

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.**

Tratamentos Térmicos

Recozimento Total ou Pleno

Tempera e Revenido

Recozimento Isotérmico

Normalização

Resfriamento Lento (dentro do forno)

Resfriamento ao ar

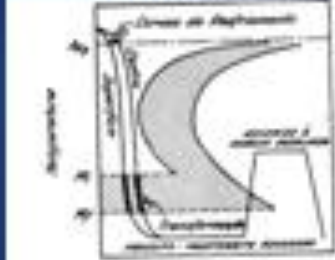


Fig. 46 -- Diagrama esboçado de transformação para tempera e revenido.

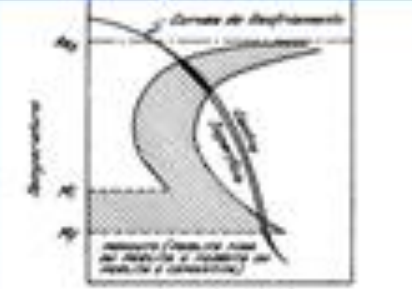
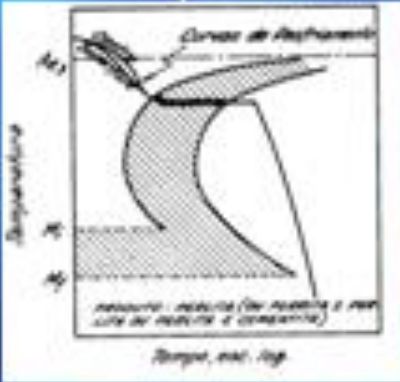


Fig. 47 -- Diagrama esboçado de transformação para normalização.

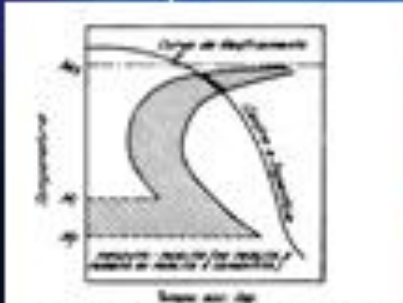


Fig. 44 -- Diagrama esboçado de transformação para recozimento pleno.

TÊMPERA E REVENIMENTO

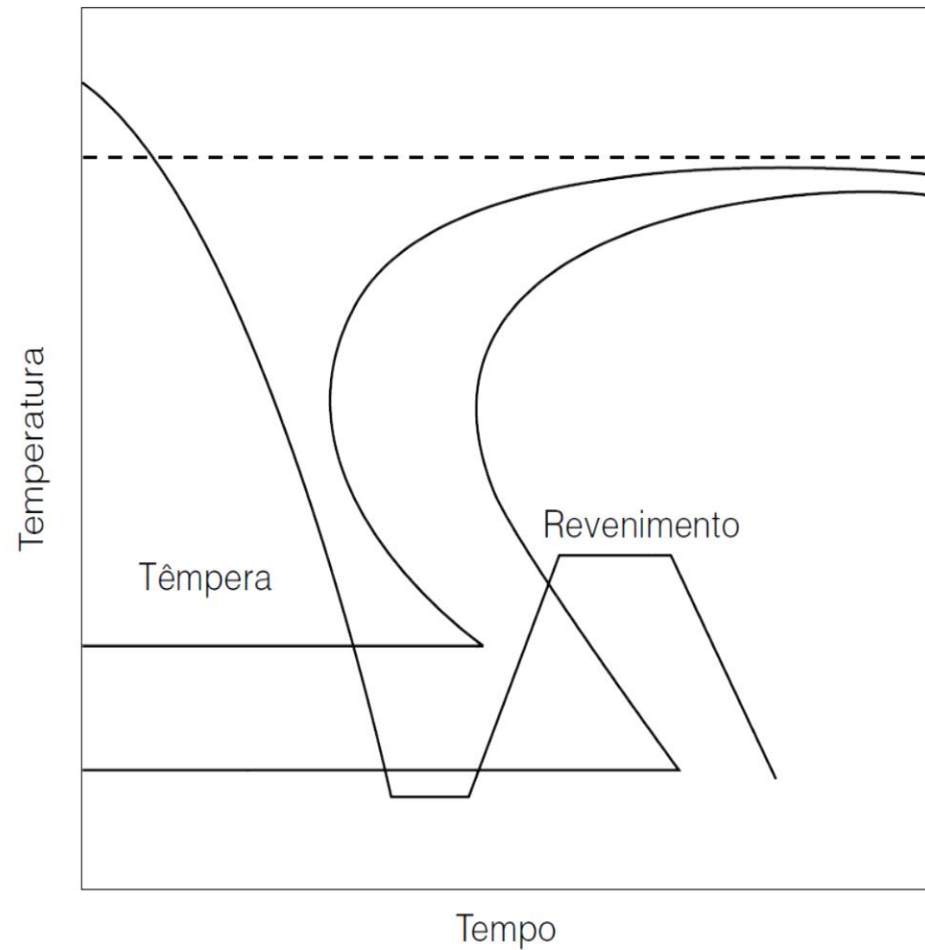
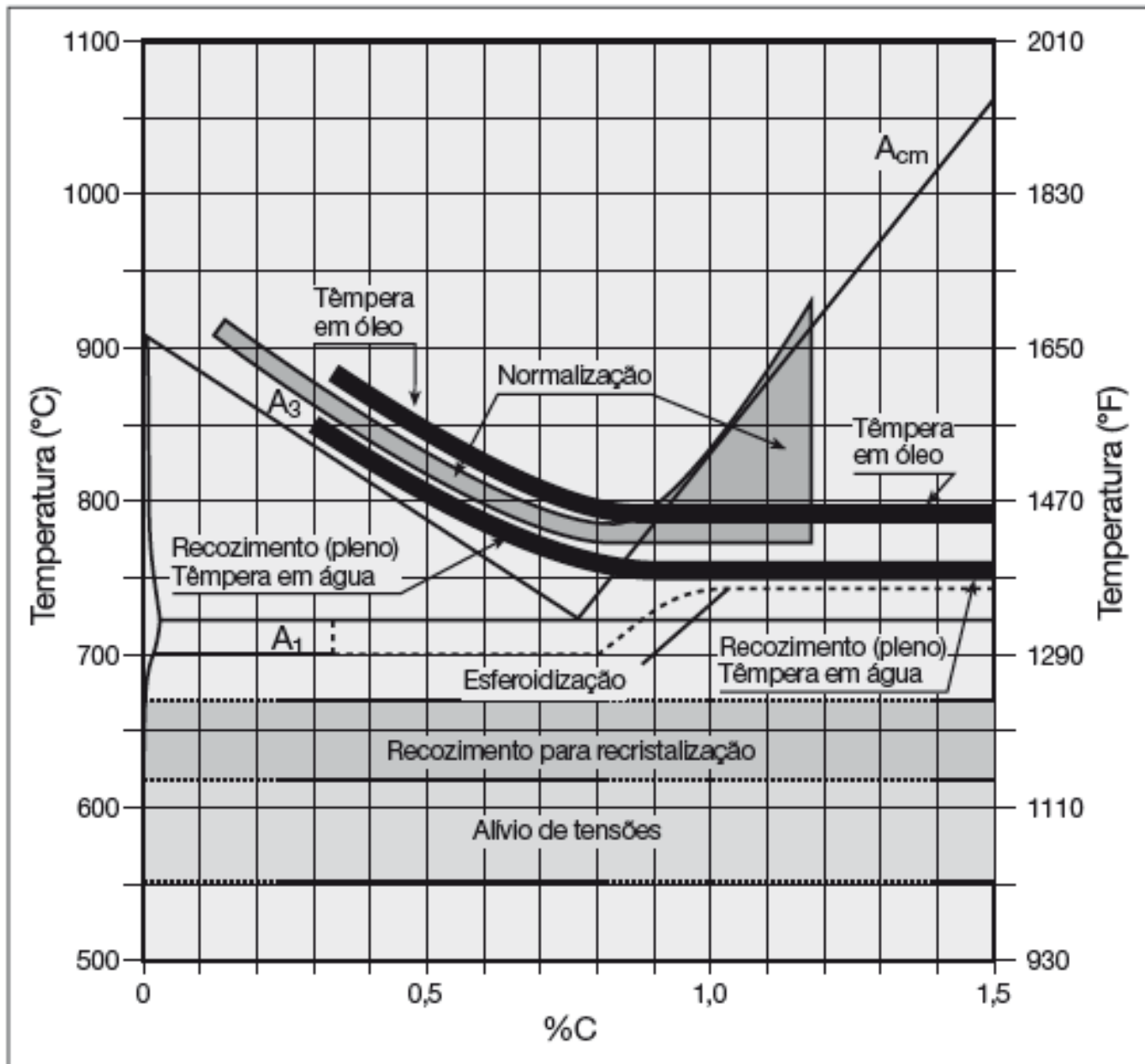


Figura 3.34 Ciclo de têmpera + revenimento.

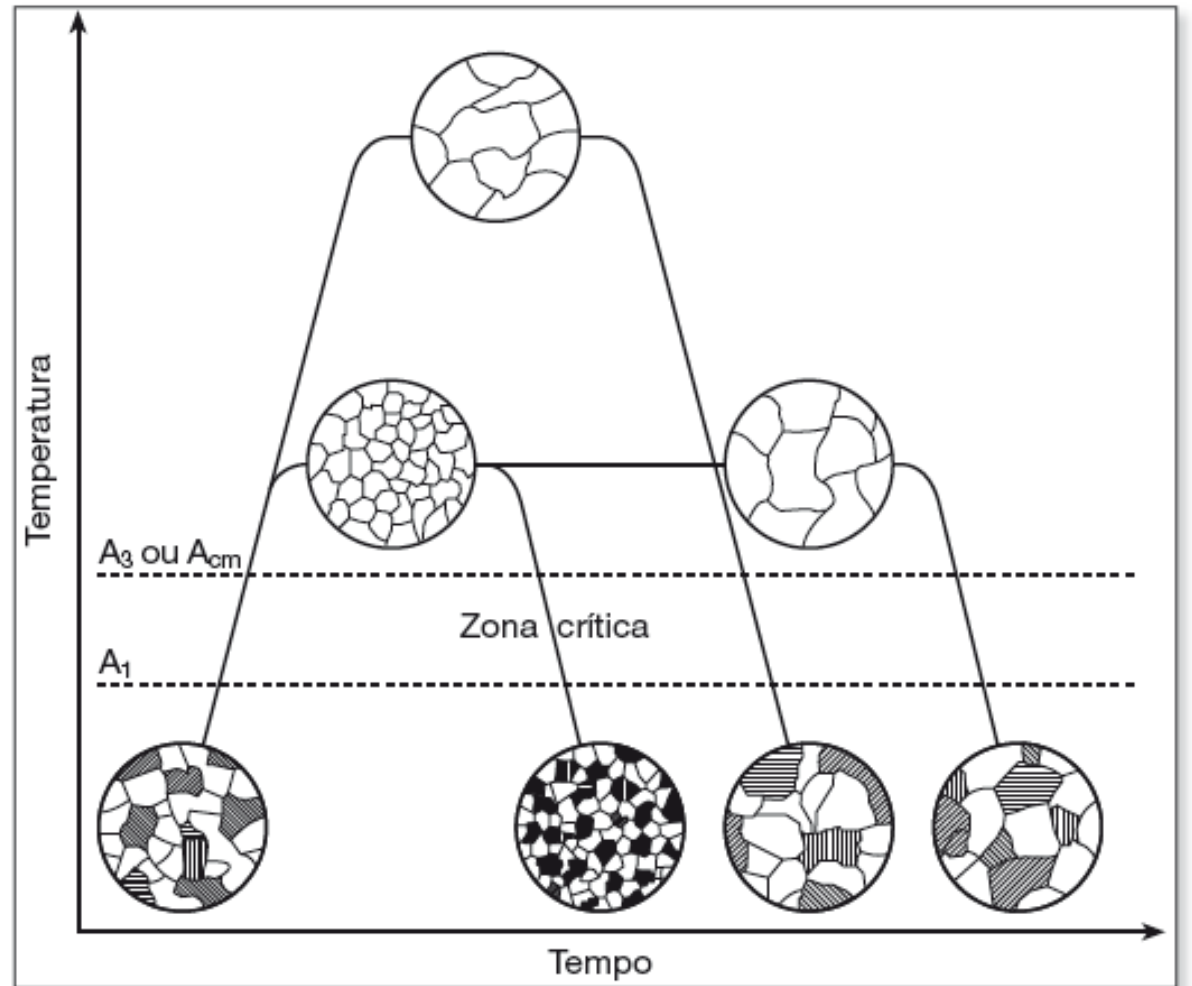
(Costa e Silva & Mei)



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

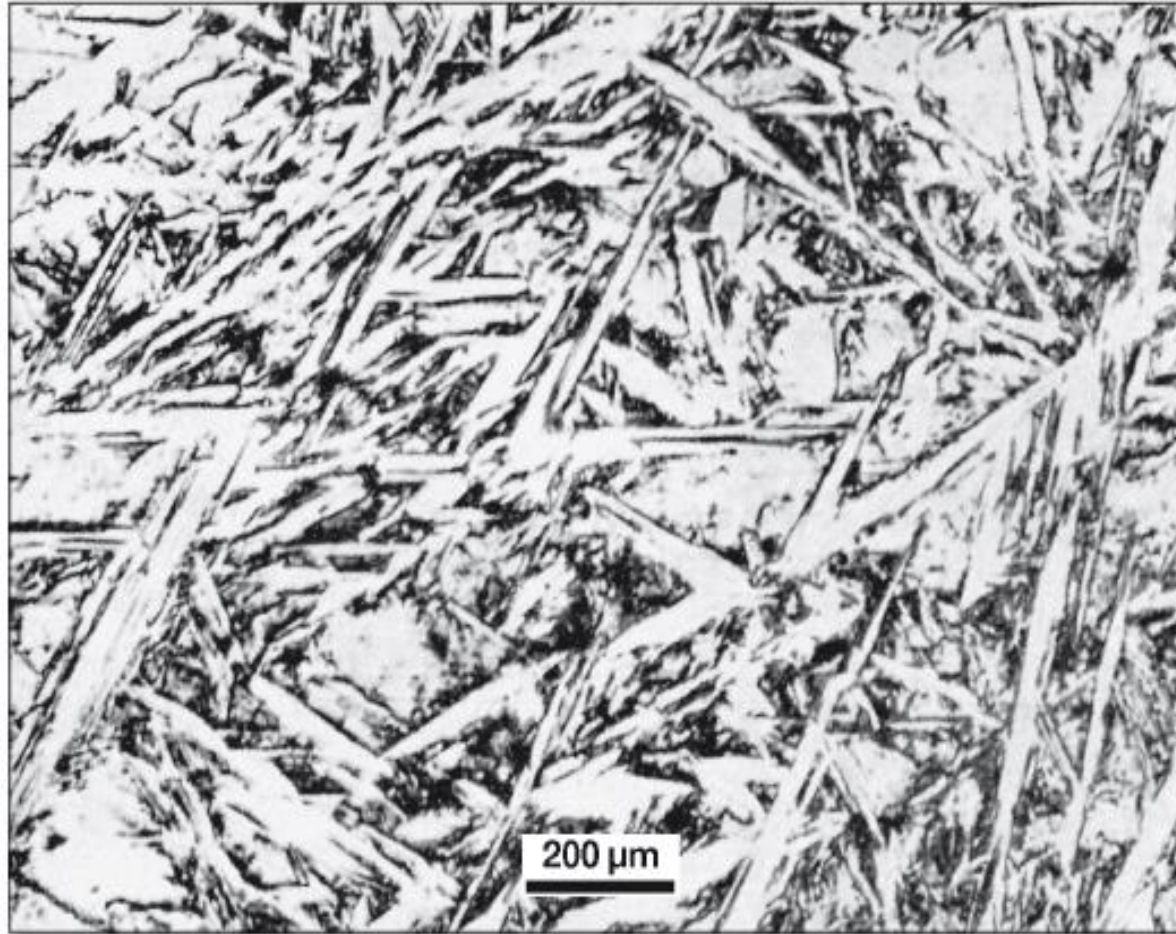


Figura 10.55

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

CRESCIMENTO EXCESSIVO DE GRÃO AUSTENÍTICO

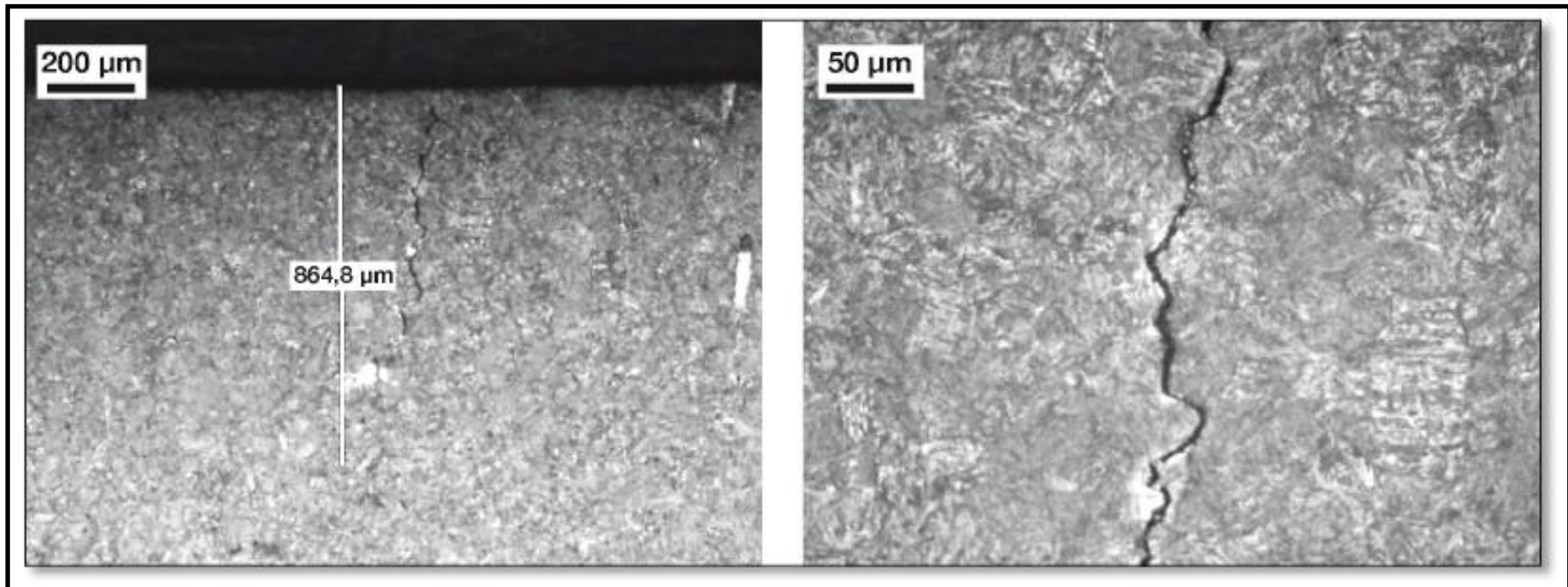


Figura 10.62

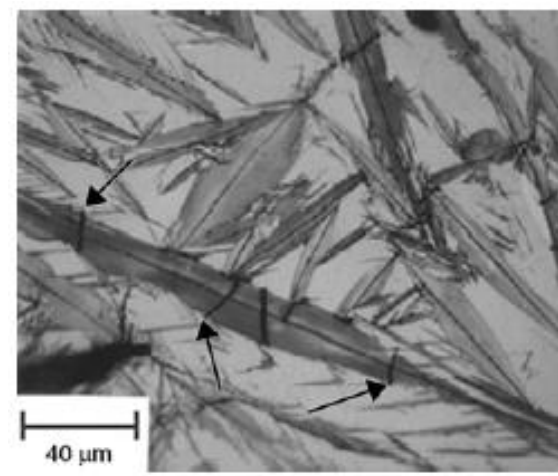
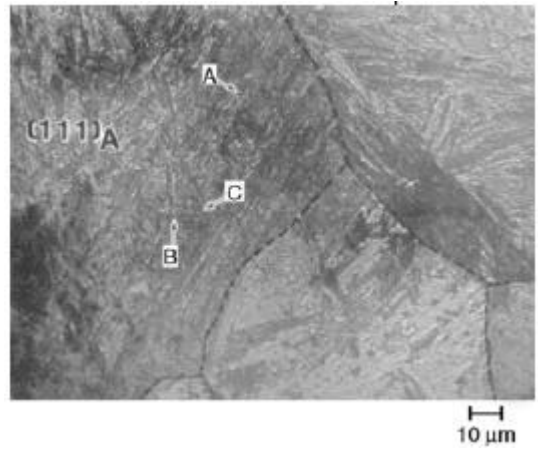
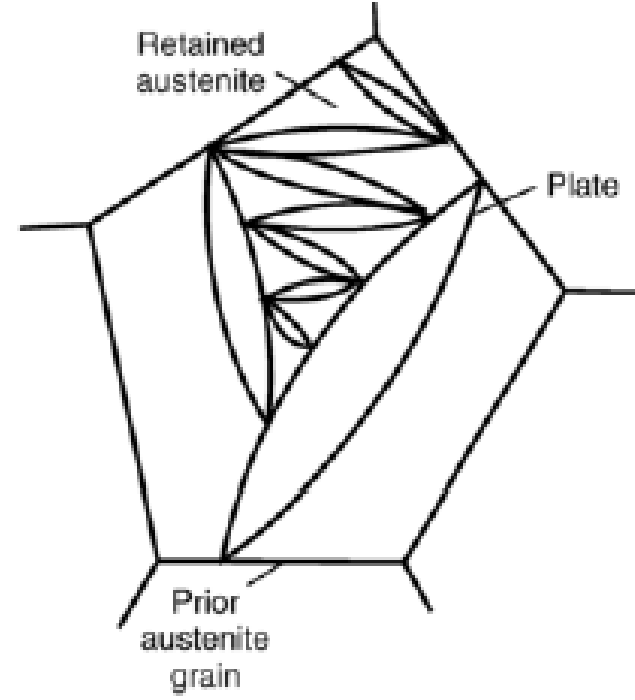
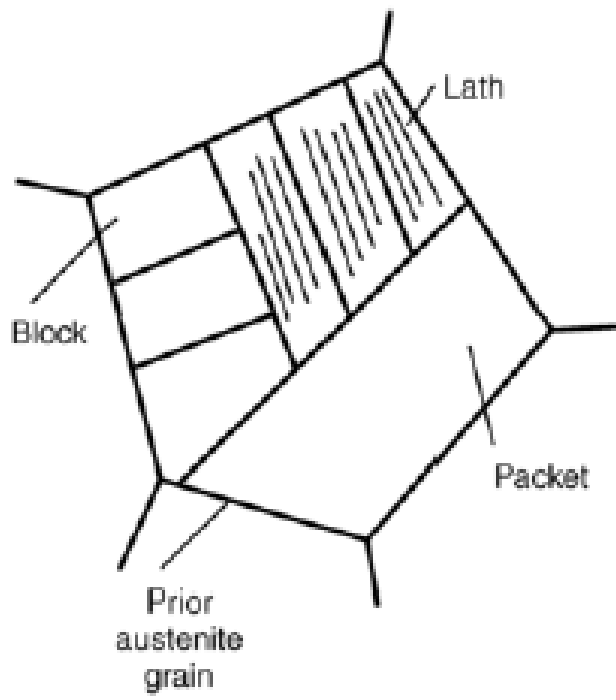
Trinca de têmpera em contornos de grão austeníticos anteriores. Houve crescimento excessivo do grão austenítico durante o aquecimento para a têmpera. Ataque: Nital 2%. Cortesia M. M. Souza, Neumayer-Tekfor, Jundiaí, Brasil.

**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.

OBJETIVO DA TÊMPERA: MARTENSITA



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 ₂ 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

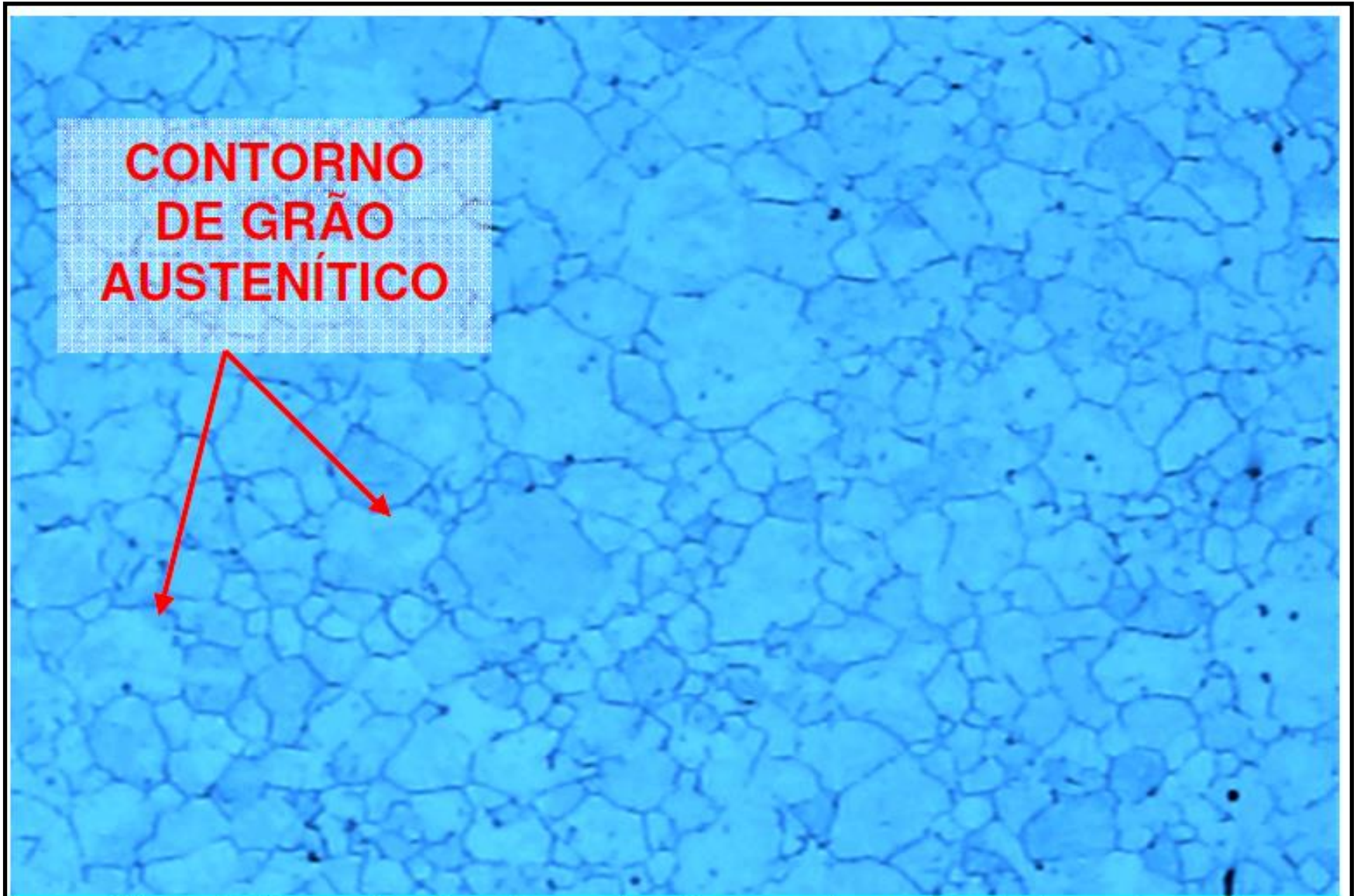


Figura3- Tamanho de grão austenítico com tamanhos heterogêneos.
.Aumento: 100X. Ataque: Picral 2%.

REVELAÇÃO DE TAMANHO DE GRÃO AUSTENÍTICO

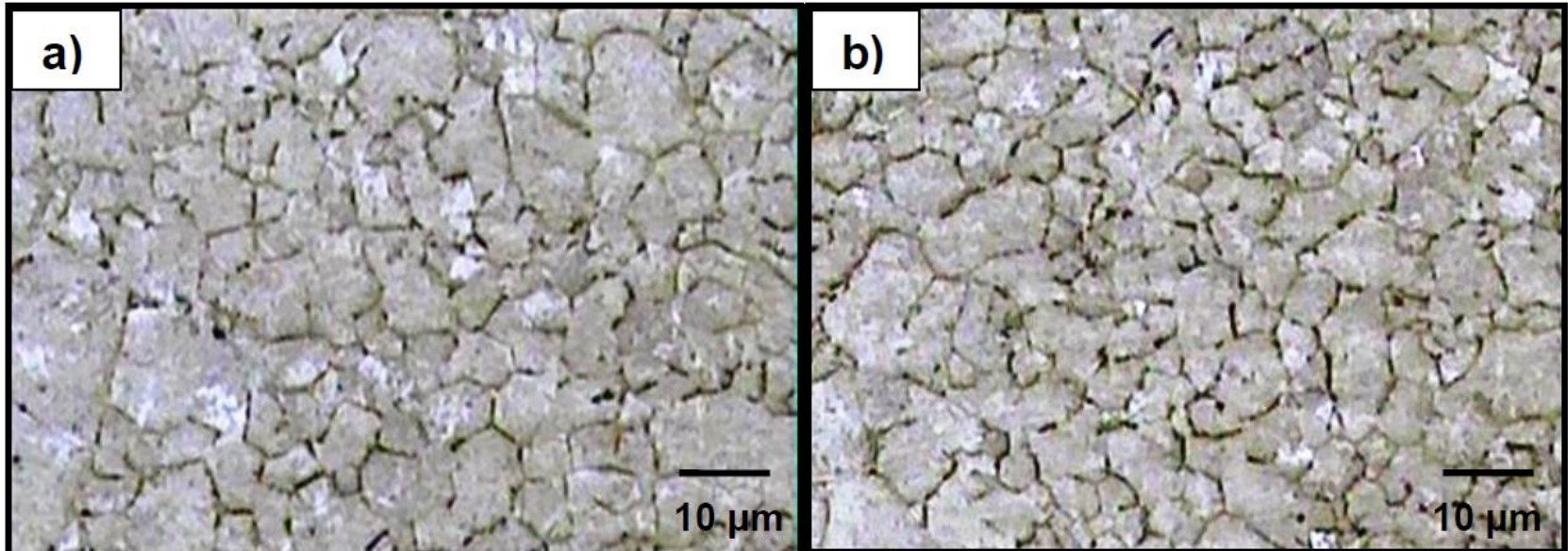


Figura 4.43 - Tamanho de grão austenítico para as amostras austenitizadas em 865°C durante 1 hora. a) 52100 MOD b) 52100 comercial. Tamanho de grão 9-ASTM E 112

TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

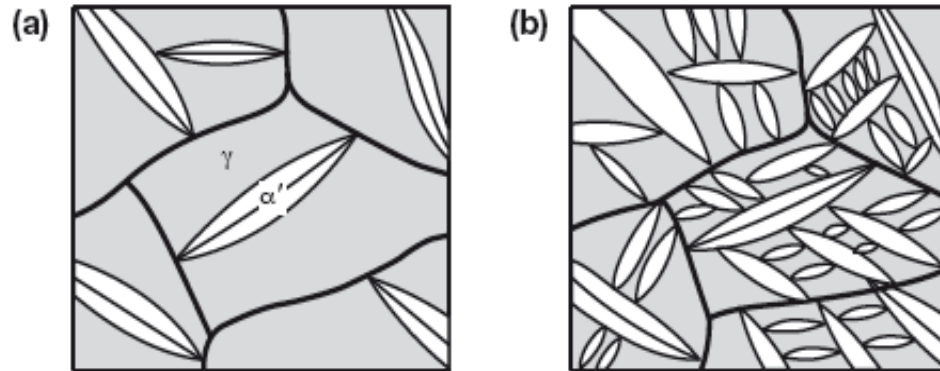


Figura 9.11

Esquema (em uma seção bidimensional) do crescimento da martensita (α') 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

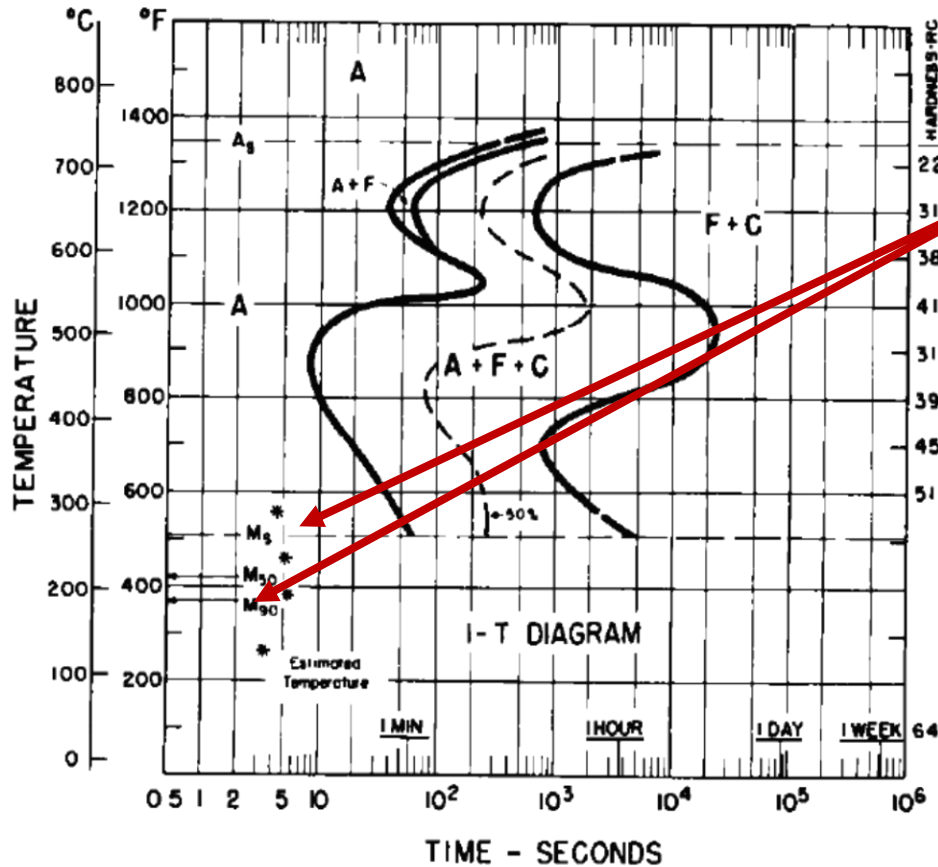
TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

- **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;**
- **Martensita: estrutura tetragonal de corpo centrada, deformada, saturada de carbono nos interstícios;**

TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

Type: 4150 Mod.

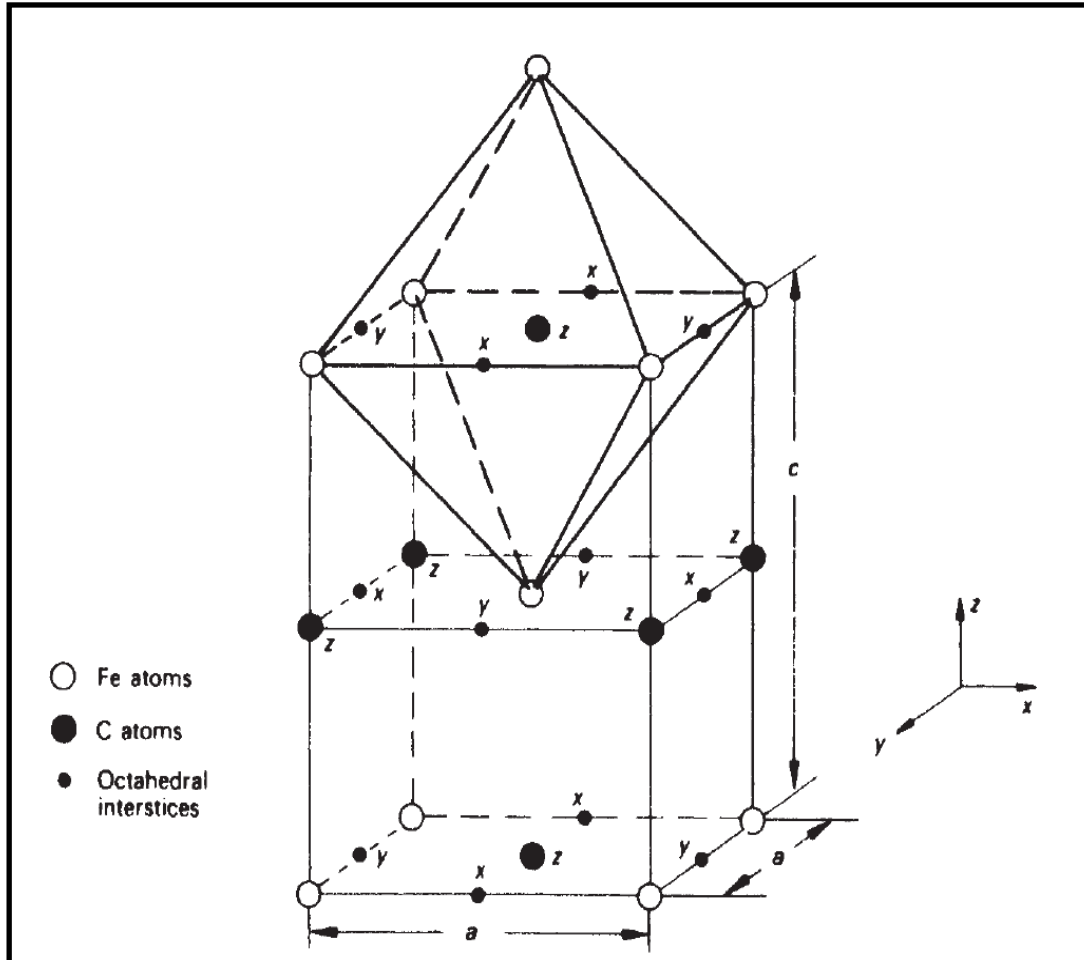
**Composition: Fe - 0.55% C - 0.60% Mn - 1.03% Cr - 0.19% Mo
- 0.36% Ni Grain size: 7-8 Austenitized at 843°C (1550°F)**



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

TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

TETRAGONALIDADE DA MARTENSITA



- “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

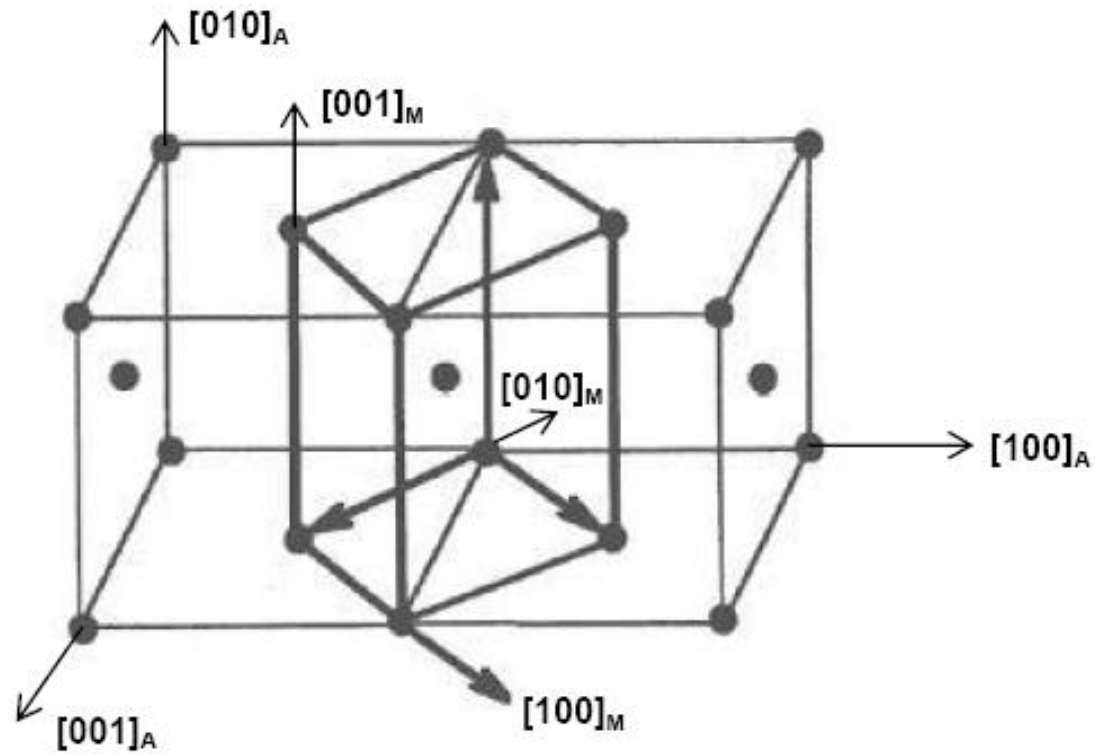


FIG. 2.1. Representação esquemática da correspondência entre as redes cfc e tcc. (BHADESHIA, 2001)

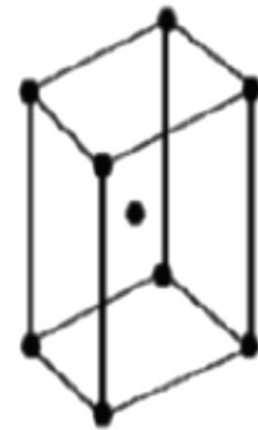
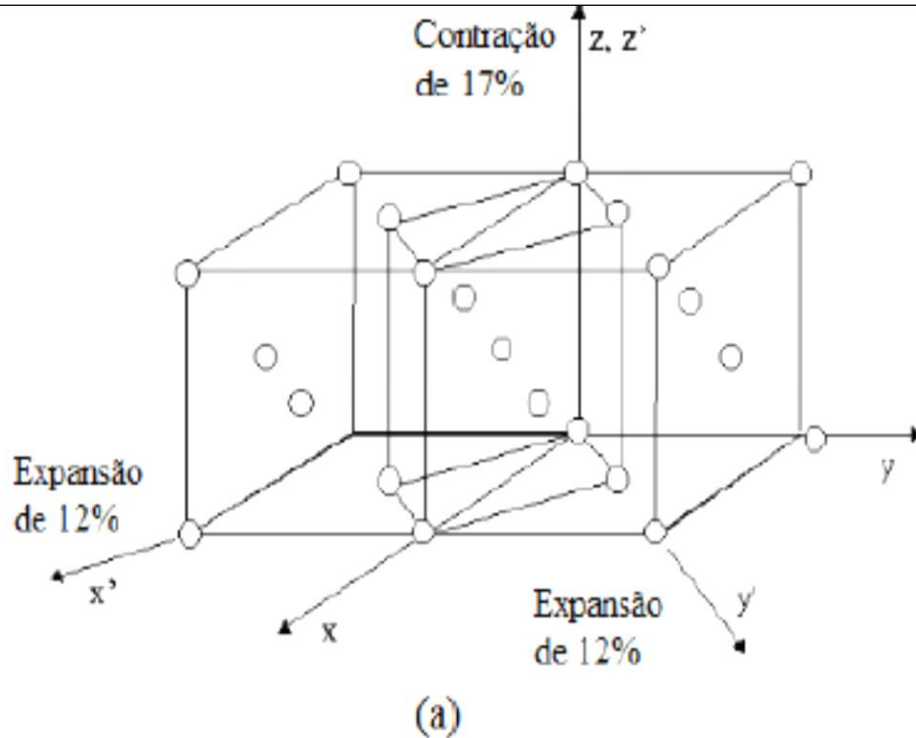
Duas células CFC (austenita) : equivalência com a tetragonal da martensita.

TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

Wechsler, Lieberman e Read

- a) **Uma distorção de Bain** transformando a estrutura CFC em TCC 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)**;
- 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**, permitindo a **coerência entre matriz e martensita**.

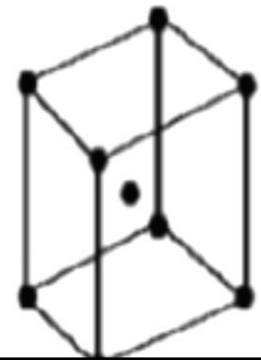
TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA



Tetragonal de corpo centrado (austenita)

(b)

Deformação de Bain



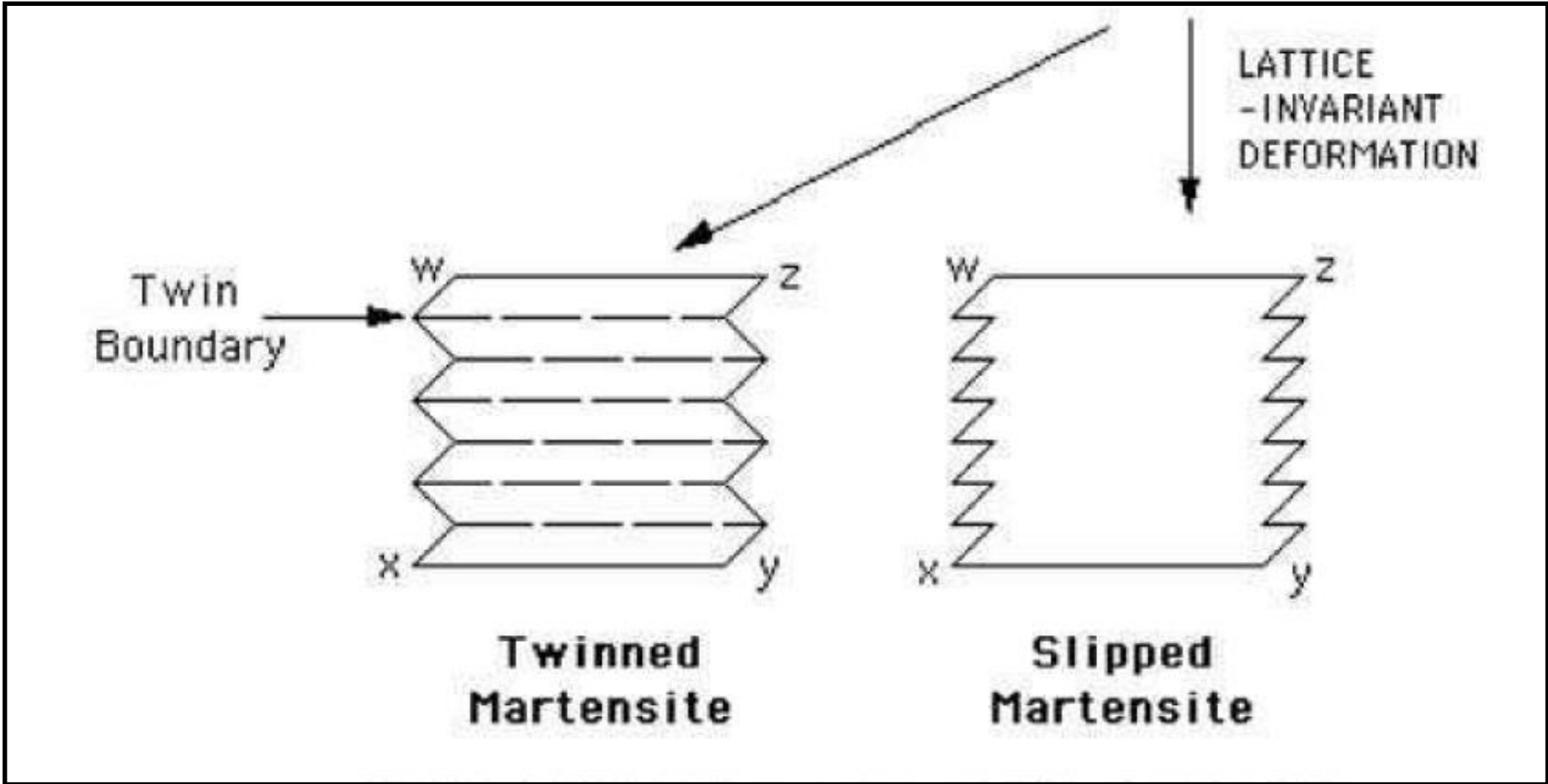
Tetragonal de corpo centrado-deformada

(c)

(ADAPTADO DA TESE DOUTORADO: KARL ZILNYK)

O AUMENTO DE VOLUME FINAL É DE ~ 4%.

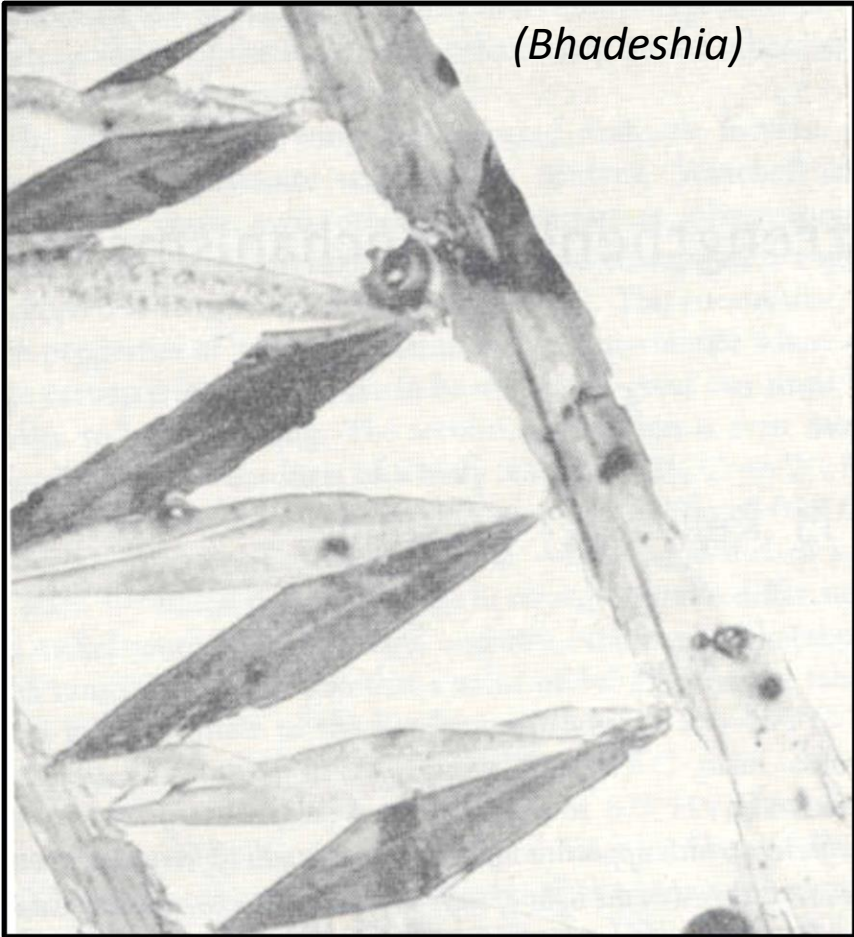
TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA



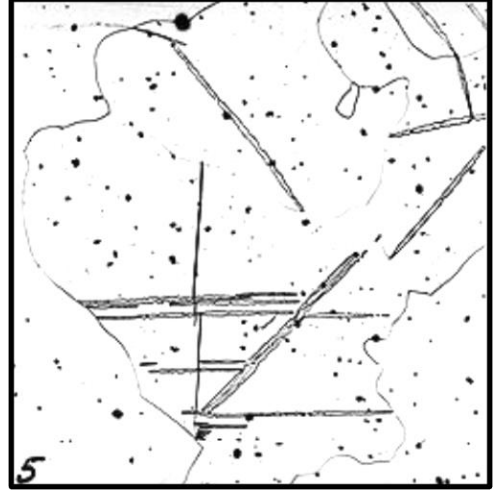
(Honeycombe)

TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

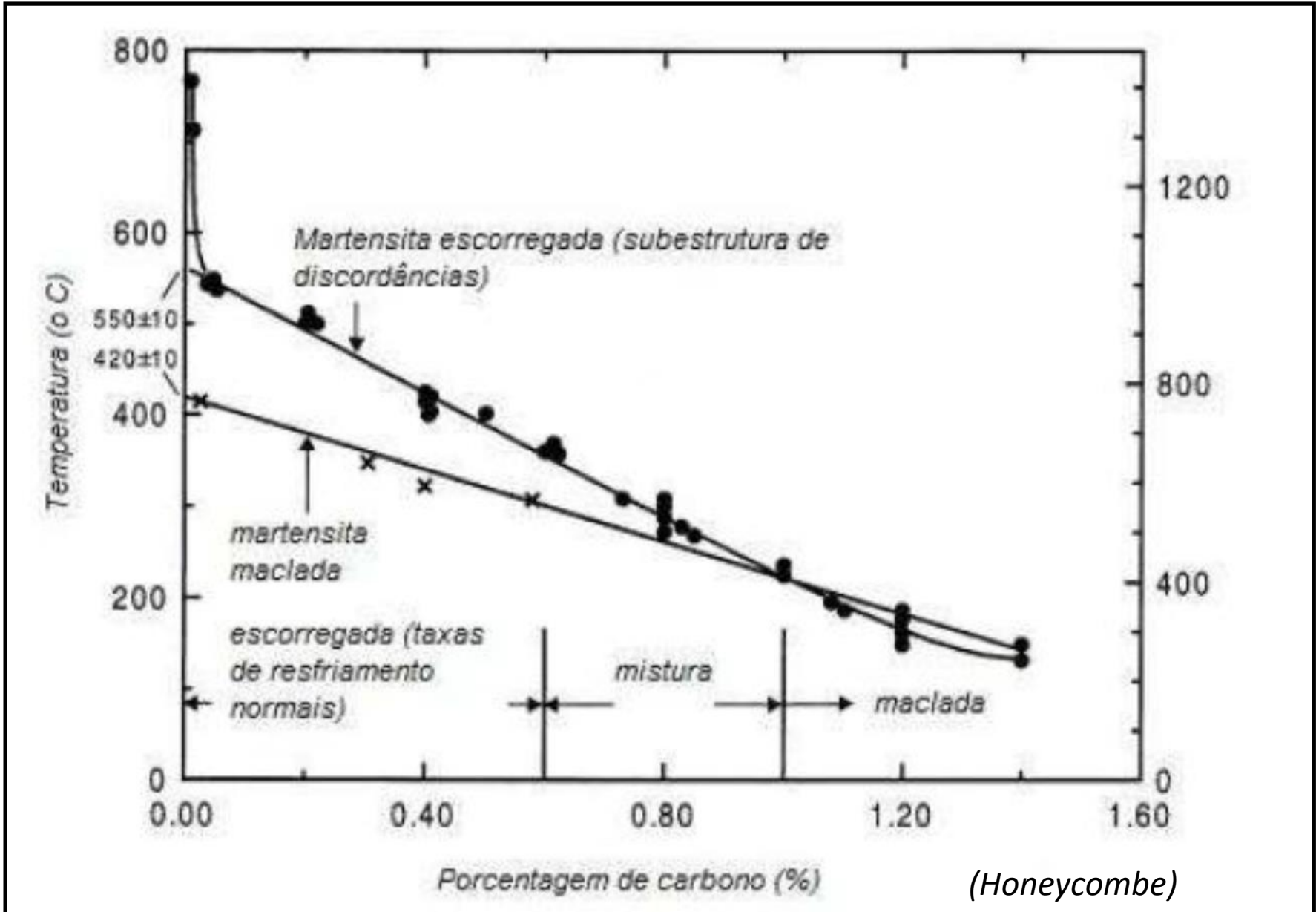
MACLAS MECÂNICAS



MARTENSITA MACLADA

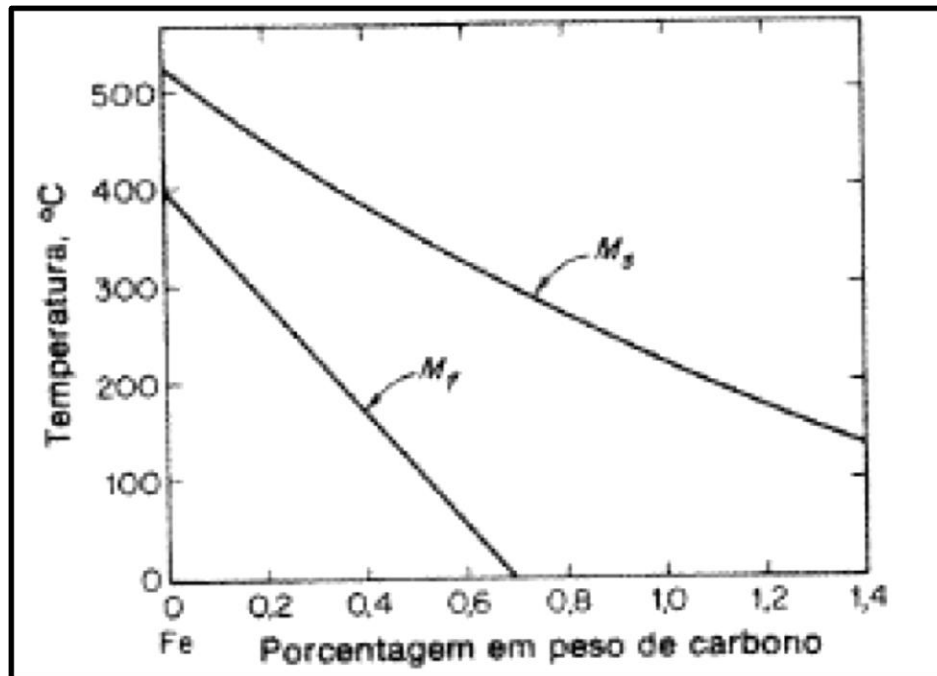


TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA



TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

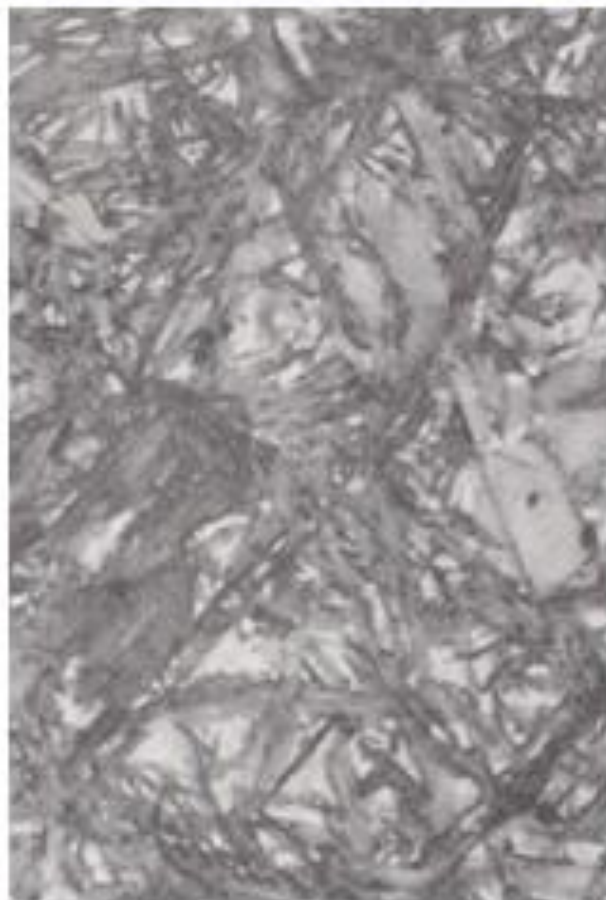
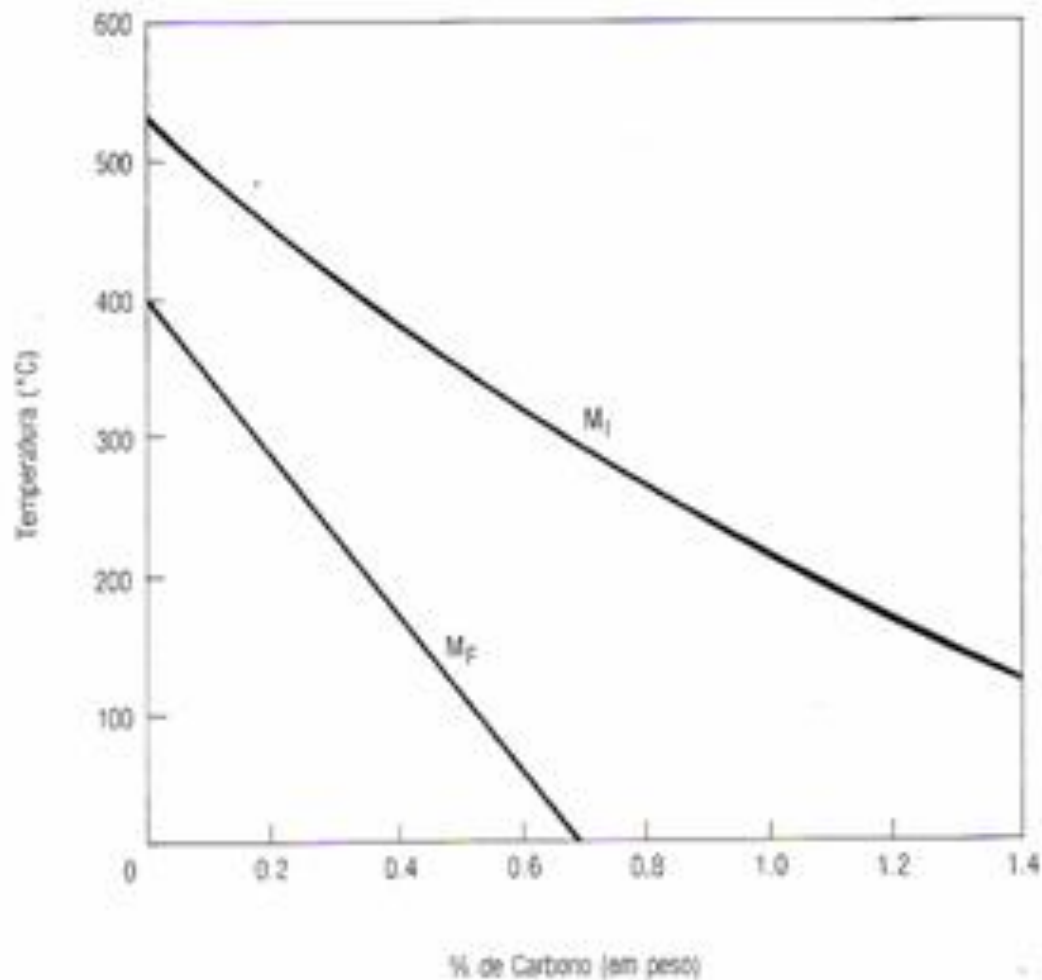
- Como ocorre por cisalhamento, as interfaces tem que ter mobilidade;
- Com aumento do teor de C: arraste das L.D. na interface, mais difícil se mover, abaixa M_s e M_f .



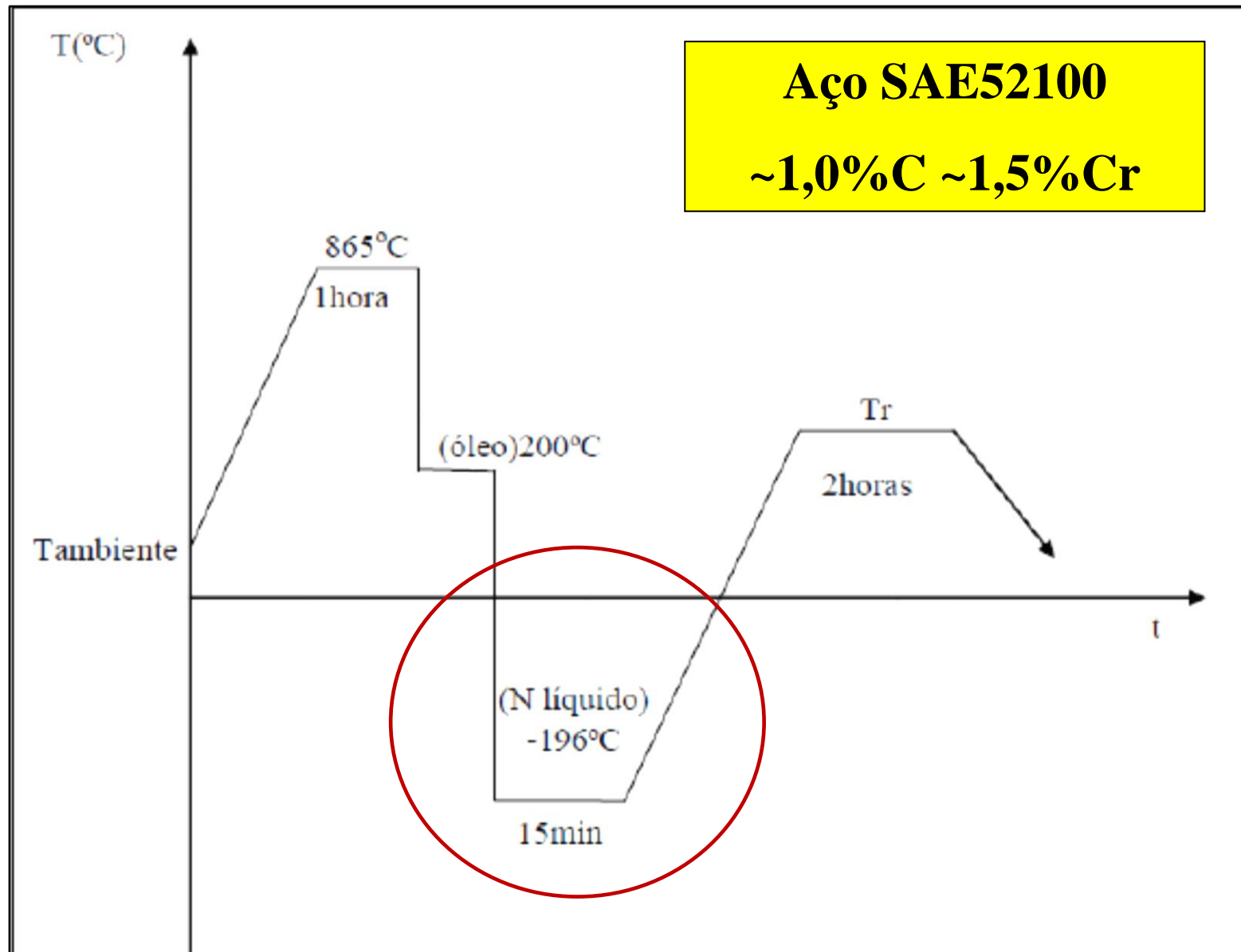
(Reed-Hill)

INFLUÊNCIA DO CARBONO NO INÍCIO E FIM DE TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

MARTENSITA +
AUSTENITA RETIDA



TRATAMENTO SUBZERO



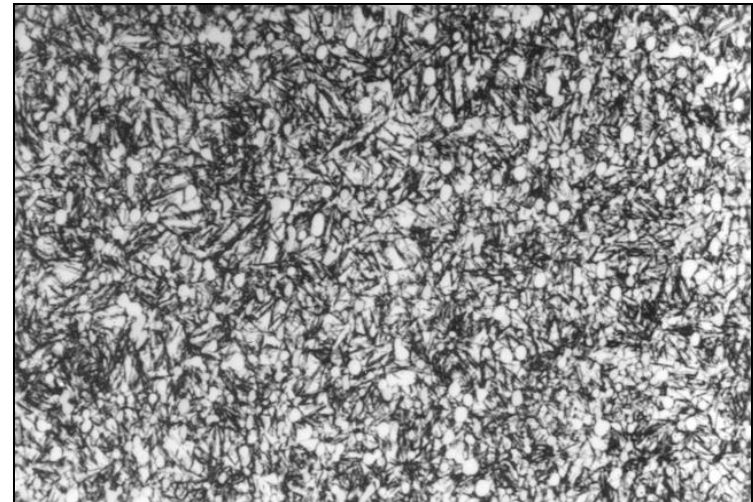
SUB ZERO

- **Consiste em resfriar as peças após a têmpera em temperaturas abaixo de 0°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

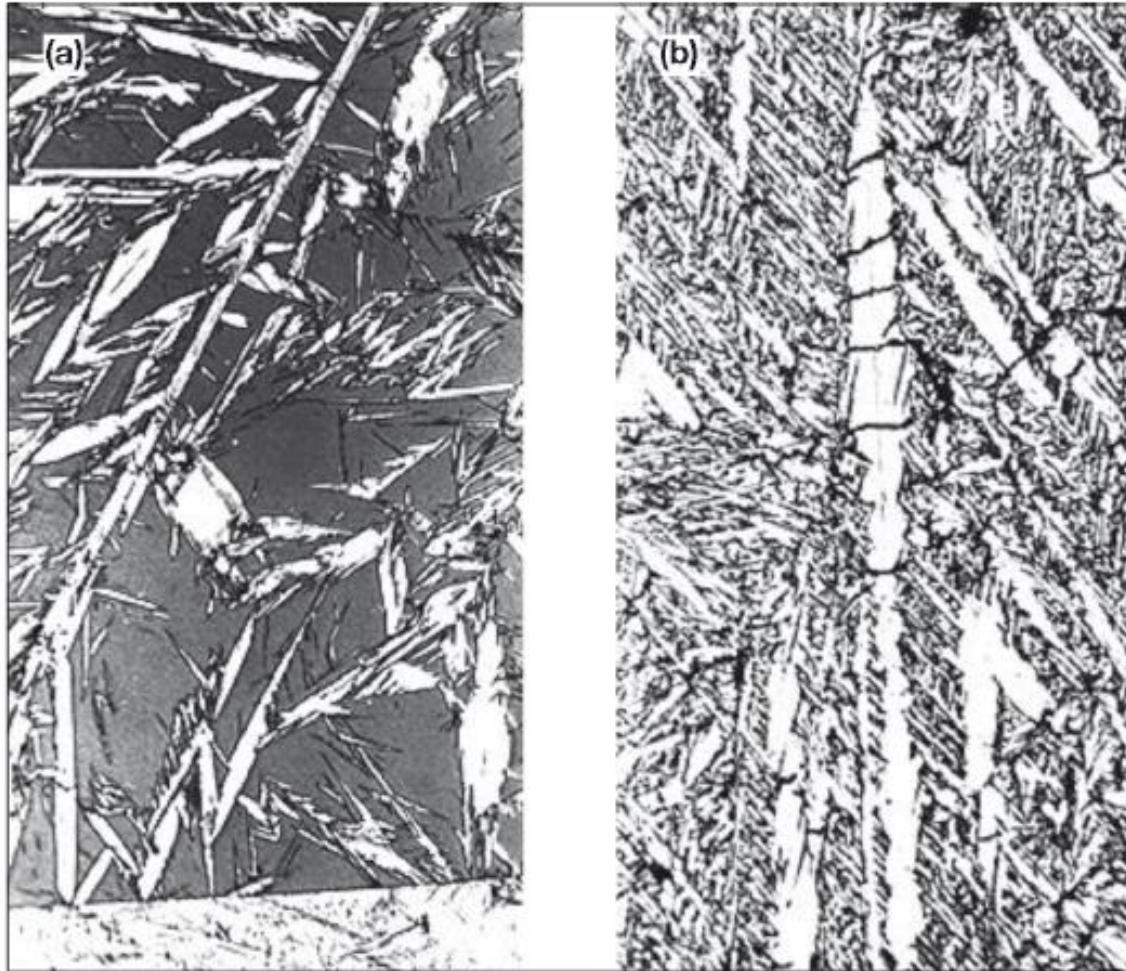


Fig. 9.18 (Colpaert)

(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

TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

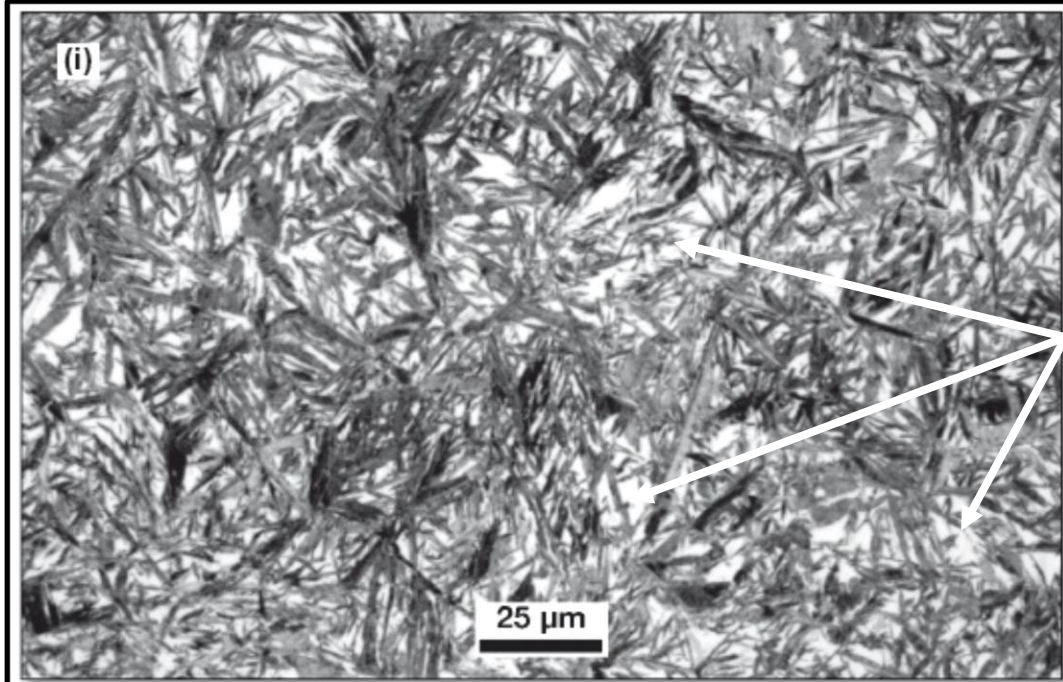
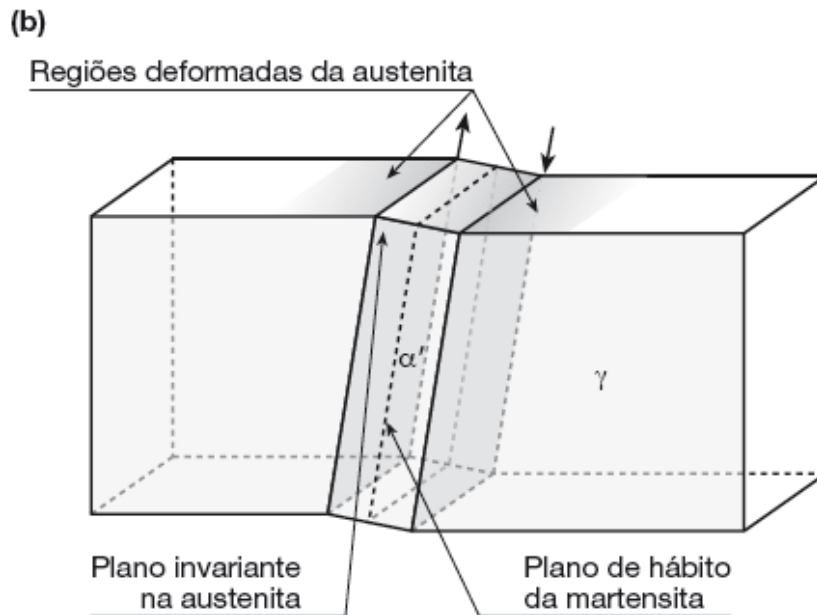
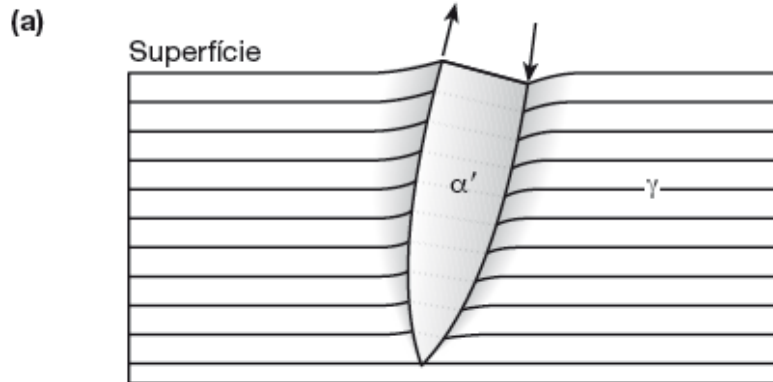


Figura 10.64(i) – AISI 43100 – 200°C

**AUSTENITA
RETIDA
BRANCA
M.O.**

(Colpaert)

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

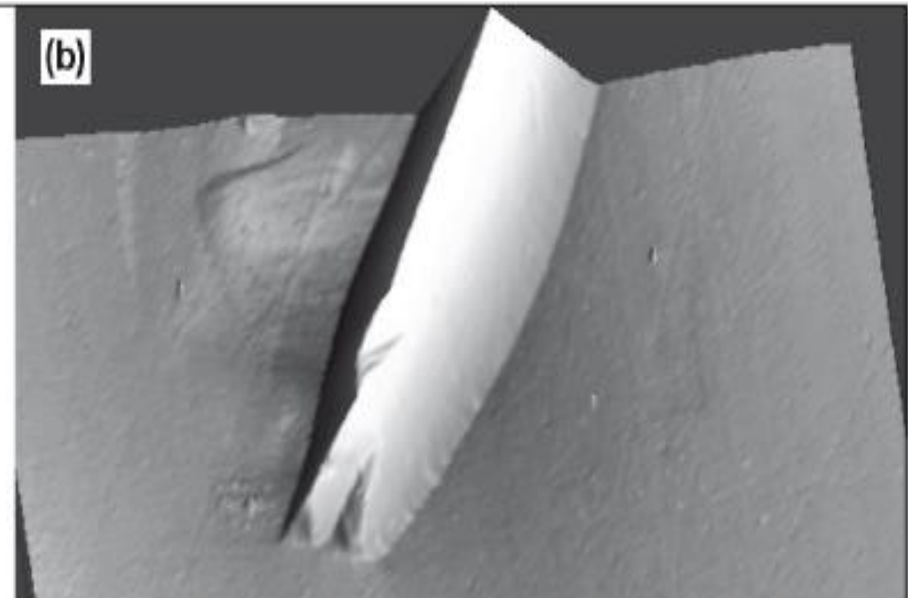
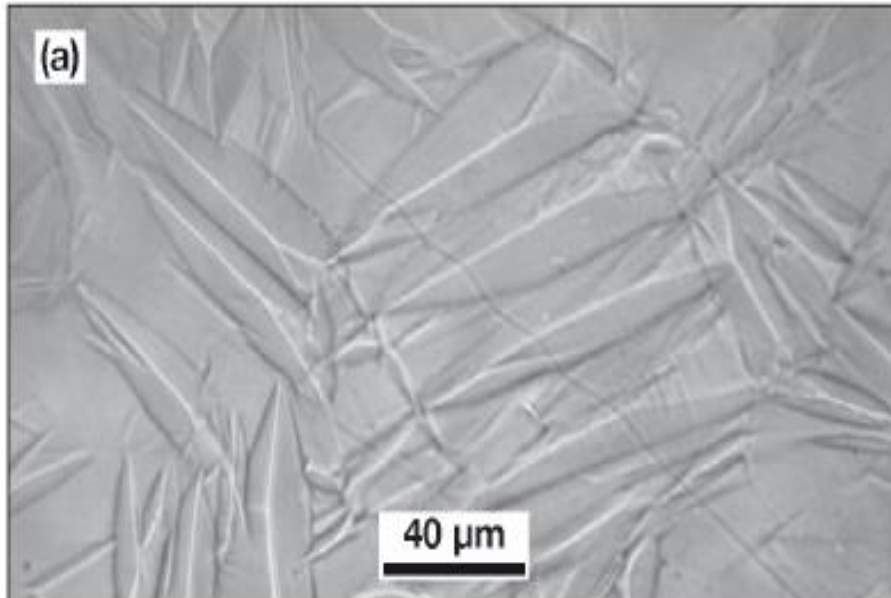
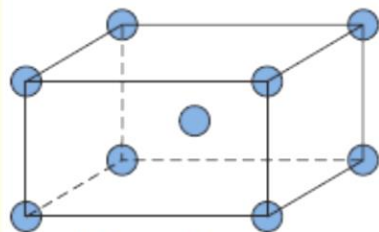


Figura 9.12

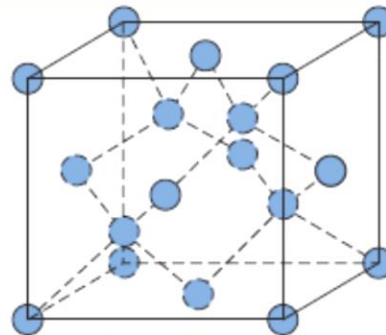
Amostra de liga à base de ferro com $C = 0,31\%$ $Ni = 30,5\%$ polida para metalografia quando austenítica e transformada para martensita. (a) Microscopia ótica mostra a distorção de riscos inicialmente retos na austenita. (b) e (c) Microscópio de força atômica mostra o relevo das placas de martensita e a ausência de descontinuidades quando a linha atravessa a interface austenita-martensita⁽¹⁰⁾. 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 PRO
CINZA, 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.**

TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA



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

(Diego Rocha-D.M.)

TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

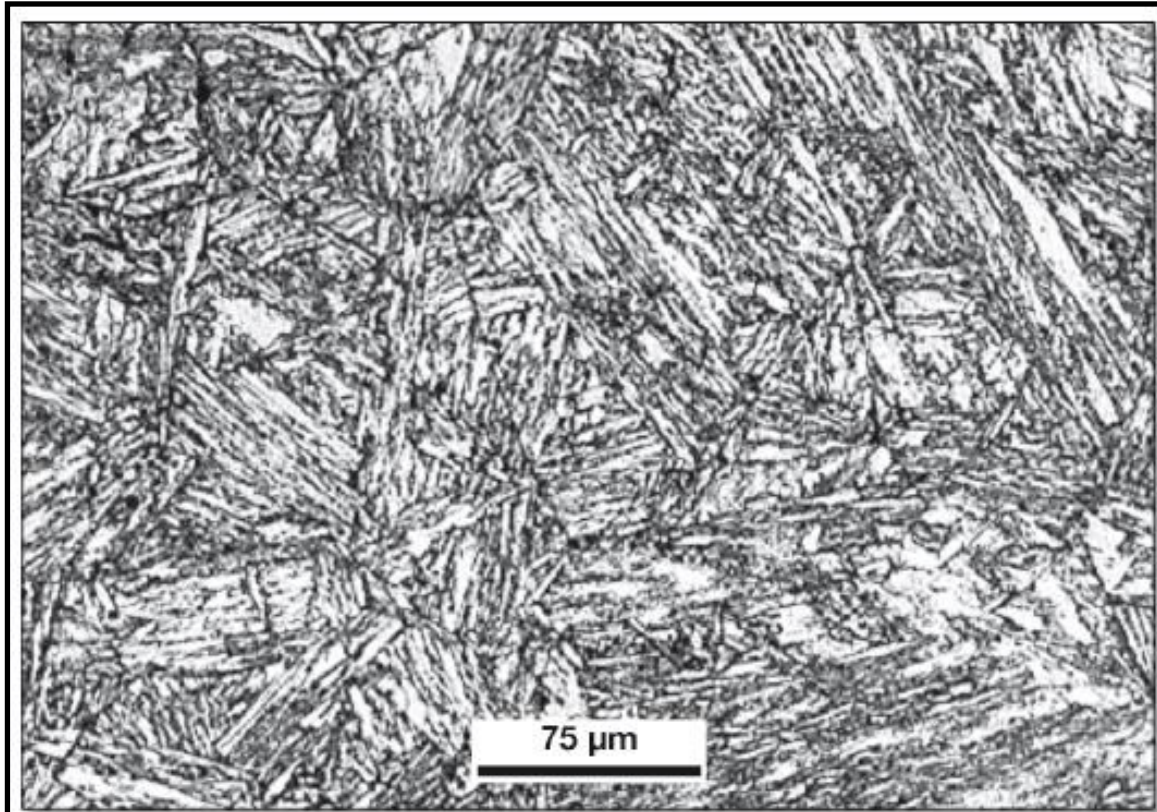


Figura 9.15

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

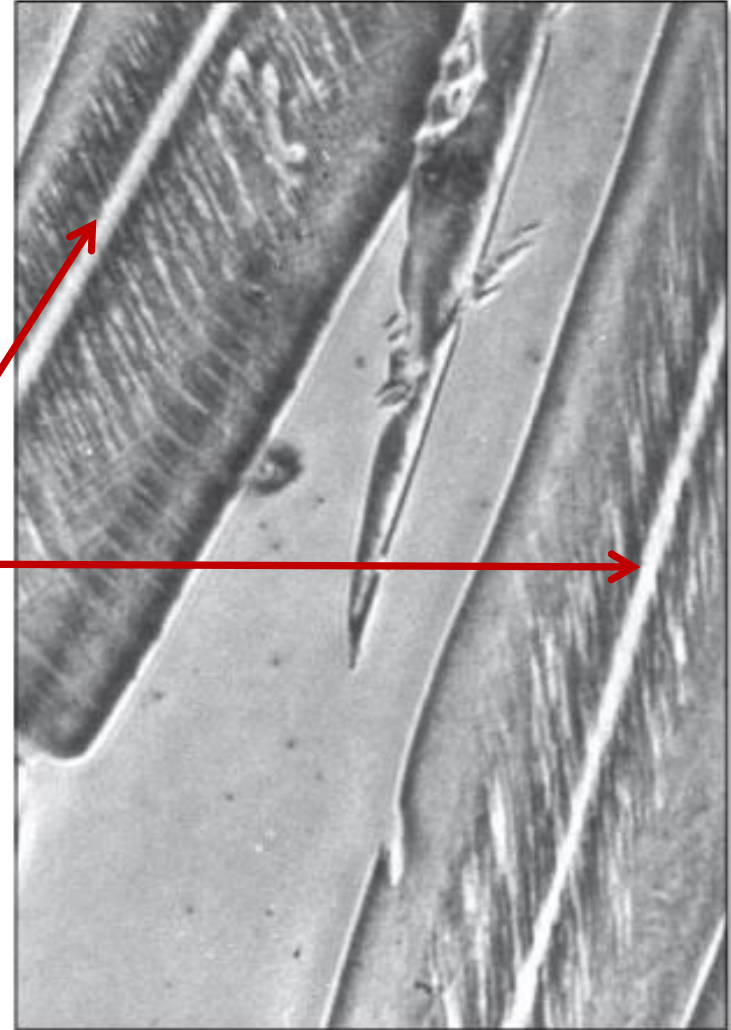
Figura 9.17

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)



TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

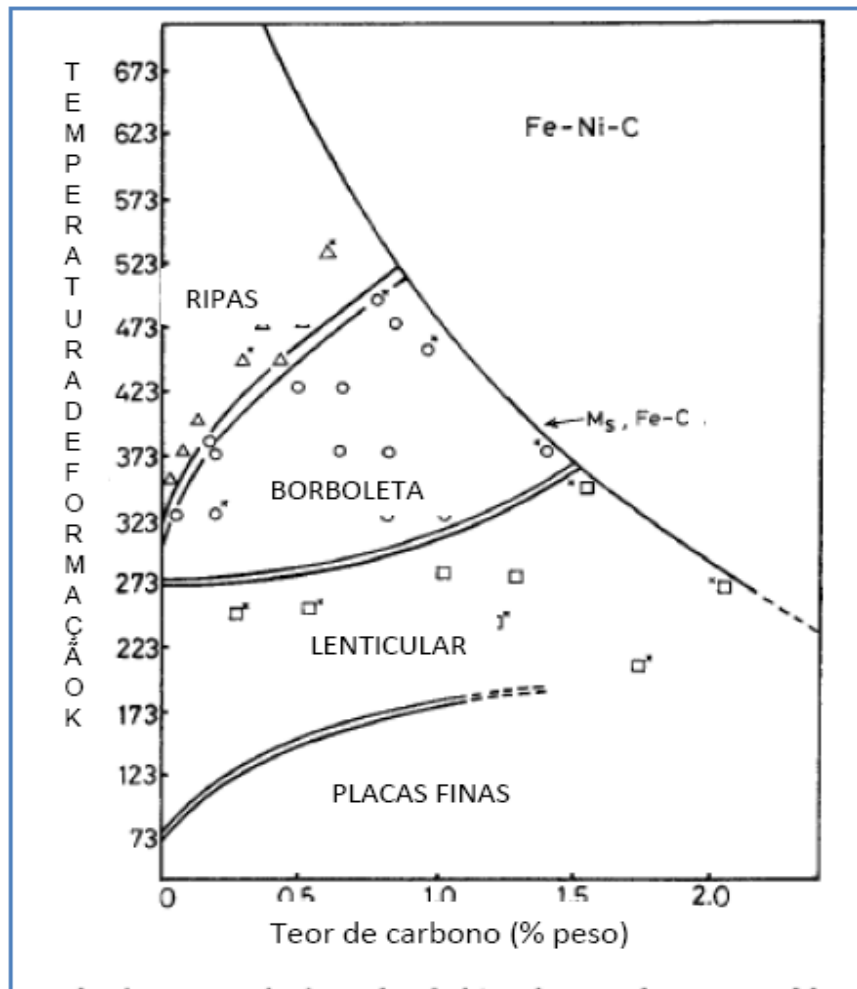


Figura 23 – Tipos de martensita em função do teor de carbono (UMEMOTO, YOSHITAKE, TAMURA, 1983).

TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

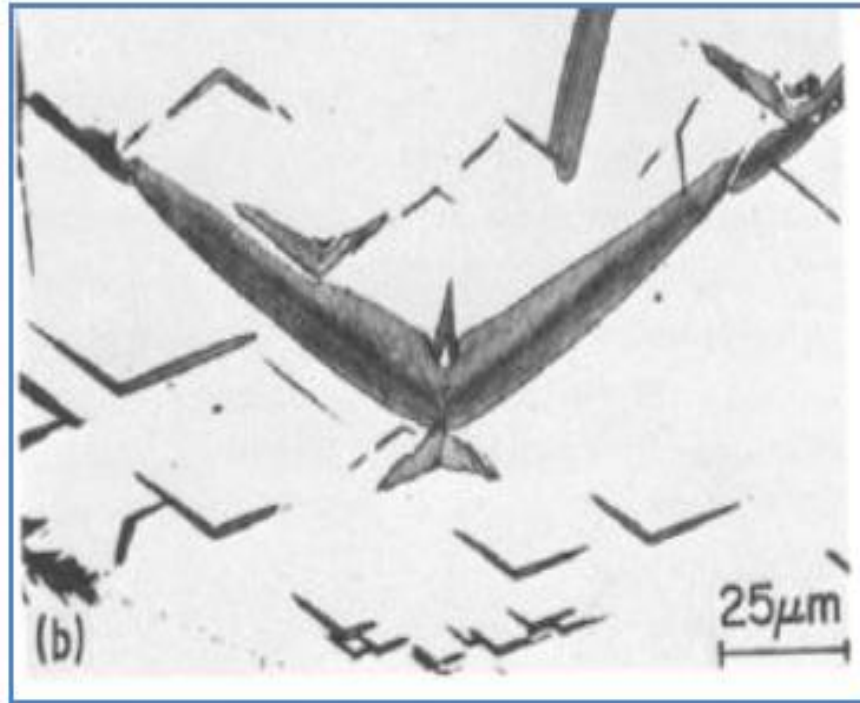


Figura 24 – Martensita em forma de borboleta para uma liga Fe-18Ni – 0,7Cr-0,50C resfriada a 263K (UMEMOTO, YOSHITAKE, TAMURA, 1983).

TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

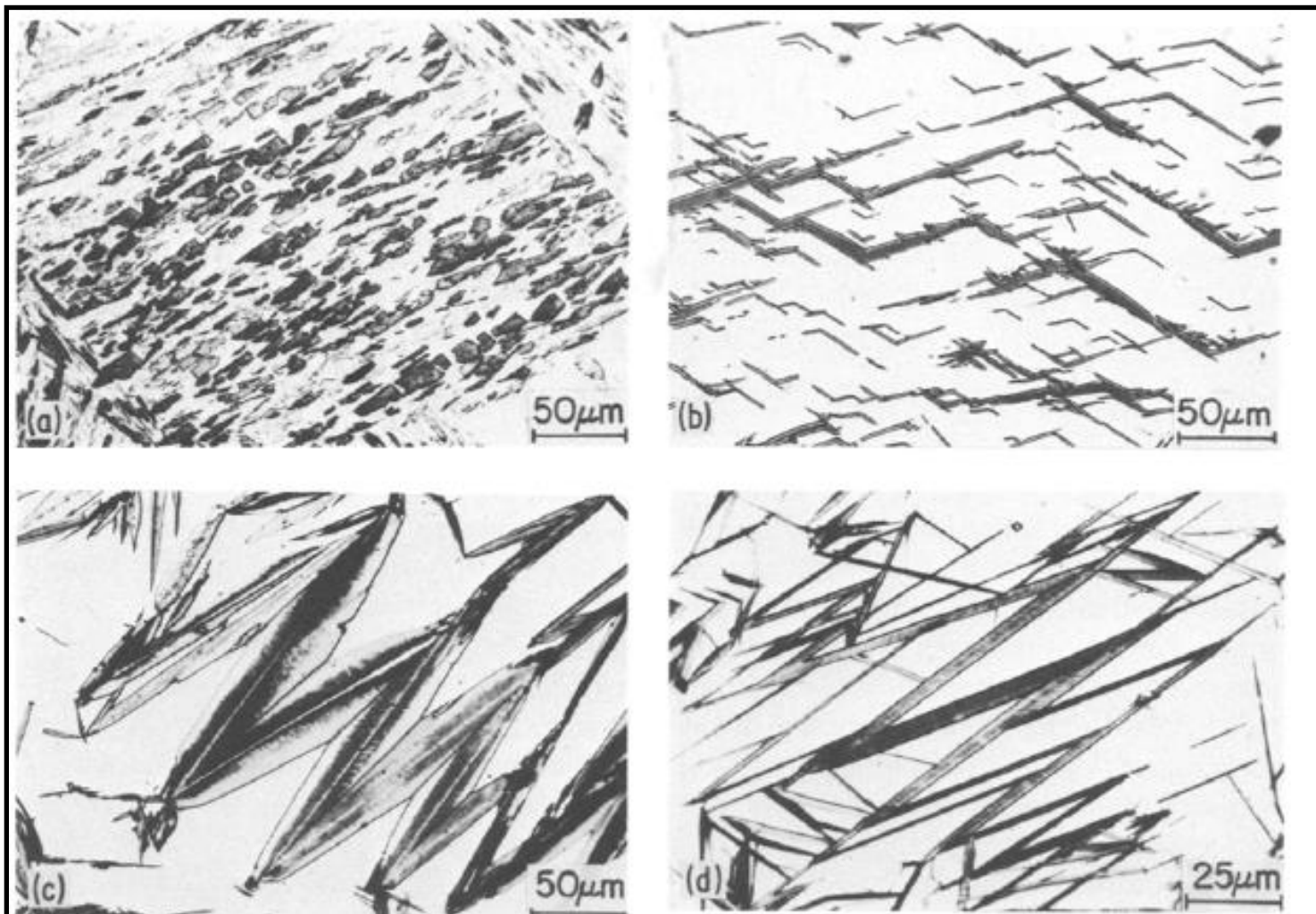


Figure 1 Optical micrographs showing different morphologies of martensites formed in Fe-Ni-C alloys. (a) Lath martensite in an Fe-15Ni-0.24C alloy. (b) Butterfly martensite in an Fe-20Ni-0.73C alloy. (c) Lenticular martensite in an Fe-31Ni-0.23C. (d) Thin plate martensite in an Fe-31Ni-0.29C.

TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

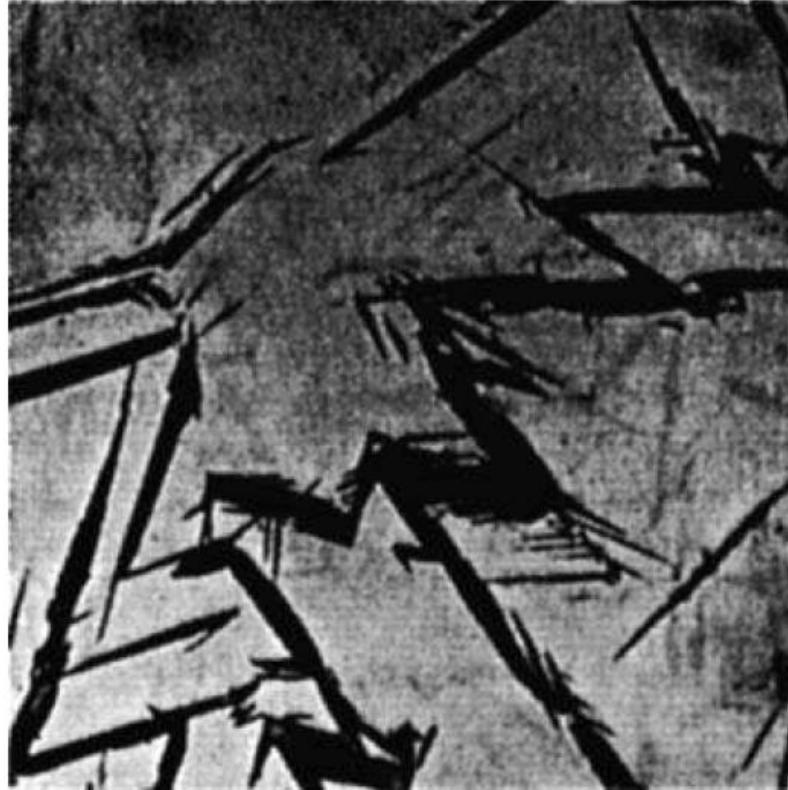


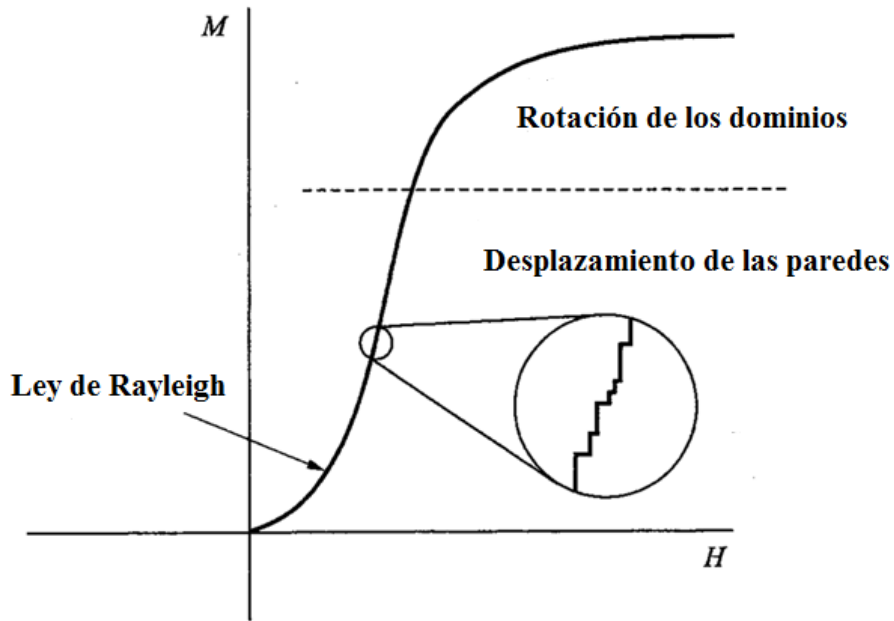
Fig. 5.11 Fe-1.8C-3Mn-2Si. Lenticular martensite illustrating the burst phenomenon. Optical micrograph, $\times 300$.

TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

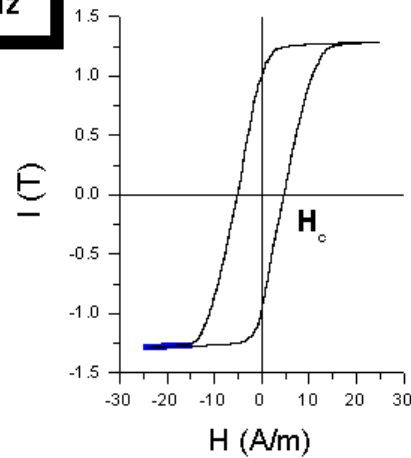
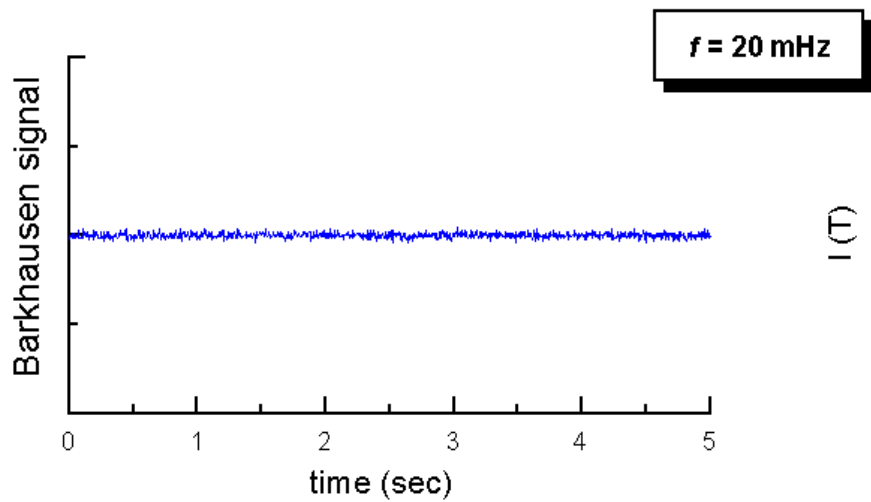
DETECÇÃO DA NUCLEAÇÃO DA MARTENSITA:

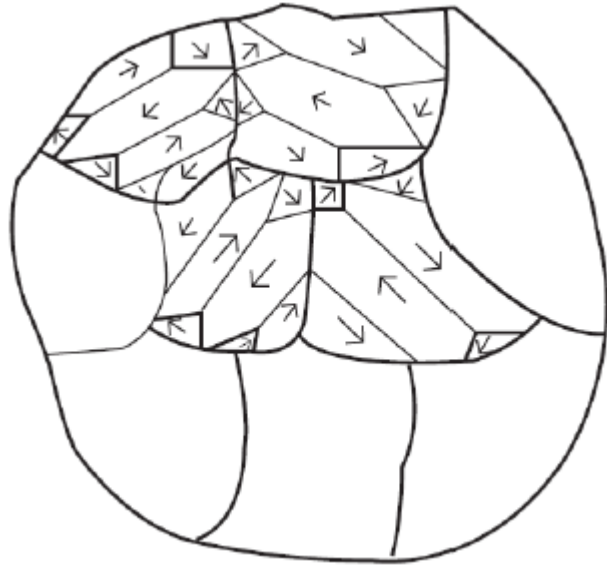
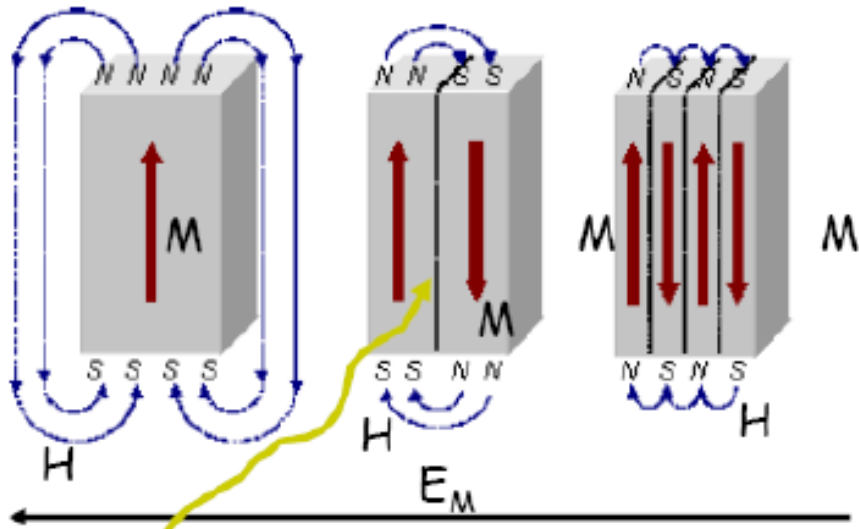
- **DILATAÇÃO;**
- **EMISSÃO ACÚSTICA;**
- **EMISSÃO MAGNÉTICA (EMISSÃO DE BARKHAUSEN);**
- **LIGAS DE ALTO Ni – “OUVE-SE” RUIDO: “BURST”.**

Ruido Magnético de Barkhausen

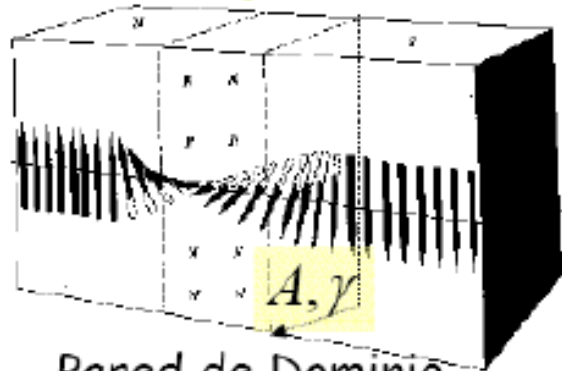


Heinrich Georg Barkhausen
(1881-1956)



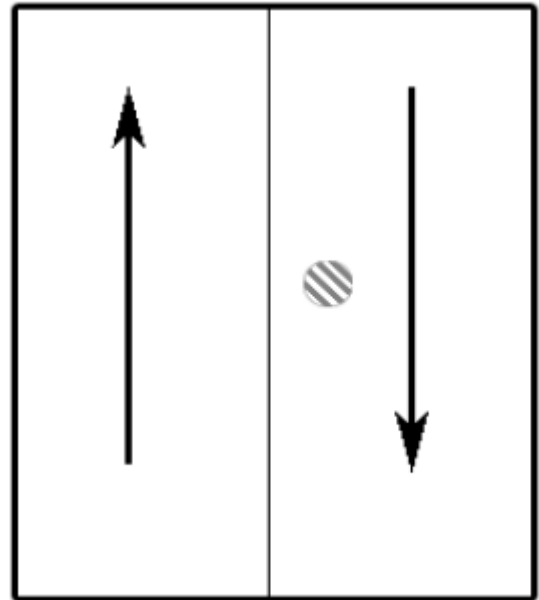


← número de dominios (n) →



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

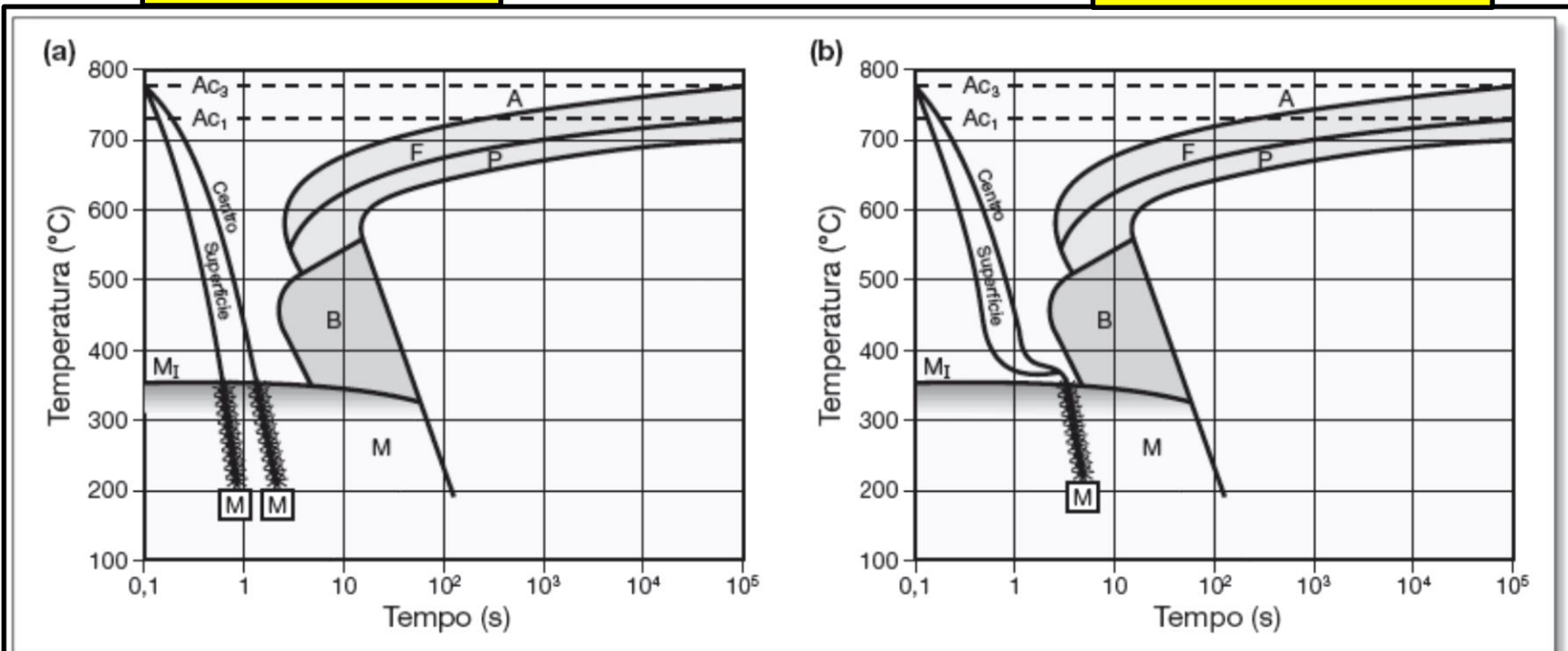
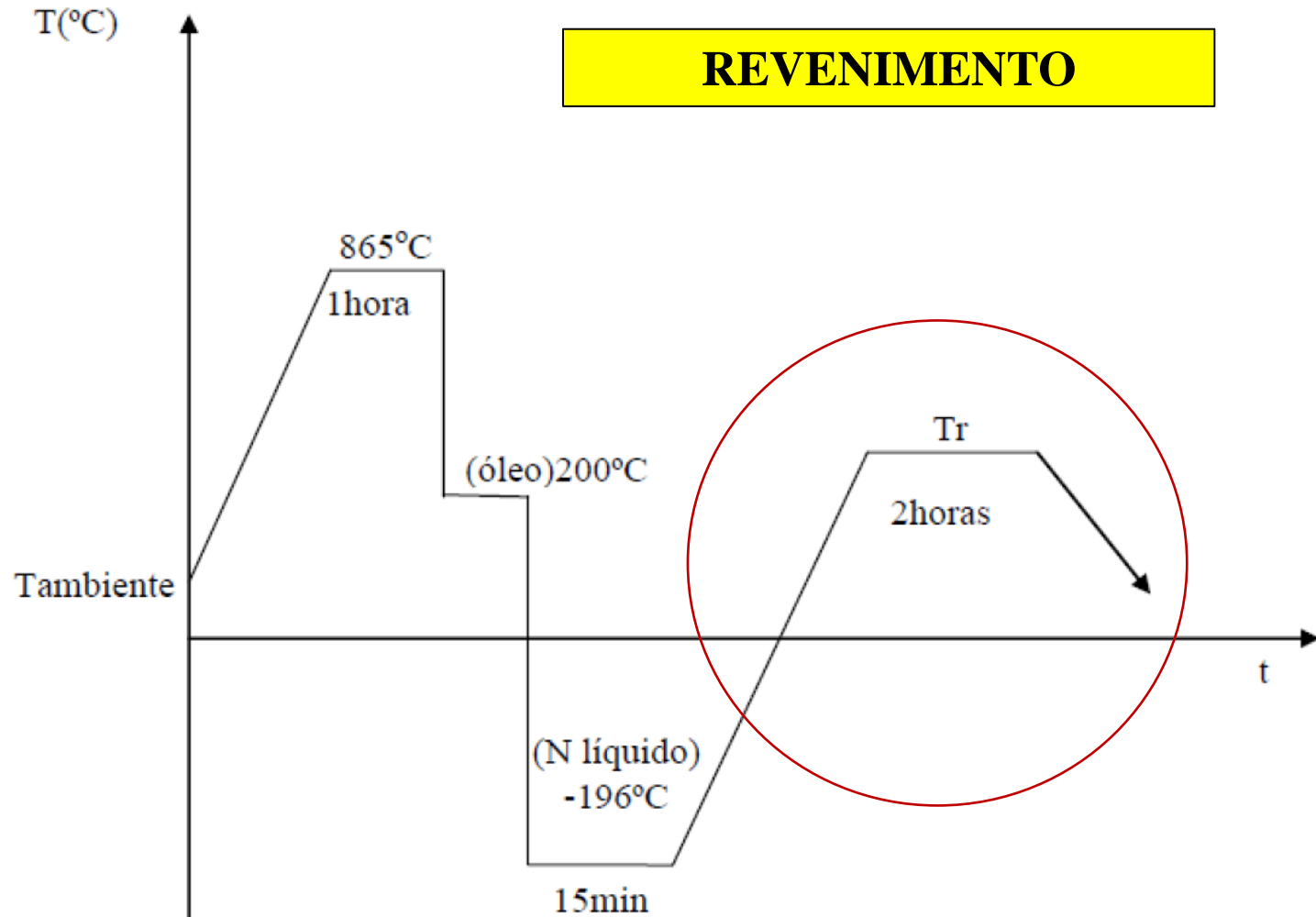


Figura 10.79

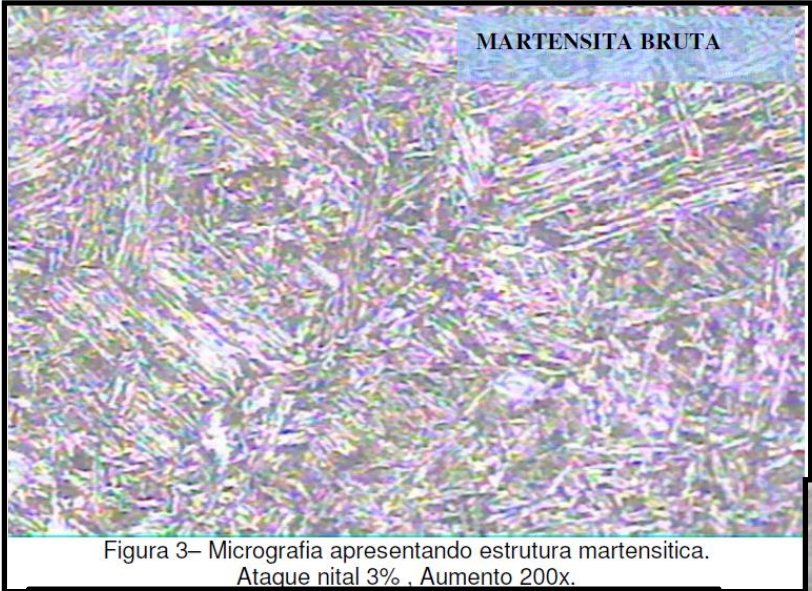
Em uma têmpera (a), a superfície e o núcleo da peça atingem a temperatura M_t em momentos diferentes, aumentando as tensões de têmpera. Na martêmpera (b), um breve tratamento isotérmico intermediário permite homogeneizar a temperatura da peça antes de atingir a temperatura M_t , reduzindo sensivelmente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

(Colpaert)

REVENIMIENTO



MARTENSITA REVENIDA

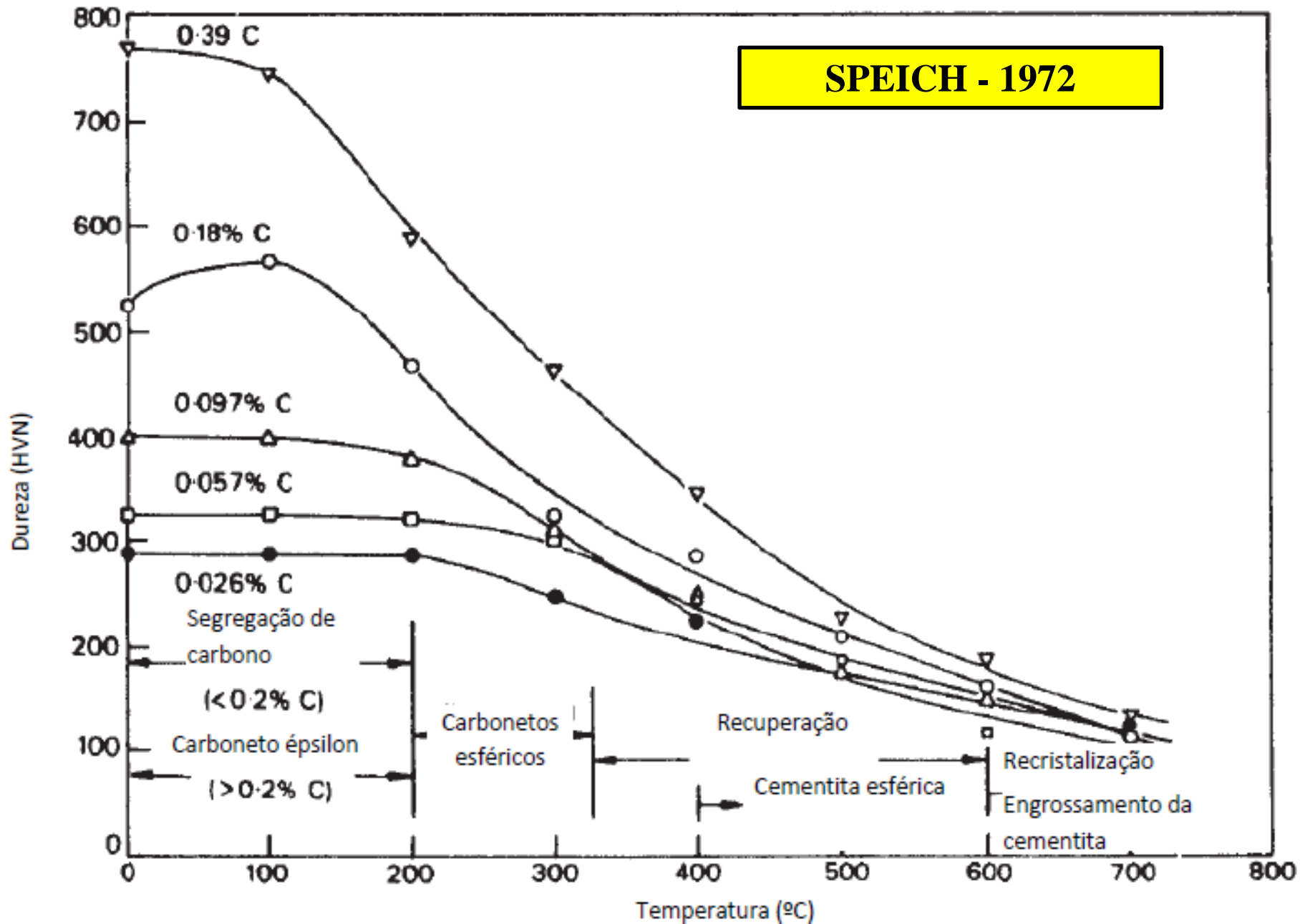


MARTENSITA REVENIDA



MARTENSITA BRUTA

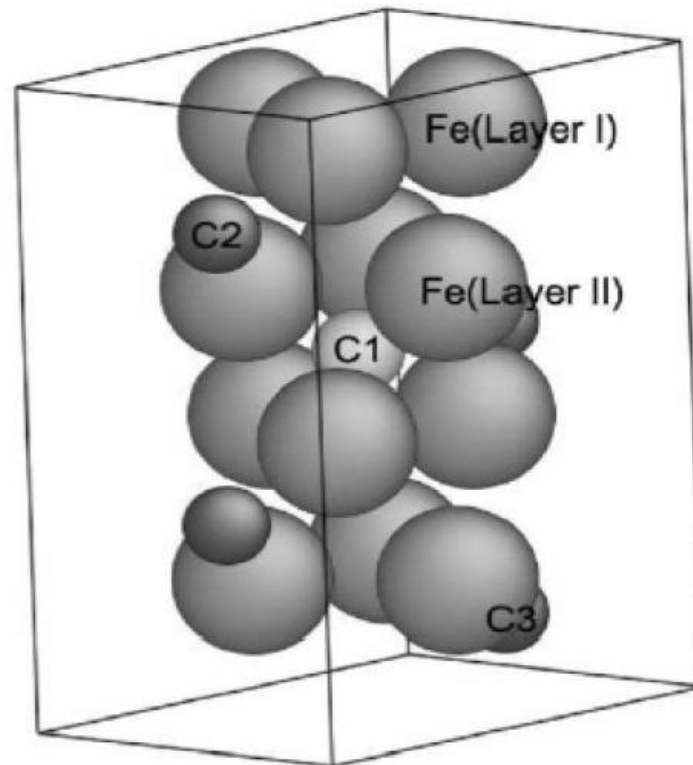
SPEICH - 1972

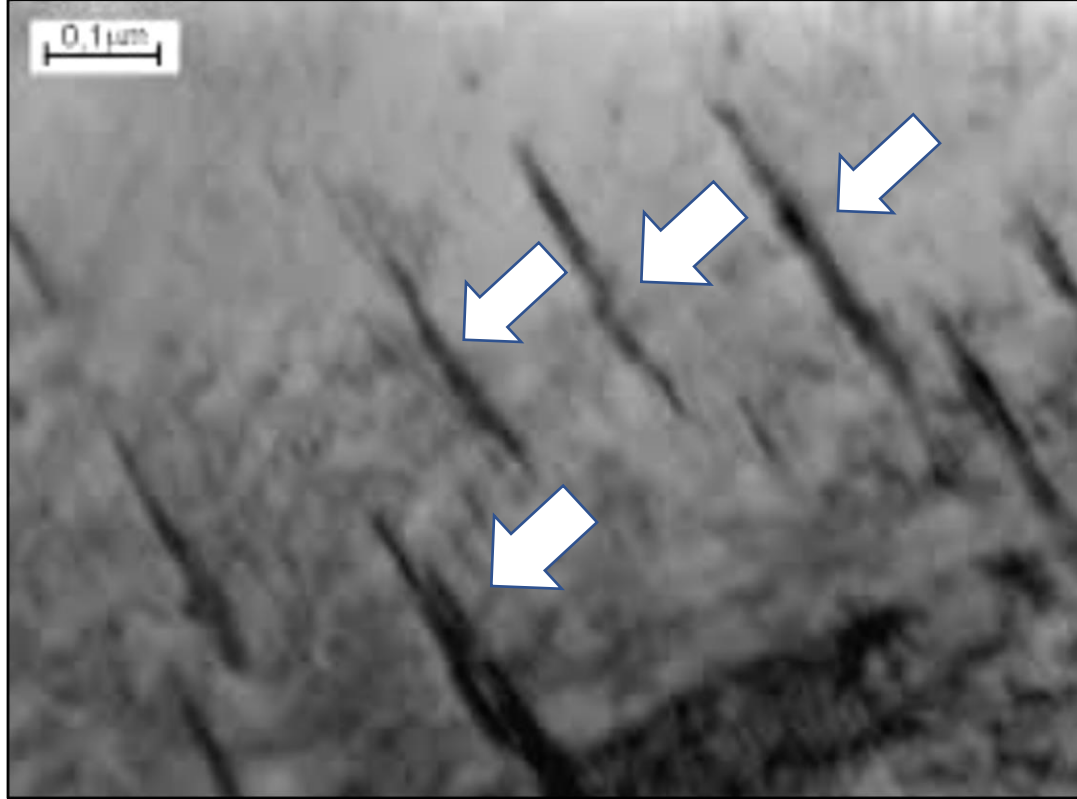


ESTÁGIOS DO REVENIMENTO

- Ta - 200°C → precipitação do carboneto ϵ ($\text{Fe}_{2,4}\text{C}$) 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 ϵ para cementsita;
- 250°C e 500°C → transição do carboneto ϵ para cementsita (MORRA et al, 2001).
- Padmanabhan e Wood (1984) → precipitação do carboneto ϵ a partir da austenita, durante a transformação austenita-martensita.

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



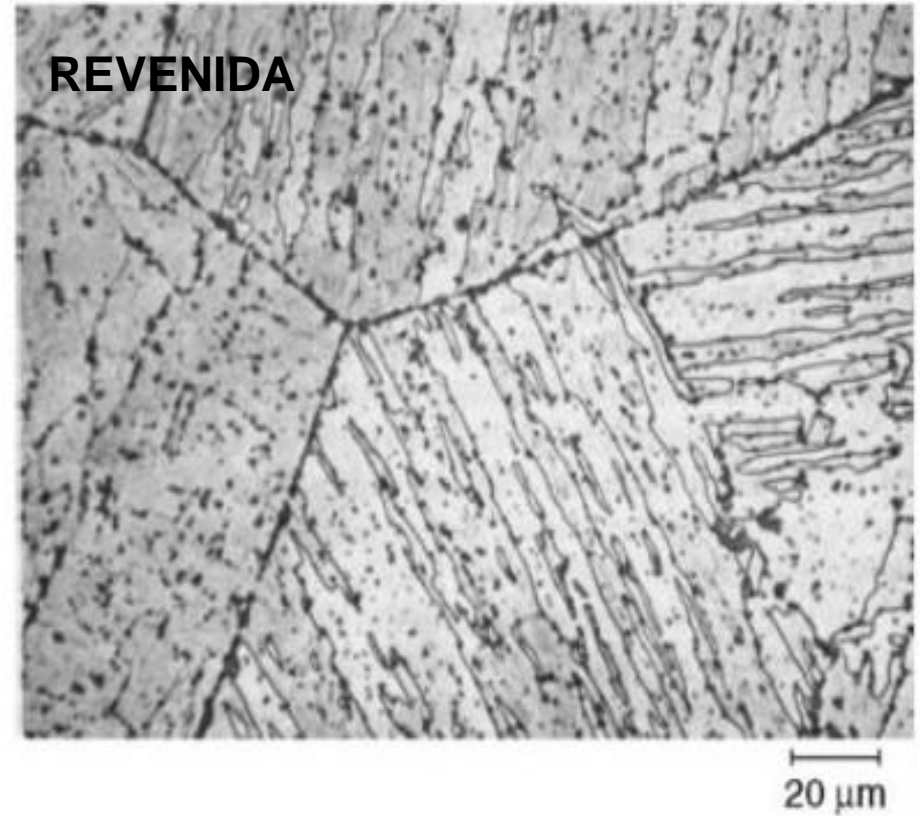
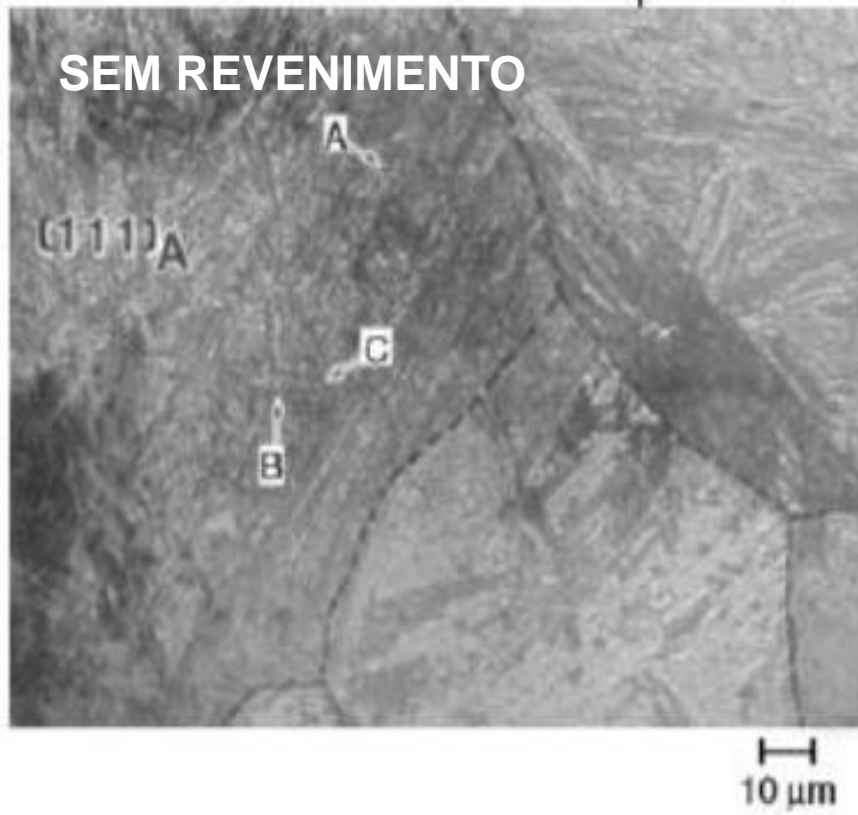


P. Bała, J. Pacyna, J. Krawczyk(2007): carbonetos ϵ em forma de discos na martensita revenida em 280°C (MET).

Descoberta do carboneto ϵ 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**).

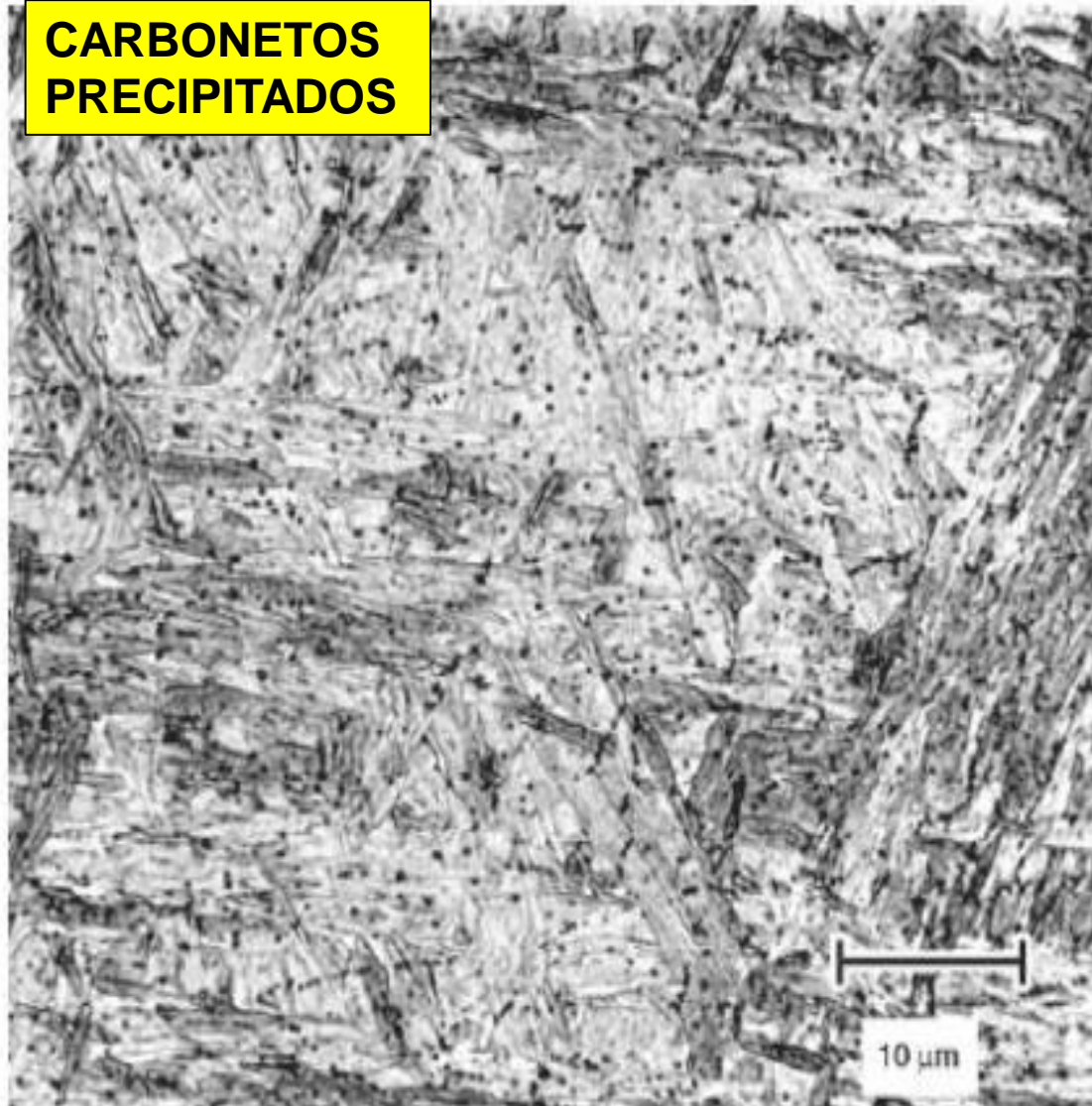
Revenimento dos aços

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** (a partir de **60°C**), transforma-se em **martensita cúbica**, 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**.

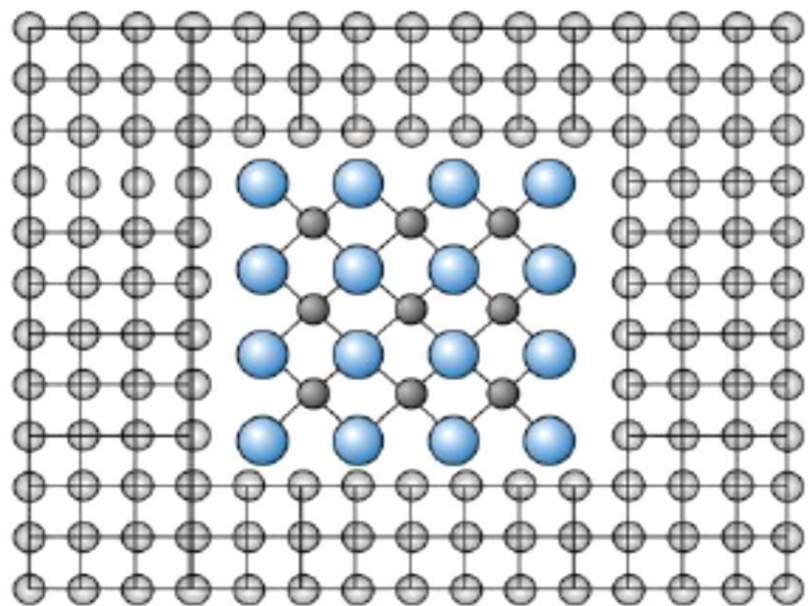
4º ESTÁGIO DO REVENIMENTO

- 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**.

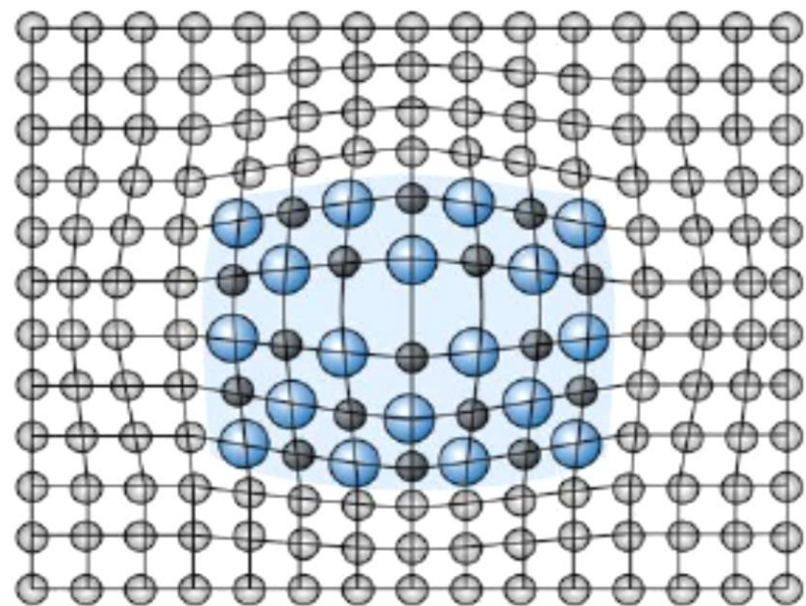
Composição do aço H13

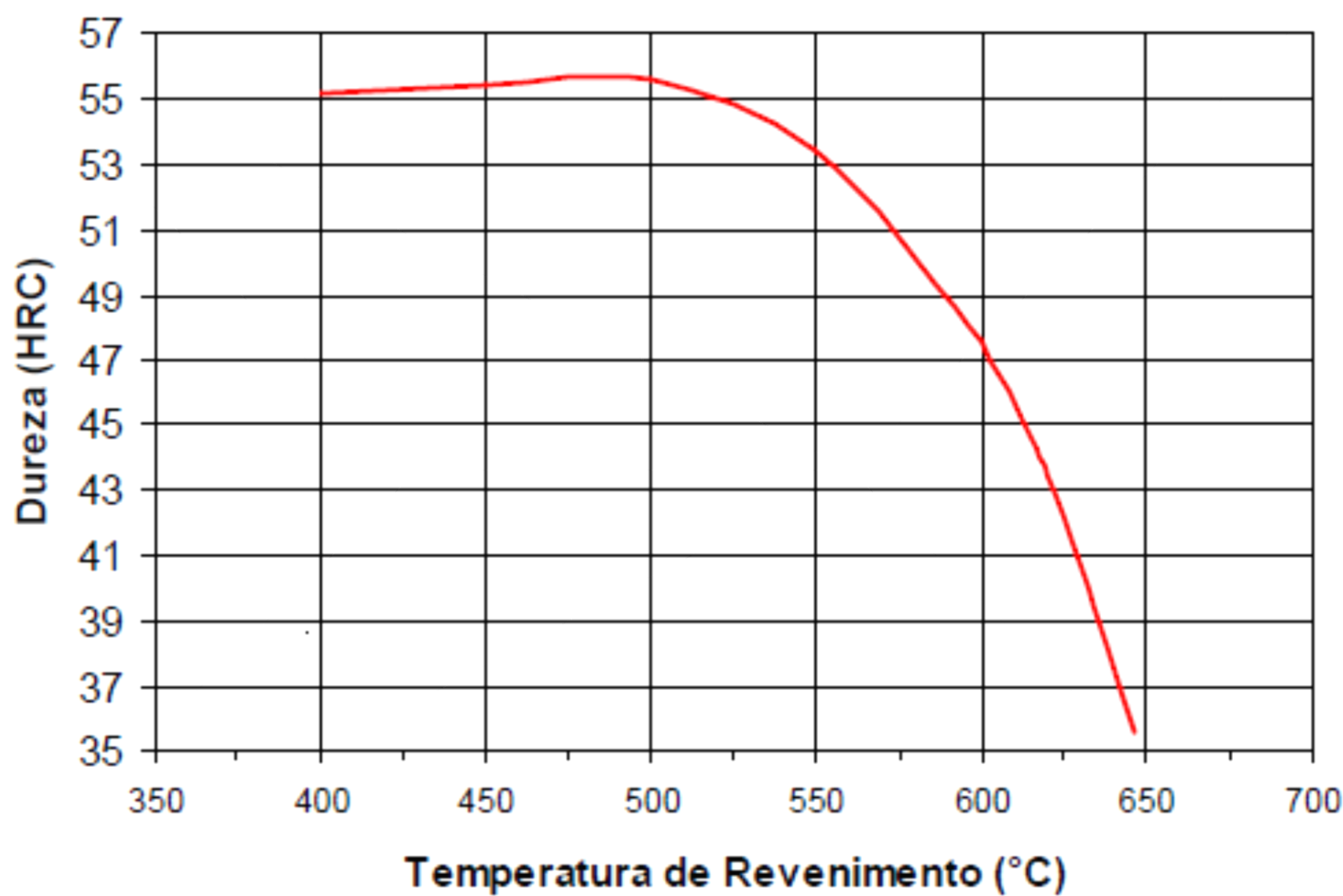
C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0,40	1,00	0,35	5,20	1,50	0,90

INCOERENTES



COERENTES





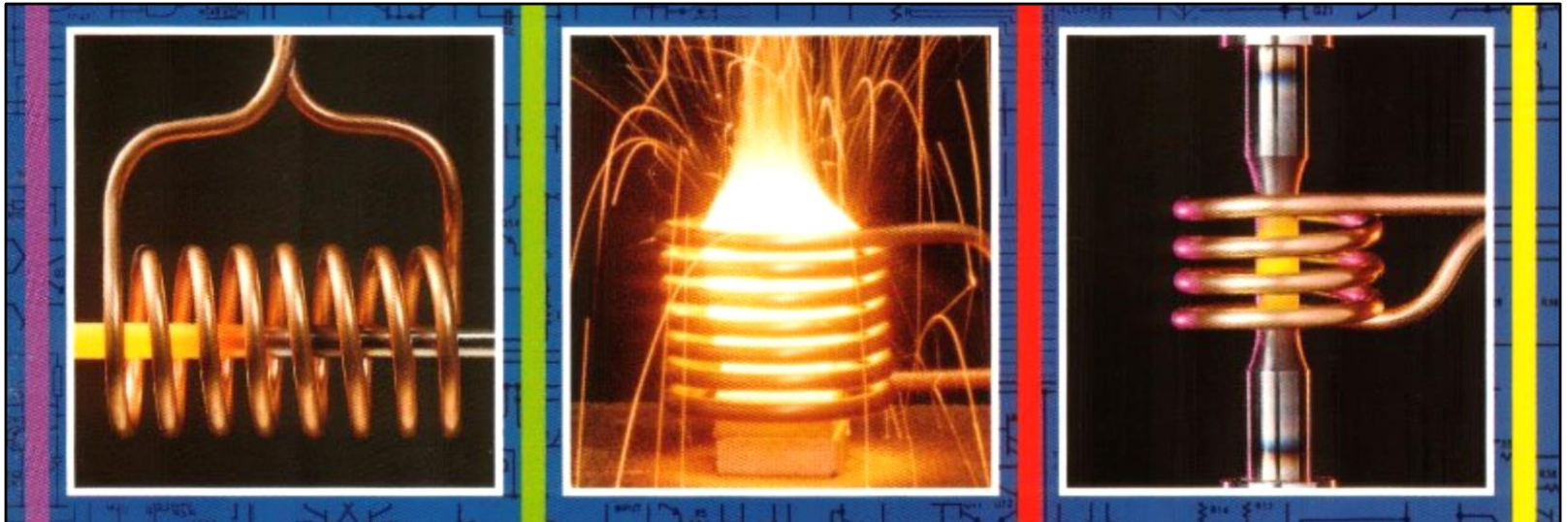
Curva obtida após tratamento térmico em corpos de prova de 20 x 20 mm².

**FRAGILIZAÇÃO AO
REVENIDO (REVERSÍVEL)**

X

**FRAGILIZAÇÃO DA
MARTENSITA REVENIDA**

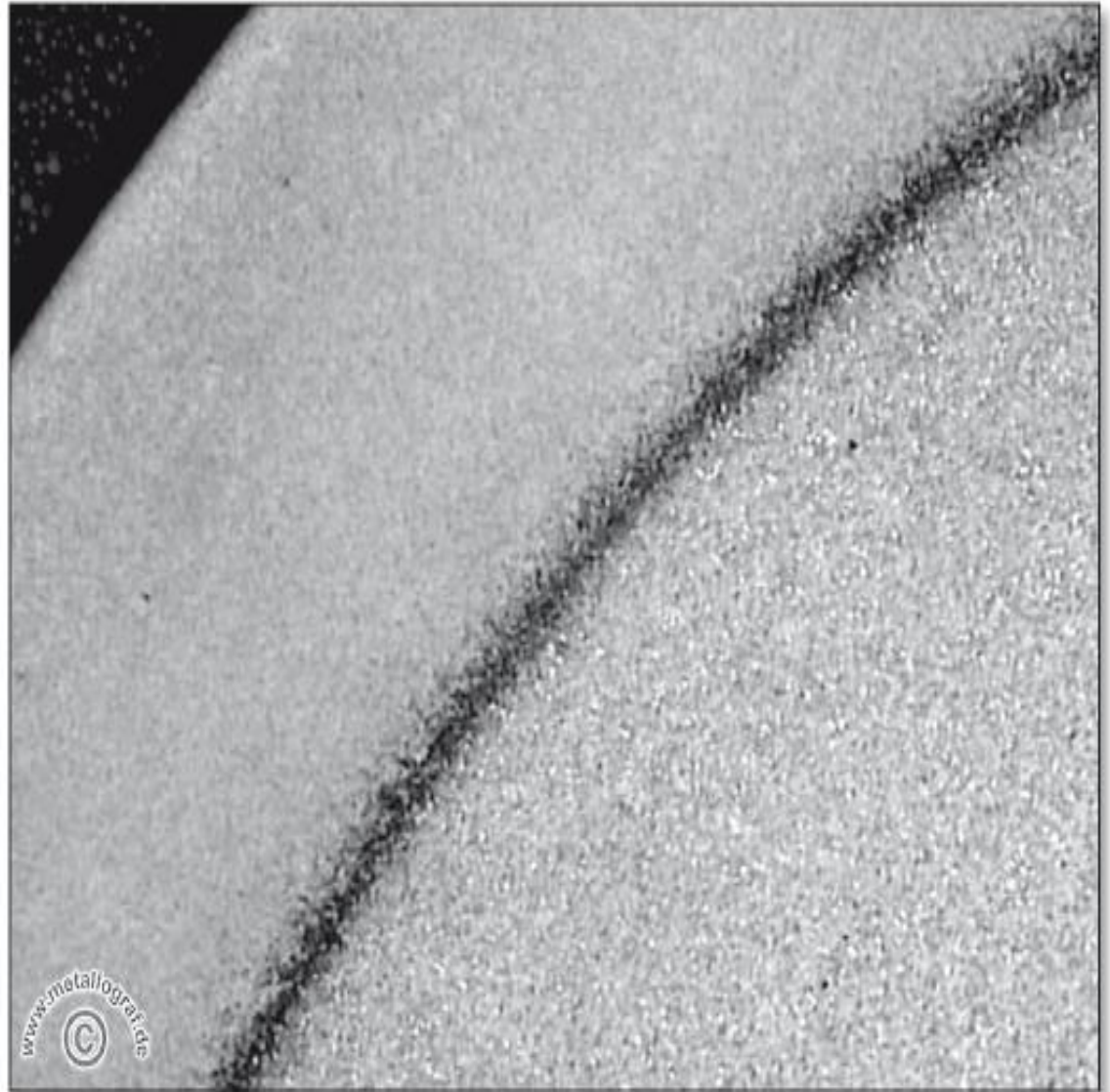
TÊMPERA POR INDUÇÃO



TÊMPERA SUPERFICIAL

Figura 10.68

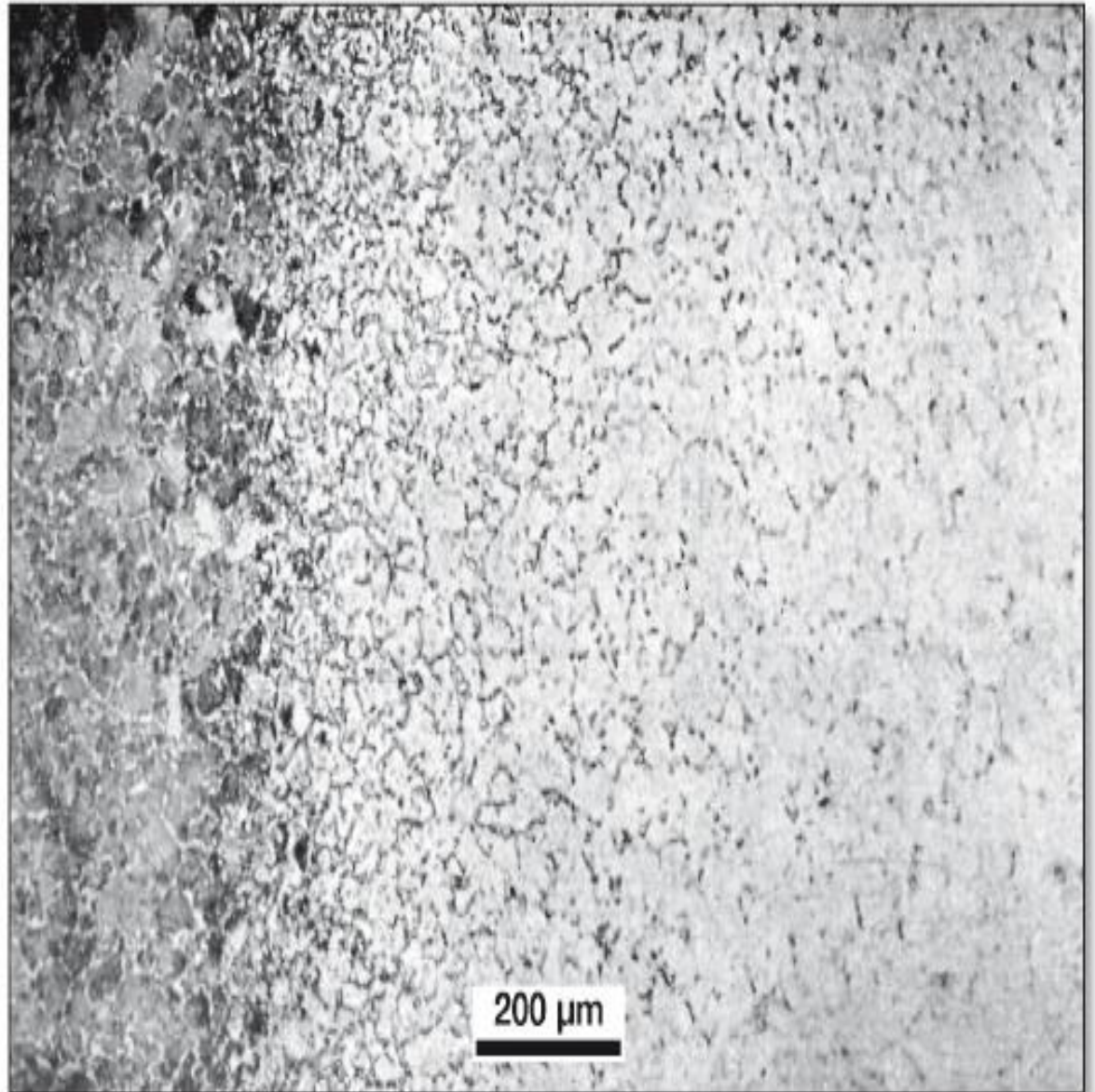
Peça de rolamento em aço 100Cr6 endurecida superficialmente por tratamento localizado. A camada endurecida tem 2,25 mm de espessura. O núcleo está esferoidizado. Ataque: Nital 3%. Cortesia D. Lober [22].



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