



# **SMM 0193 – ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS I**

## **TÊMPERA E REVENIMENTO**

## **REFERÊNCIAS:**

- **Aços e Ligas Especiais, André Luiz Vasconcelos da Costa e Silva e Paulo Roberto Mei, Edgard Blücher-Villares Metals, segunda edição, 2006;**
- **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais, William D. Callister Jr., LTC, segunda edição, 2006;**
- **Princípios de Metalurgia Física, Robert E. Reed-Hill, segunda edição, Guanabara Dois, 1982;**
- **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns, Hubertus Colpaert, 4ª. Edição revisada e atualizada por André Luiz Vasconcelos da Costa e Silva, Editora Blücher – Villares Metals, 2008;**
- **Aços, Microestrutura e Propriedades, R.W.K Honeycombe, Fundação Calouste Gulbenkian, 1982;**
- ***Phase Transformation in Metals and Alloys*, David A. Porter, Kenneth E. Easterling, Mohamed Y. Sherif, 3ª. Ed., CRC Press, 2009.**

# Tratamentos Térmicos

Recozimento Total ou Pleno

Tempera e Revenido

Recozimento Isotérmico

Normalização

Resfriamento Lento (dentro do forno)

Resfriamento ao ar

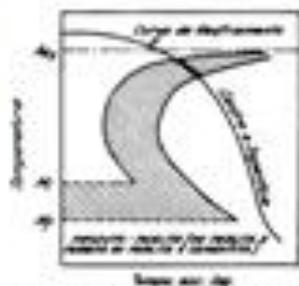


Fig. 44 — Diagrama esquemático de transformação para recozimento pleno.

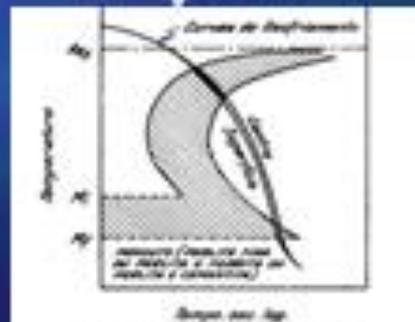
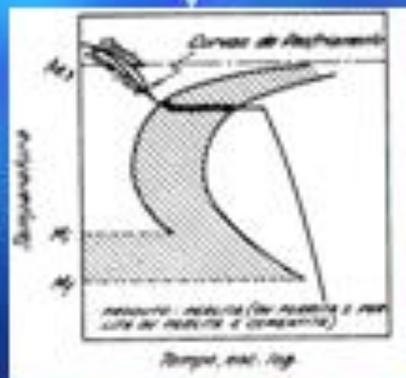


Fig. 45 — Diagrama esquemático de transformação para normalização.

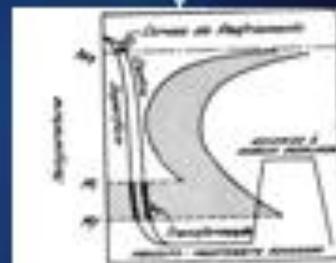


Fig. 46 — Diagrama esquemático de transformação para tempera e revenido.

# TÊMPERA E REVENIMENTO

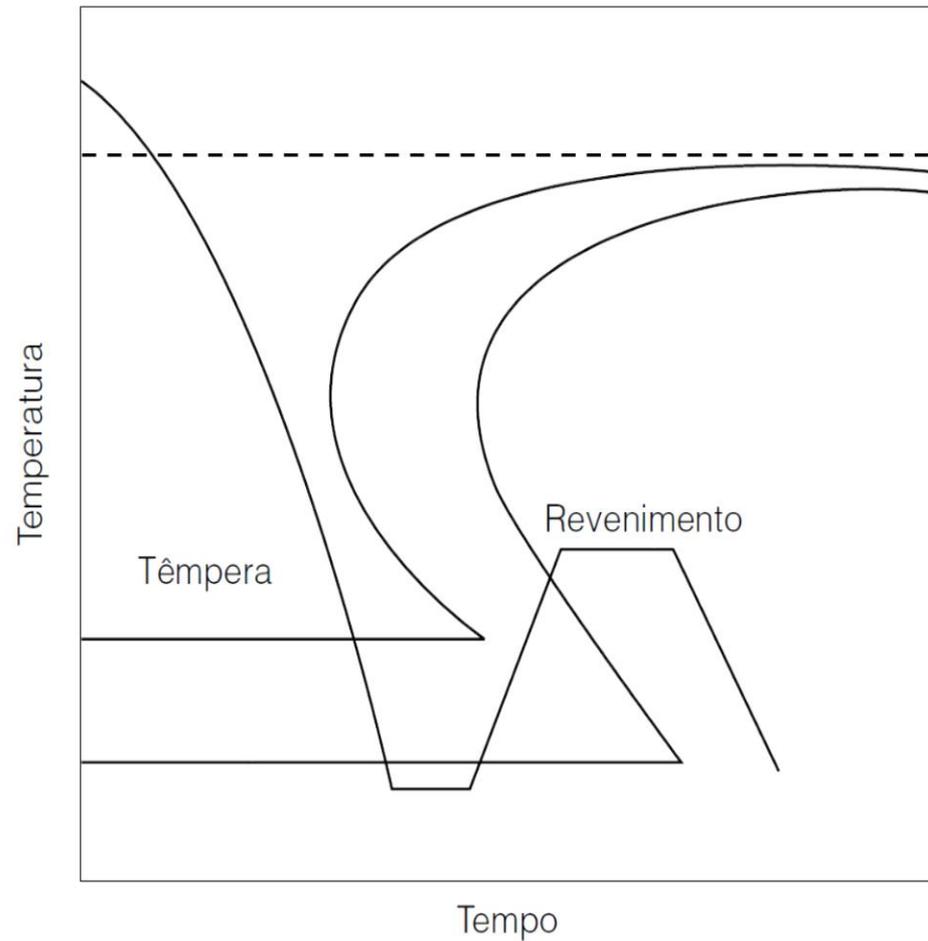
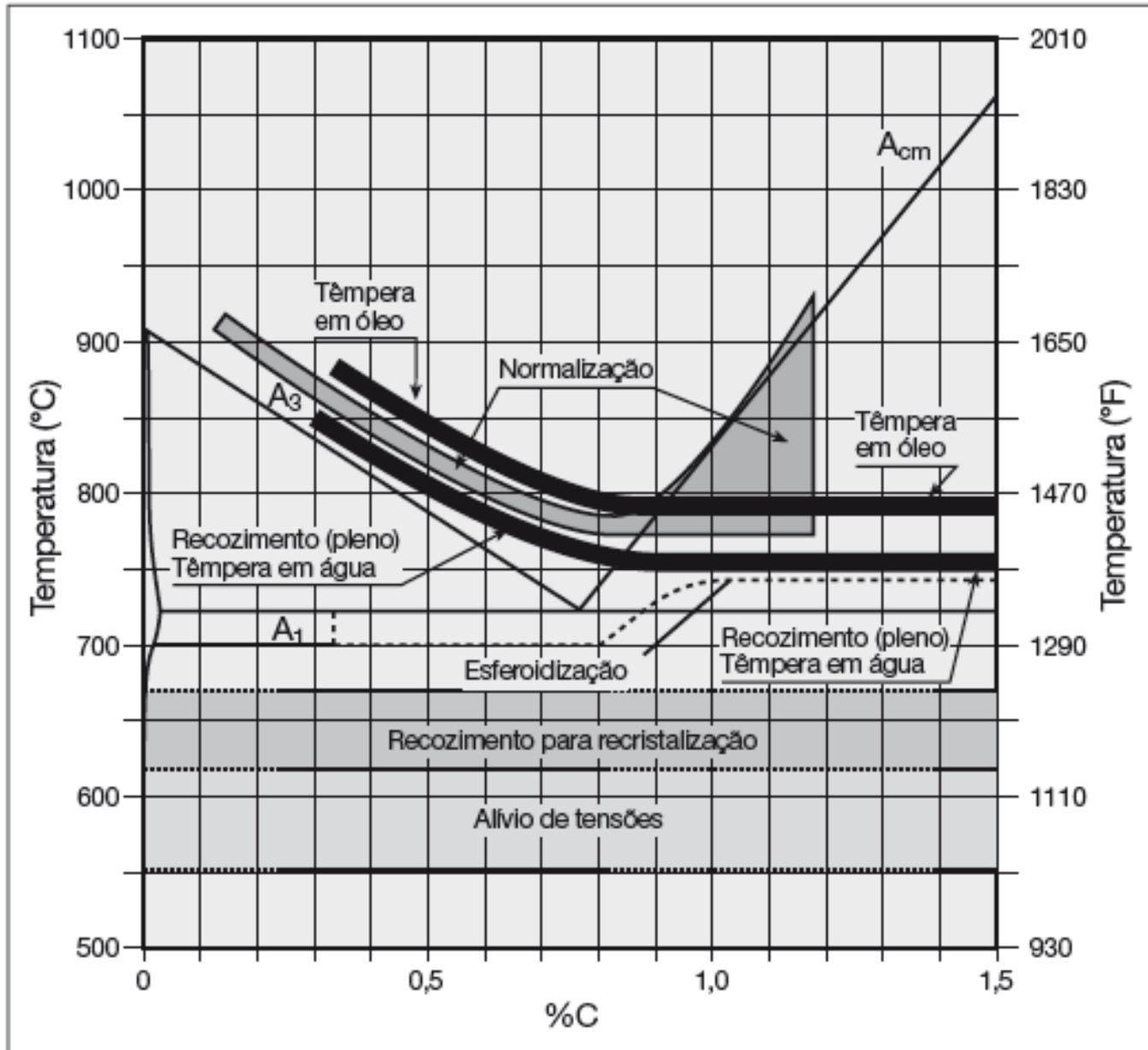


Figura 3.34 Ciclo de têmpera + revenimento.

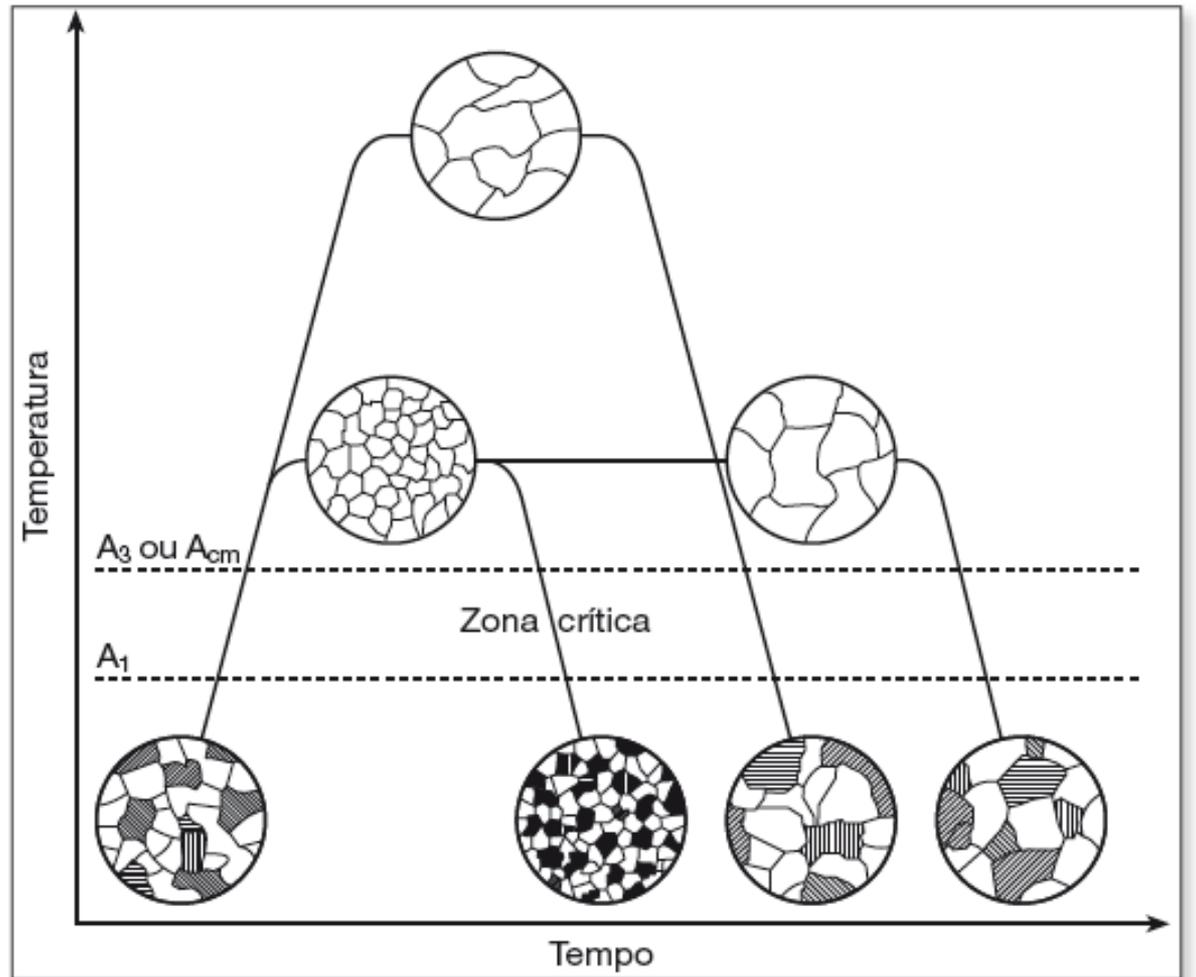
*(Costa e Silva & Mei)*



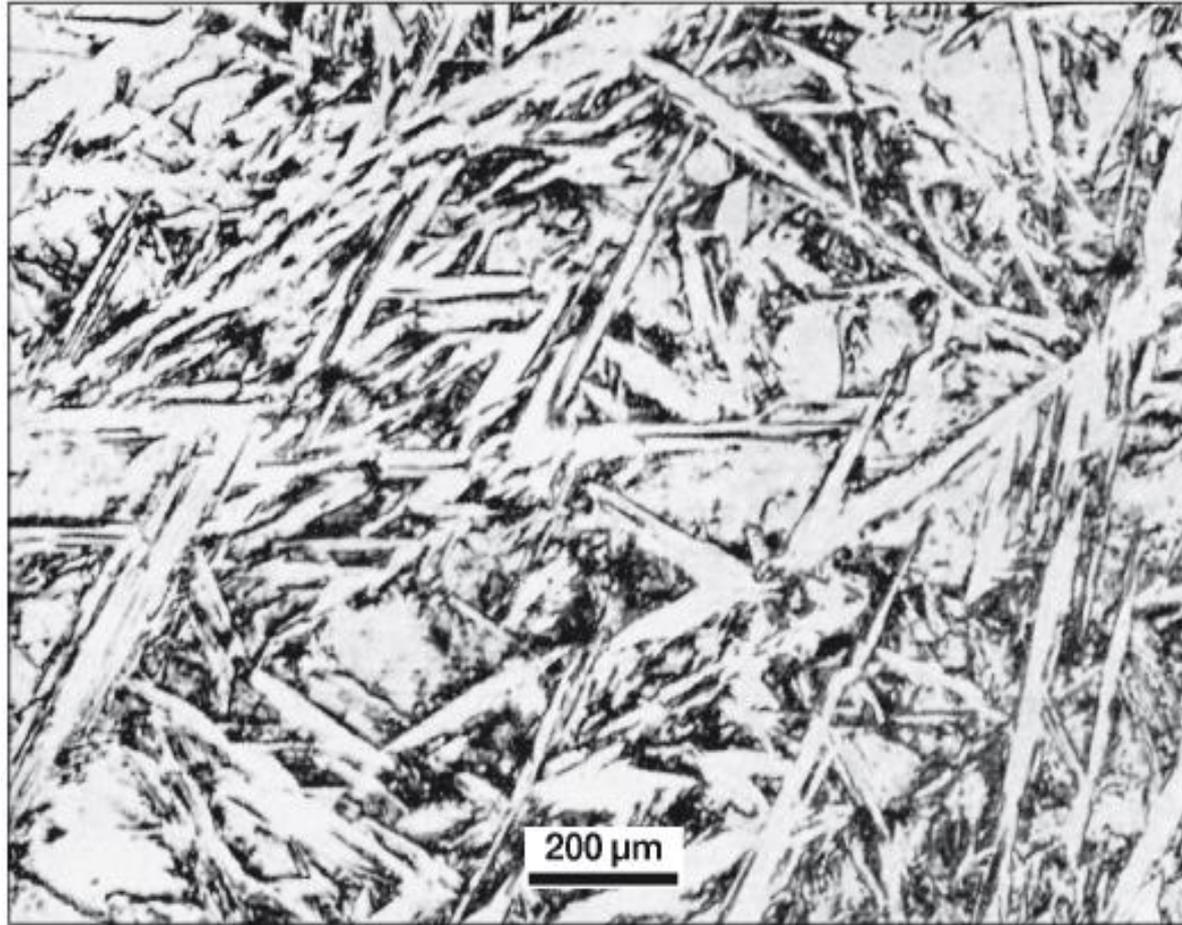
# EFEITO DO TEMPO E TEMPERATURA DE AUSTENITIZAÇÃO NO TAMANHO DE GRÃO

**Figura 9.49**

Representação esquemática do efeito do tempo e da temperatura de austenitização sobre o tamanho de grão austenítico e o efeito sobre a microestrutura resultante (resfriamento ao ar). O esquema assume austenita homogênea, tanto em tamanho de grão como em composição química.



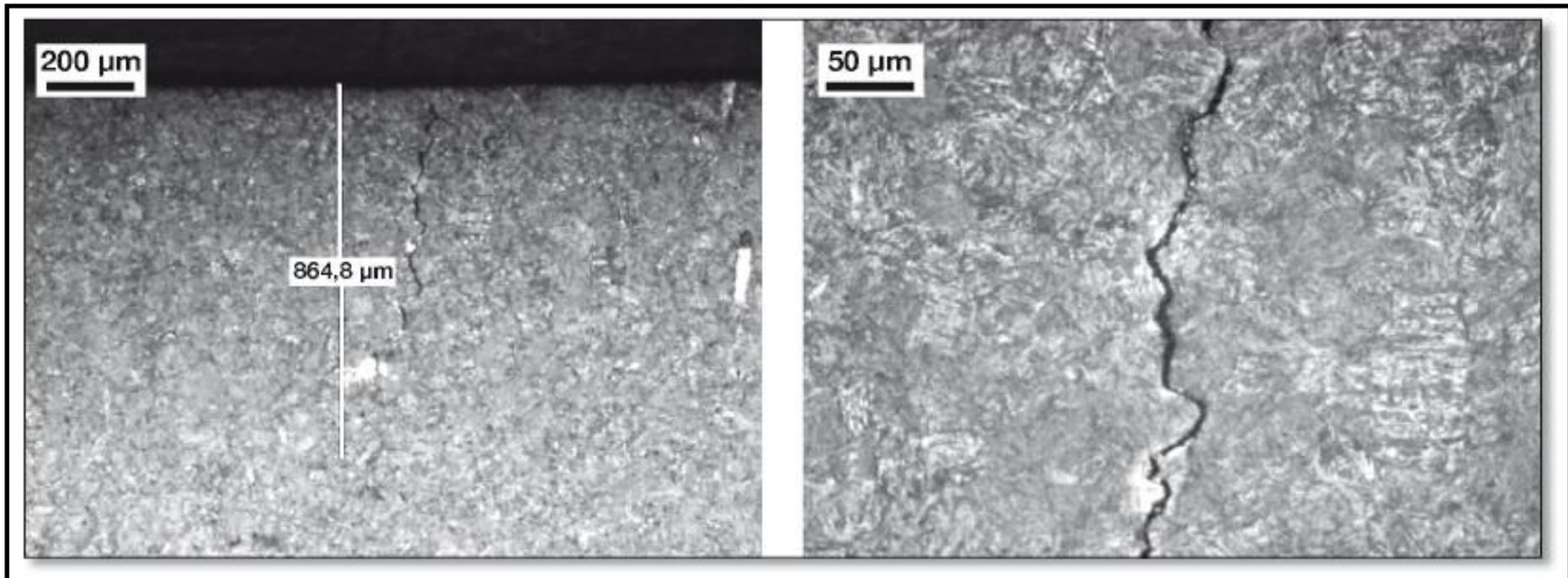
# MARTENSITA GROSSEIRA- TEMPERATURA DE AUSTENITIZAÇÃO EXCESSIVA



**Figura 10.55**

Aço de alto carbono temperado depois de superaquecido no campo austenítico. Martensita muito grosseira. Ataque: Nital.

## CRESCIMENTO EXCESSIVO DE GRÃO AUSTENÍTICO



### Figura 10.62

Trinca de têmpera em contornos de grão austeníticos anteriores. Houve crescimento excessivo do grão austenítico durante o aquecimento para a têmpera. Ataque: Nital 2%. Cortesia M. M. Souza, Neumayer-Tekfor, Jundiaí, Brasil.

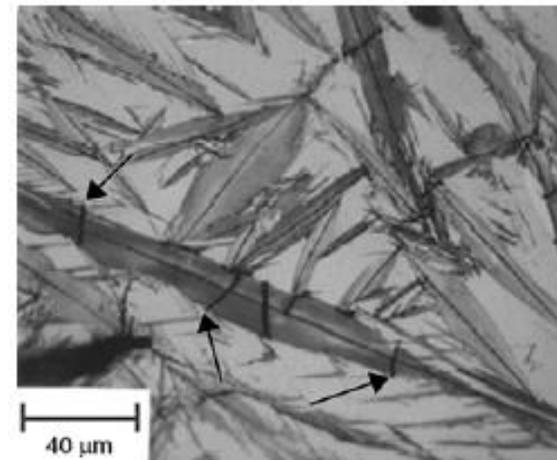
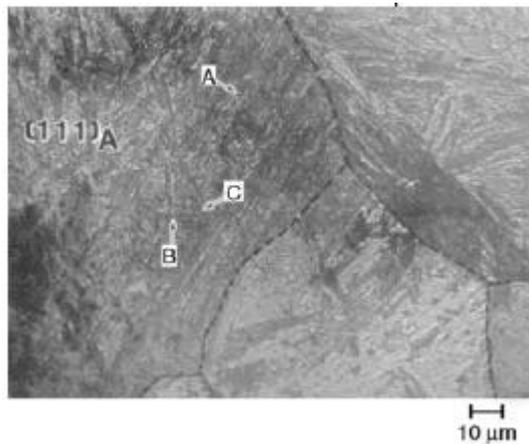
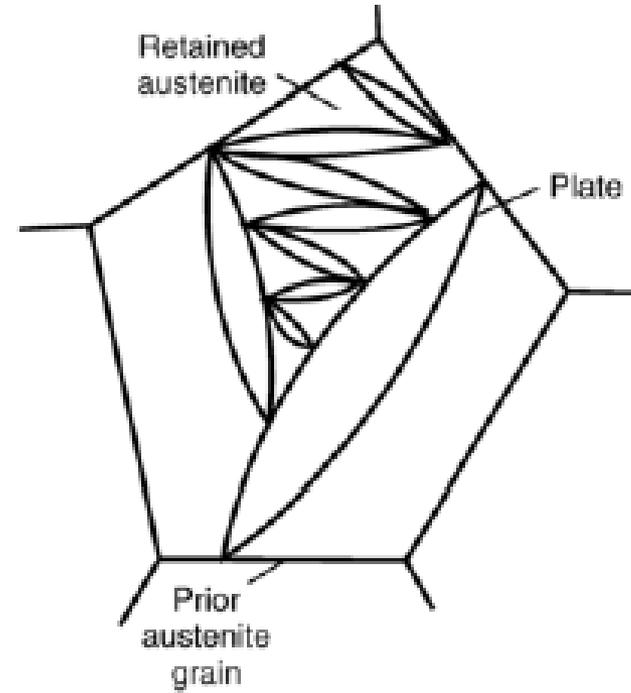
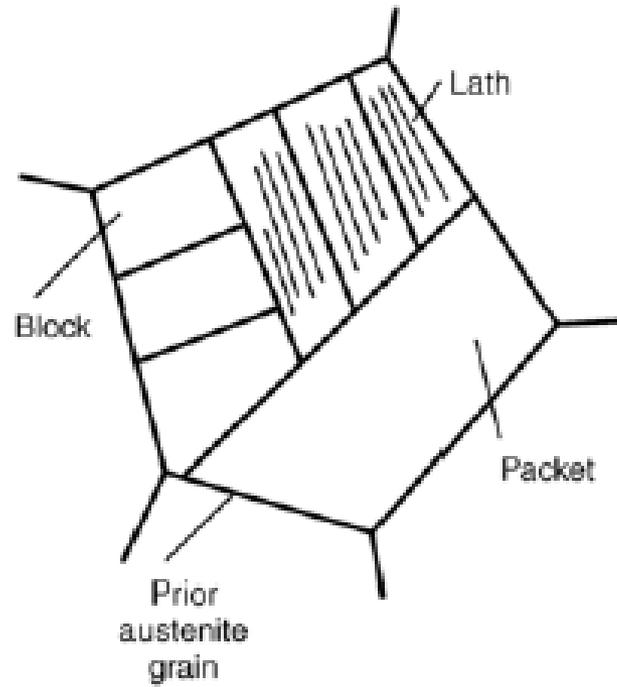
## **EFEITO DO TEMPO E TEMPERATURA DE AUSTENITIZAÇÃO NO TAMANHO DE GRÃO**

**TEMPO DE “ENCHARQUE”: 1 HORA POR POLEGADA, ATÉ  
2” E MAIS 15 MINUTOS A CADA POLEGADA EXCEDENTE;**

**PARA CHAPAS: 1,5 MINUTOS POR mm DE ESPESSURA.**

**Importância do TG/ $\gamma$ : As placas ou ripas de martensita crescem dentro dos grãos de austenita de origem: o contorno de pacotes de ripas ou de placas de martensita é o contorno do grão austenítico prévio.**

# FORMAÇÃO DA MARTENSITA NA AUSTENITA PRÉVIA



# REVELAÇÃO DE TAMANHO DE GRÃO AUSTENÍTICO

**Tabela 9.3**

Resumo dos principais métodos para avaliação metalográfica do tamanho de grão austenítico, adaptado de Millsop [50].

Técnica	Detalhes	Aplicação
Soluções de ácido pícrico	Ataque realizado a temperatura ambiente. Várias composições são empregadas, por exemplo: (a) 75 mL de H <sub>2</sub> O, 55 mL de teepol (detergente industrial) e 3 g de ácido pícrico. [52] (b) Solução saturada de ácido pícrico em água, 1% HCl e agente tensoativo (detergente) [53]	Empregadas para uma ampla faixa de aços especialmente com estrutura martensítica ou bainítica. Podem fornecer informações sobre o tamanho de grão austenítico sem nova austenitização. (ver Figura 9.56)
Carbonetação. McQuaid-Ehn [54]	Carbonetação do aço a 925 °C por 5 h. Polimento e ataque (Nital, por exemplo) para revelar a cementita que delinea os contornos de grão.	Aplica-se principalmente a aços hipoeutectóides. Não reflete o grão austenítico do aço “como recebido”. O tamanho de grão obtido é razoável para aços utilizados para carbonetação. Para outros aços, o valor obtido é um limite superior dos tamanhos de grão austeníticos esperados em tratamentos térmicos. (ver Figura 9.59)
Oxidação	Uma superfície polida do aço é exposta a uma atmosfera oxidante a 855 °C por 1 h. O aço é temperado em salmoura ou água e levemente repolido para revelar os contornos de grão austeníticos, revelados por oxidação preferencial.	Aplica-se principalmente a aços hipoeutectóides. Não reflete o grão austenítico do aço “como recebido”.
“Ataque térmico” ou tratamento sob vácuo [54]	Tratamento sob vácuo a 900 °C por 1 h ou menos. Ver detalhes em [51]	Aplicável a grande número de aços. Não reflete o grão austenítico do aço “como recebido”. (ver Figura 9.61)
Delineamento por ferrita ou cementita pró-eutectóide	Austenitização completa, seguida de resfriamento controlado para precipitar a fase pró-eutectóide em rede, ao longo dos contornos de grão austeníticos.	Aplicável a ampla gama de aços hipo- e hiper-eutectóides. Em alguns casos o tratamento térmico não é requerido pois a estrutura em “rede” já está presente.

# REVELAÇÃO DE TAMANHO DE GRÃO AUSTENÍTICO

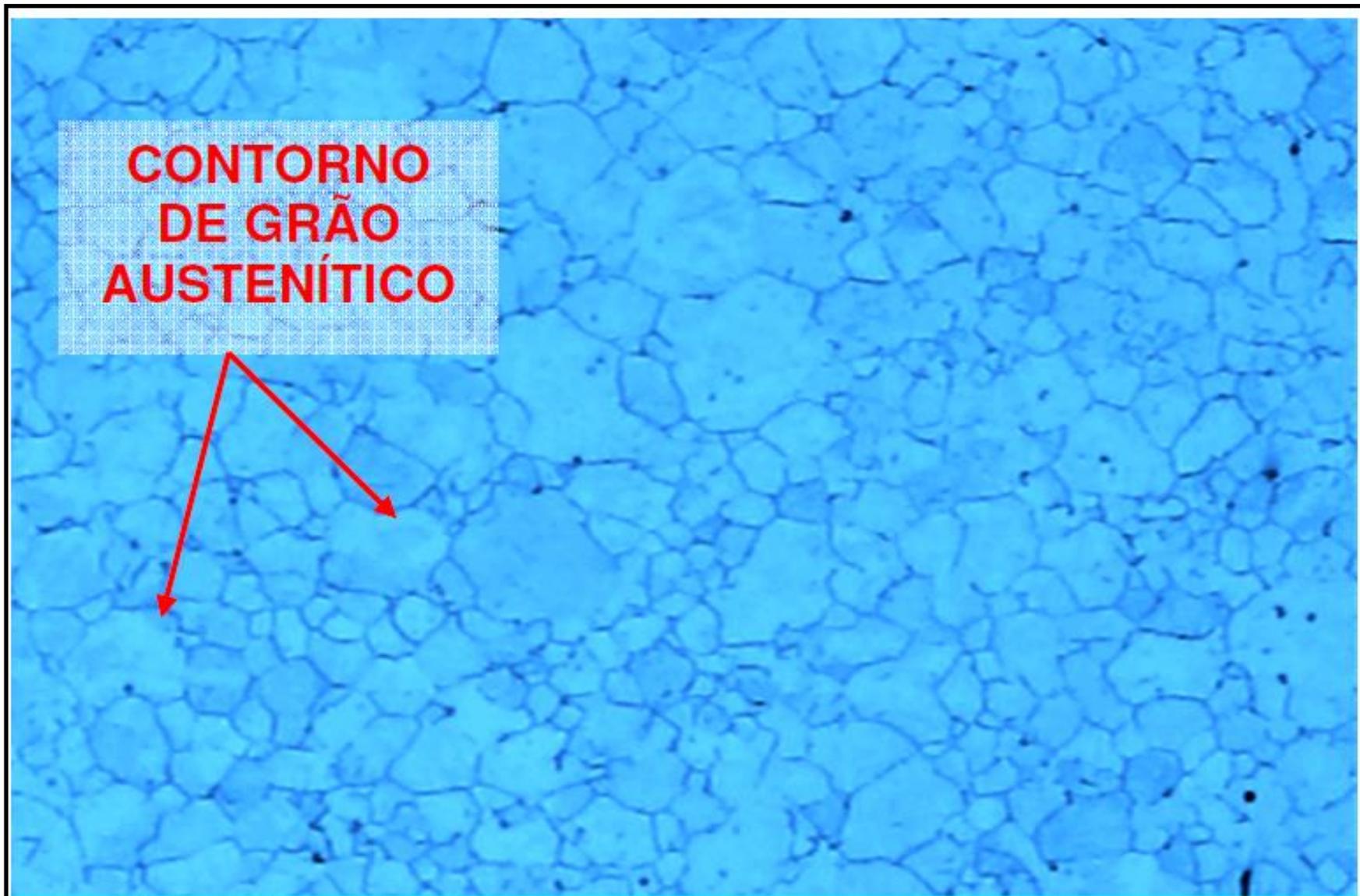


Figura3- Tamanho de grão austenítico com tamanhos heterogêneos.  
.Aumento: 100X. Ataque: Picral 2%.

## REVELAÇÃO DE TAMANHO DE GRÃO AUSTENÍTICO

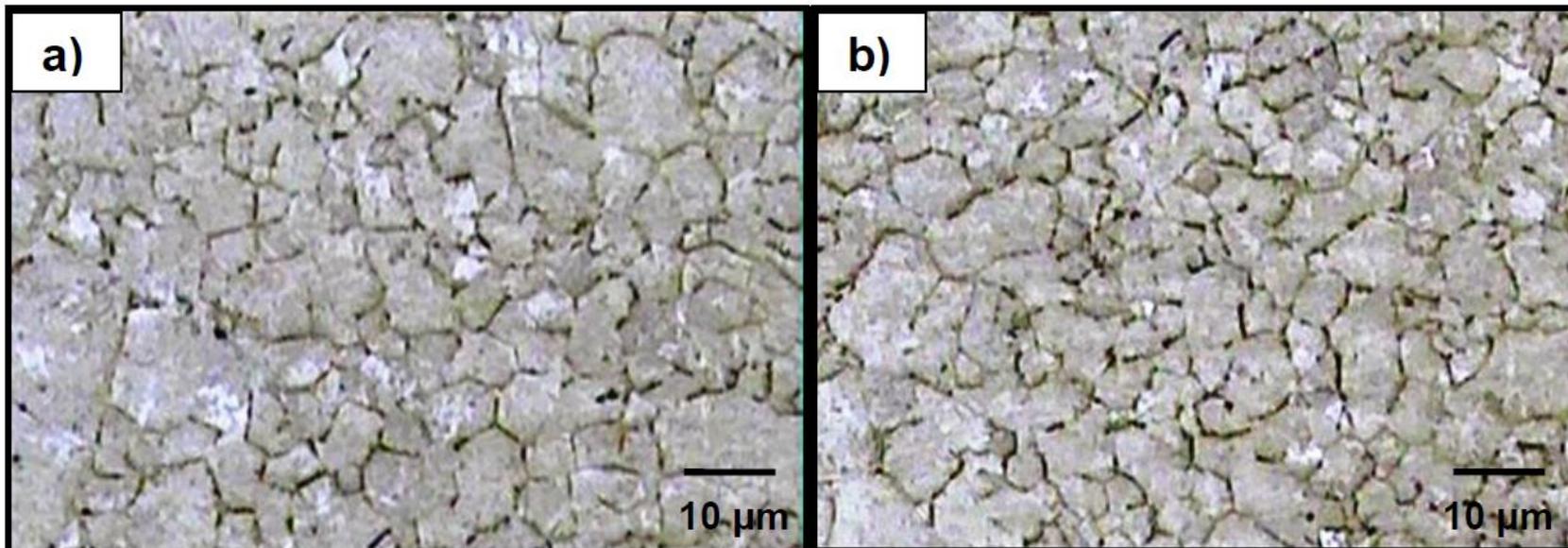
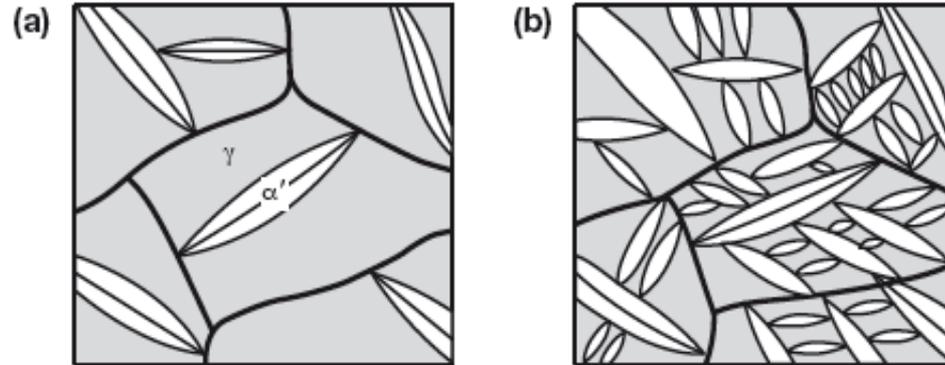


Figura 4.43 - Tamanho de grão austenítico para as amostras austenitizadas em 865°C durante 1 hora. a) 52100 MOD b) 52100 comercial. Tamanho de grão 9-ASTM E 112

# TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA



**Figura 9.11**

Esquema (em uma seção bidimensional) do crescimento da martensita ( $\alpha'$ ) com a redução da temperatura abaixo da temperatura  $M_s$ .

*(Colpaert)*



**J. R. C. Guimarães · P. R. Rios**

J Mater Sci (2009) 44:998–1005

**TAMANHO DE GRÃO AUSTENÍTICO PELO MÉTODO DE TÊMPERA**

## TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

- **Transformação adifusional, composição química é a mesma da austenita de origem;**
- **Atérmica- Fração de martensita só depende da temperatura atingida e não do tempo nesta temperatura;**
- **Osmond (1895): MARTENSITA - microestrutura de um aço temperado (Martens);**
- **Christian (1965): transformação militar pois ocorria de uma maneira organizada, diferente de uma transformação civil, desordenada;**
- **Clarence Zener (1946): “Kinetics of the decomposition of austenite”- primeiro modelo matemático da cinética de transformações de fases, incluindo a transformação martensítica;**
- **Definiu  $T_0$  – temperatura na qual a energia livre da martensita e da austenita são iguais (relacionada à  $M_s$ );**
- **Martensita: estrutura tetragonal de corpo centrada, deformada, saturada de carbono nos interstícios;**

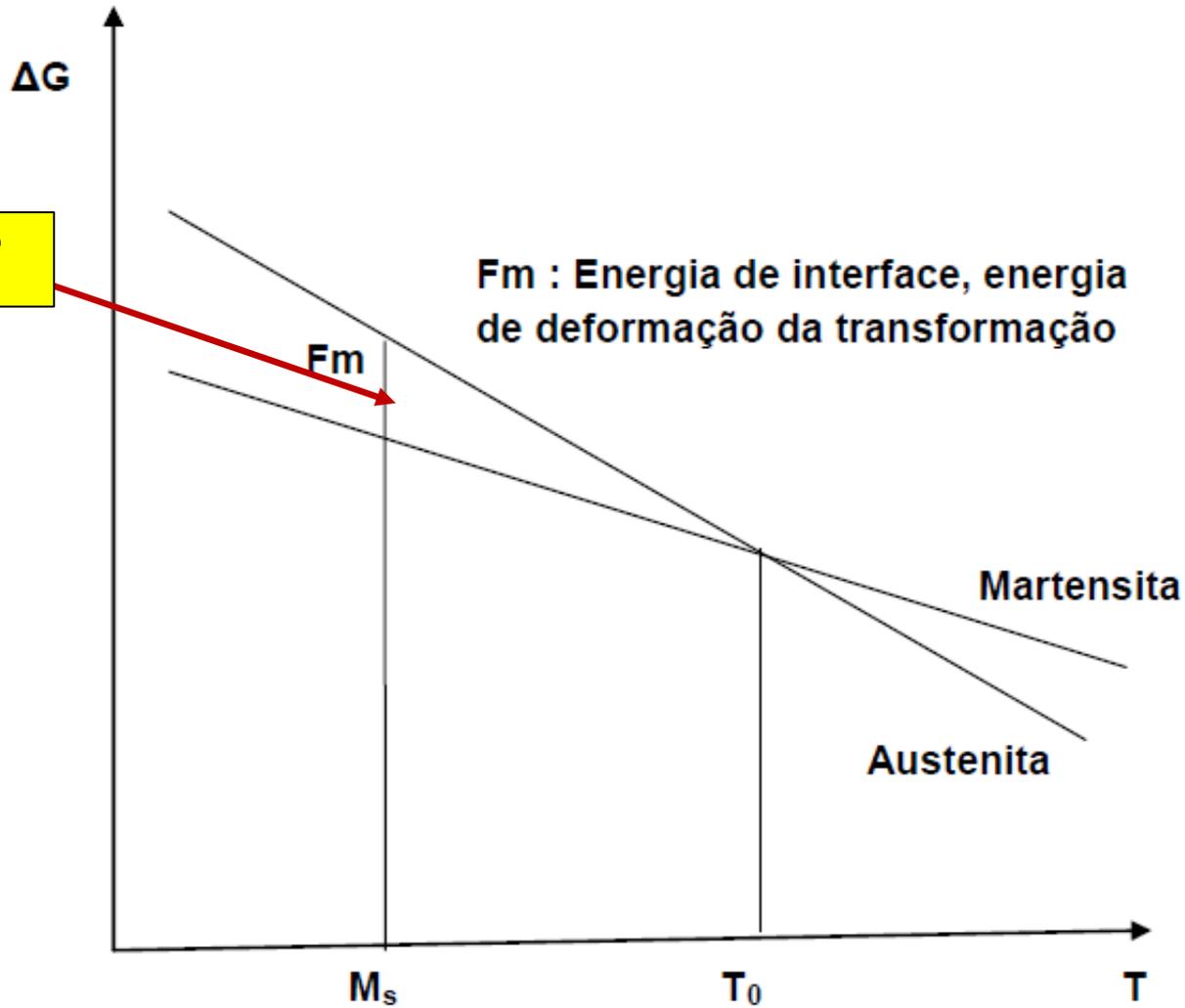
## TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

### FORÇA MOTRIZ:

- Variação de energia livre química por unidade de volume ( $\Delta g$ );
- Energia de deformação (A);
- Variação da energia livre interfacial por unidade de área ( $\alpha$ )

**Redução da energia de interface (o contorno de grão austenítico é substituído pela interface entre pacotes de ripas ou placas de martensita) e redução da energia livre volumétrica devido ao aumento de volume após a transformação (4%).**

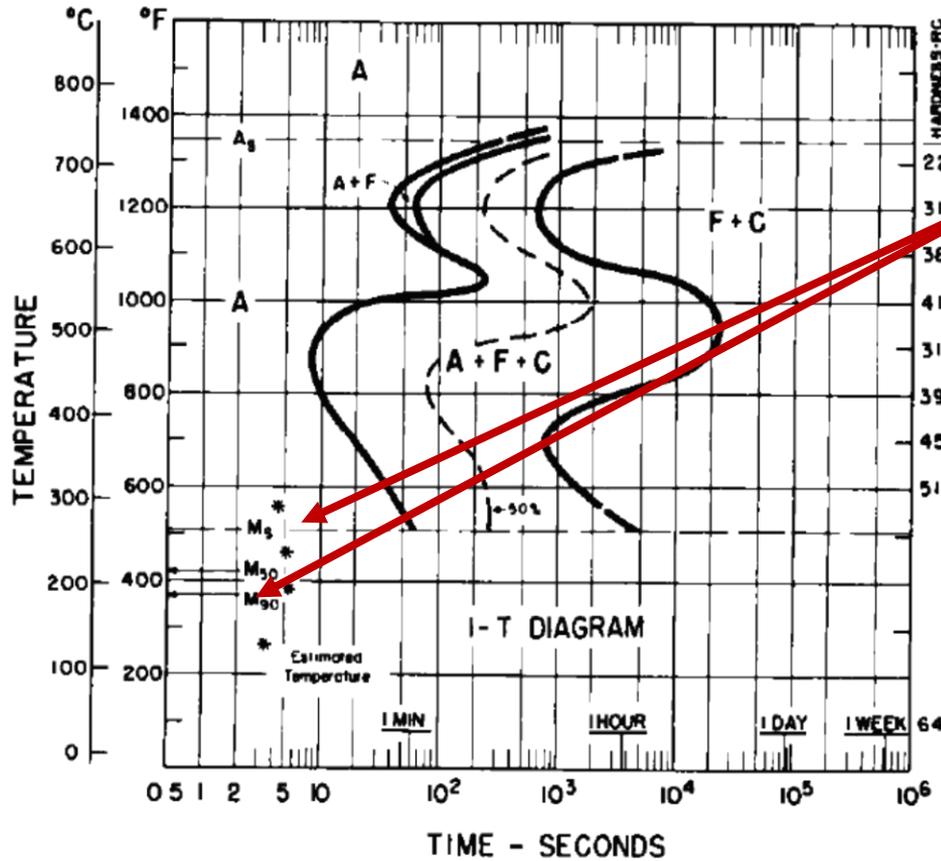
$$\Delta G = \frac{4}{3} \pi r^2 c \Delta g + \frac{4}{3} \pi r c^2 A + 2\pi r^2 \alpha$$



# TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

**Type: 4150 Mod.**

**Composition: Fe - 0.55% C - 0.60% Mn - 1.03% Cr - 0.19% Mo  
- 0.36% Ni Grain size: 7-8 Austenitized at 843°C (1550°F)**

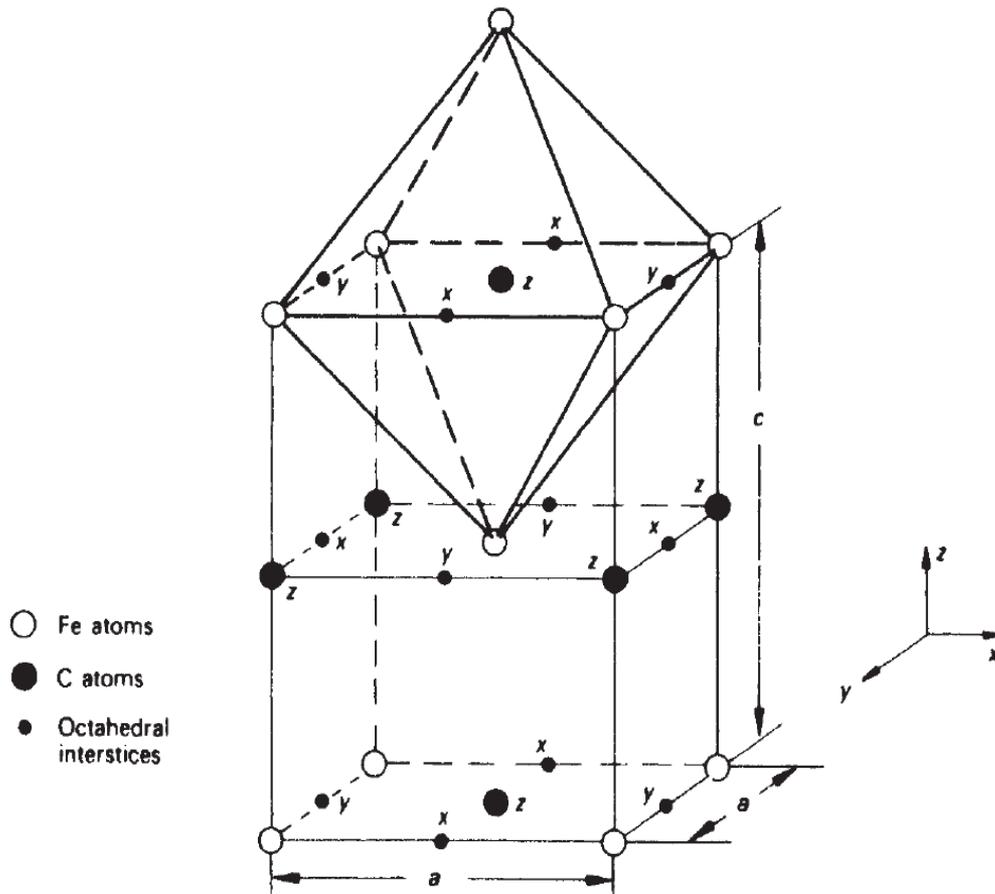


**Ms: “start”  
Mf: “final”  
Na verdade “M90”**

# TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

## TETRAGONALIDADE DA MARTENSITA

$$\frac{c}{a} = 1 + 0.045 \text{ wt\% C}$$



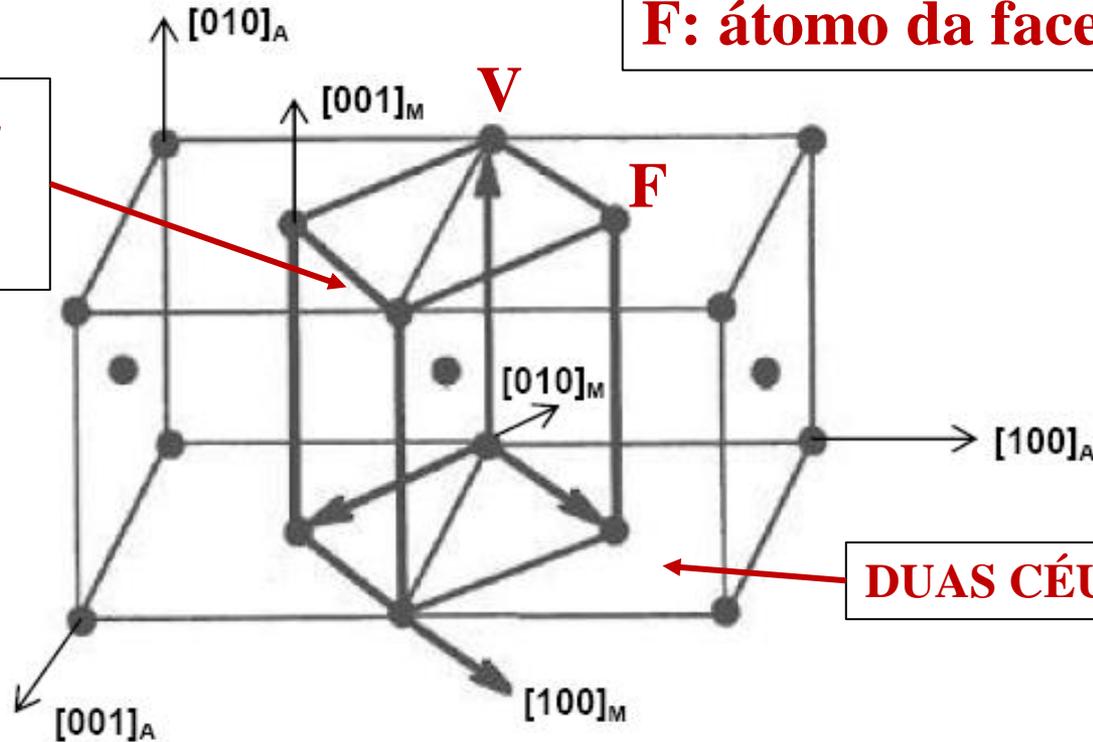
- “Zener Ordering”: átomos de carbono ocupam locais preferenciais nos quais existe simetria, em interstícios octaédricos;
- Transformação sem difusão, o C não sai do eixo Z e acaba deformando mais este eixo: TETRAGONAL;

(Honeycombe)

# TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

**V: átomo do vértice CFC**  
**F: átomo da face CFC**

**TETRAGONAL  
DE CORPO  
CENTRADO**



**DUAS CÉULAS CFC**

FIG. 2.1. Representação esquemática da correspondência entre as redes cfc e tcc. (BHADESHIA, 2001)

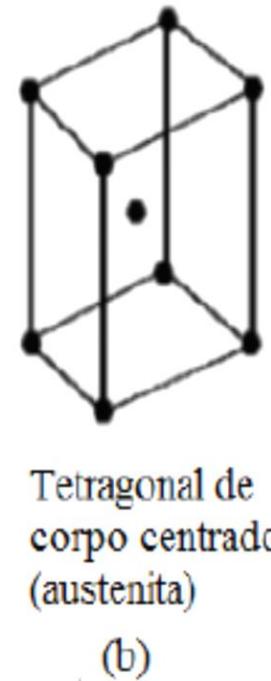
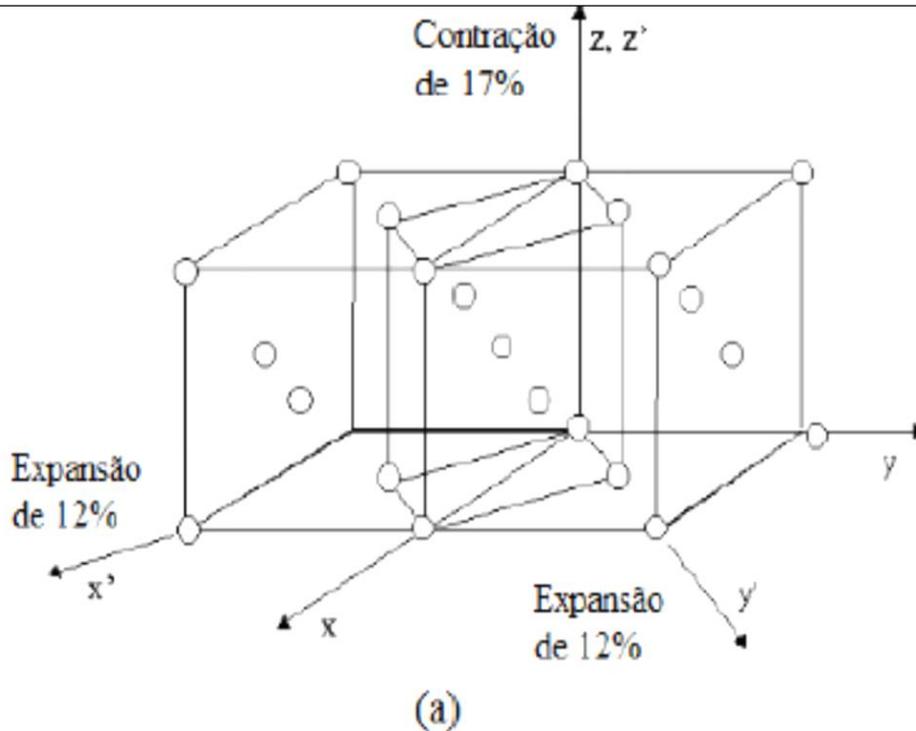
**Duas células CFC (austenita) : equivalência com a tetragonal da martensita.**

# MECANISMO DA TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

## Wechsler, Lieberman e Read

- a) **Uma distorção de Bain transformando a estrutura CFC em TCC (deformada) com todos os planos sendo deformados-compressão de c (z) e expansão dos eixos a’;**
- b) **Uma deformação por cisalhamento que mantém a estrutura do cristal (escorregamento ou maclagem). Ocorre, aproximadamente, na velocidade do som;**
- c) **As deformações anteriores ocorrendo simultaneamente dão origem a um plano distorcido, porém os planos não distorcidos da fase austenítica e da fase martensítica ainda apresentam orientações diferentes;**
- d) **Uma rotação do reticulado que permite que os planos não distorcidos fiquem com a mesma orientação, levando à coerência entre austenita e martensita.**

# TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA



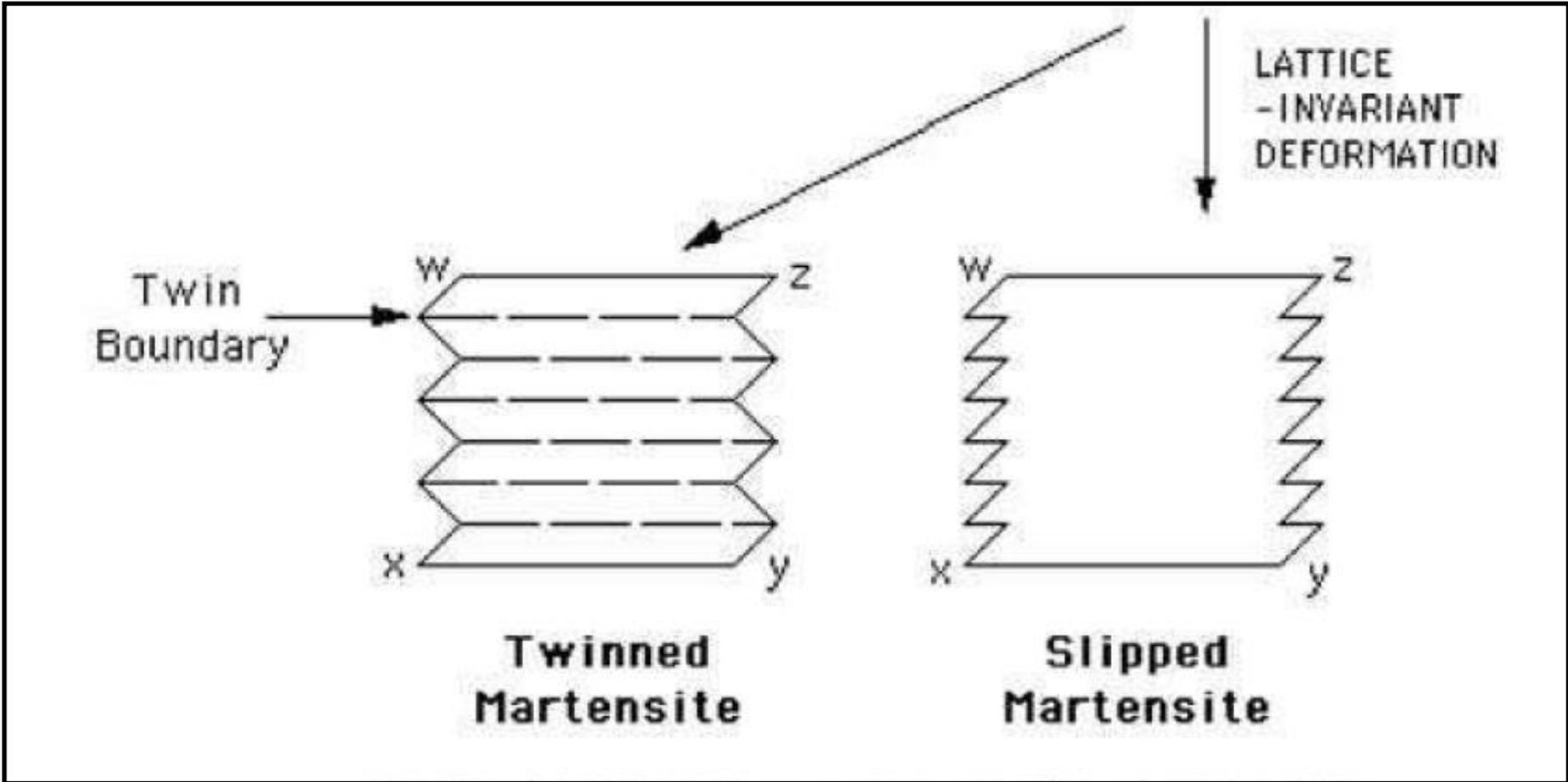
Deformação de Bain



(ADAPTADO DA TESE DOUTORADO: KARL ZILNYK)

**O AUMENTO DE VOLUME FINAL É DE ~ 4%.**

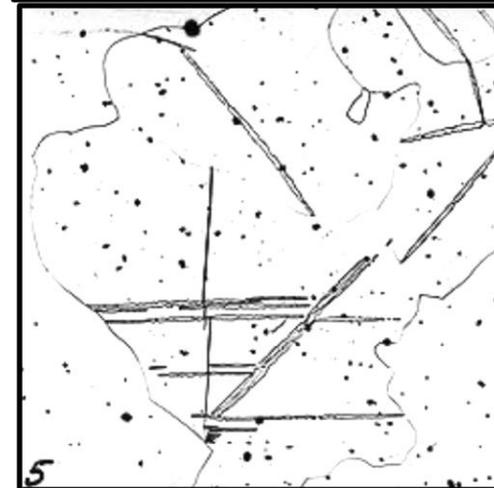
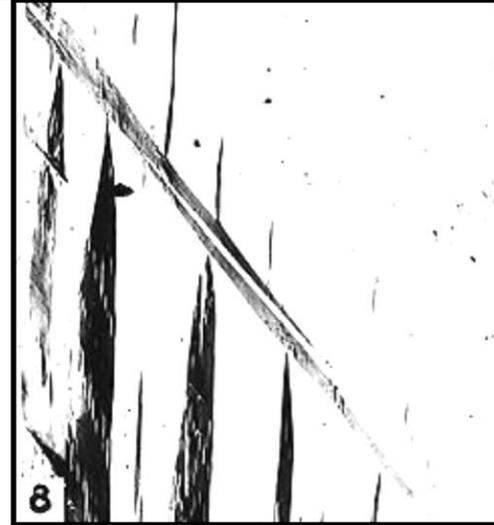
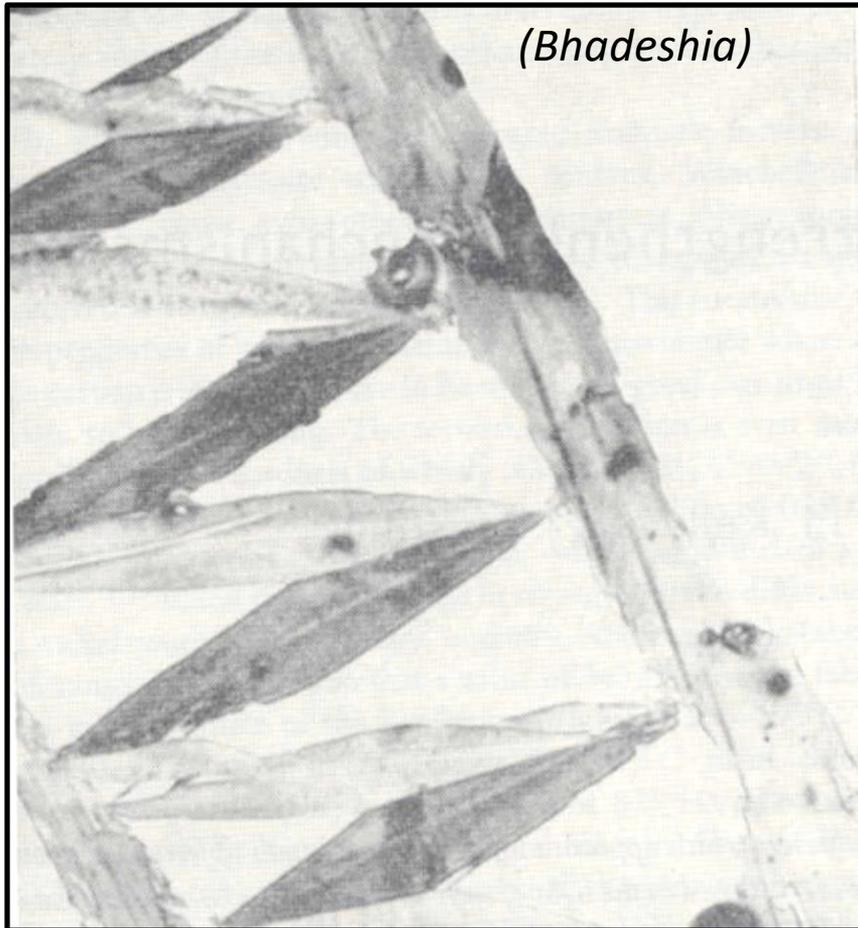
# TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA



(Honeycombe)

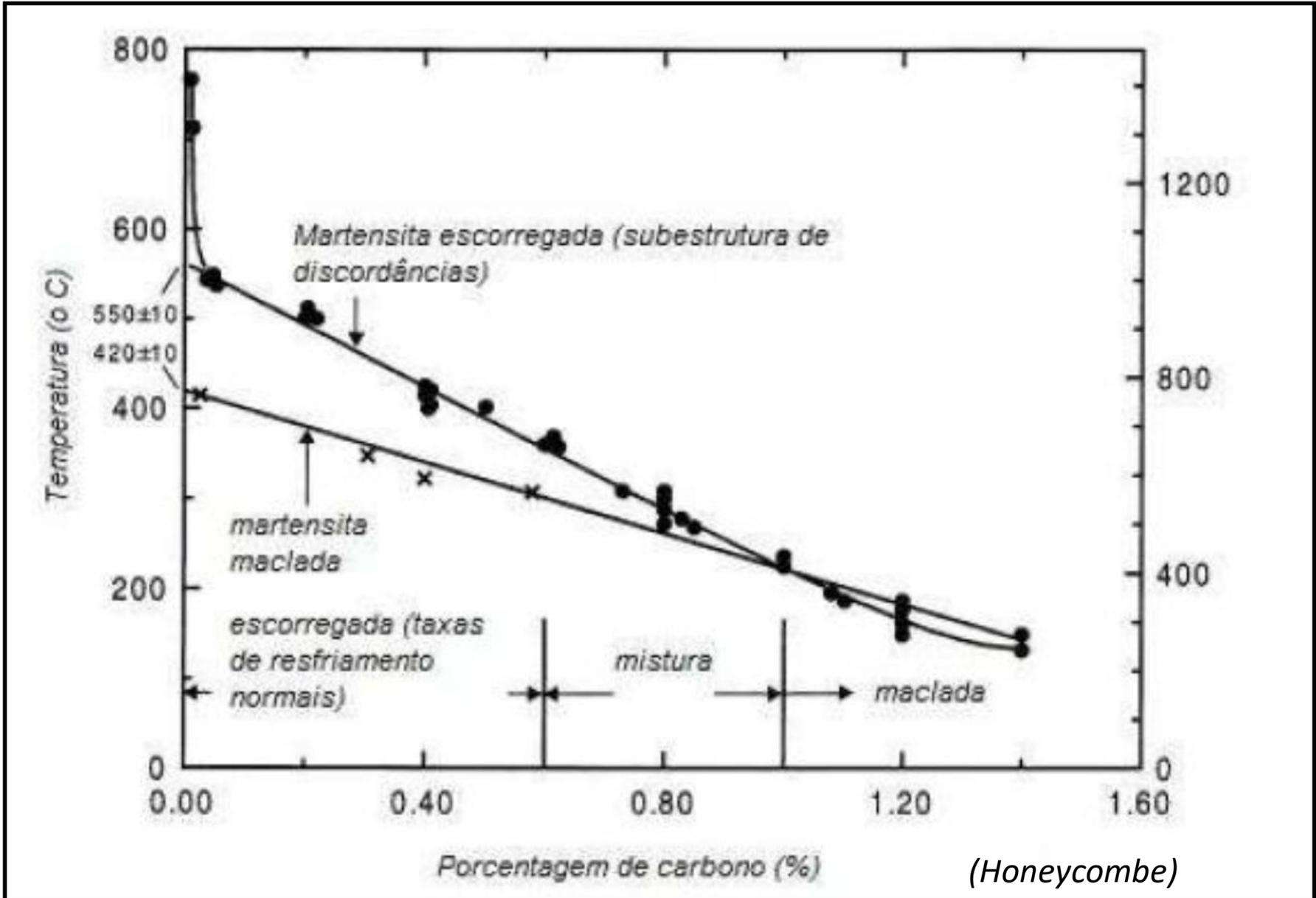
# TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

## MACLAS MECÂNICAS



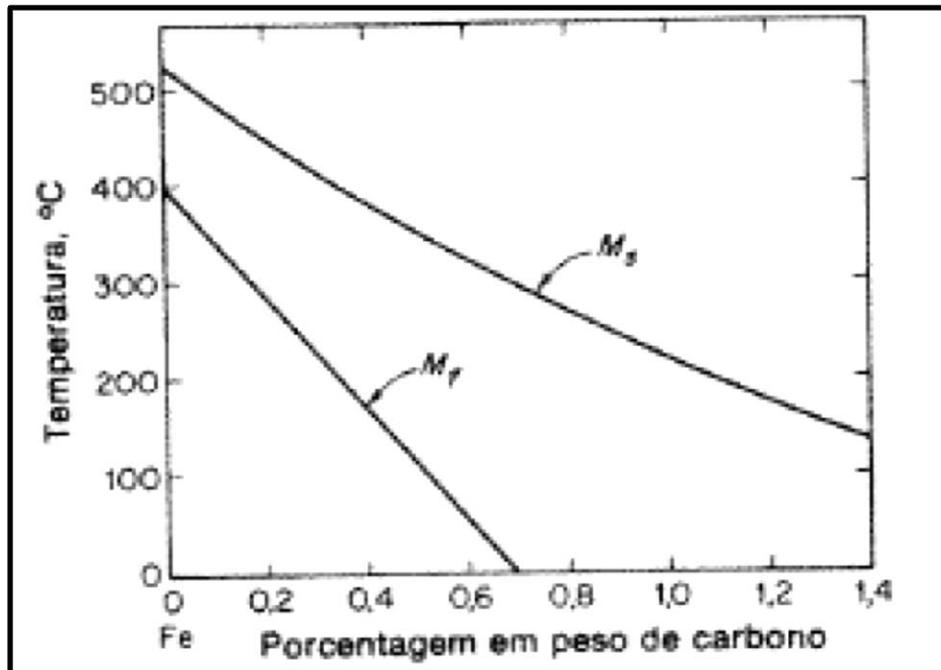
**MARTENSITA MACLADA**

# TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA



## TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

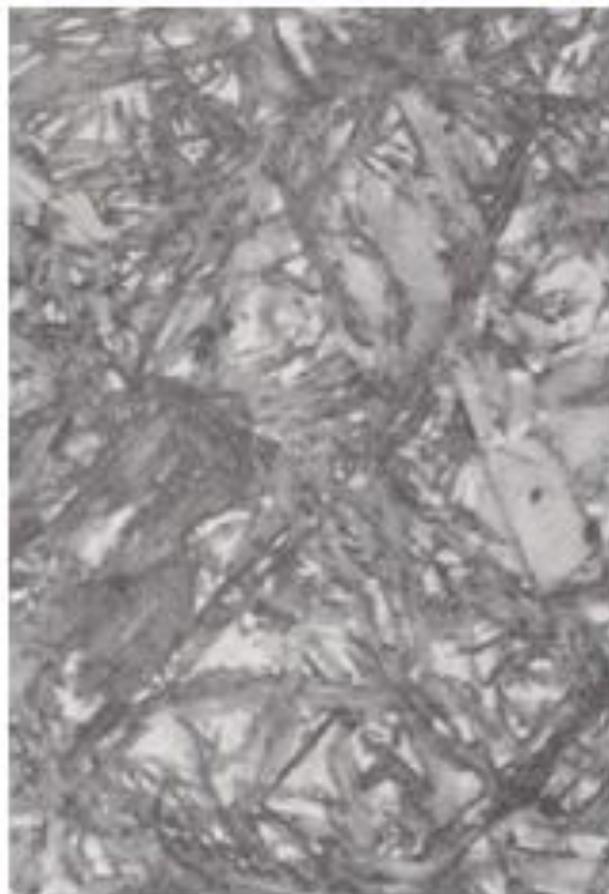
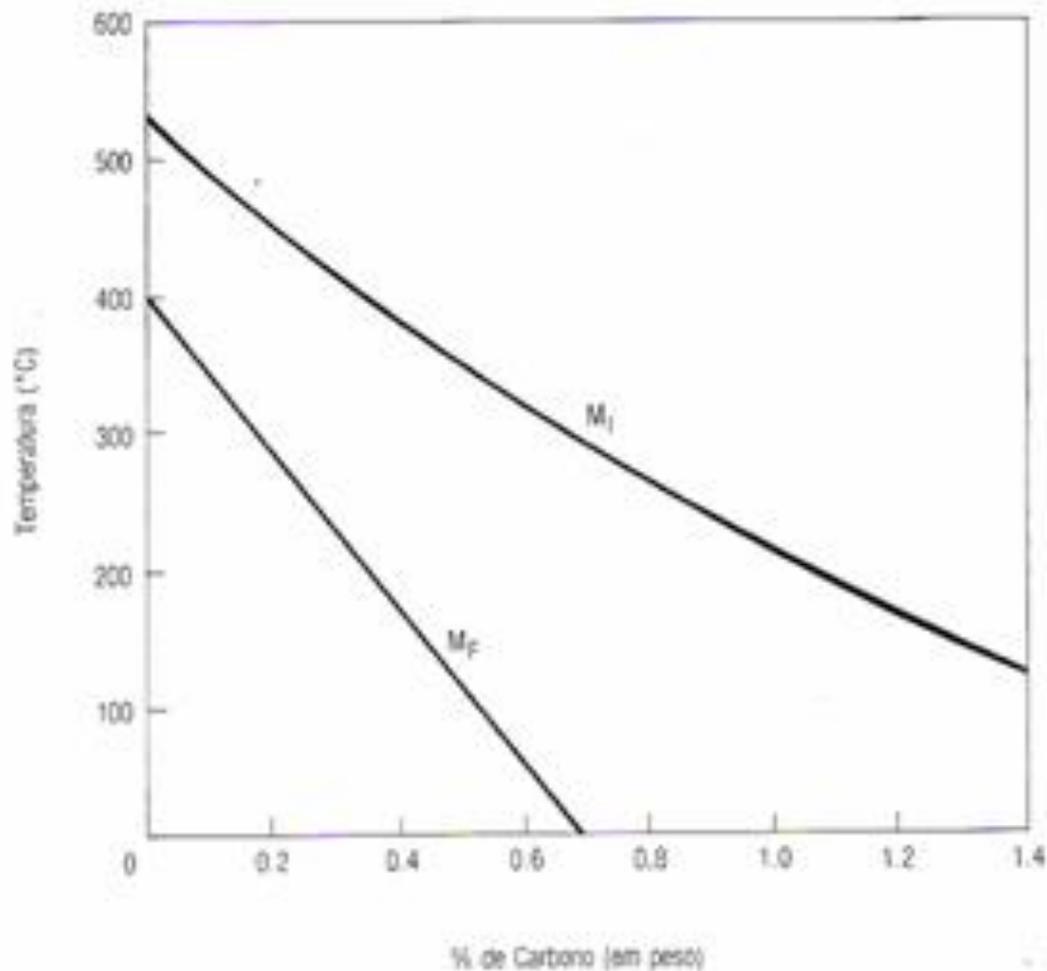
- Como ocorre por cisalhamento, as interfaces tem que ter mobilidade (Glissil  $\neq$  Séssil);
- Com aumento do teor de C: arraste das L.D. na interface, mais difícil se mover, abaixa  $M_s$  e  $M_f$ .

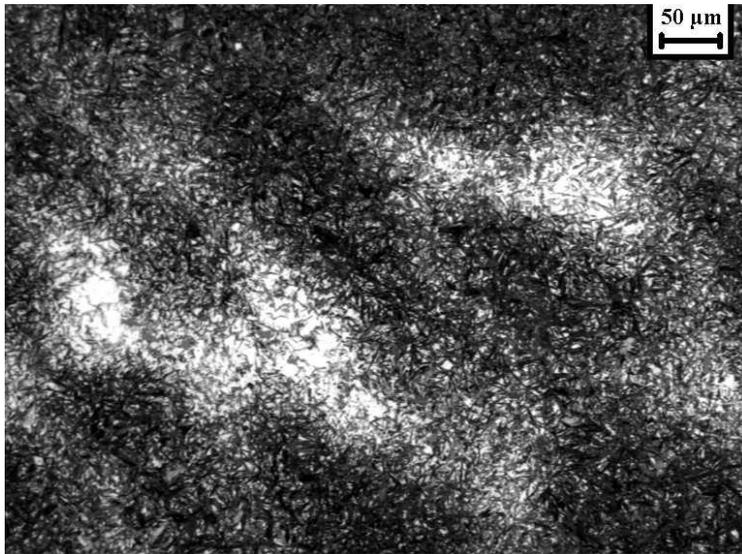


(Reed-Hill)

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

MARTENSITA +  
AUSTENITA RETIDA



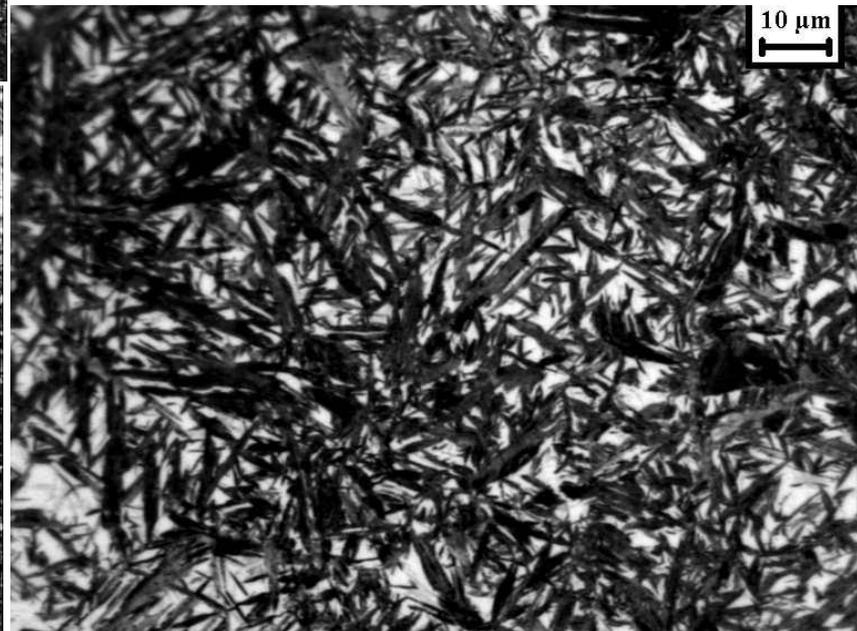
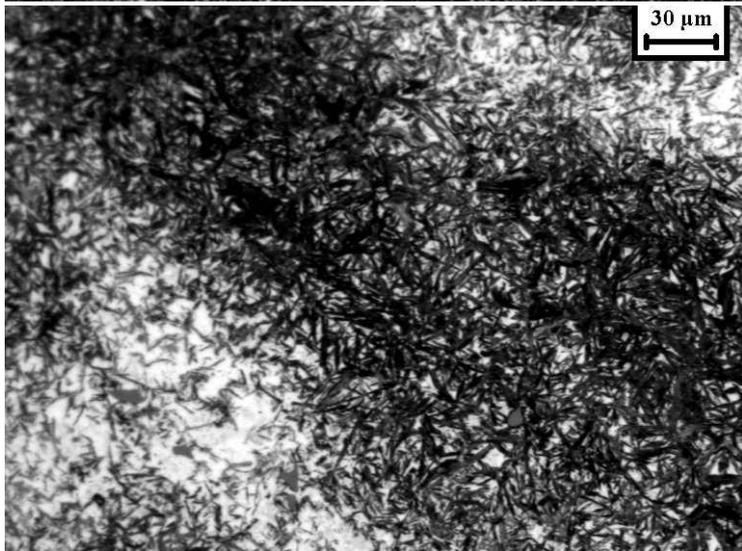


## **AÇO ALTA LIGA TEMPERADO**

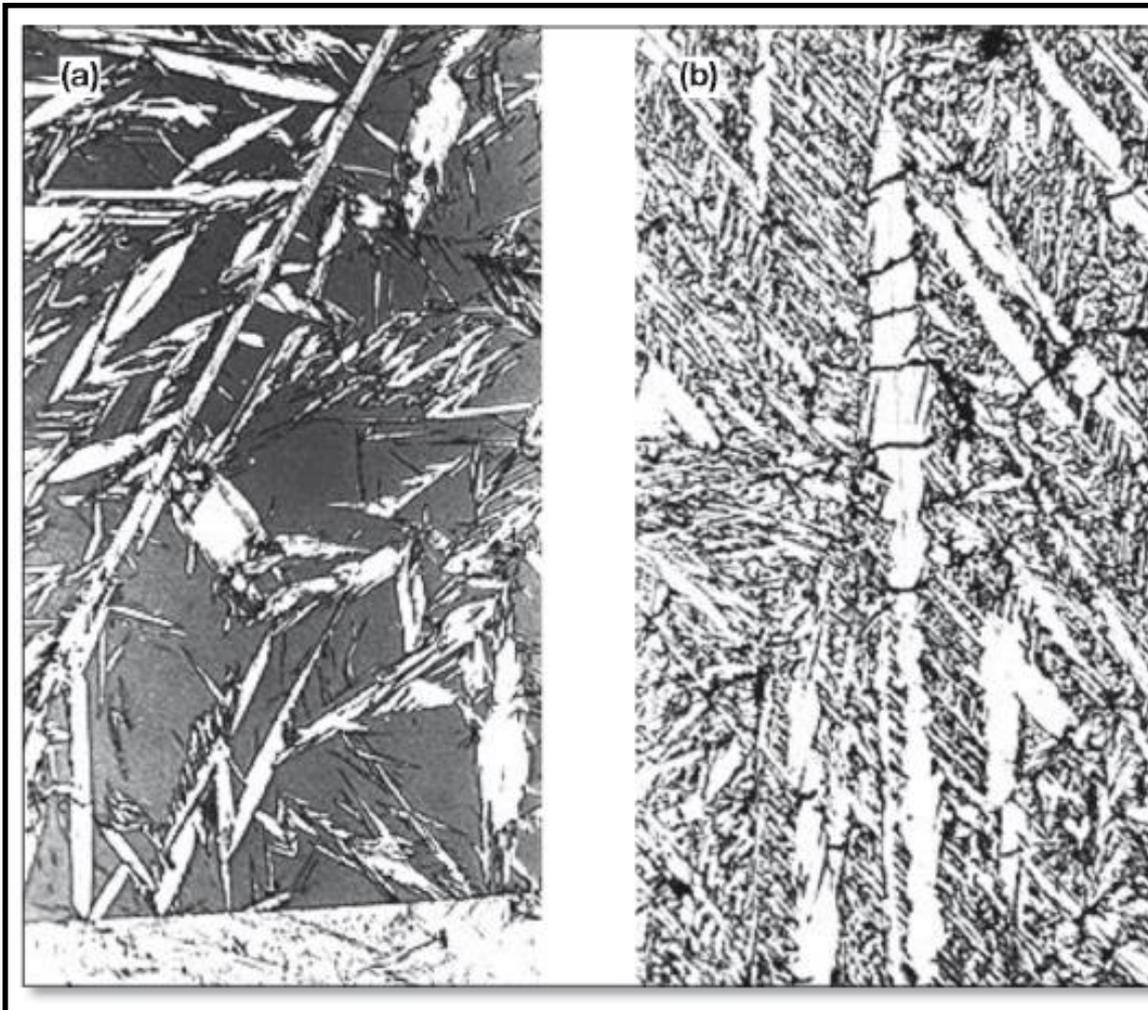
Estrutura:

**martensita e austenita retida**

A distribuição heterogênea dos elementos de liga provocou heterogeneidade microestrutural



# TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA



**Figura 9.19**

(a) Placas de martensita em matriz de austenita retida em um aço com 1,7% C, resfriado rapidamente até a temperatura ambiente. (b) A mesma amostra da fotografia (a) submetida a resfriamento em ar líquido. Observa-se o aumento significativo da fração de martensita e a eliminação quase completa da austenita retida. A placa central de martensita apresenta trincas transversais a seu eixo maior. Comparar com a Figura 9.11. Cortesia de M. Hillert, [20].

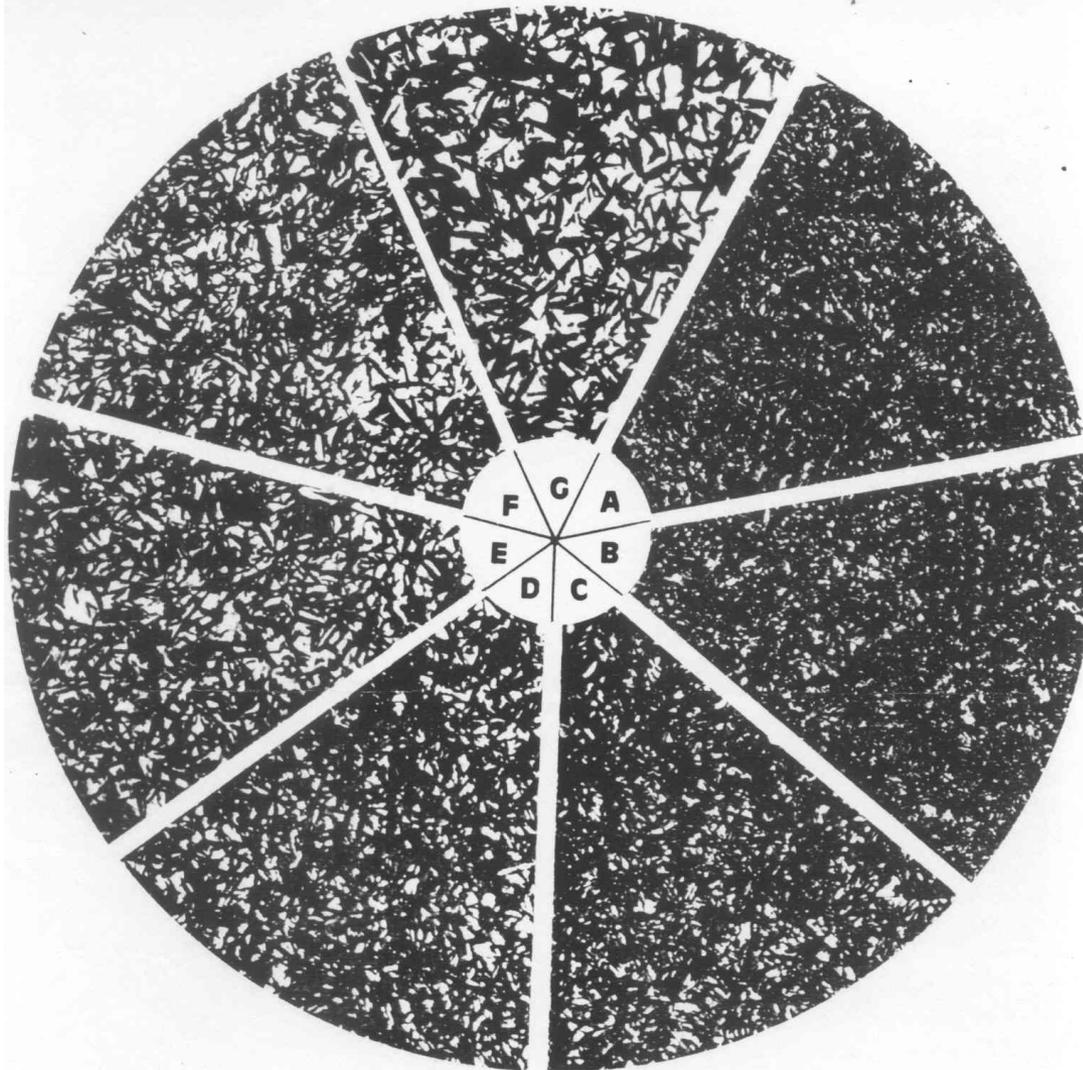
## AUSTENITA RETIDA

### MEDIDA:

- DIFRAÇÃO DE RAIOS-X
- ULTRASSOM
- M.O.: ATAQUE QUÍMICO ESPECÍFICO

*(Colpaert)*

# MARTENSITA E AUSTENITA RETIDA



SETOR	% $\gamma_R$
A	10
B	15
C	20
D	25
E	30
F	35
G	40

# TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

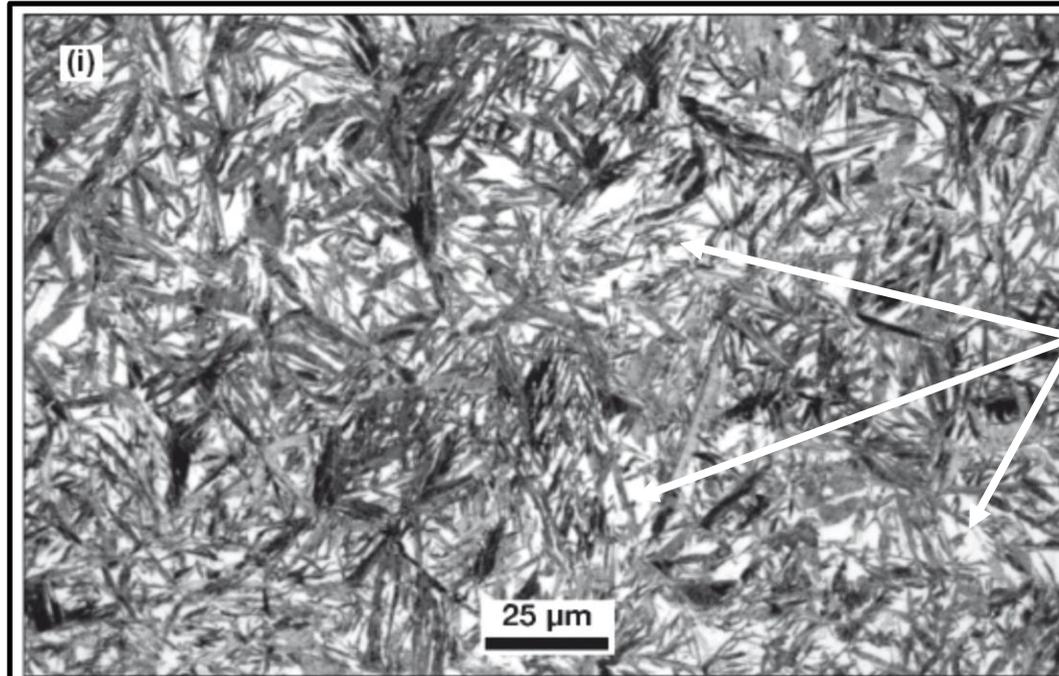
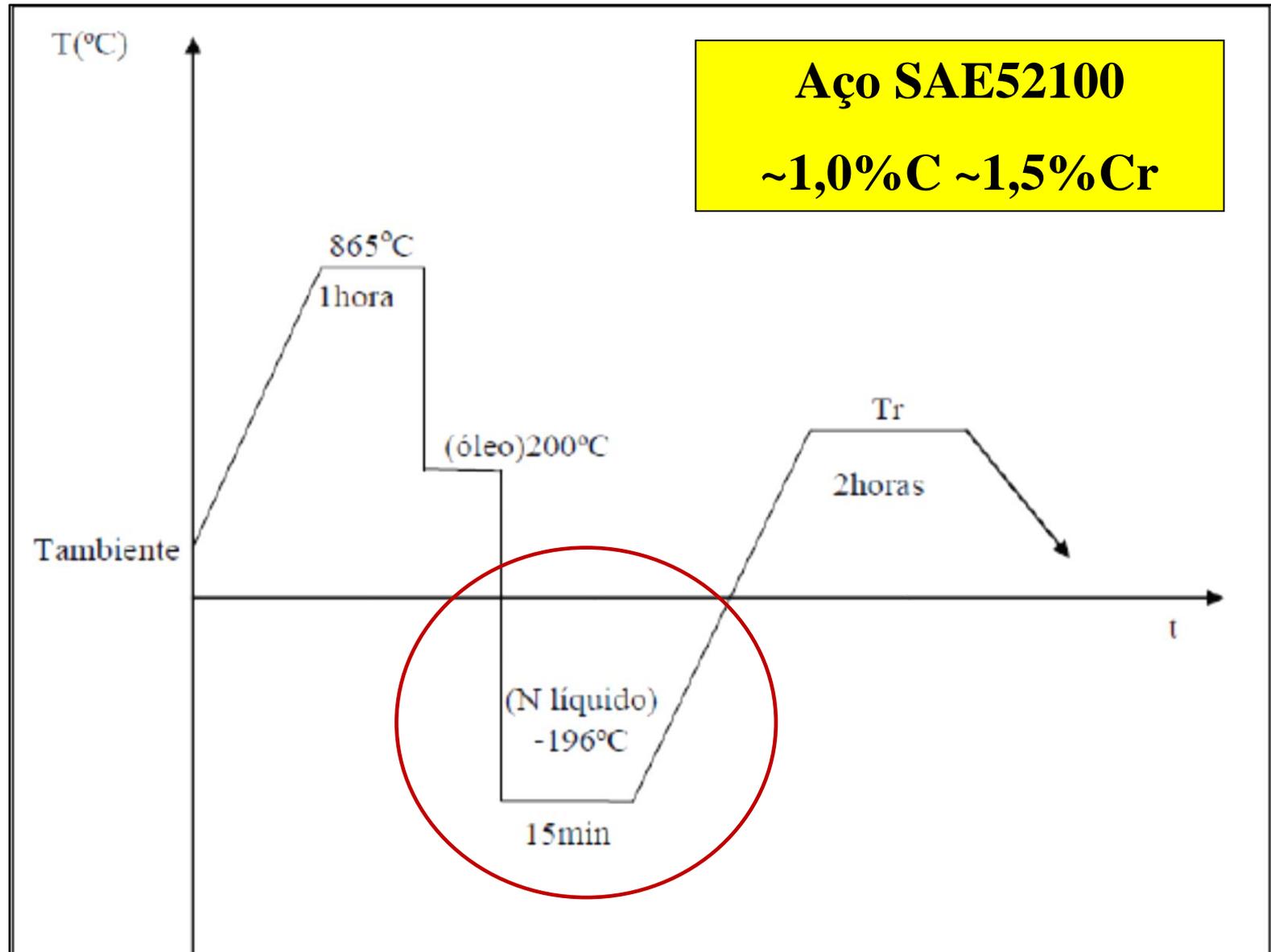


Figura 10.64(l) – AISI 43100 – 200°C

**AUSTENITA  
RETIDA  
BRANCA  
M.O.**

*(Colpaert)*

# TRATAMENTO SUBZERO



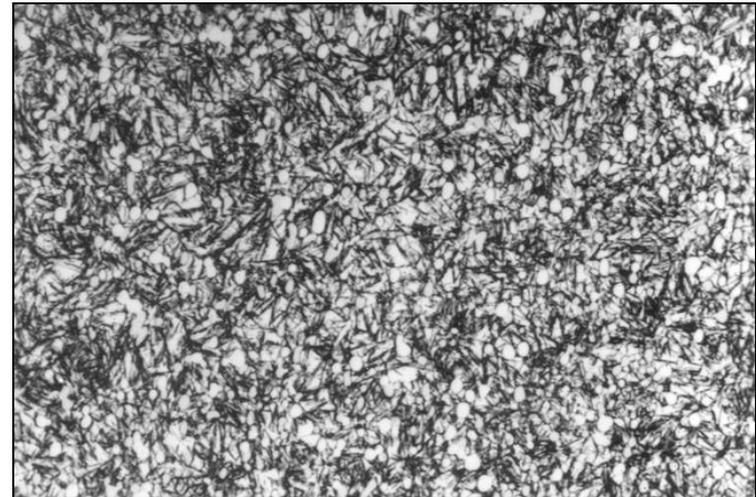
## SUB ZERO

- **Consiste em resfriar as peças após a têmpera em temperaturas abaixo de  $0^{\circ}\text{C}$ , como: nitrogênio líquido  $\cong -196^{\circ}\text{C}$ , gelo seco  $\cong -68^{\circ}\text{C}$  ou hélio líquido  $\cong -268^{\circ}\text{C}$ ;**
- **Propiciando temperaturas inferiores a  $M_f$  ocorrendo a transformação da austenita retida em martensita.**

## Subzero

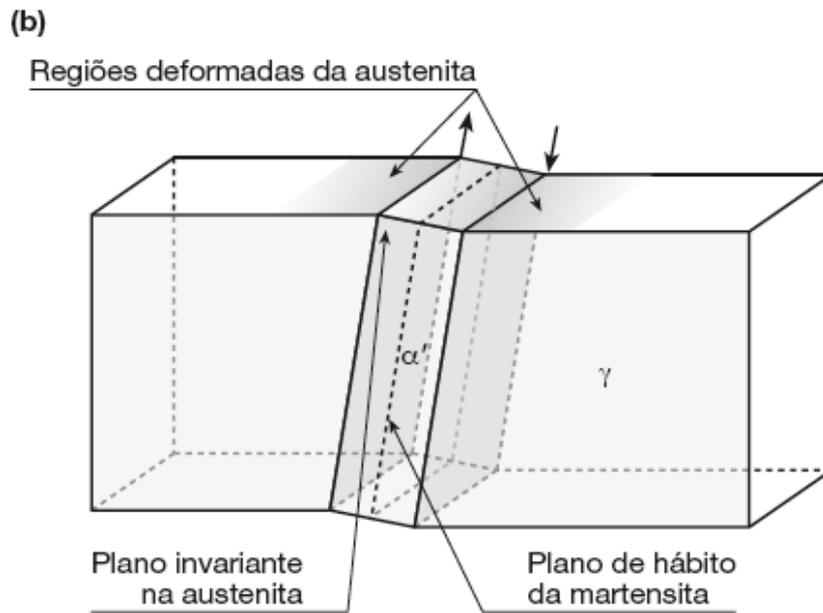
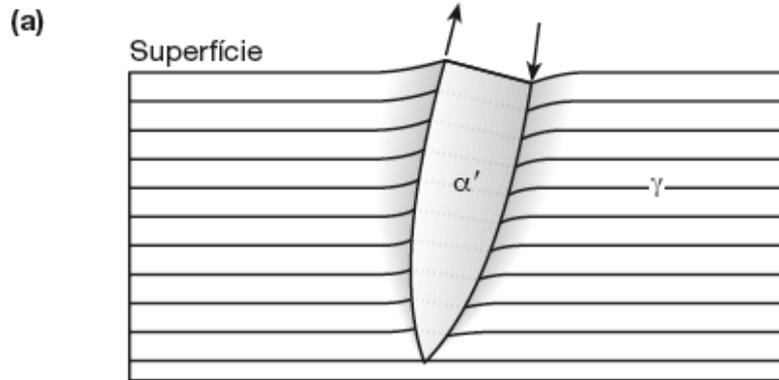
Tem por objetivo reduzir ao mínimo o teor de austenita retida após a têmpera.

### Tanque para tratamento subzero



**Aço rápido M3:2 temperado  
com 16% de austenita retida**

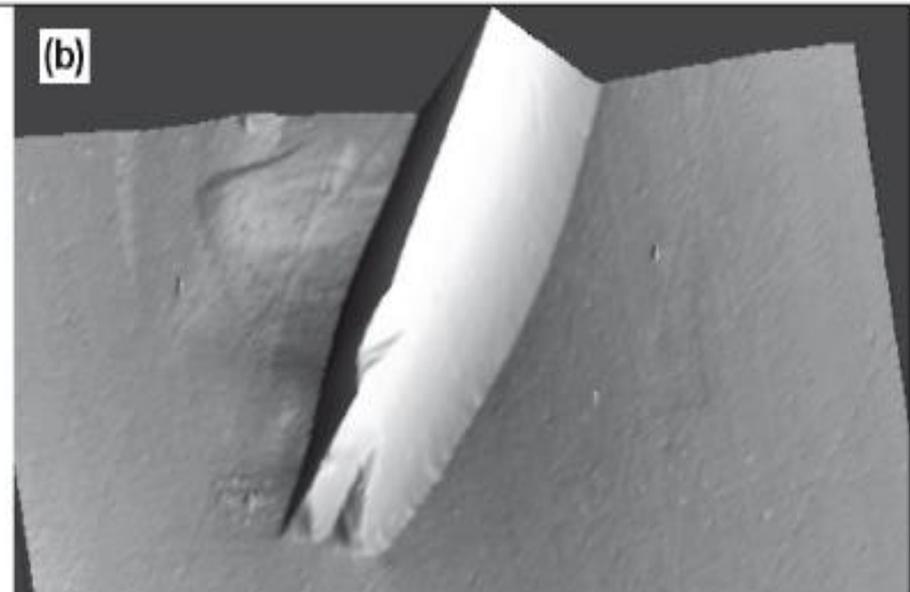
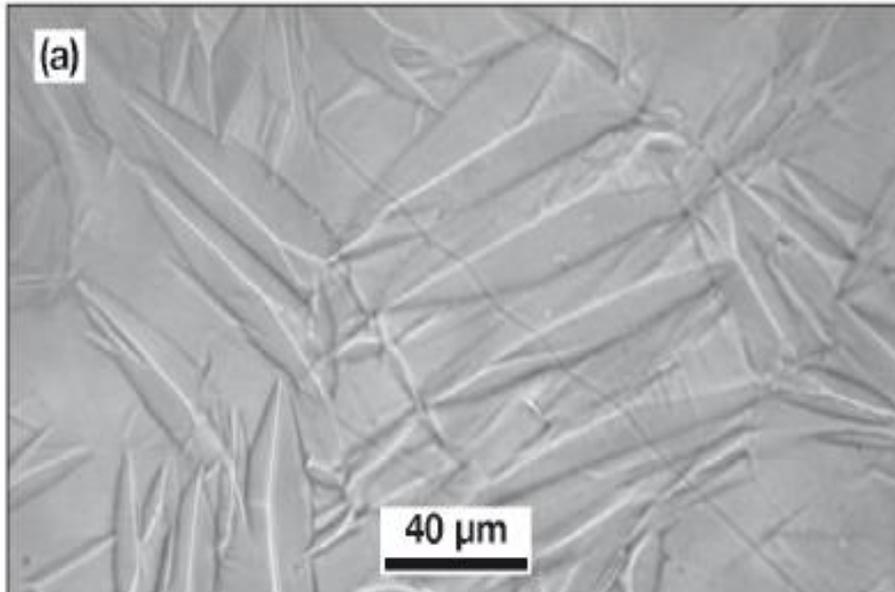
# TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA



- FORMA UM RELÊVO VISTO MACROSCÓPICAMENTE EM SUPERFÍCIE BEM POLIDA;
- PLANO DE HÁBITO-MARTENSITA;
- PLANO INVARIANTE NA AUSTENITA;
- ESTES PLANOS SÃO PARALELOS –RELAÇÃO CRISTALOGRÁFICA – KURDJUMOV-SACHS, GRENINGER-TROIANO, NISHIYAMA-WASSERMAN;

(Colpaert)

# TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

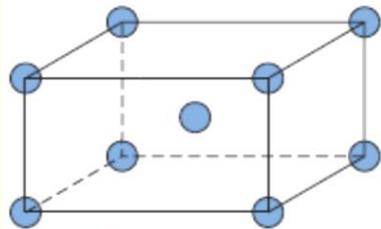


**Figura 9.12**

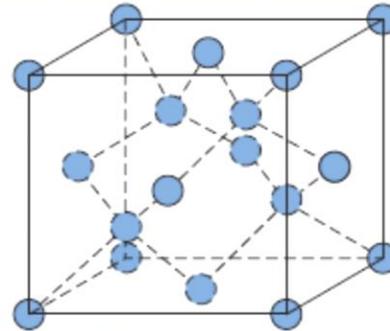
Amostra de liga à base de ferro com  $C = 0,31\%$   $Ni = 30,5\%$  polida para metalografia quando austenítica e transformada para martensita. (a) Microscopia ótica mostra a distorção de riscos inicialmente retos na austenita. (b) e (c) Microscópio de força atômica mostra o relevo das placas de martensita e a ausência de descontinuidades quando a linha atravessa a interface austenita-martensita<sup>(10)</sup>. Reproduzido por cortesia de H.K.D.H. Bhadeshia, Universidade de Cambridge, Inglaterra.

*(Colpaert)*

# DOENÇA DO ESTANHO



13.2°C  
Cooling



**TRANSFORMAÇÃO  
LENTA COM  
AUMENTO DE 27%  
NO VOLUME E  
DECRÉSCIMO DE  
DENSIDADE**



**QUANTO MAIS BAIXA A  
TEMPERATURA, MAIS RÁPIDA É A  
TRANSFORMAÇÃO: DO BRANCO ( $\beta$ )  
PRO CINZA ( $\alpha$ ), DESINTEGRA: NÃO  
APRESENTA O PLANO DE  
HÁBITO/PLANO INVARIANTE.  
EM 1850, SOLDADOS RUSSOS  
MORRERAM NO INVERNO RIGOROSO  
POIS OS BOTÕES DE ESTANHO DO  
UNIFORME DESINTEGRARAM:  
“DOENÇA DO ESTANHO.**

**"Os botões de Napoleão: as 17 moléculas que mudaram a história", de Jay Burreson:**

Napoleão tomou Moscou em **1812**, porém, os russos não se renderam e, embora não admitam, incendiaram a cidade em 4 dias e, **bloquearam os caminhos que levavam a regiões com temperaturas mais** amenas, forçando os franceses a passarem pelo caminho que haviam vindo (**Batalha de Borodino**). Era inverno, com **-40°C**. No referido caminho, o que os franceses não haviam consumido, os russos destruíram. Além de tudo isso, **os botões das fardas dos soldados franceses** eram de estanho e, viraram pó. Muitos morreram devido à “doença do estanho”. Napoleão só escapou por sorte. Dos 600mil soldados que participaram da invasão, retornaram apenas 100 mil.

**Controvérsia: botões de bronze (Cu-Sn)**

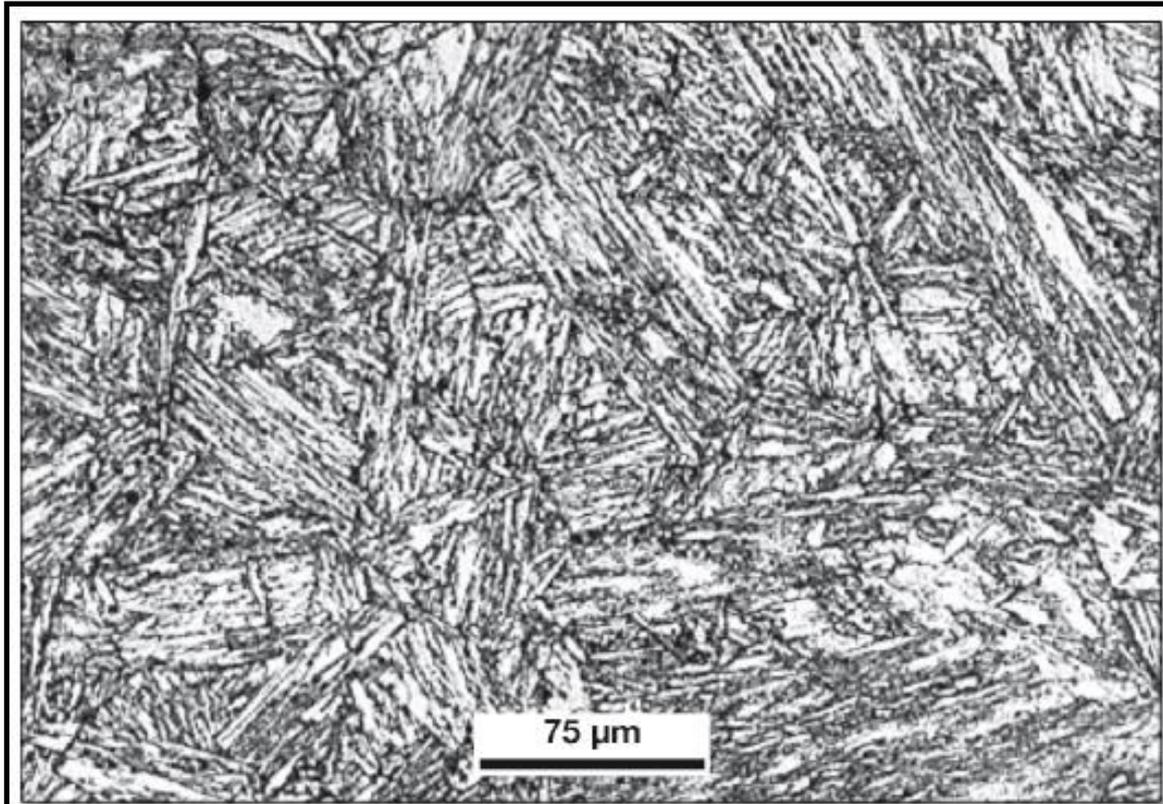
# TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA



Figura 14: Martensita na forma de ripas e sua estrutura(29).

(Diego Rocha-D.M.)

# TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA



**Figura 9.15**

Martensita em aço baixa liga ASTM A533 Cl.1 (20MnMoNi55) com C = 0,2%, Mn = 1,38%, Si = 0,25%, Ni = 0,83%, Mo = 0,49% resfriado continuamente a 50 °C/s Início da transformação: 415 °C. Ataque: Nital 2%. Cortesia B. Marini, CEA, França. [19].

*(Colpaert)*

# TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

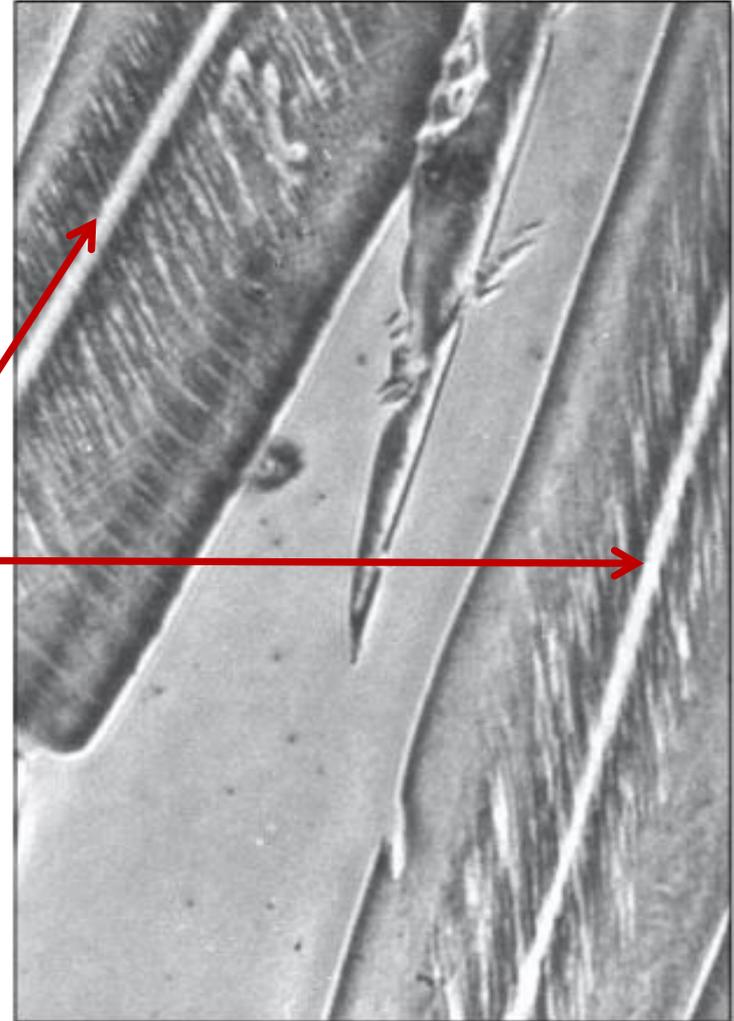
Imagem de MET

**Figura 9.17**

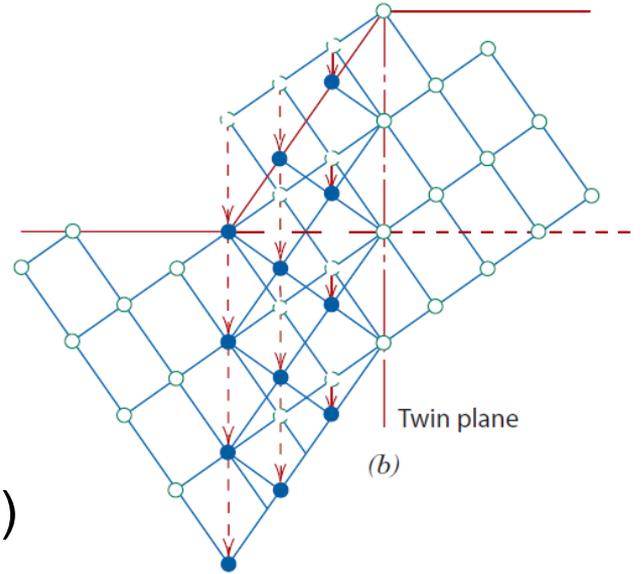
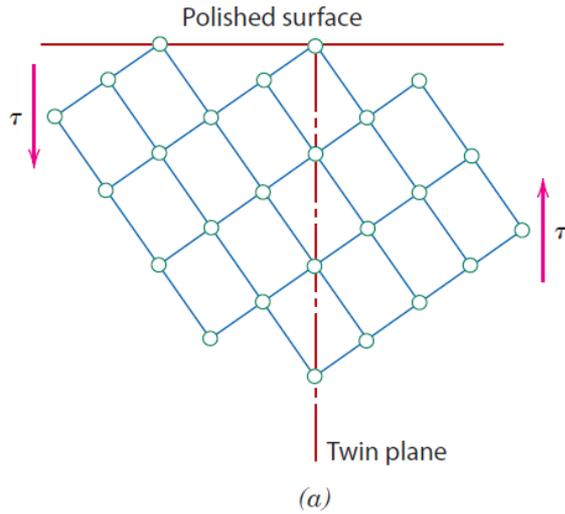
Placas de martensita em aço experimental com C = 0,1%; Ni = 30%. Observa-se o *midrib* linha central associada, na teoria, à nucleação da martensita. Fotografia de J.R.C. Guimarães, Cortesia de H. -J. Kestenbach, UFSCar, Brasil.

**“Midribs”- Micro-maclas:  
associadas à “nucleação” da  
martensita.  
Martensita Maclada**

(Colpaert)



# DEFORMAÇÃO POR MACLAÇÃO



(ADAPTADO DE :CALLISTER)



MACLAS MECÂNICAS

# TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

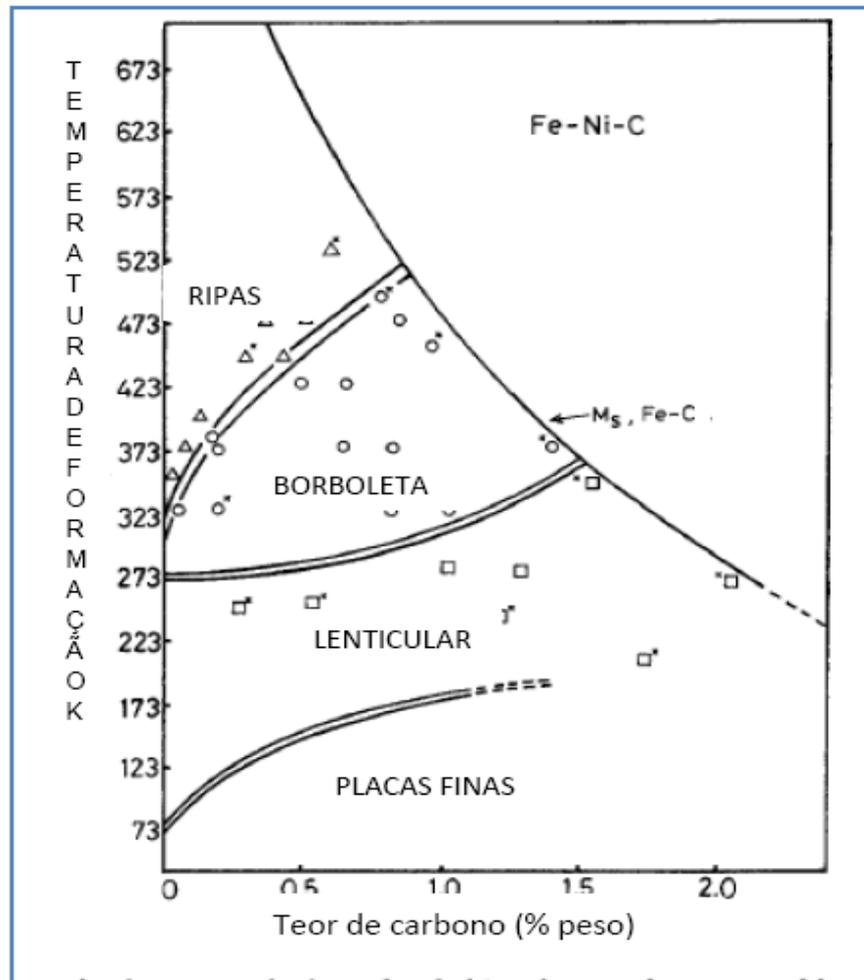


Figura 23 – Tipos de martensita em função do teor de carbono (UMEMOTO, YOSHITAKE, TAMURA, 1983).

## TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

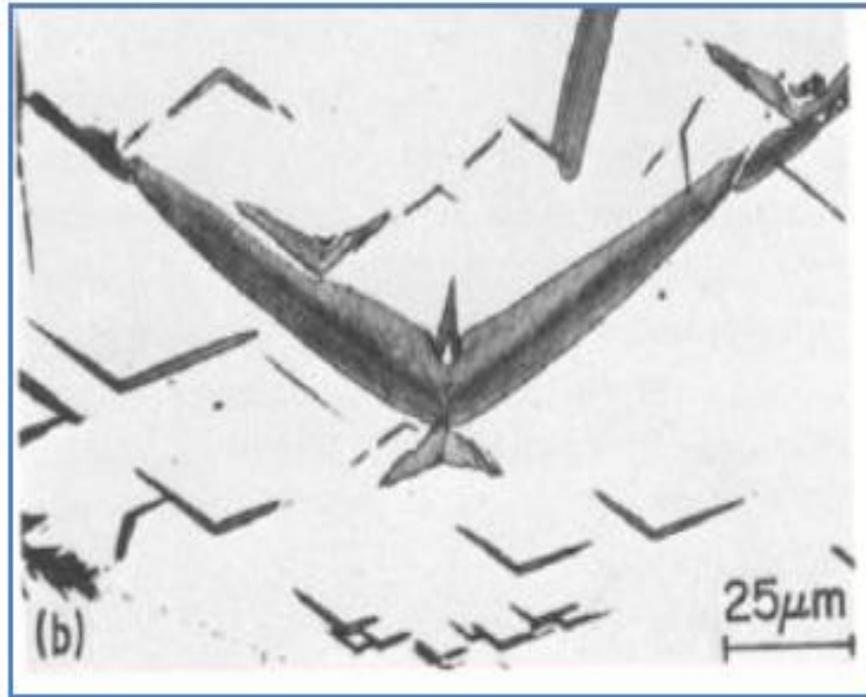
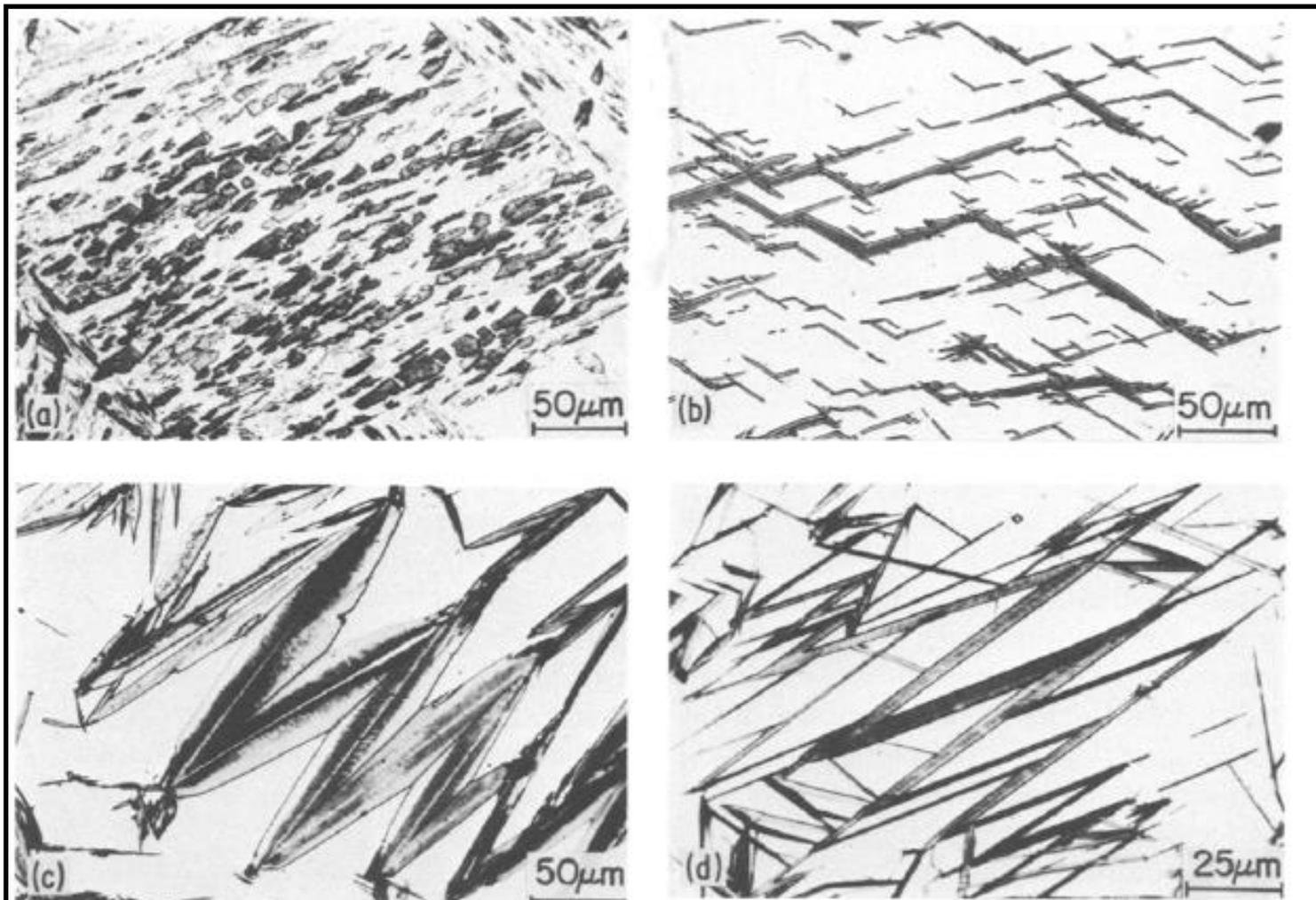


Figura 24 – Martensita em forma de borboleta para uma liga Fe-18Ni – 0,7Cr-0,50C resfriada a 263K (UMEMOTO, YOSHITAKE, TAMURA, 1983).

# TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA



*Figure 1* Optical micrographs showing different morphologies of martensites formed in Fe-Ni-C alloys. (a) Lath martensite in an Fe-15Ni-0.24C alloy. (b) Butterfly martensite in an Fe-20Ni-0.73C alloy. (c) Lenticular martensite in an Fe-31Ni-0.23C. (d) Thin plate martensite in an Fe-31Ni-0.29C.

# TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA



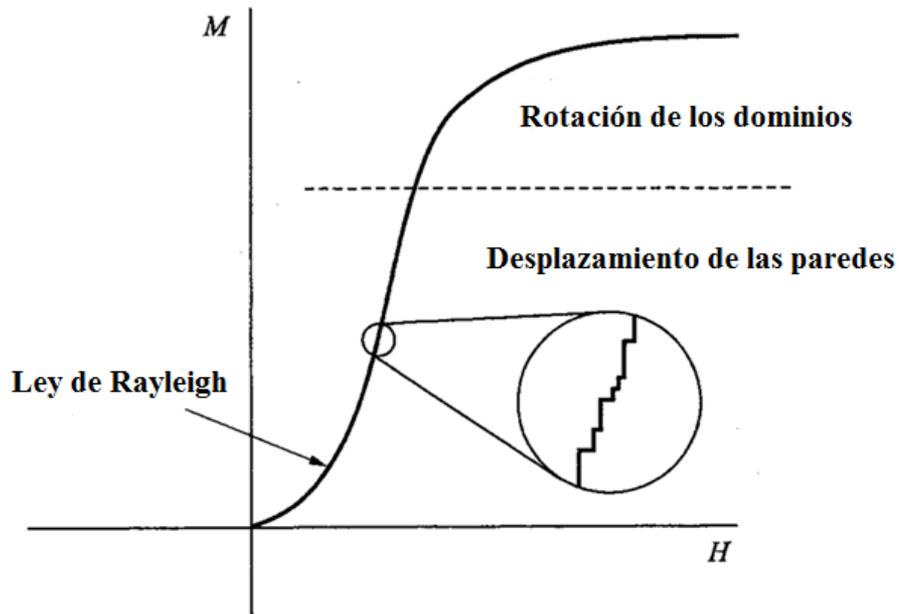
**Fig. 5.11** Fe-1.8C-3Mn-2Si. Lenticular martensite illustrating the burst phenomenon. Optical micrograph,  $\times 300$ .

# TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

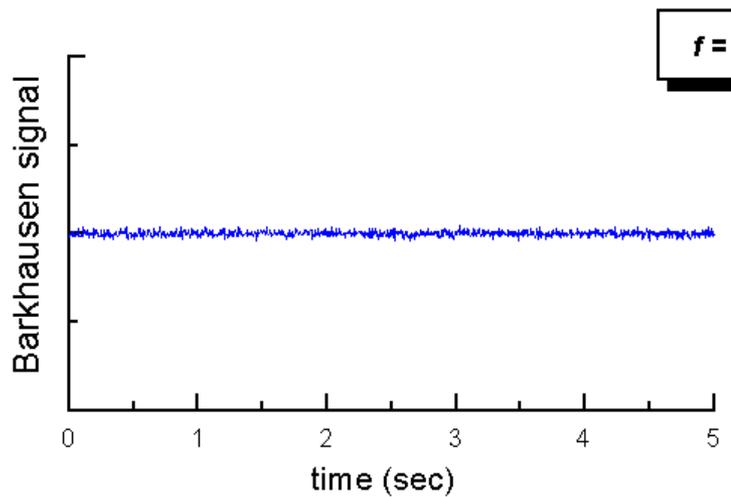
## DETECÇÃO DA NUCLEAÇÃO DA MARTENSITA:

- **DILATAÇÃO;**
- **EMISSÃO ACÚSTICA;**
- **EMISSÃO MAGNÉTICA (EMISSÃO DE BARKHAUSEN);**
- **LIGAS DE ALTO Ni – “OUVE-SE” RUIDO: “BURST”.**

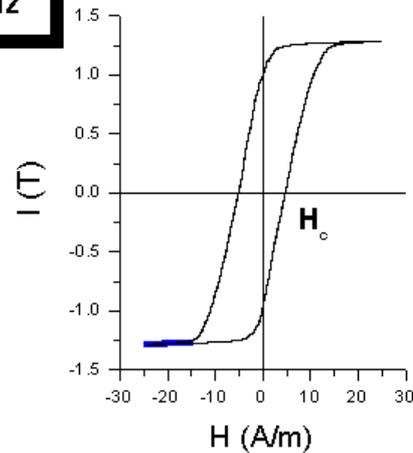
# Ruido Magnético de Barkhausen

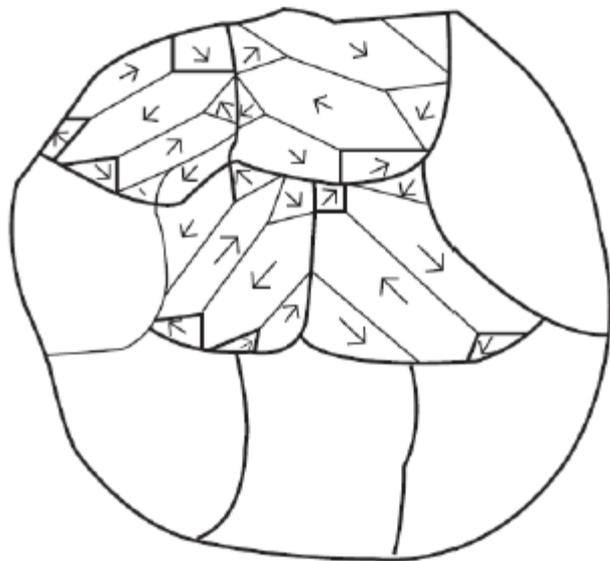
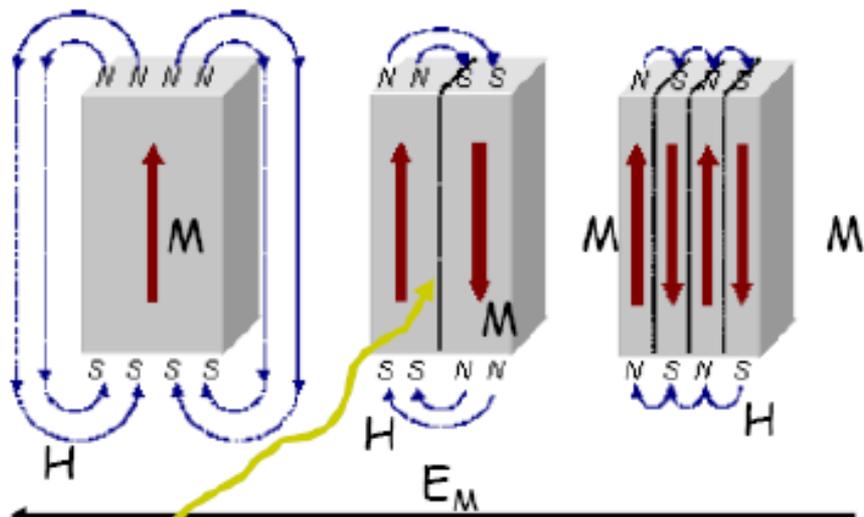


Heinrich Georg Barkhausen  
(1881-1956)

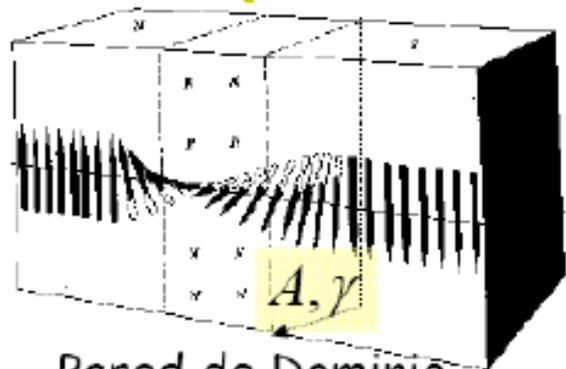


$f = 20 \text{ mHz}$



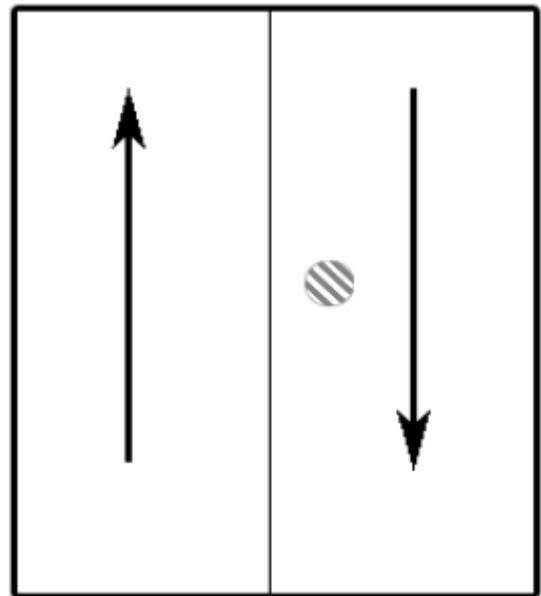


número de dominios (n)



Pared de Dominio (Bloch)

$$E_w \approx nA\gamma$$



H

# **TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA**

## **ALTA RESISTÊNCIA DA MARTENSITA:**

- **SOLUÇÃO SÓLIDA SUBSTITUCIONAL E INTERSTICIAL;**
- **ENCRUAMENTO DURANTE A TRANSFORMAÇÃO-LINHAS DE DISCORDÂNCIA;**
- **MACLAS;**
- **TAMANHO DE GRÃO FINO – PACOTES DE MARTENSITA FINO;**
- **SEGREGAÇÃO DE ÁTOMOS DE CARBONO (CLUSTERS);**
- **PRECIPITAÇÃO DE CARBONETOS.**

# TÊMPERA E REVENIMENTO

## TÊMPERA

## MARTÊMPERA

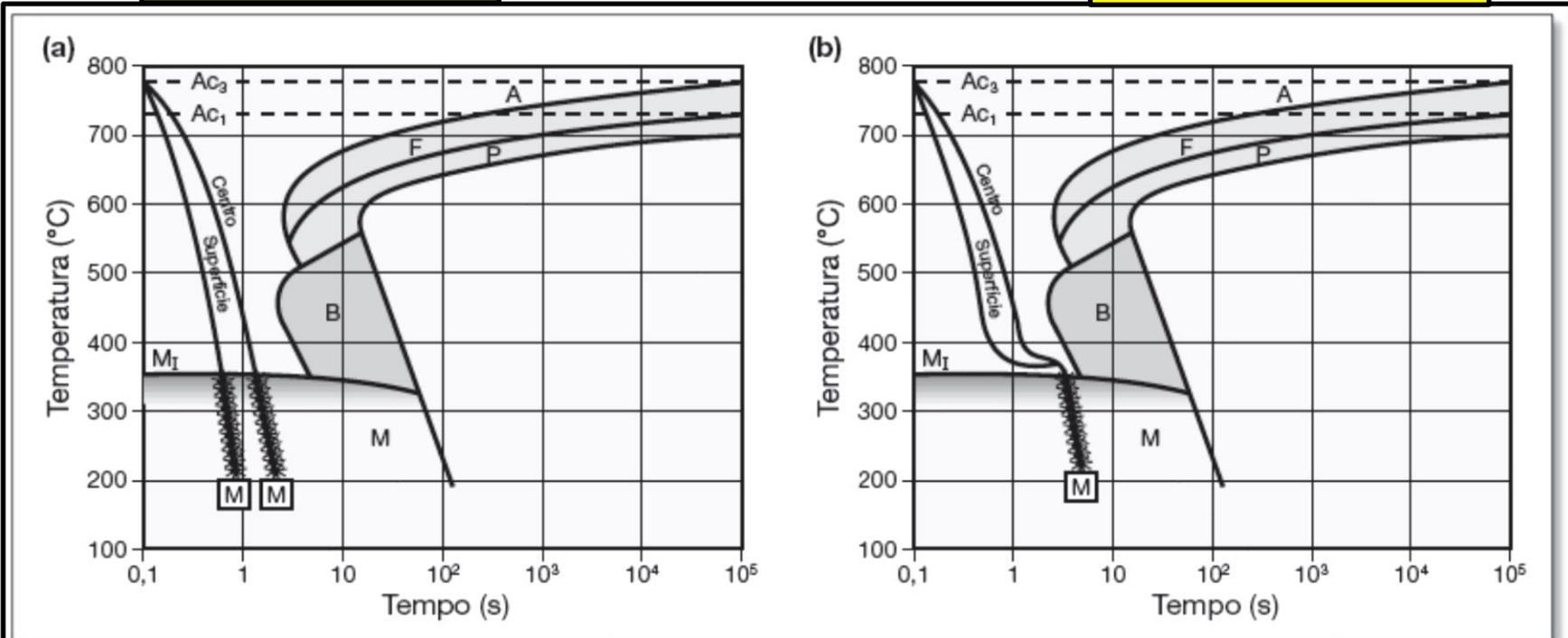
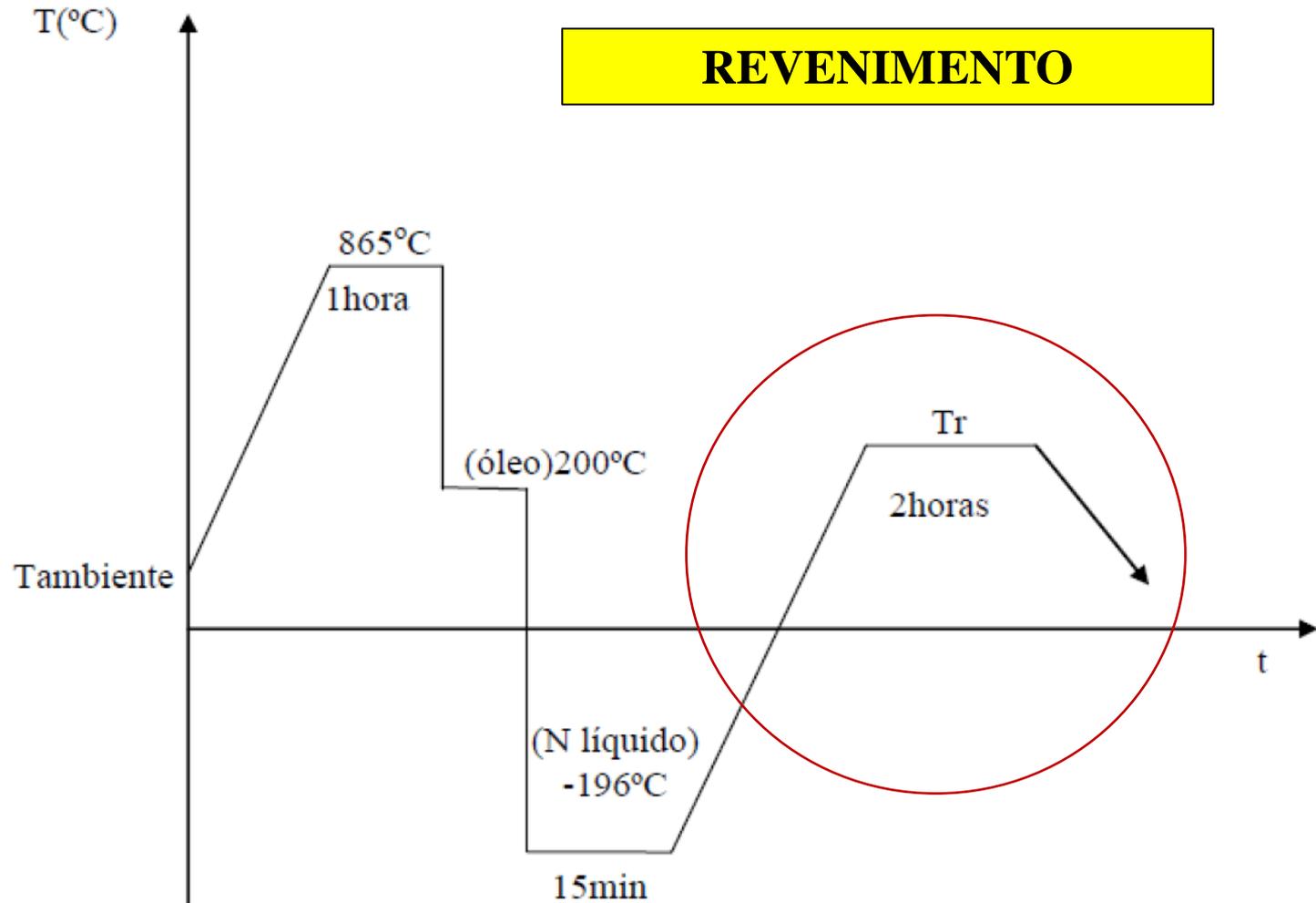


Figura 10.79

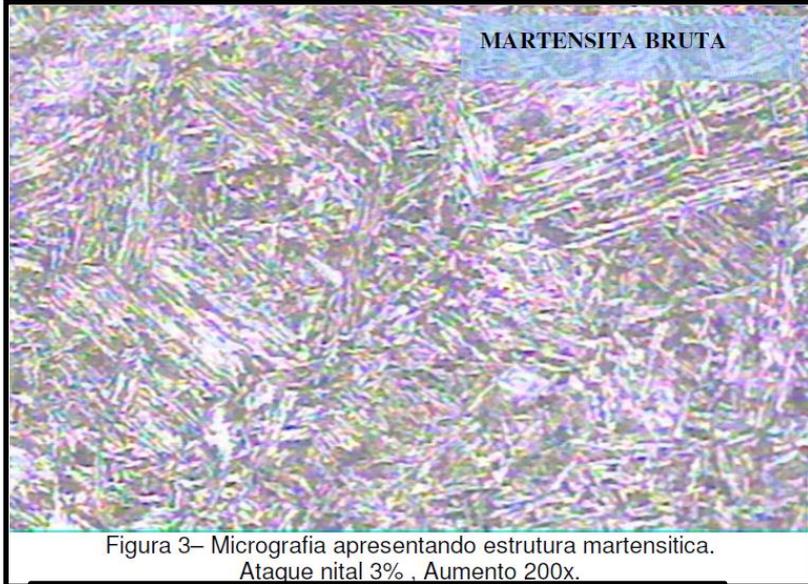
Em uma têmpera (a), a superfície e o núcleo da peça atingem a temperatura  $M_T$  em momentos diferentes, aumentando as tensões de têmpera. Na martêmpera (b), um breve tratamento isotérmico intermediário permite homogeneizar a temperatura da peça antes de atingir a temperatura  $M_T$ , reduzindo sensivelmente as tensões de têmpera.

(Colpaert)

# REVENIMENTO



# MARTENSITA REVENIDA

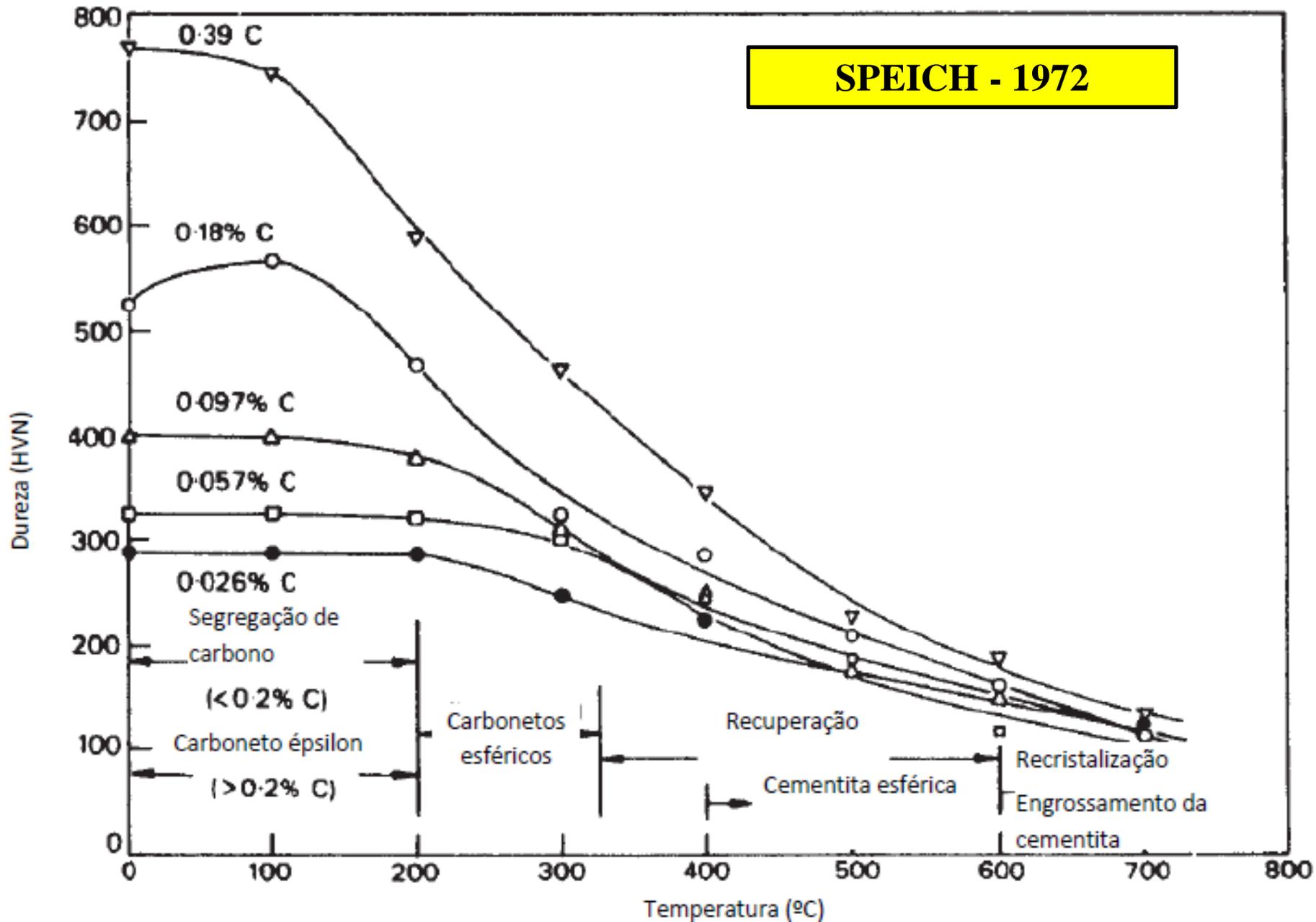


# MARTENSITA REVENIDA



# MARTENSITA BRUTA

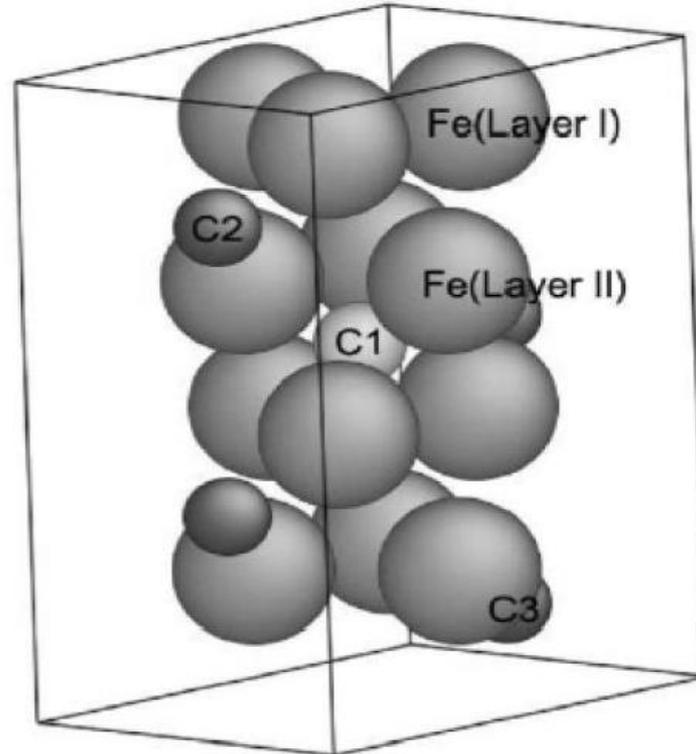
**SPEICH - 1972**

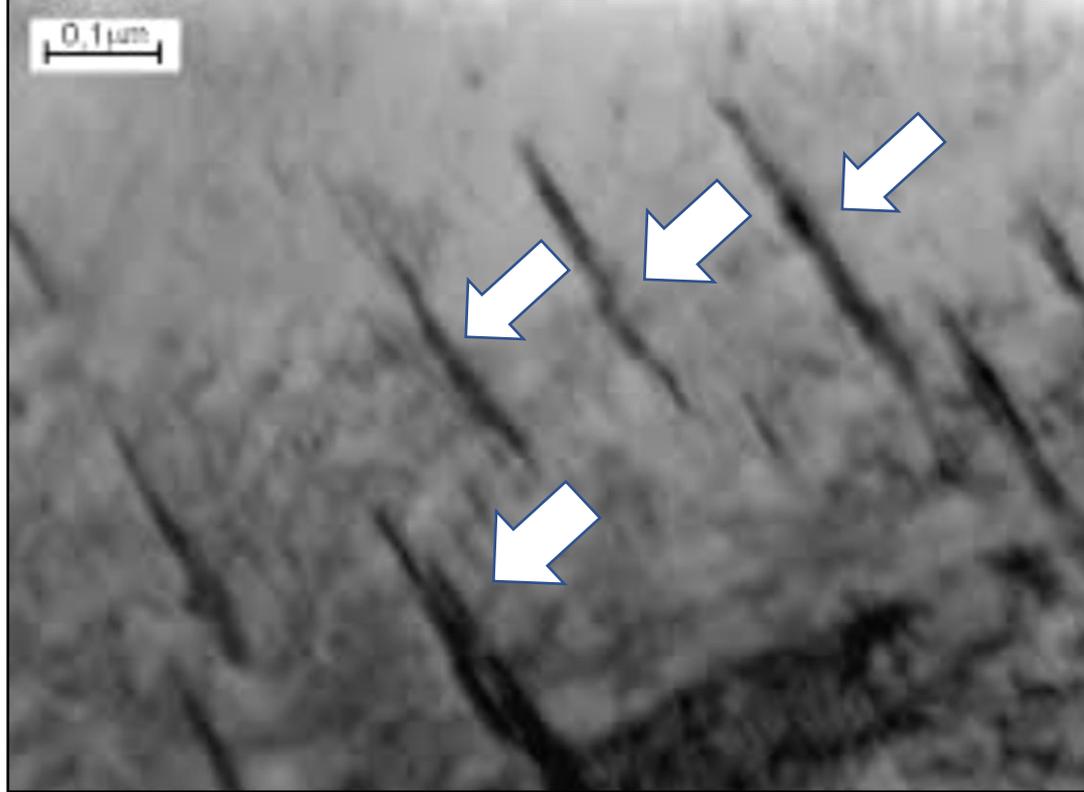


## ESTÁGIOS DO REVENIMENTO

- Ta - 200°C → precipitação do carboneto  $\epsilon$  ( $\text{Fe}_{2,4}\text{C}$ ) na martensita e perda da tetragonalidade (Speich, 1972);
- perda da tetragonalidade a partir de 60°C (WINCHELL, 1980), 100°C (ZENER, 1946);
- 100°C e 300°C → decomposição da austenita retida em bainita;
- 400°C → transição do carboneto  $\epsilon$  para cementita;
- 250°C e 500°C → transição do carboneto  $\epsilon$  para cementita (MORRA et al, 2001).
- Padmanabhan e Wood (1984) → precipitação do carboneto  $\epsilon$  a partir da austenita, durante a transformação austenita-martensita.

O carboneto  $\epsilon$  (HC)  $\rightarrow$  precipita sob a forma de **ripas delgadas (discoides)** ou **bastonetes** nos planos paralelos às faces do cubo da matriz martensítica, com relação de orientação de Jack (1951) (HONEYCOMBE, 1982). O carboneto  $\epsilon$  é da ordem de grandeza de 20 - 50 nanômetros.



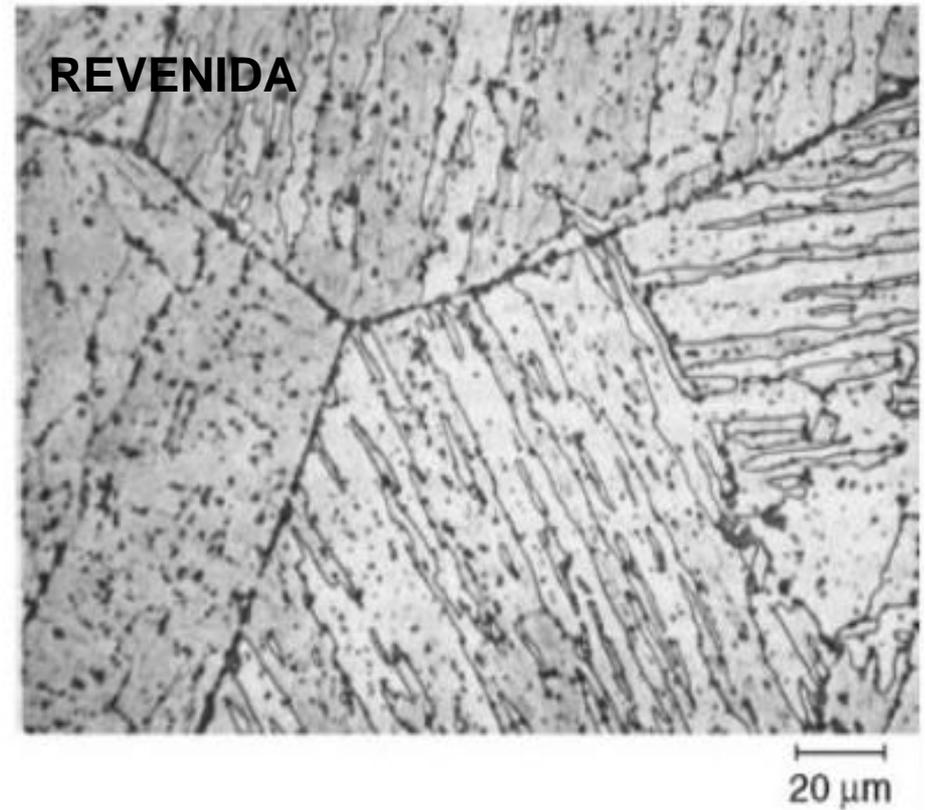
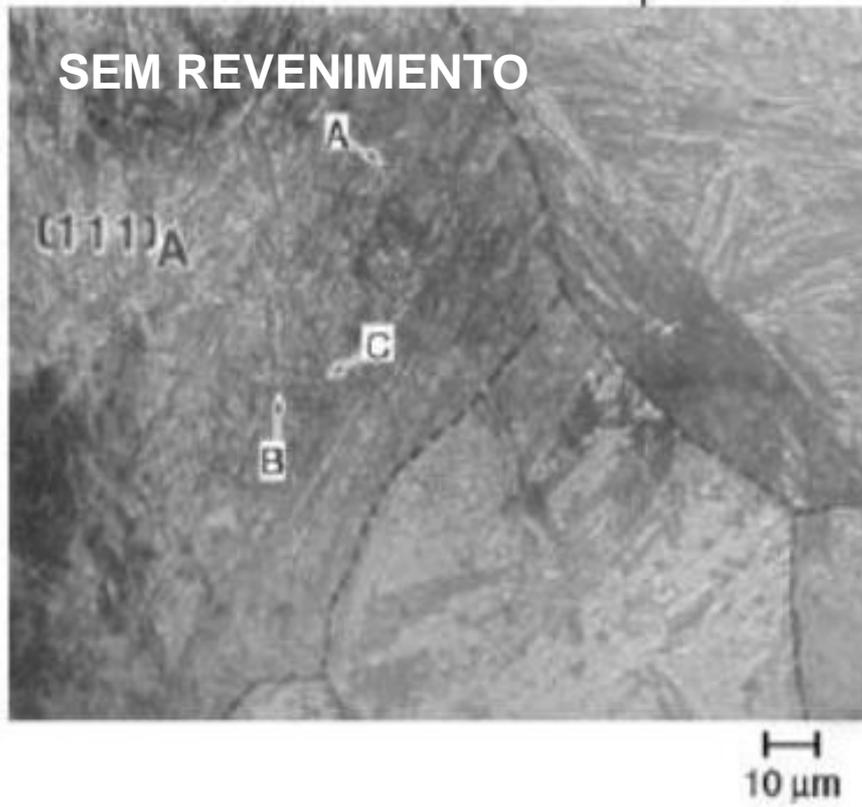


P. Bała, J. Pacyna, J. Krawczyk(2007): carbonetos  $\epsilon$  em forma de discos na martensita revenida em 280°C (MET).

**Descoberta do carboneto  $\epsilon$  em poeira cósmica** por Roy Christoffersen e Peter R. Buseck , por meio de análise microscopia eletrônica de transmissão. A teoria dos autores é que este carboneto foi sintetizado por aquecimento dos grãos de ferro ou níquel por fluxos de gás carbônico e hidrogênio (**Science, outubro de 1983**).

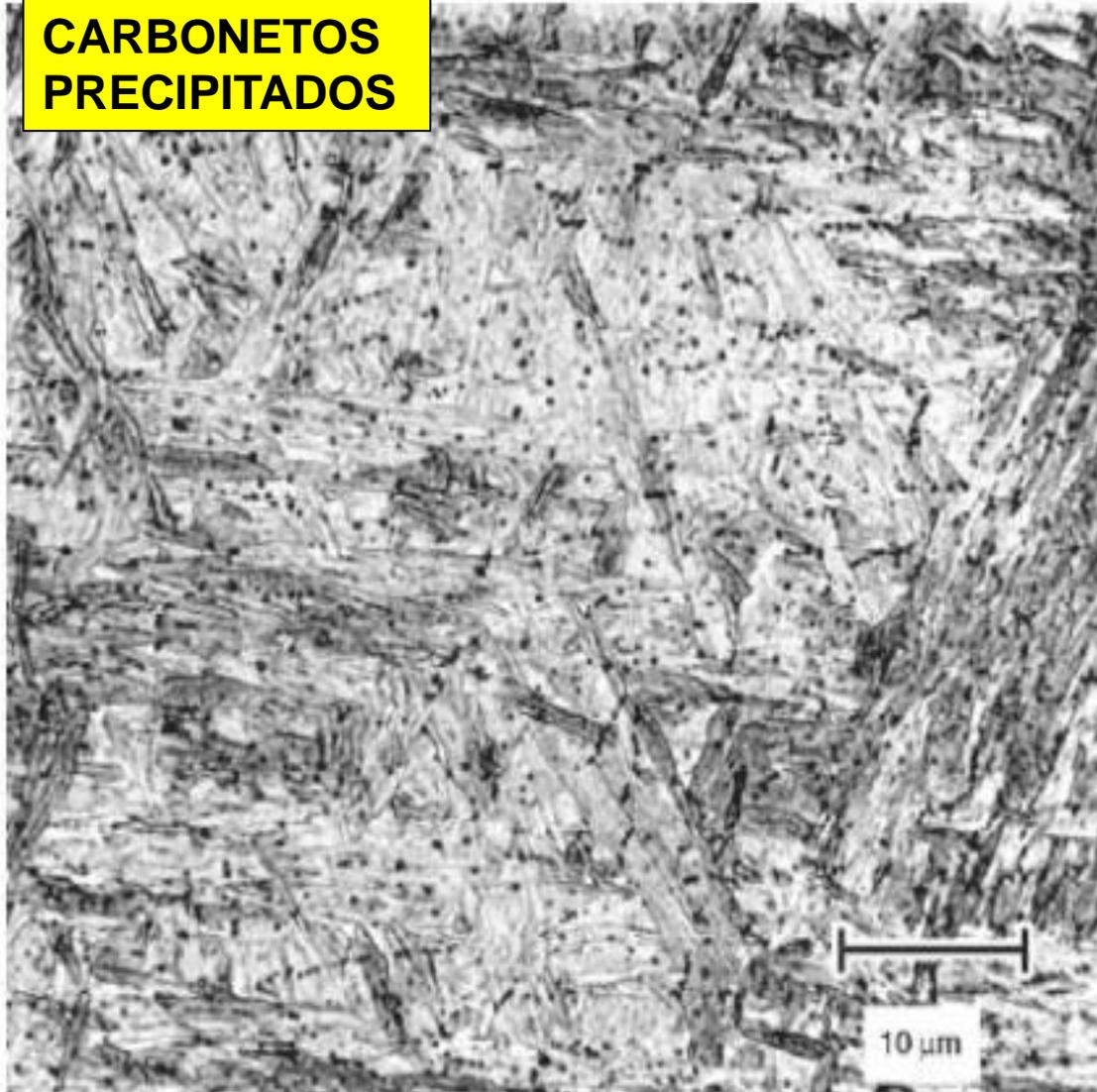
# Revenimento dos aços

Martensita em aço 0,2%C e após revenimento a 700°C por 2hs



# Martensita em aço 0,2%C e após revenimento a 550°C

**CARBONETOS  
PRECIPITADOS**



## AUSTENITA RETIDA E TRANSFORMAÇÕES NO REVENIMENTO

- Quando a **martensita perde a tetragonalidade durante o revenimento**, transforma-se em **martensita cúbica (ferrita saturada em carbono)**, com precipitação de **carbonetos**, o que **escurece a matriz**, uma vez que existem **áreas brancas** devido à **austenita retida**;
- Em aços com **alto teor de C, Cr (aços ferramenta)**, a **austenita** leva **muito tempo** para se **transformar (em bainita)** e muitas vezes **não ocorre**, mesmo após **1000h** de revenimento;
- Então, no **revenimento**, ocorre a **precipitação de C e elementos de liga**, na forma de **carbonetos**, **desestabilizando a austenita e possibilitando** sua transformação em **martensita não revenida** (menos dura);
- A **estrutura** será formada de **martensita revenida e martensita não revenida**, o que pode causar certa **fragilização**;
- Necessidade de **Duplo Revenimento**.

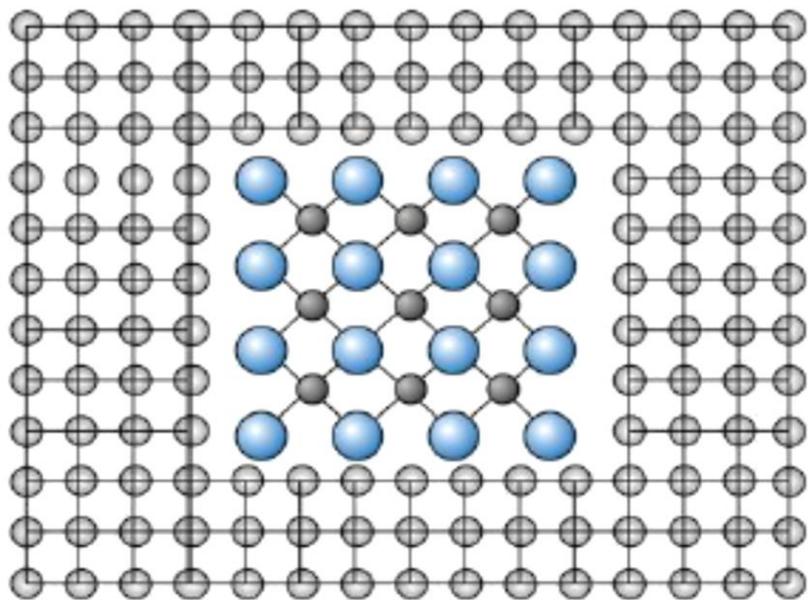
## 4º ESTÁGIO DO REVENIMENTO

- O **4º estágio** do revenimento ocorre para **aços** com elementos de liga que são **fortes formadores de carbonetos**, como o **Cr, Mo e V** no **aço H13** (aço ferramenta para trabalho a quente), por exemplo;
- Submetendo esses aços a revenimento **em torno de 500°C**, ocorre a **dissolução da cementita** e **precipitação** de uma **dispersão** de carbonetos de elementos de liga, geralmente **coerentes** com a matriz, levando a um **endurecimento secundário**.

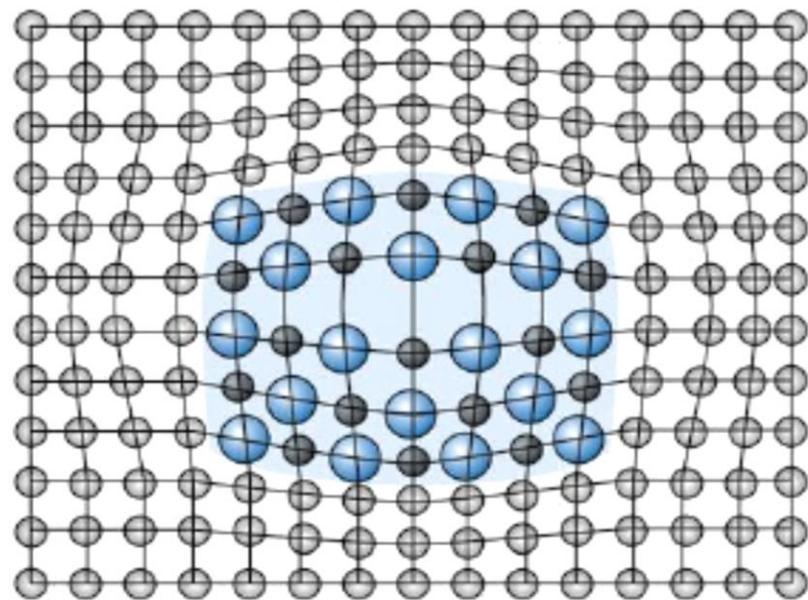
### Composição do aço H13

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0,40	1,00	0,35	5,20	1,50	0,90

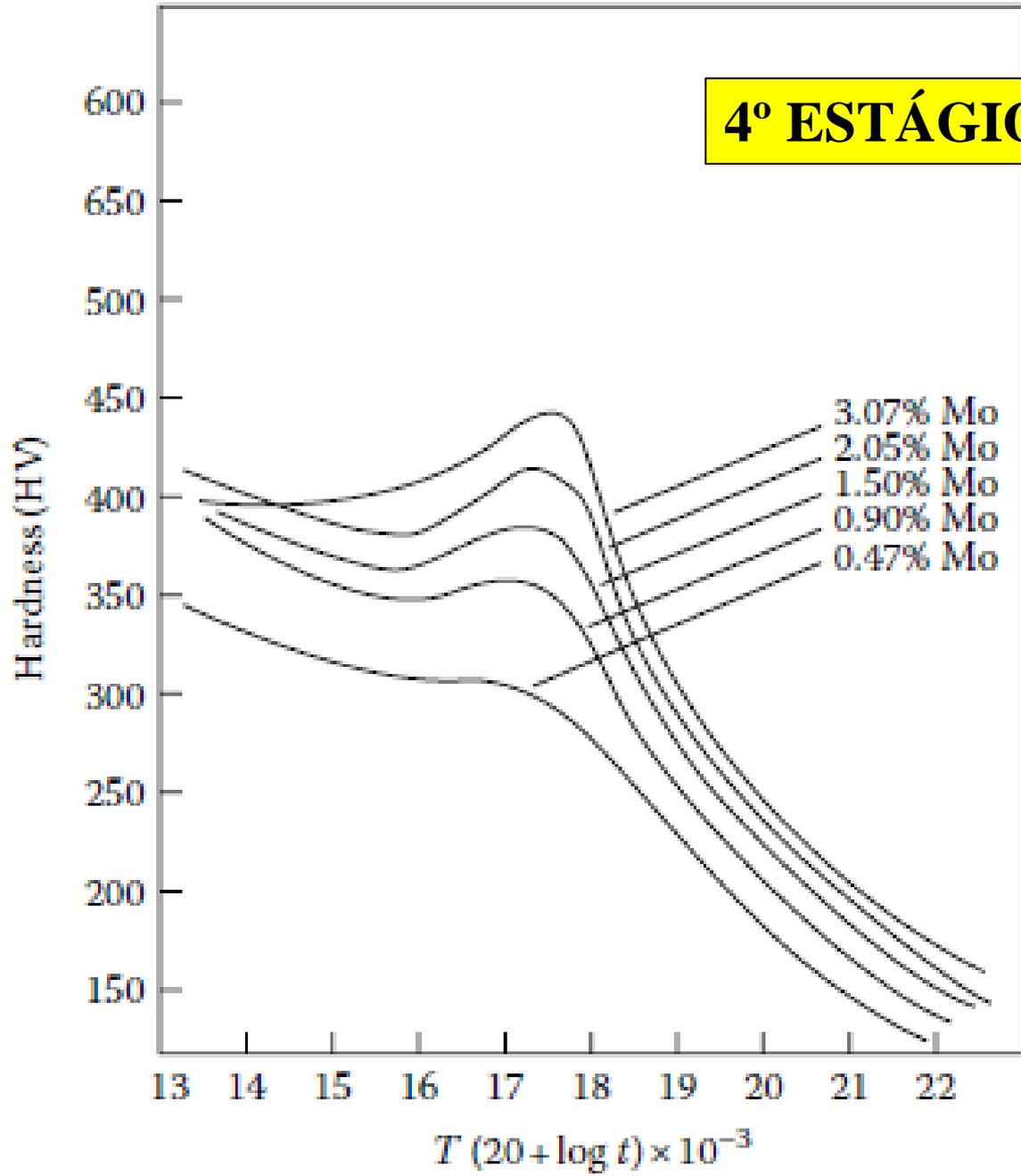
## INCOERENTES



## COERENTES

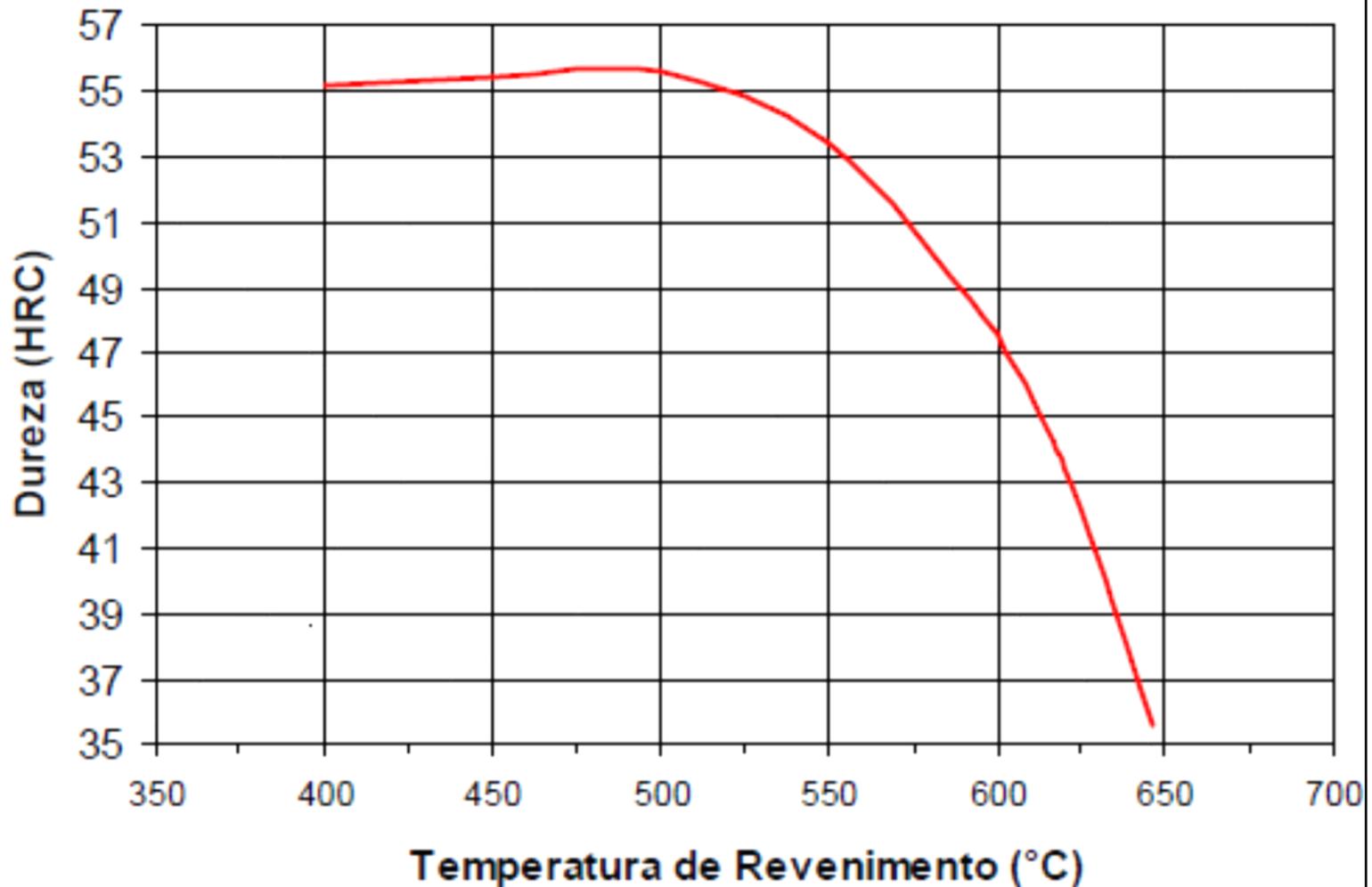


# 4º ESTÁGIO DO REVENIMENTO



*(Porter, Easterling, Sherif),*

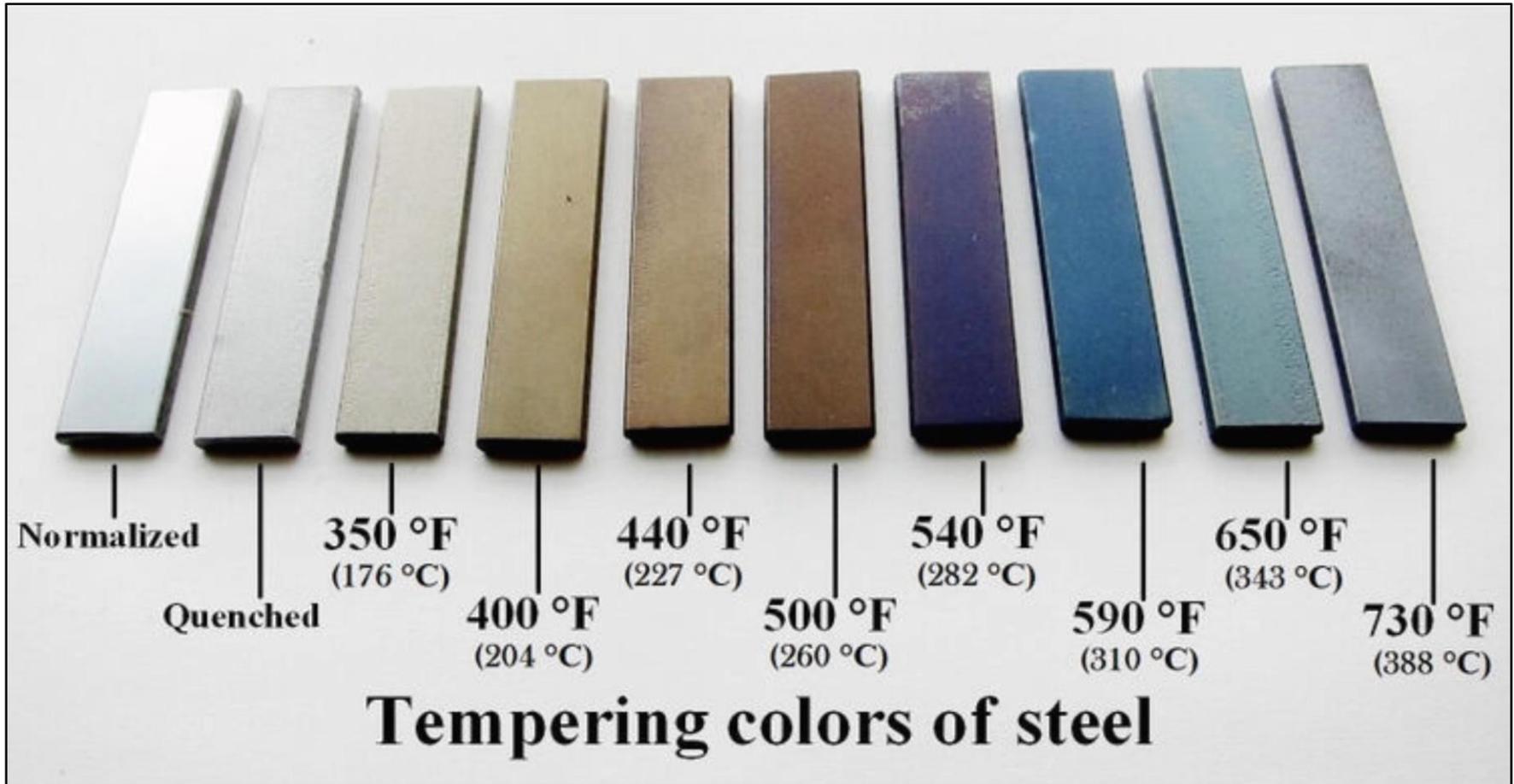
**Para aços baixa liga e aços carbono, ocorre uma redução da dureza após o revenimento.**



Curva obtida após tratamento térmico em corpos de prova de 20 x 20 mm<sup>2</sup>.

## CORES DO REVENIDO

Óxidos de diferentes cores são formados em diferentes temperaturas. As cores se devem à diferente decomposição da luz refletida, dependendo espessura da camada de óxido e da temperatura máxima atingida.



**FRAGILIZAÇÃO AO  
REVENIDO (REVERSÍVEL)**

**X**

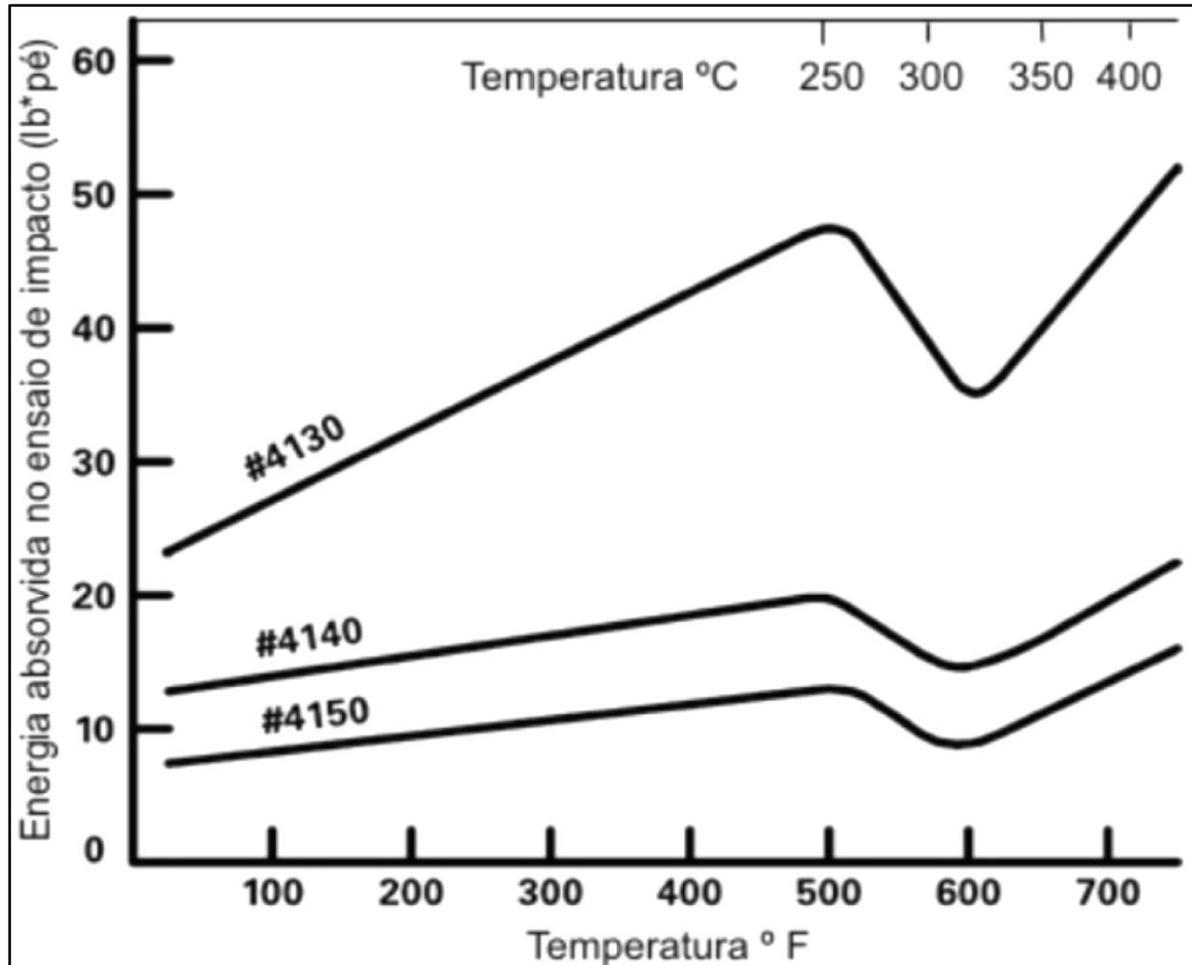
**FRAGILIZAÇÃO DA  
MARTENSITA REVENIDA**

**X**

**FRAGILIDADE EM AZUL**

# FRAGILIDADE EM AZUL

Envelhecimento dinâmico por deformação em temperaturas acima da ambiente: atmosferas de Cottrell/Efeito Portevin-Le Chatelier



**EXISTE UM ENSAIO PARA ANÁLISE DE  
MACROINCLUSÕES, BASEADO NESTE FENÔMENO:  
ENSAIO DE FRATURA AZUL.**

	<p>AÇO DETERMINAÇÃO DE MACROINCLUSÕES PELO MÉTODO DE FRATURA AZUL</p> <p>Método de ensaio</p>	<p>01.029 NBR 6346 FEV/1986</p>
--	---	---

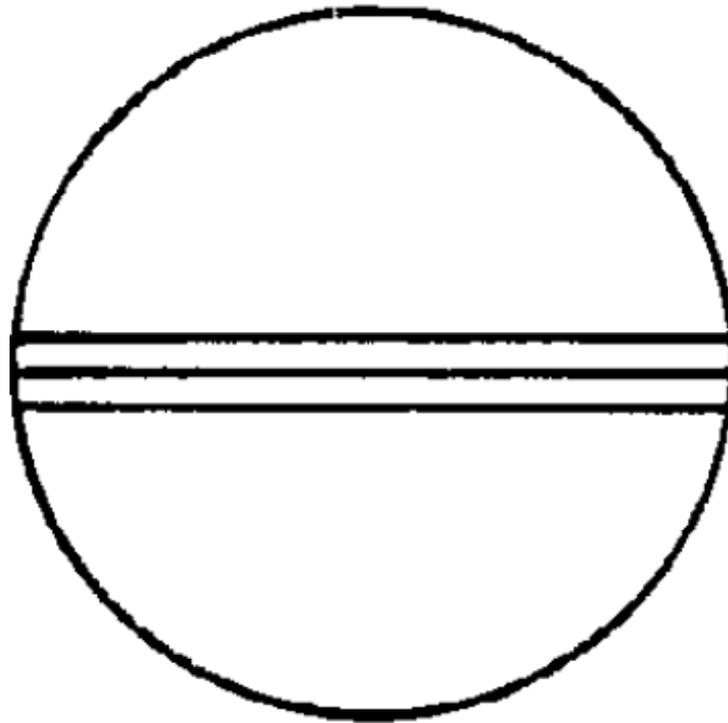
3 EXECUÇÃO DO ENSAIO

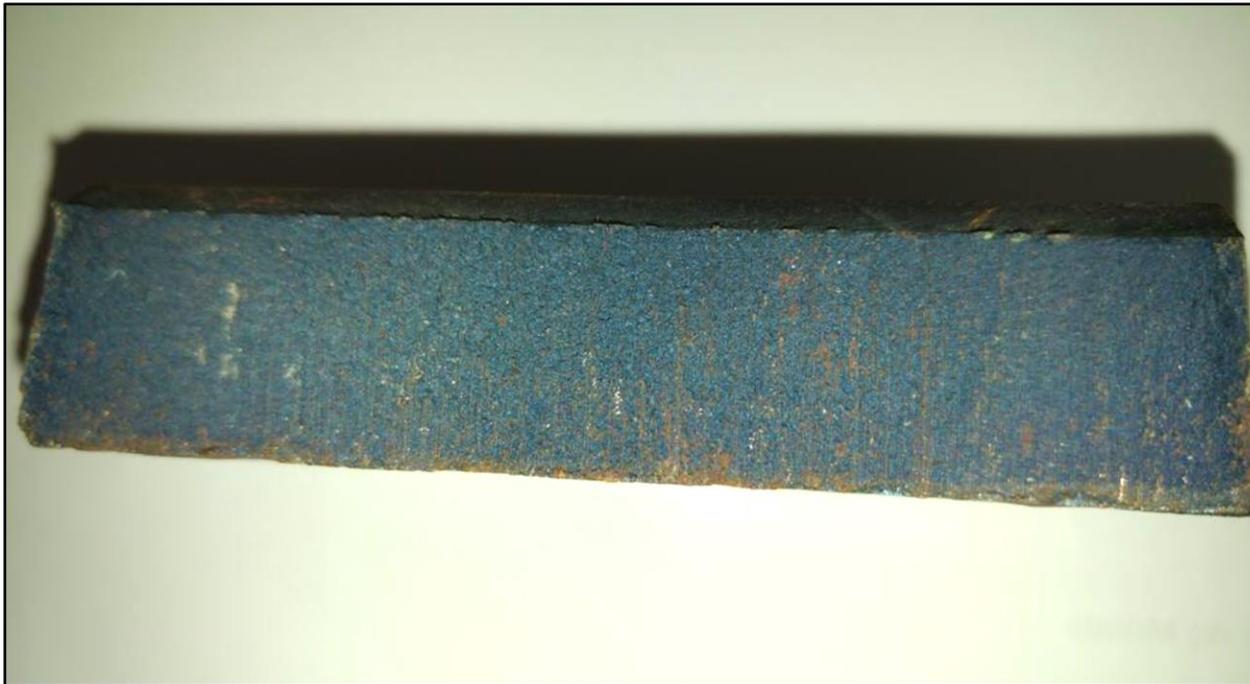
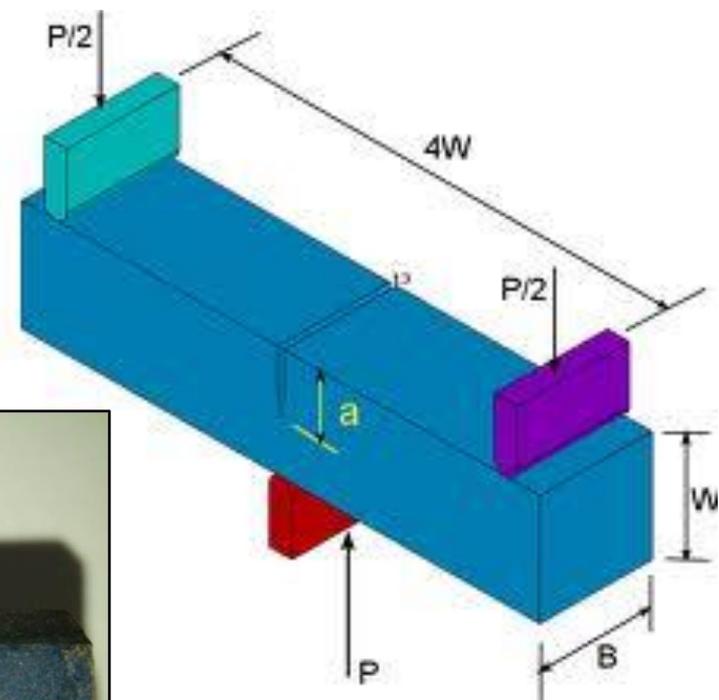
3.1 Amostragem

3.1.1 A amostragem deve ser feita aleatoriamente ou por ultra-som, sendo aquela constituída no mínimo de seis amostras retiradas de uma corrida e esta no mínimo de três amostras retiradas de regiões com maiores indicações de ultra-som.

CONCLUÍDA

**É feito um entalhe e o cp (fatia da barra) é colocada no forno em 300°C-350°C. Após retirada do forno: fratura em máquina universal de ensaios, por flexão em 3 pontos.**

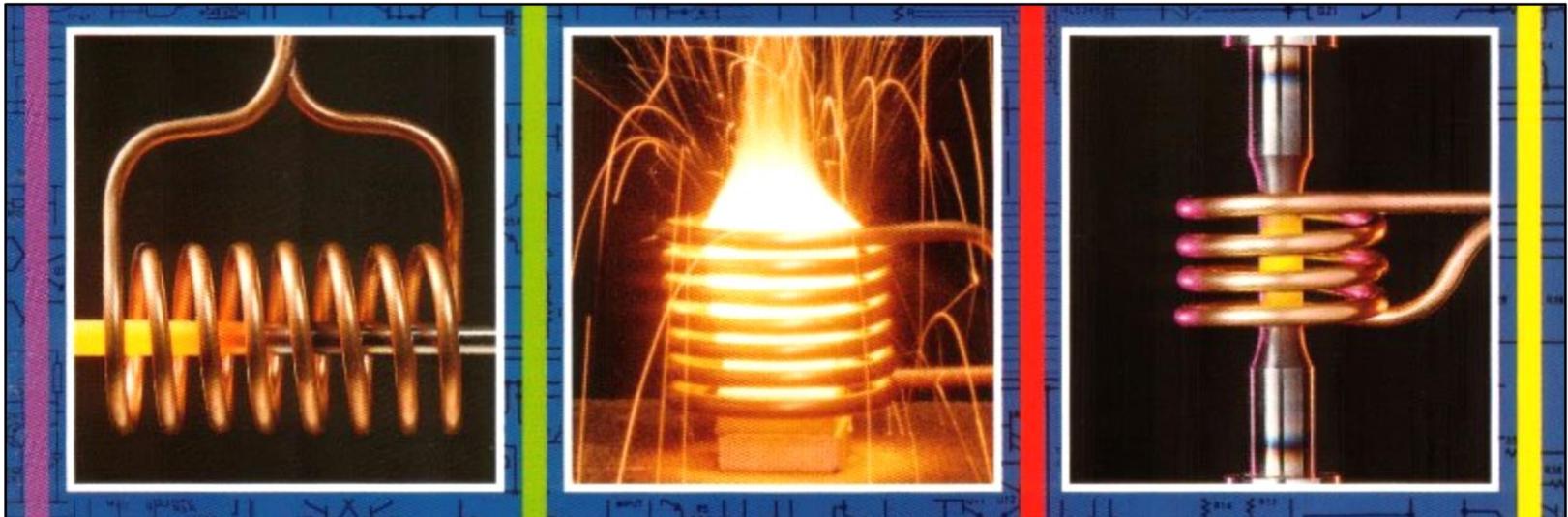




**ENTRE 300-350°C, O ÓXIDO FORMADO TEM A COLORAÇÃO AZUL E COMO AS INCLUSÕES NÃO OXIDAM (LIGAÇÃO FORTE), FICAM BRANCAS E SE DESTACAM .**

**Prof.Dr. Jose Benedito Marcomini**

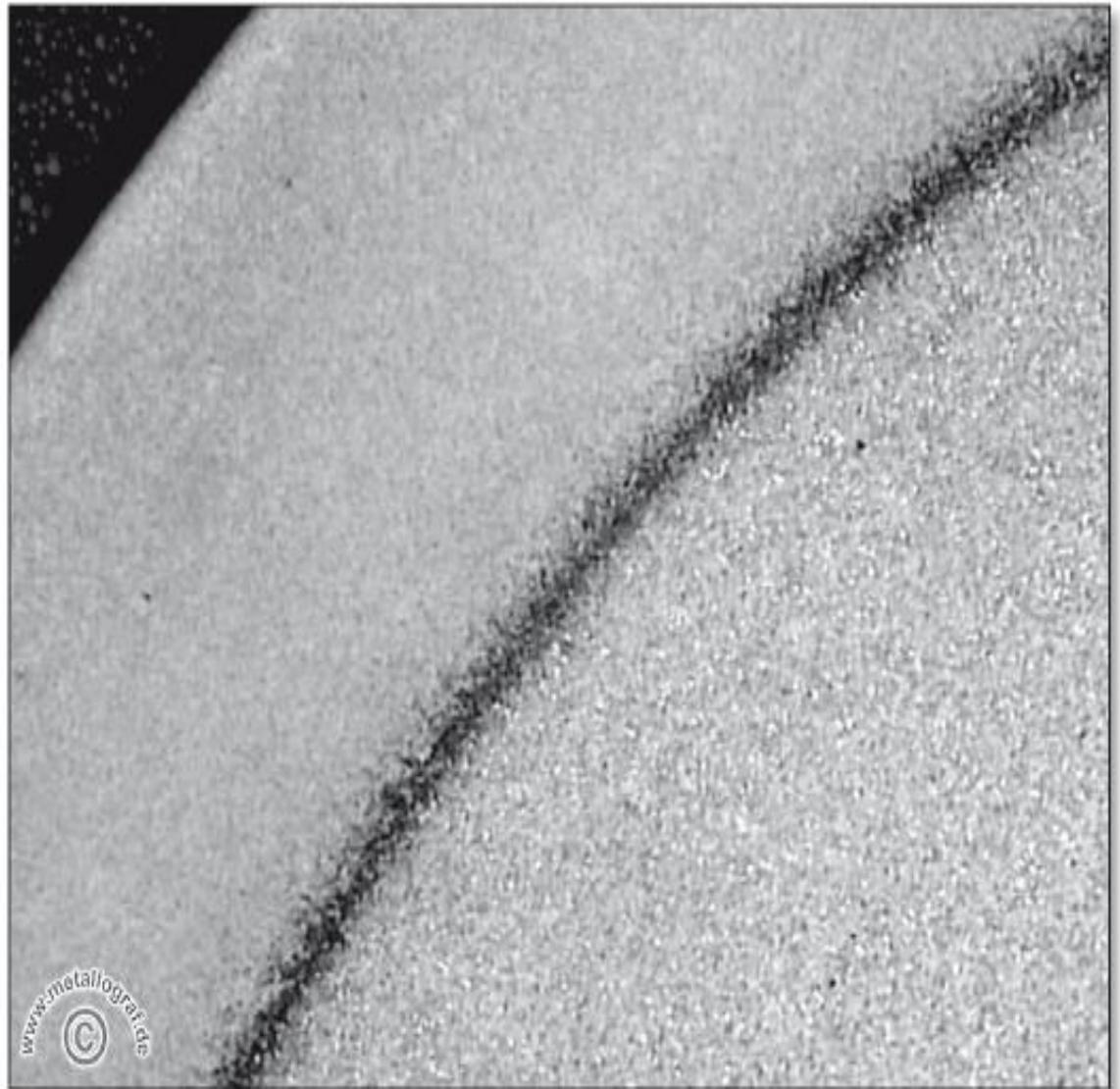
# TÊMPERA POR INDUÇÃO



# TÊMPERA SUPERFICIAL

**Figura 10.68**

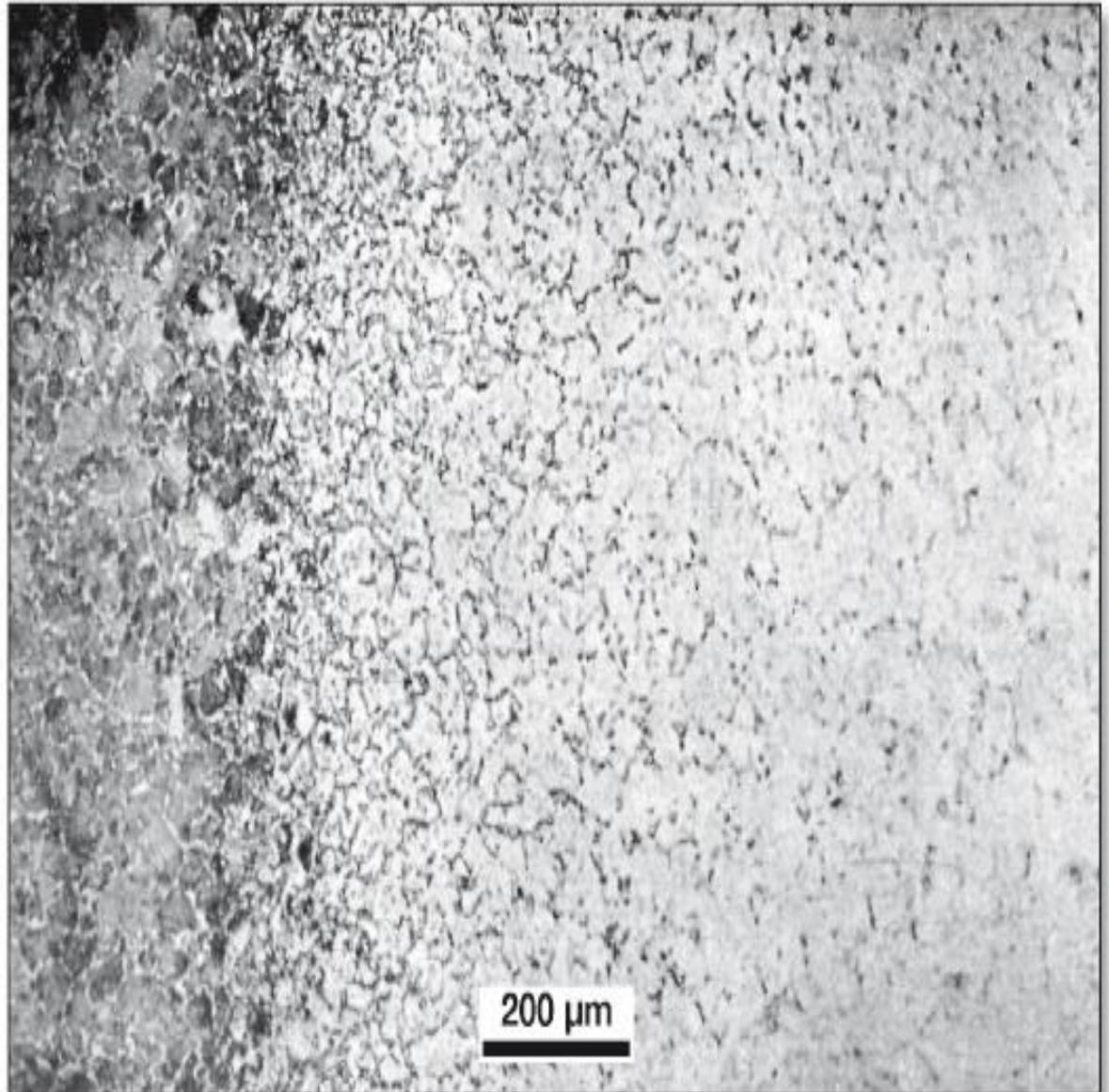
Peça de rolamento em aço 100Cr6 endurecida superficialmente por tratamento localizado. A camada endurecida tem 2,25 mm de espessura. O núcleo está esferoidizado. Ataque: Nital 3%. Cortesia D. Lober [22].



## TÊMPERA SUPERFICIAL

### Figura 10.72

Detalhe da camada temperada do pino da Figura 10.71. A região à direita da fotografia é a região próxima à superfície. Observa-se apenas martensita. À medida que se observa mais para o interior da peça, nota-se a presença de perlita e uma região intermediária onde a austenitização deve ter sido intercrítica.



**FIM**