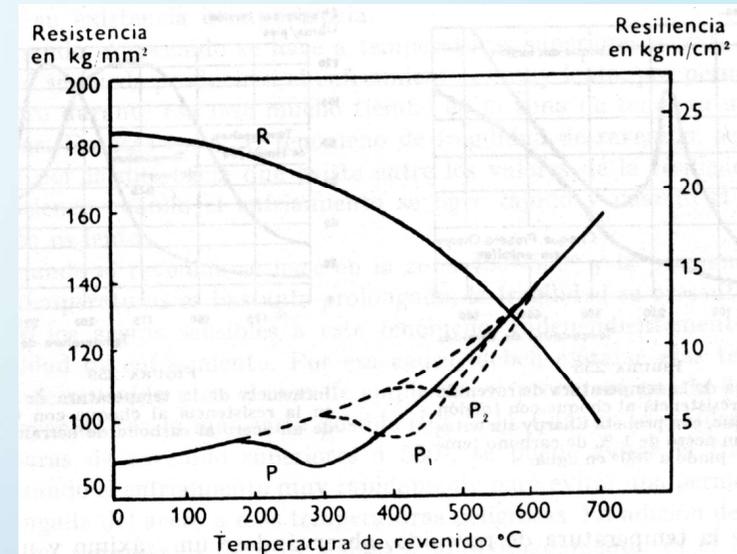


# DUPLO REVENIDO

- 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 SUBSEQÜENTE 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
- Pode ser 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 NESTA 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 SUCEPTÍVEIS 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 .