

SMM 0193– ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS I

TÊMPERA E REVENIMENTO

Prof.Dr. José Benedito Marcomini

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.

Prof.Dr. José Benedito Marcomini

Tratamentos Térmicos

Recozimento Total ou Pleno

Resfriamento Lento (dentro do forno)

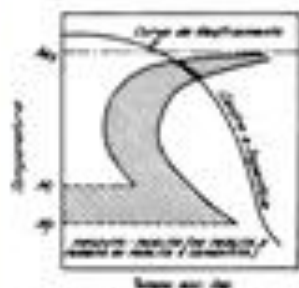
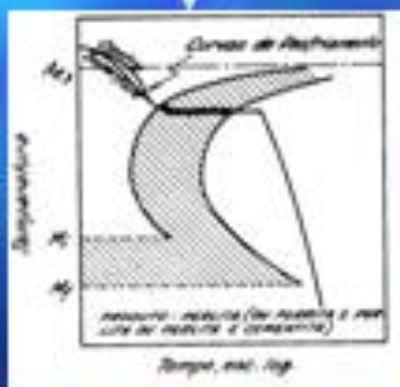


Fig. 44 — Diagrama representativo de transformação para recozimento pleno.

Recozimento Isotérmico



Normalização

Resfriamento ao ar

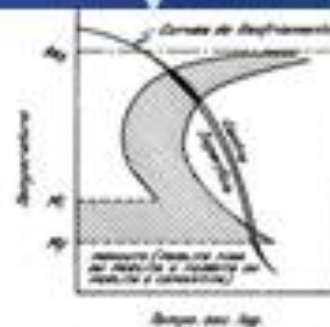


Fig. 47 — Diagrama representativo de transformação para normalização.

Tempera e Revenido

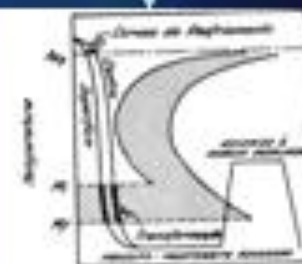


Fig. 48 — Diagrama representativo de transformação para tempera e revenido.

TÊMPERA E REVENIMENTO

(Costa e Silva & Mei)

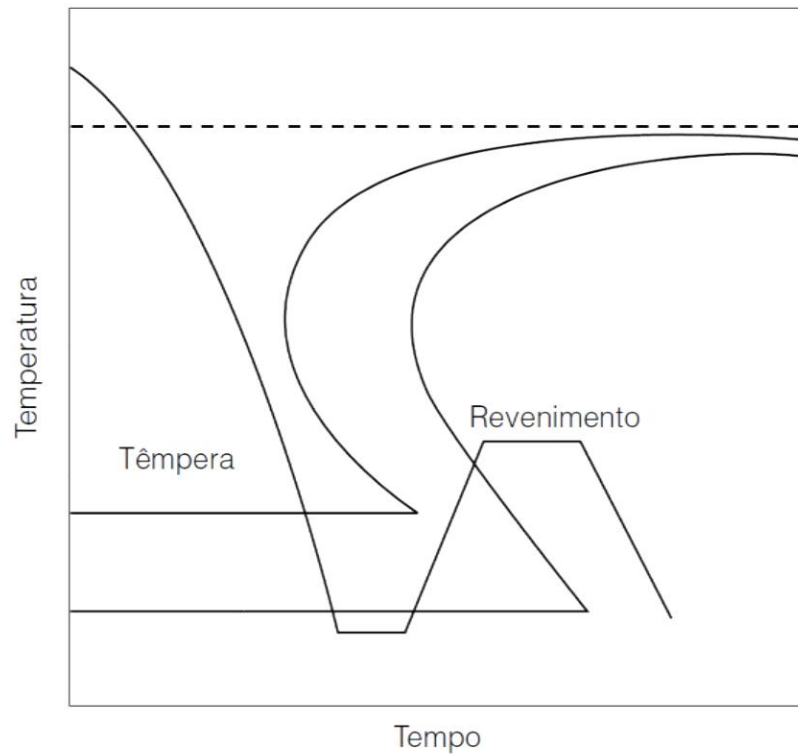
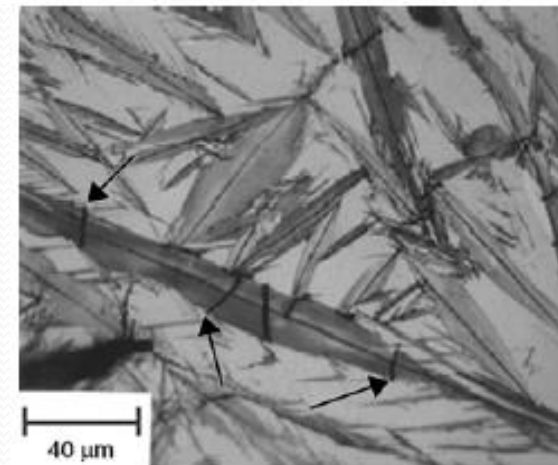
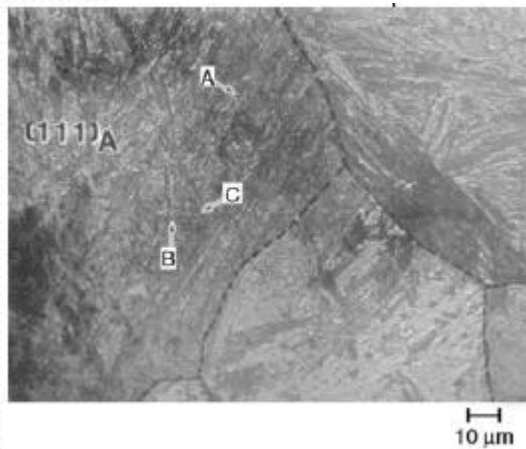
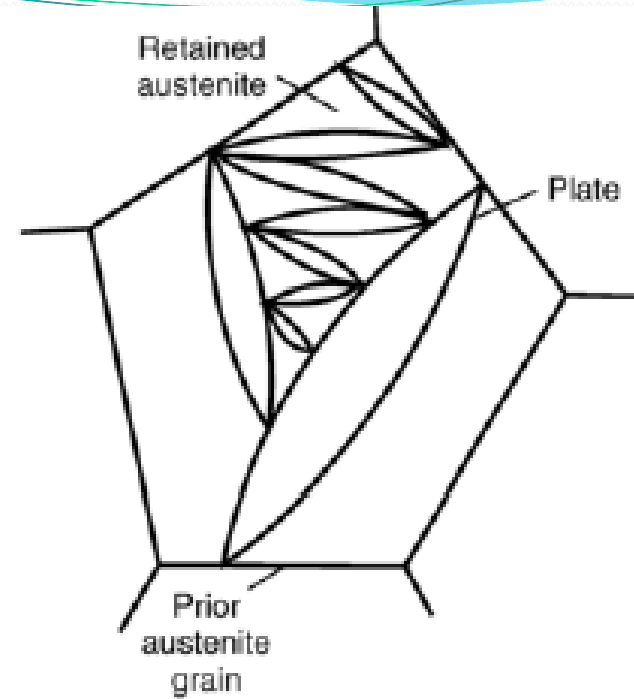
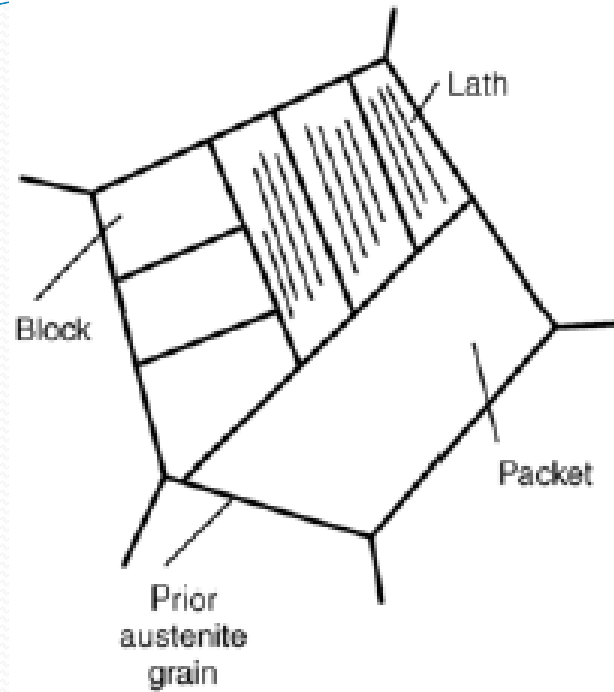


Figura 3.34 Ciclo de têmpera + revenimento.

Prof.Dr. José Benedito Marcomini

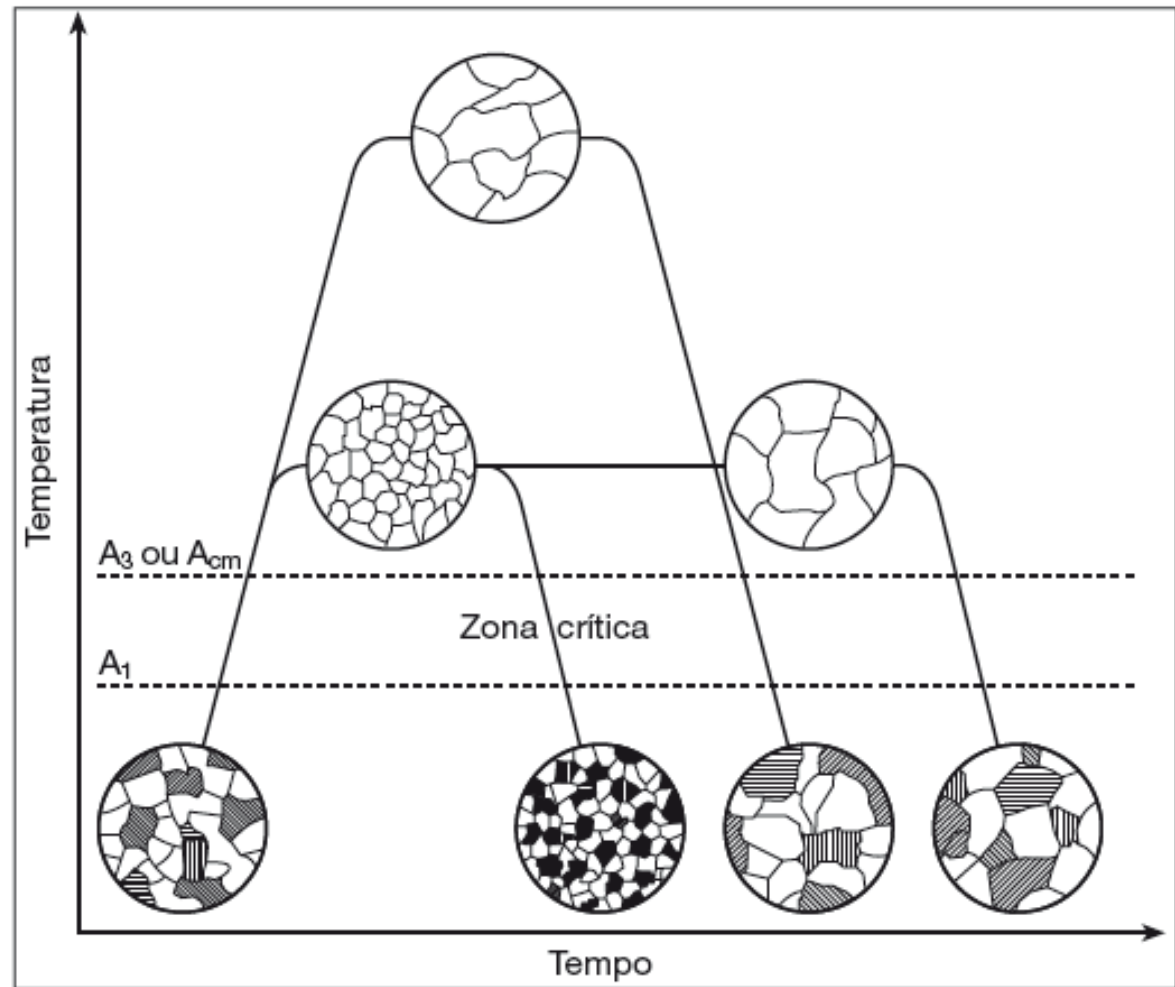
OBJETIVO DA TÊMPERA: MARTENSITA



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

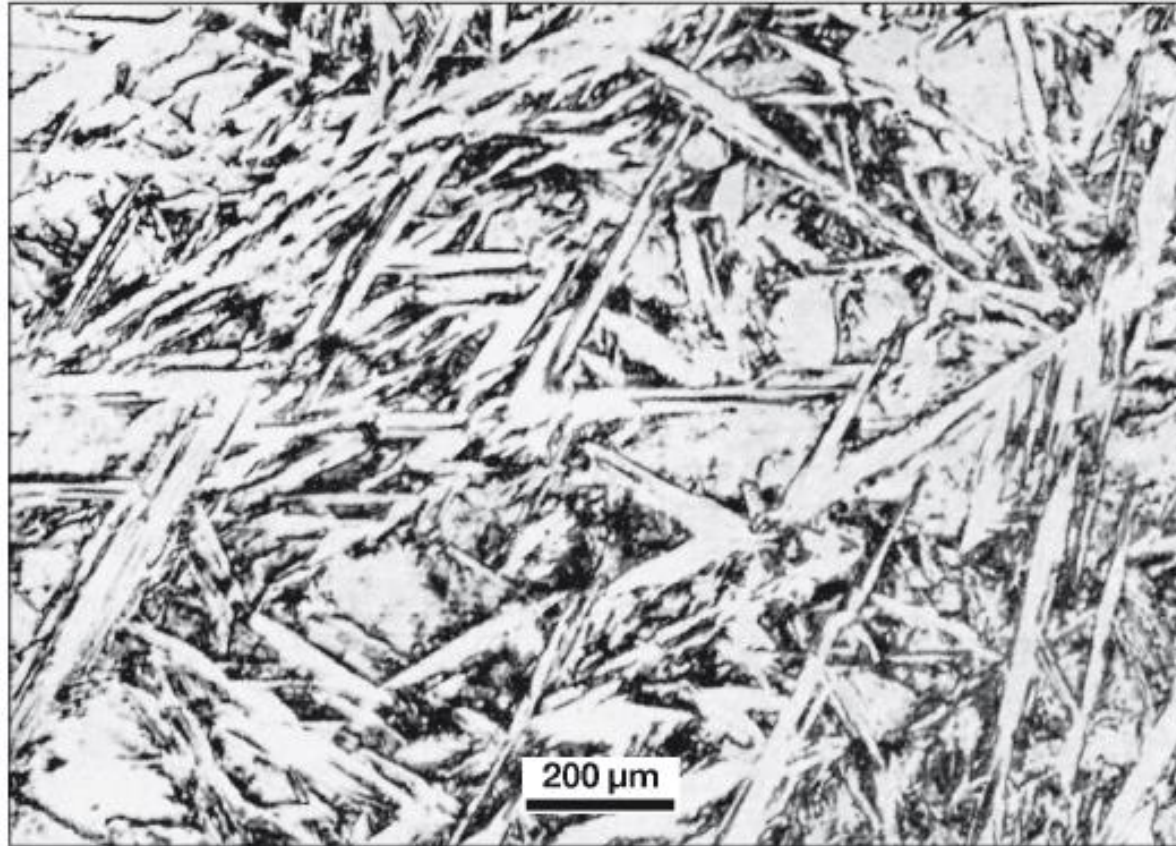


Figura 10.55

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

CRESCIMENTO EXCESSIVO DE GRÃO AUSTENÍTICO

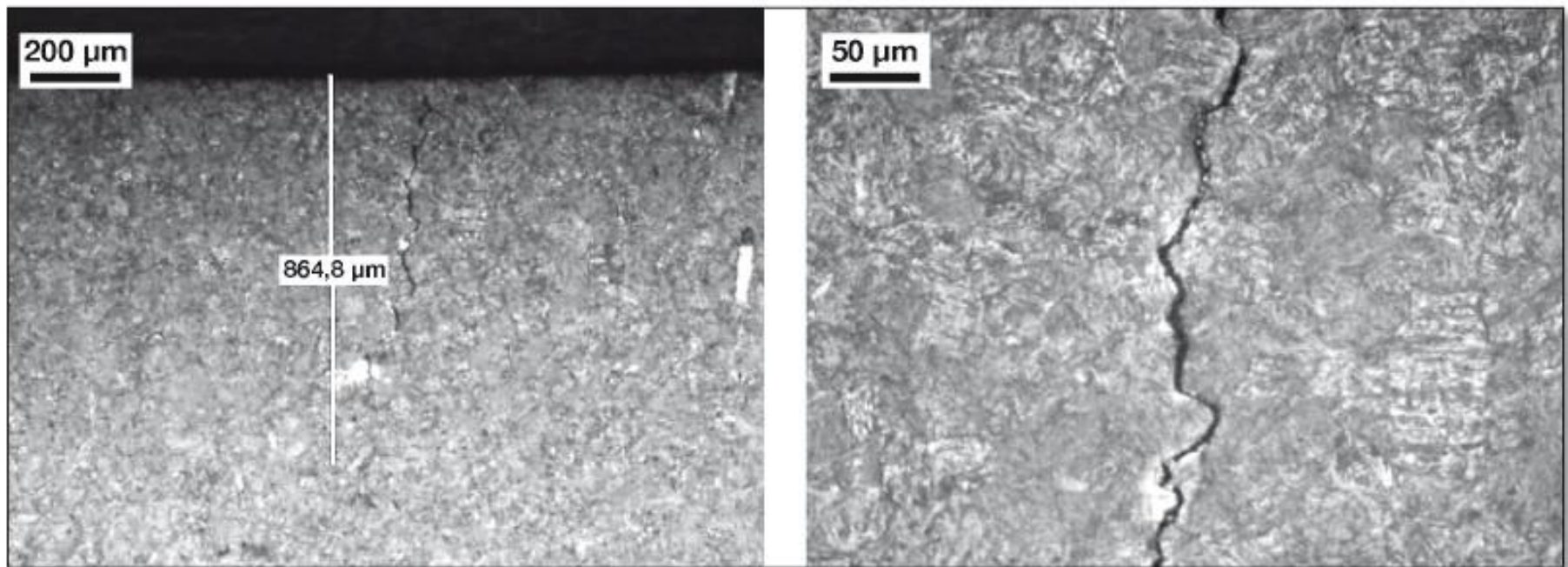


Figura 10.62

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.

o Marcomini

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.

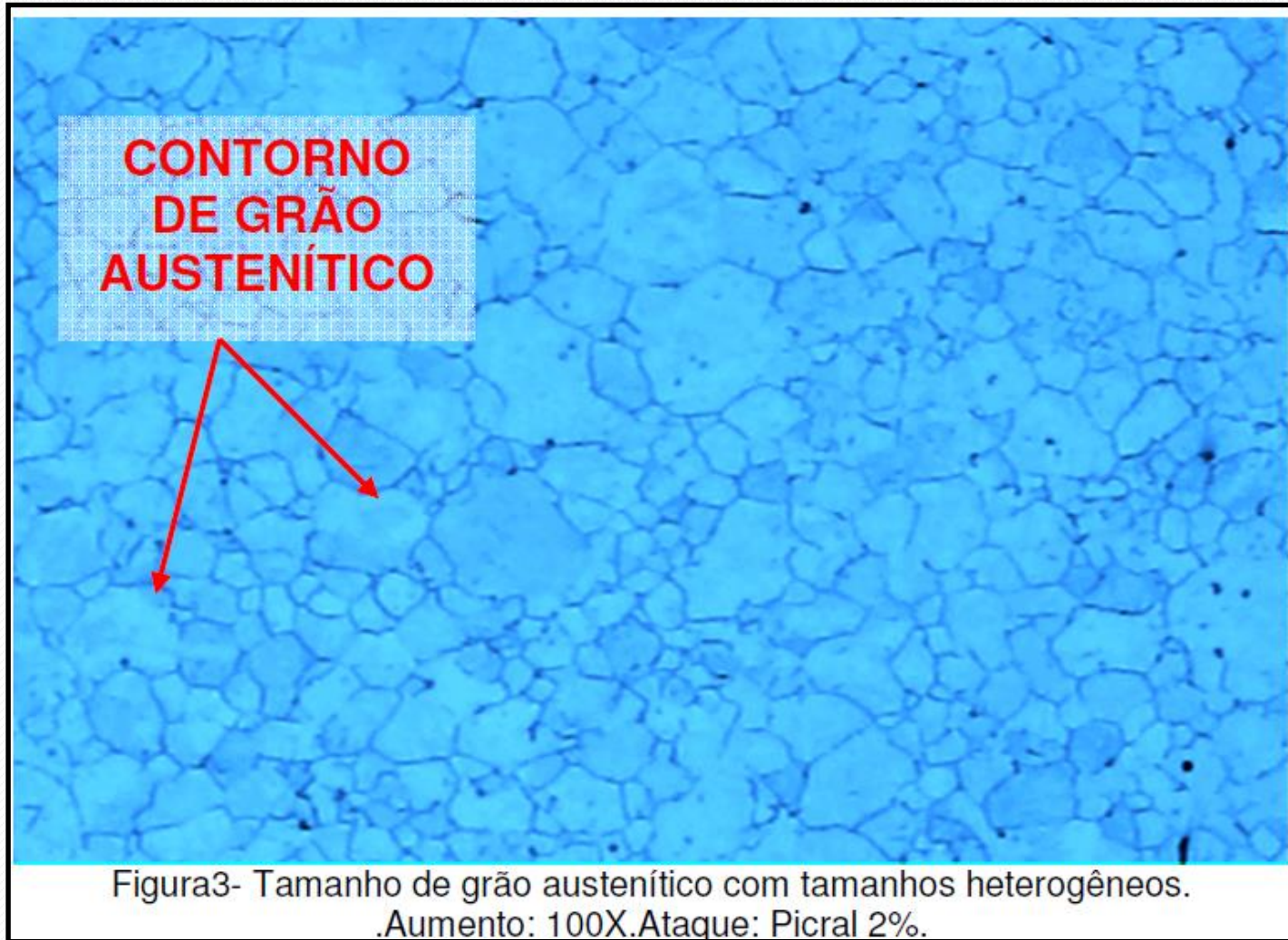
REVELAÇÃO DE TAMANHO DE GRÃO AUSTENÍTICO

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 hipó- 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



Prof.Dr. José Benedito Marcomini

REVELAÇÃO DE TAMANHO DE GRÃO AUSTENÍTICO

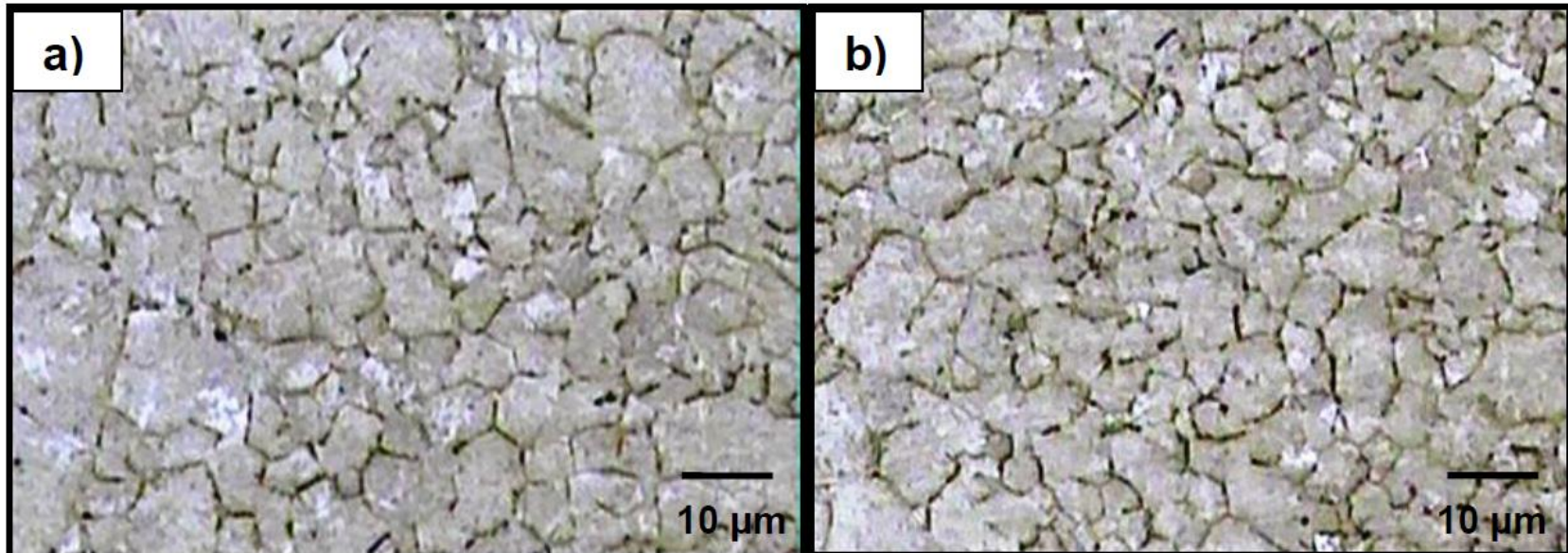


Figura 4.43 - Tamanho de grão austenítico para as amostras austenitizadas em 865°C durante 1 hora. a) 52100 MOD b) 52100 comercial. Tamanho de grão 9-ASTM E 112

TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

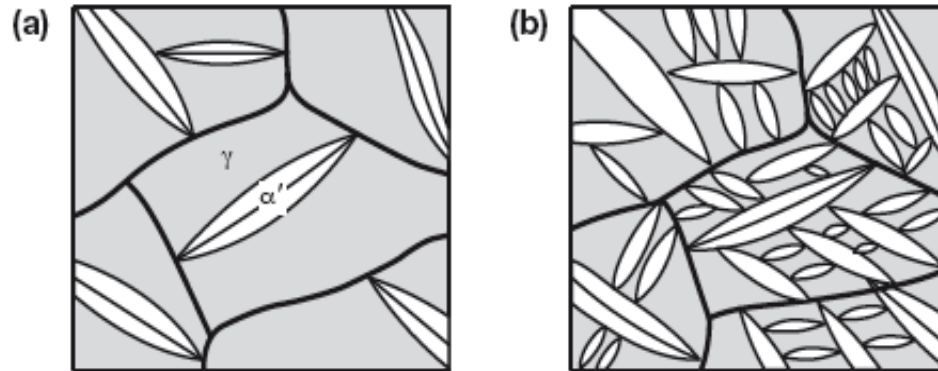


Figura 9.11

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

Prof.Dr. José Benedito Marcomini

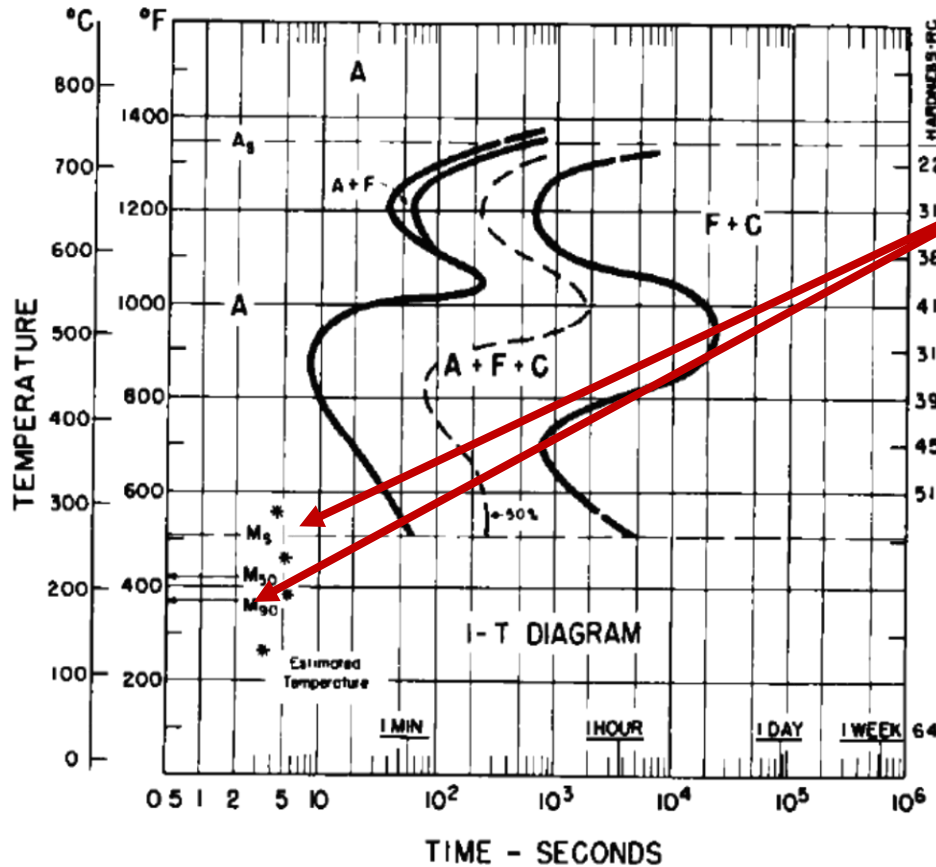
TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

- 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;
- 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)**



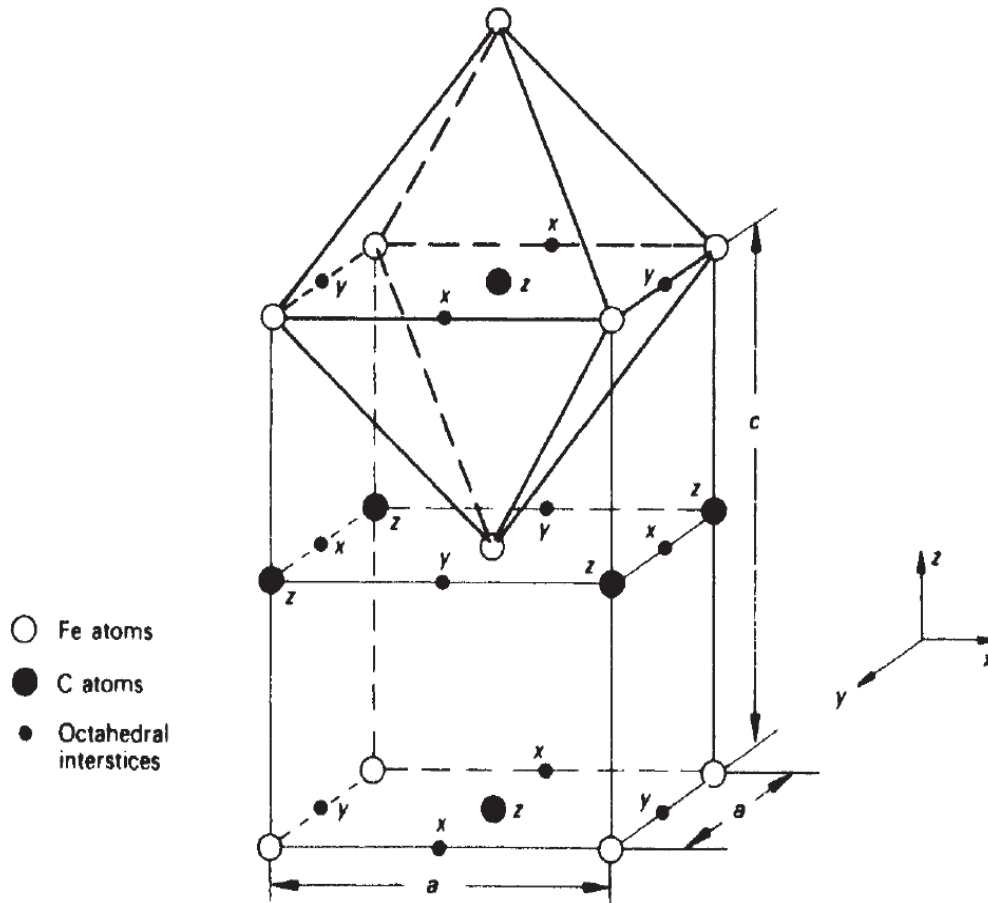
Ms: “start”
Mf: “final”
Na verdade “M₉₀”

Atlas of Time-Temperature Diagrams for Irons and Steels Copyright© ASM International® 1991

Prof.Dr. José Benedito Marcomini

TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

TETRAGONALIDADE DA MARTENSITA



- “Zener Ordering”: átomos de carbono ocupam locais preferenciais nos quais existe simetria, em interstícios octaédricos;
- CFC: x,y e z do octaedro são simétricos;
- CCC: z é achatado;
- Transformação sem difusão, o C não sai do eixo Z e acaba deformando mais este eixo: TETRAGONAL;

(Honeycombe)

Prof.Dr. José Benedito Marcomini

TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

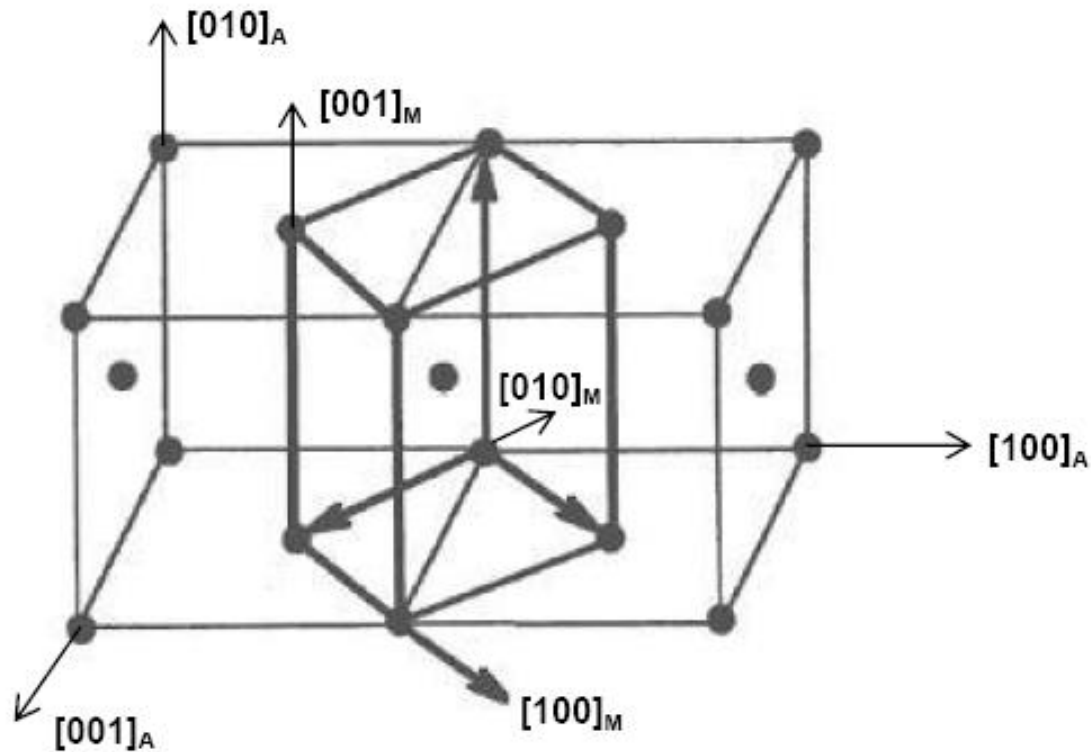


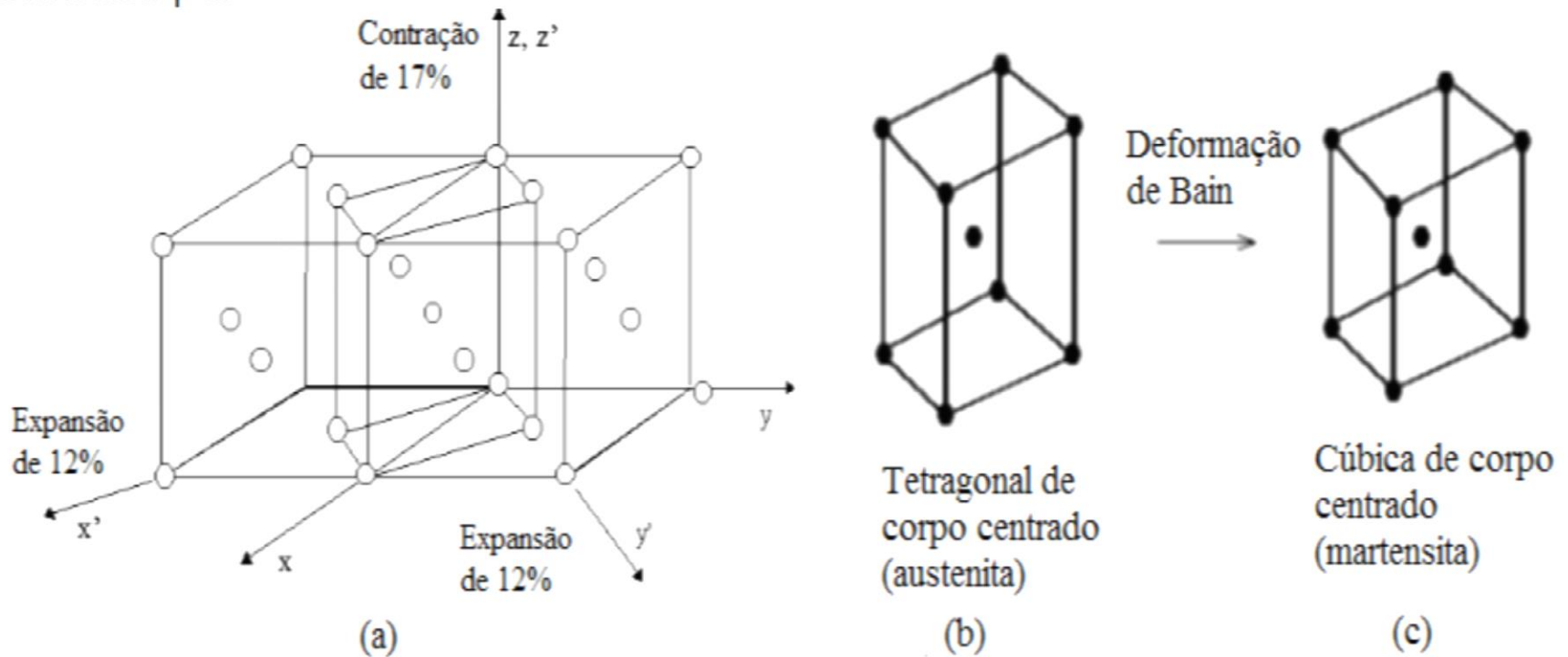
FIG. 2.1. Representação esquemática da correspondência entre as redes cfc e tcc. (BHADESHIA, 2001)

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

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.

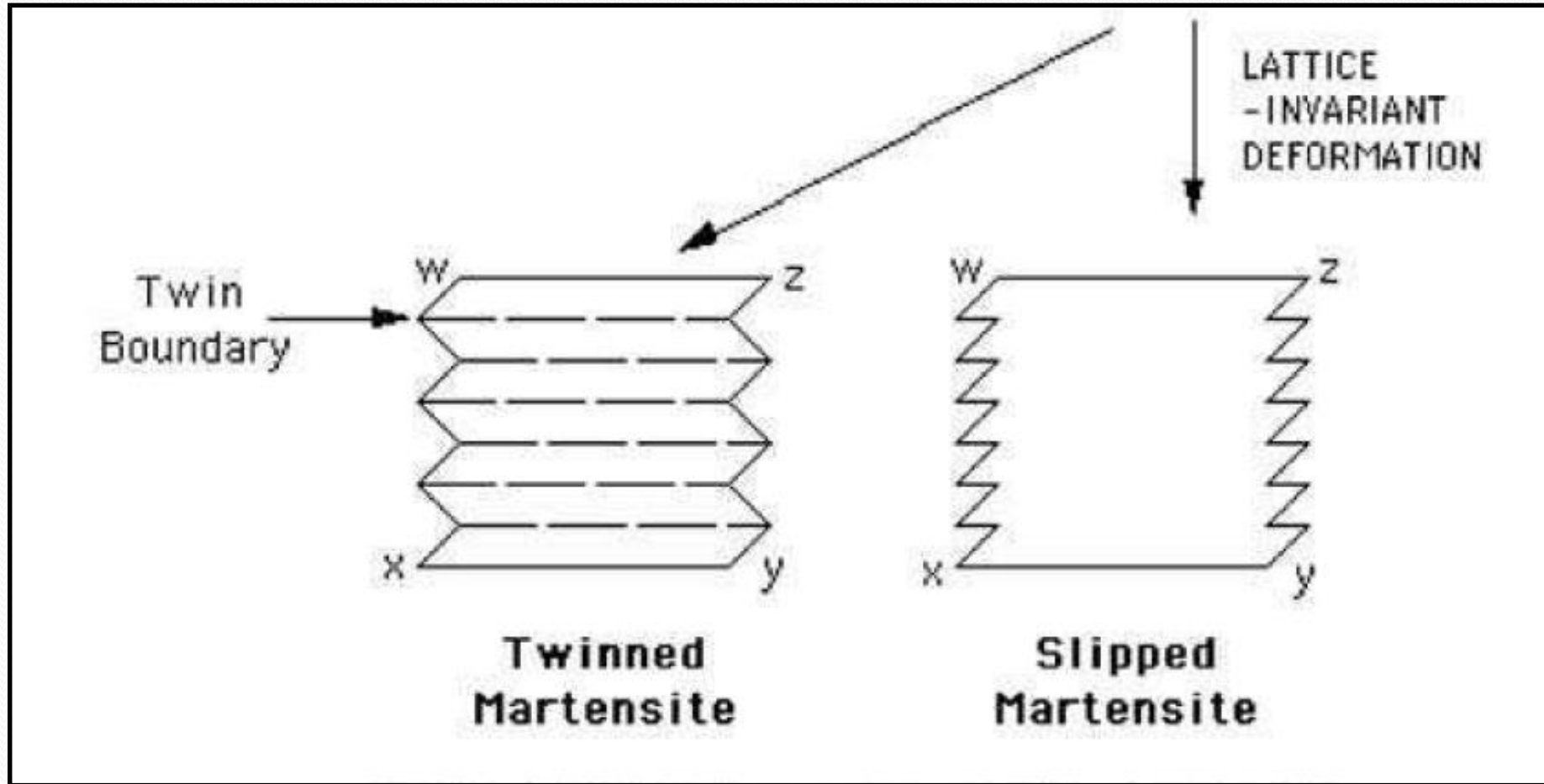
Figura 29 - Representação esquemática do mecanismo proposto por Bain para a transformação martensítica γ - α .



(TESE DOUTORADO: KARL ZILNYK)

Prof.Dr. José Benedito Marcomini

TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

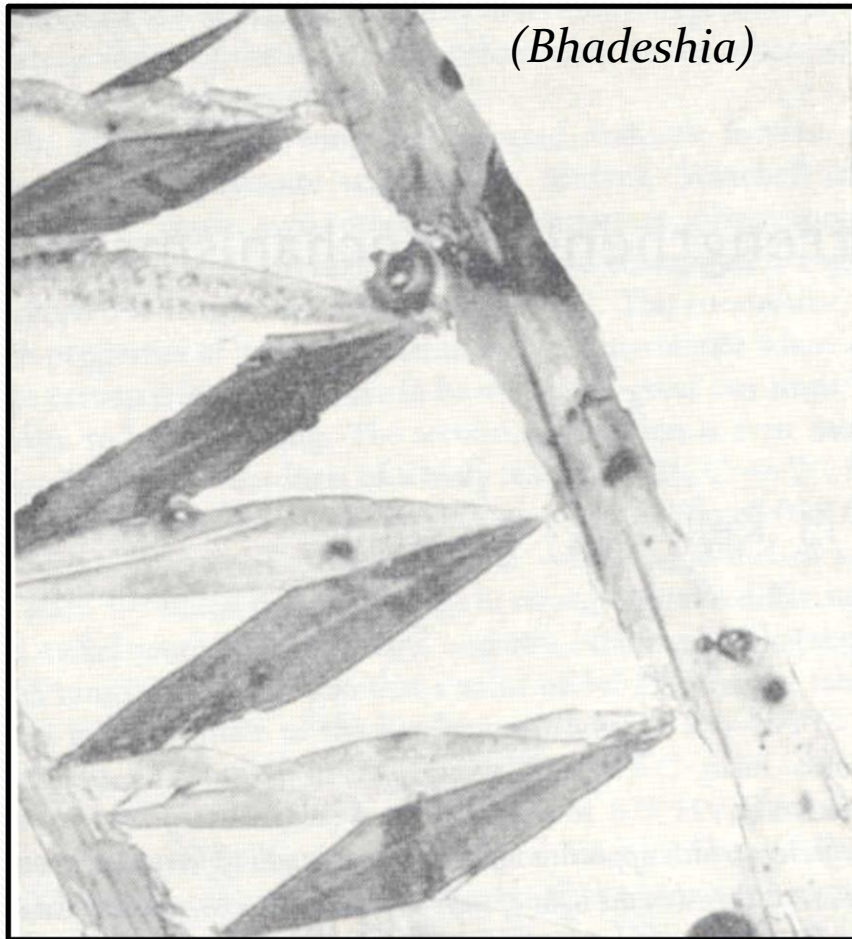


(Honeycombe)

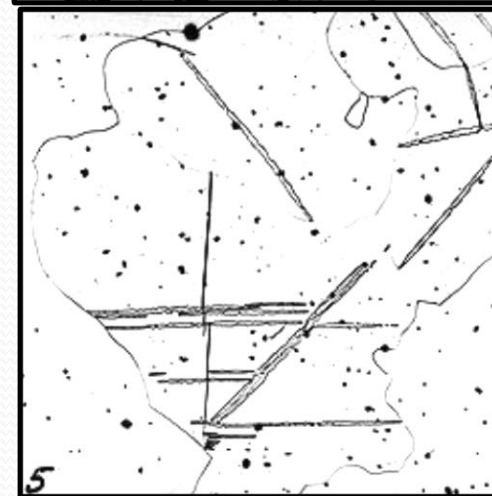
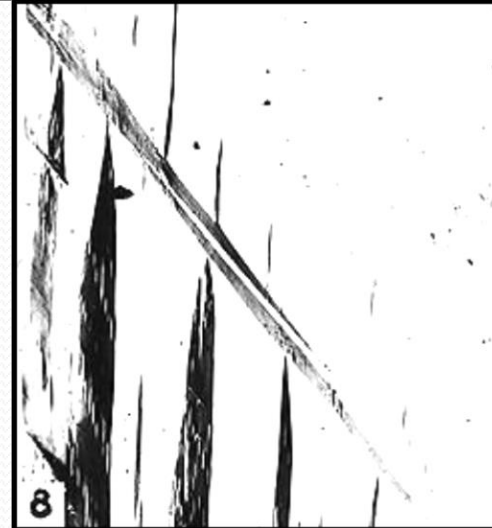
Prof.Dr. José Benedito Marcomini

TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

MACLAS MECÂNICAS



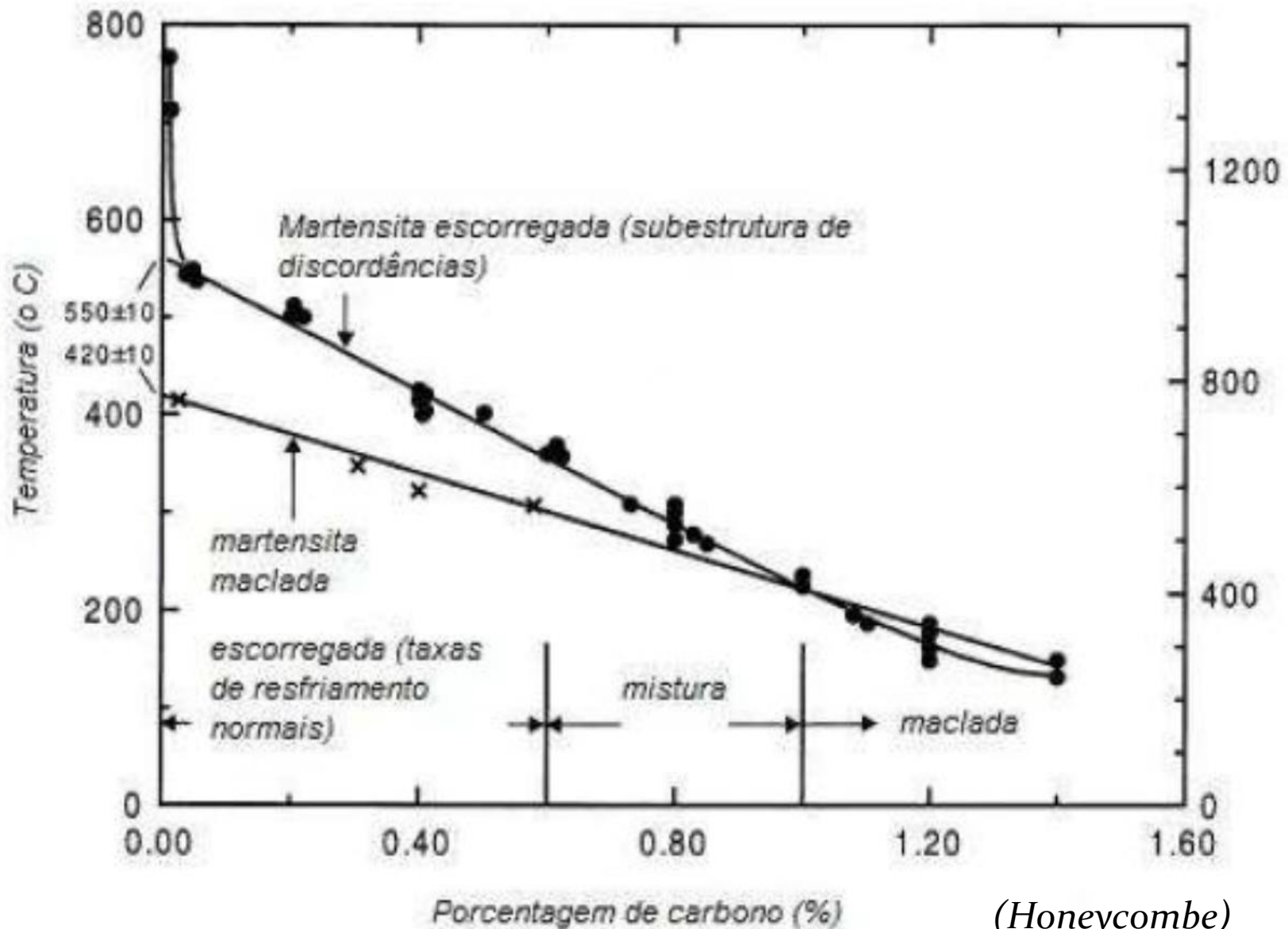
MARTENSITA MACLADA



<http://www.met.kth.se/iafreeatlas3a-e.html>

Prof.Dr. José Benedito Marcomini

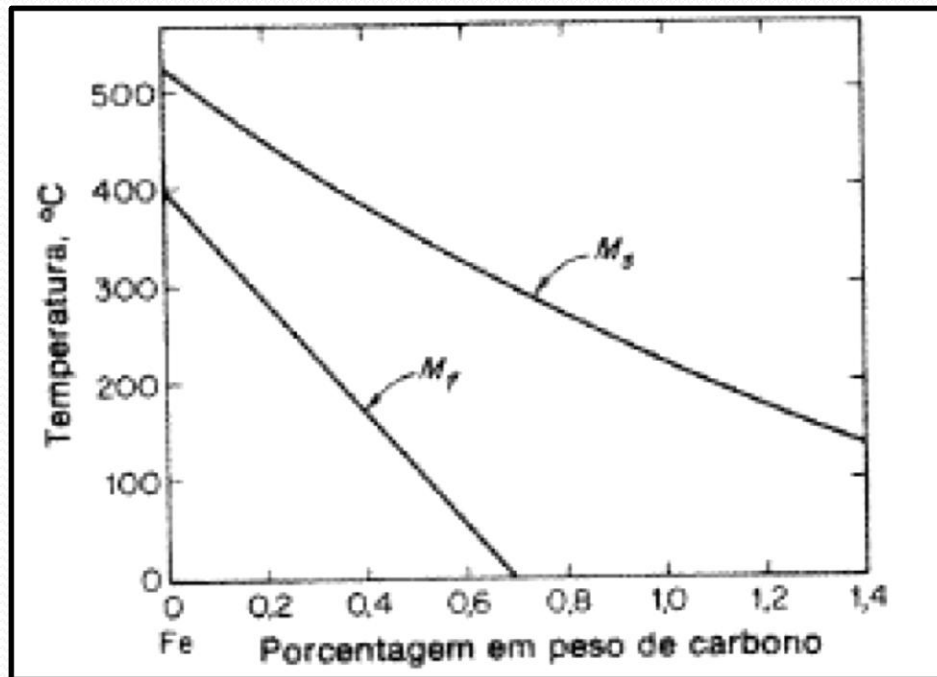
TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA



(Honeycombe)

TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

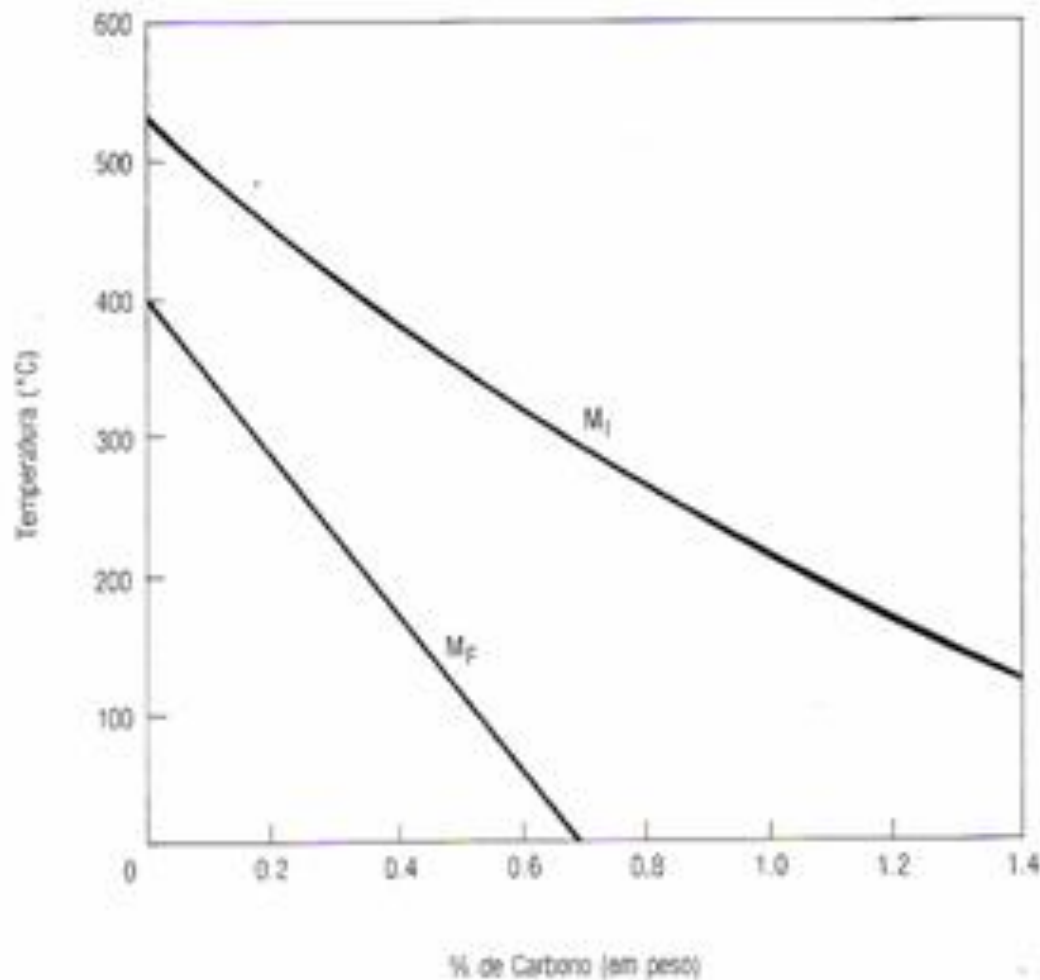
- Como ocorre por cisalhamento, as interfaces tem que ter mobilidade;
- Com aumento do teor de C: arraste das L.D. na interface, mais difícil se mover, abaixa M_s e M_f .



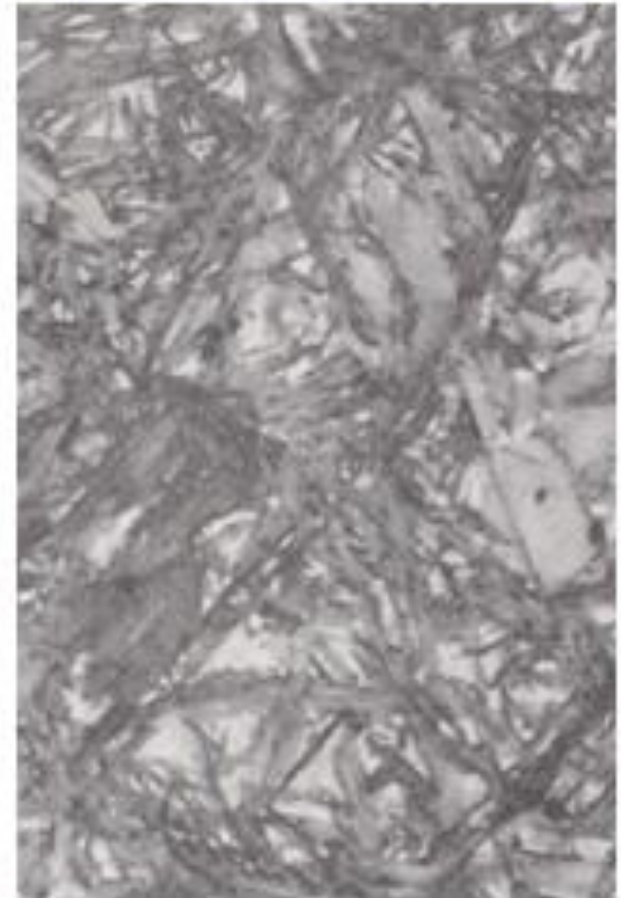
(Reed-Hill)

Prof.Dr. José Benedito Marcomini

INFLUÊNCIA DO CARBONO NO INÍCIO E FIM DE TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA



MARTENSITA + AUSTENITA RETIDA

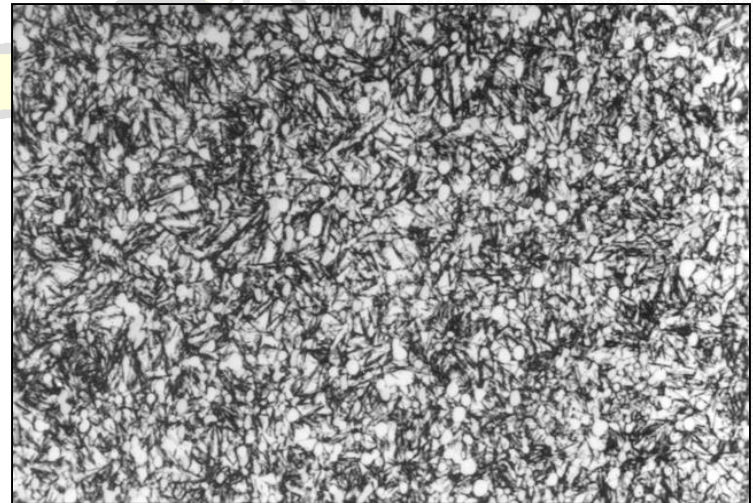


SUB ZERO

- Conciste 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 M_f ocorrendo a transformação da austenita retida em martensita.

Sub Zero

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



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

Tanque para tratamento
sub-zero

TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

(Colpaert)

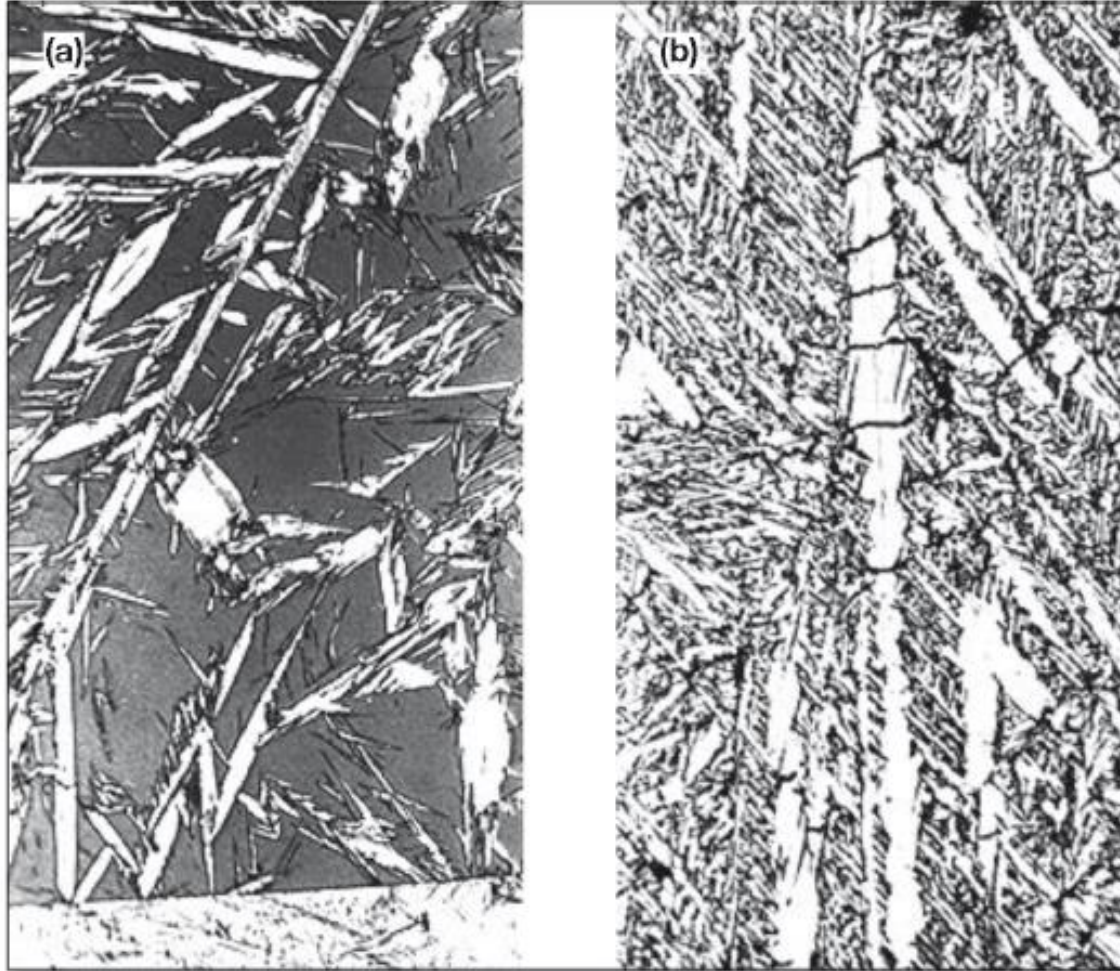


Figura 9.19

(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

Prof.Dr. José Benedito Marcomini

TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

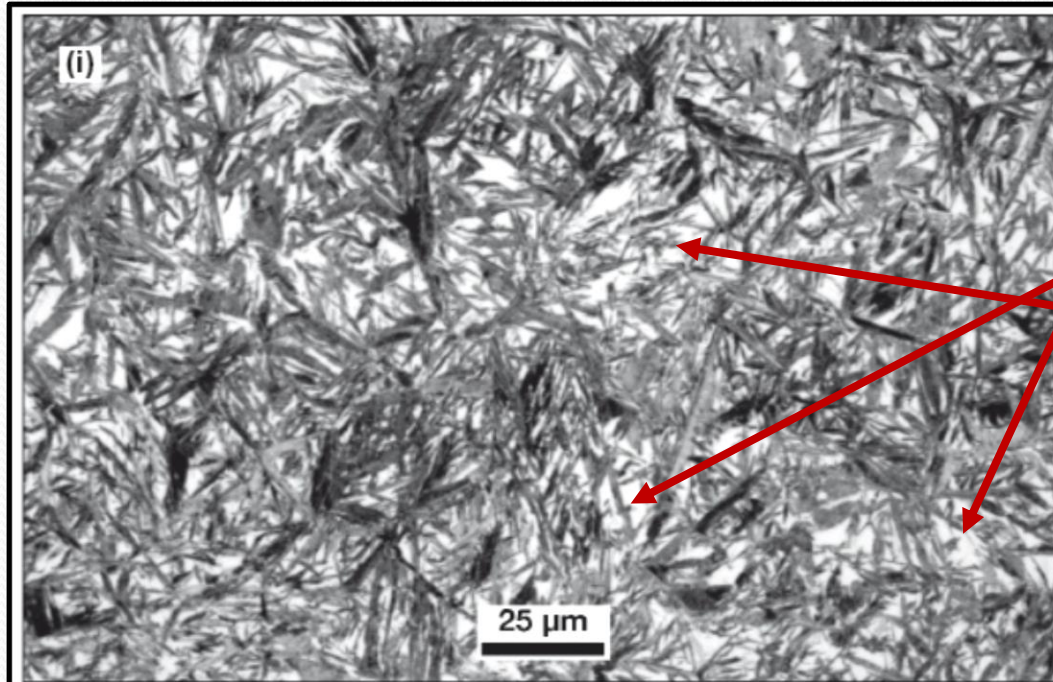


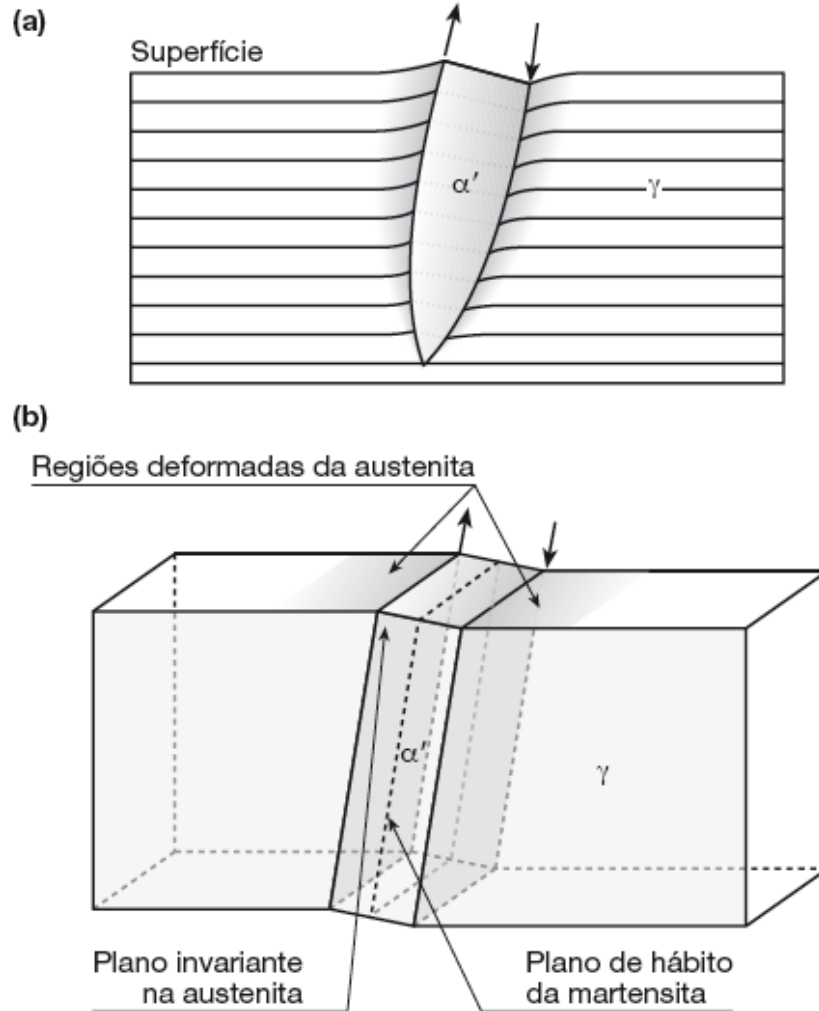
Figura 10.64(l) — AISI 43100 — 200°C

**AUSTENITA RETIDA
BRANCA
M.O.**

(Colpaert)

Prof.Dr. José Benedito Marcomini

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;
- ESTANHO-NAPOLEÃO;

PROF. DR. JOSÉ BENEDITO

(Colpaert)

TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

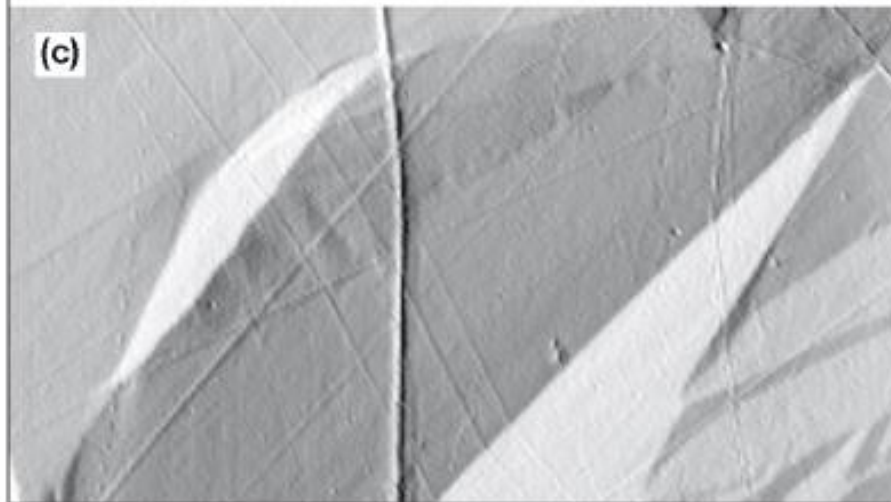
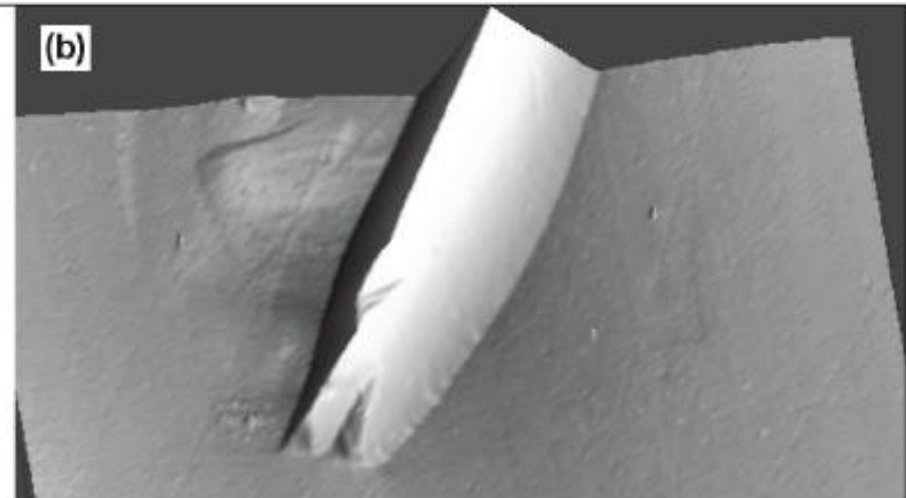
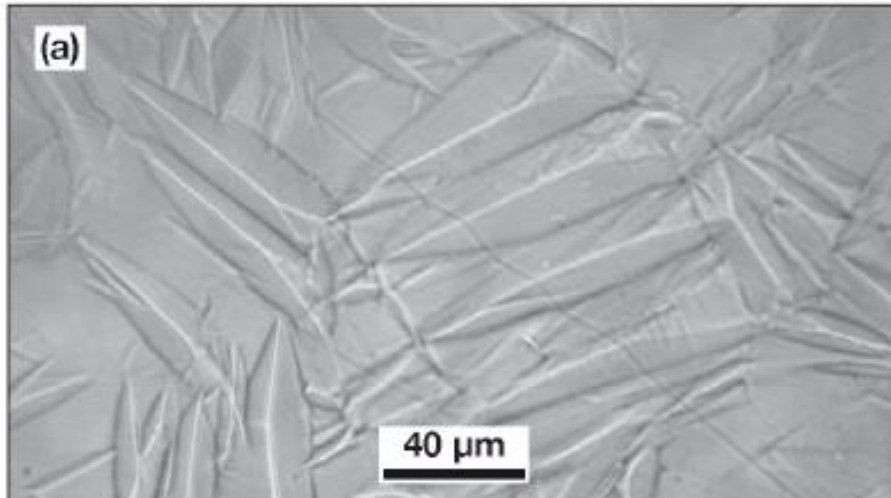


Figura 9.12

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)

TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA



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

(Diego Rocha-D.M.)

Prof.Dr. José Benedito Marcomini

TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

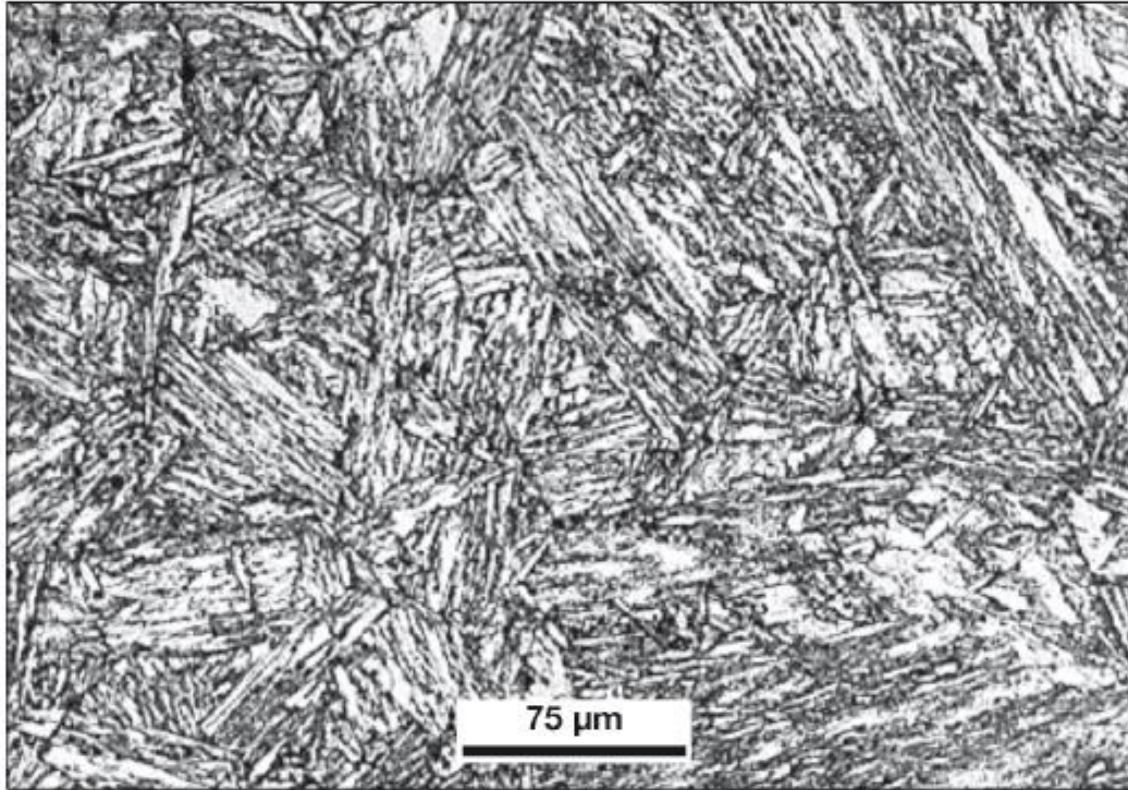


Figura 9.15

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)

Prof.Dr. José Benedito Marcomini

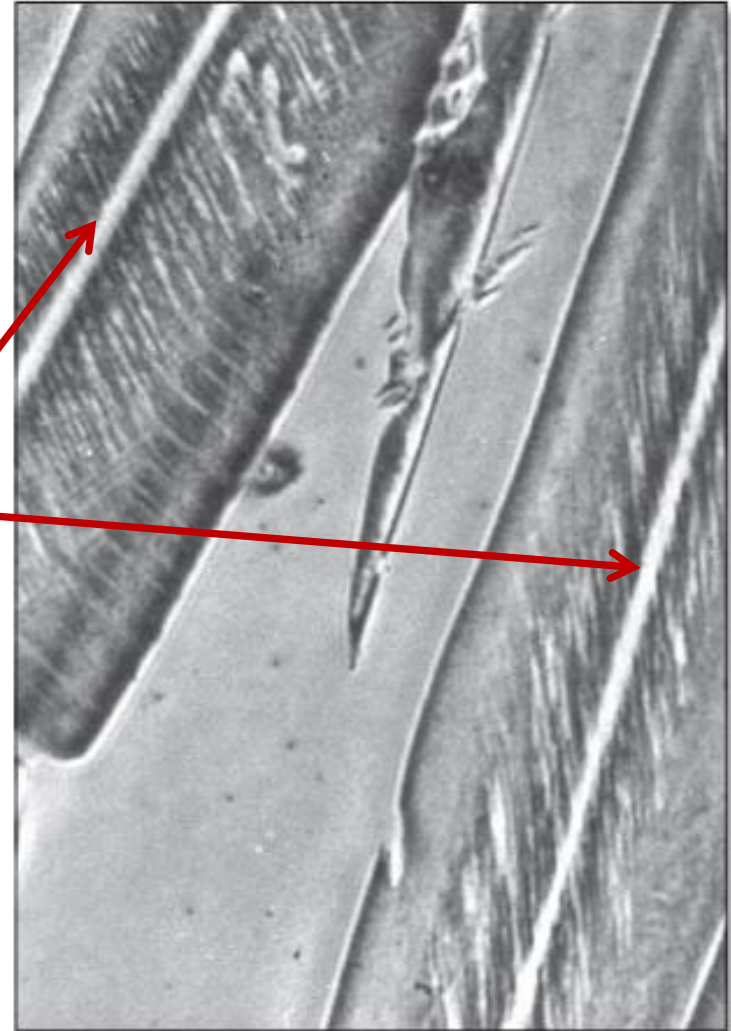
TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

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

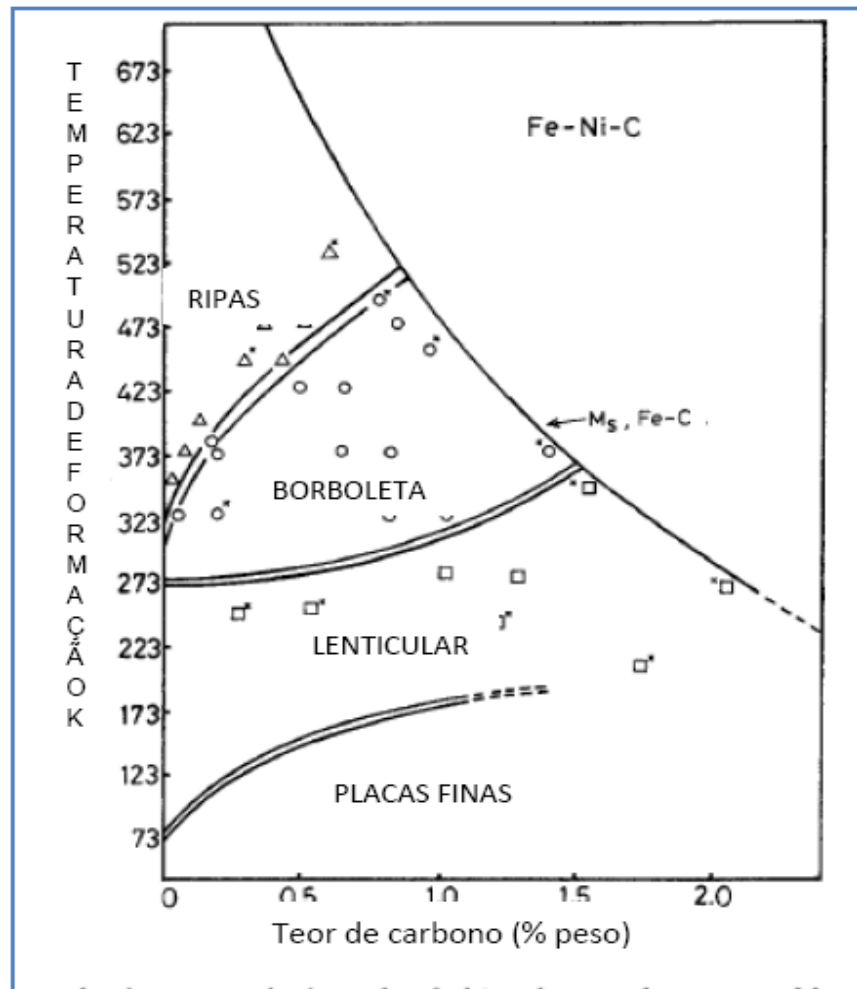


Figura 23 – Tipos de martensita em função do teor de carbono (UMEMOTO, YOSHITAKE, TAMURA, 1983).

TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

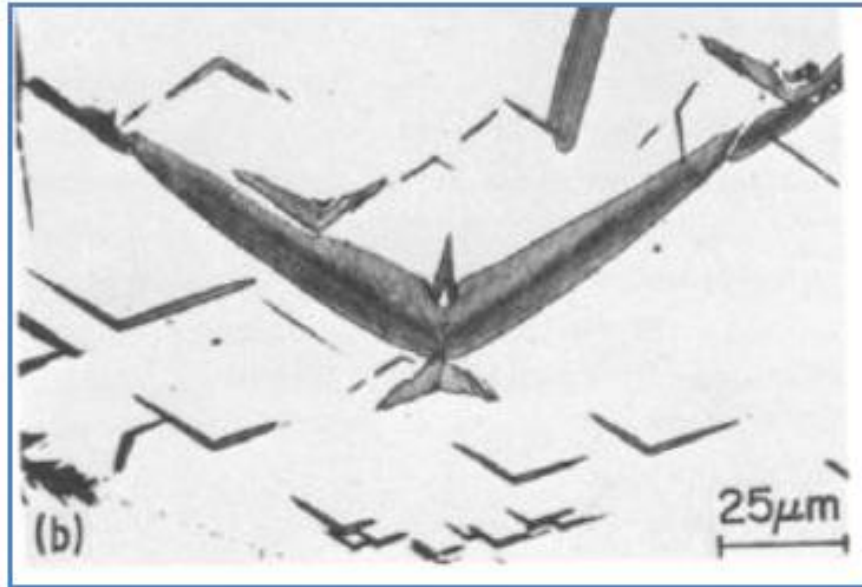


Figura 24 – Martensita em forma de borboleta para uma liga Fe-18Ni – 0,7Cr-0,50C resfriada a 263K (UMEMOTO, YOSHITAKE, TAMURA, 1983).

Prof.Dr. José Benedito Marcomini

TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

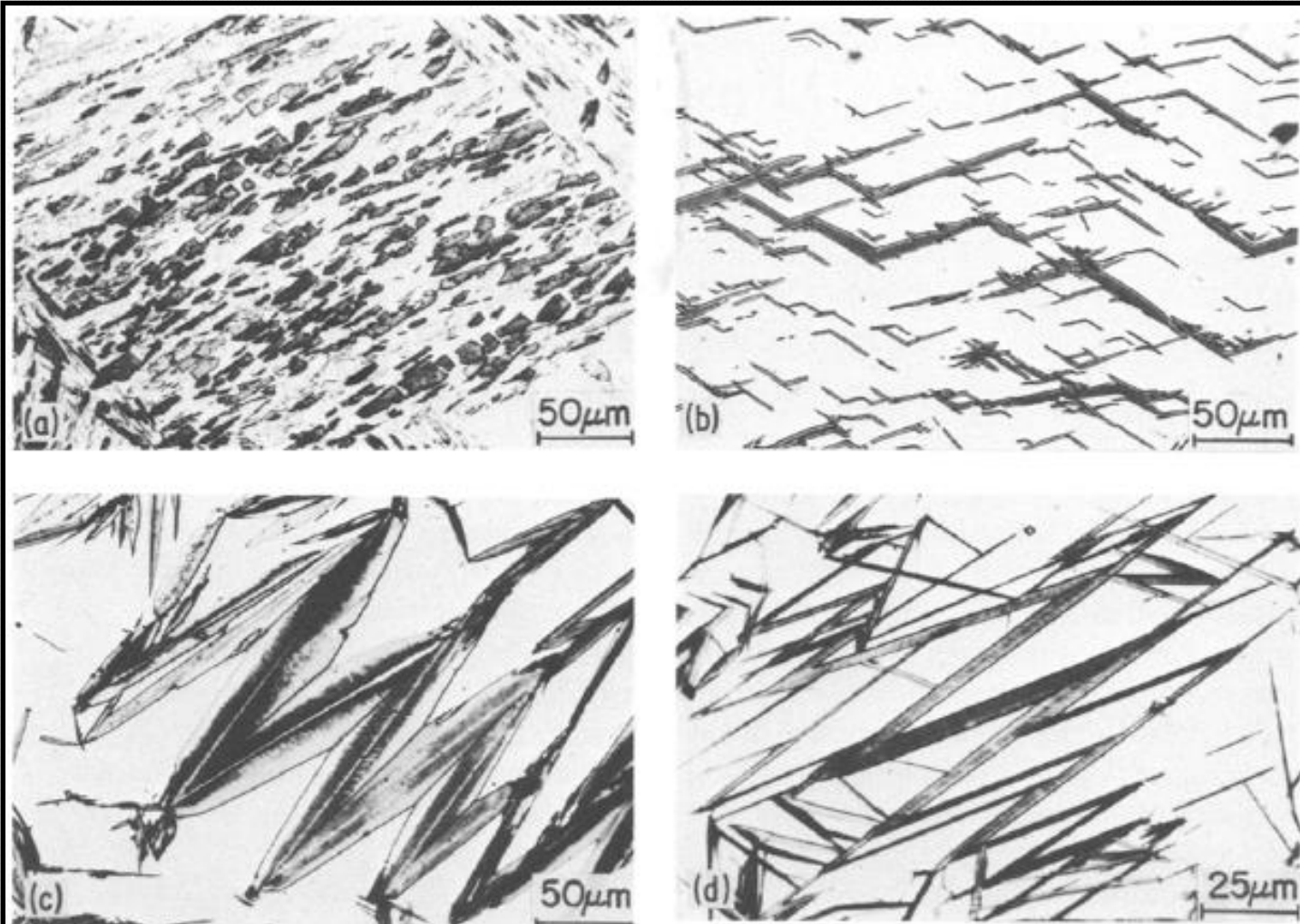


Figure 1 Optical micrographs showing different morphologies of martensites formed in Fe-Ni-C alloys. (a) Lath martensite in an Fe-15Ni-0.24C alloy. (b) Butterfly martensite in an Fe-20Ni-0.73C alloy. (c) Lenticular martensite in an Fe-31Ni-0.23C. (d) Thin plate martensite in an Fe-31Ni-0.29C.

TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

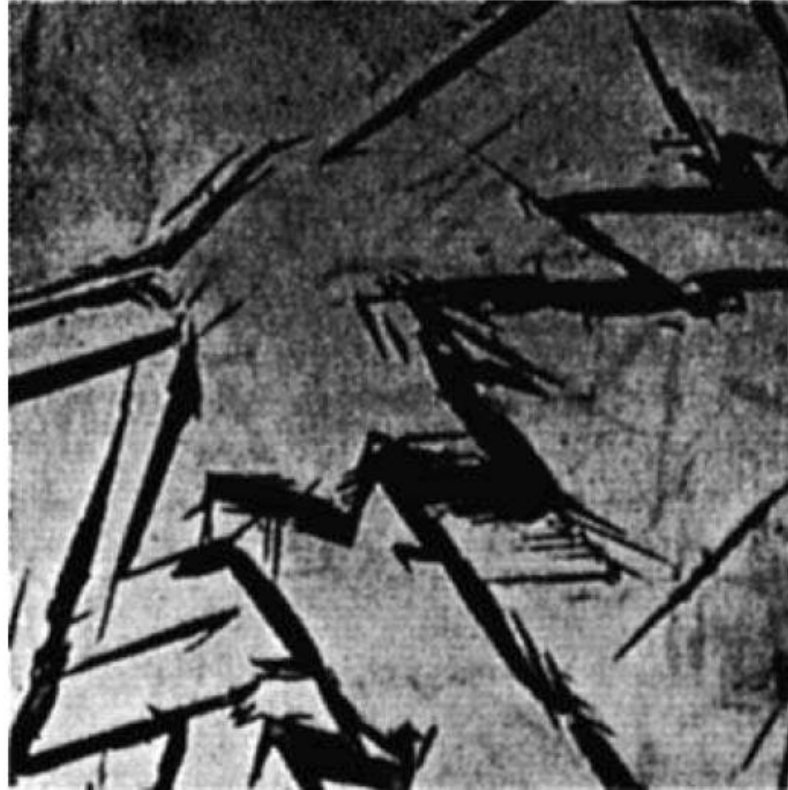


Fig. 5.11 Fe-1.8C-3Mn-2Si. Lenticular martensite illustrating the burst phenomenon. Optical micrograph, $\times 300$.

Prof.Dr. José Benedito Marcomini

TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

DETECÇÃO DA NUCLEAÇÃO DA MARTENSITA:

- DILATAÇÃO;
- EMISSÃO ACÚSTICA;
- EMISSÃO MAGNÉTICA.
- LIGAS DE ALTO Ni – “OUVE-SE” RUÍDO: “BURST”

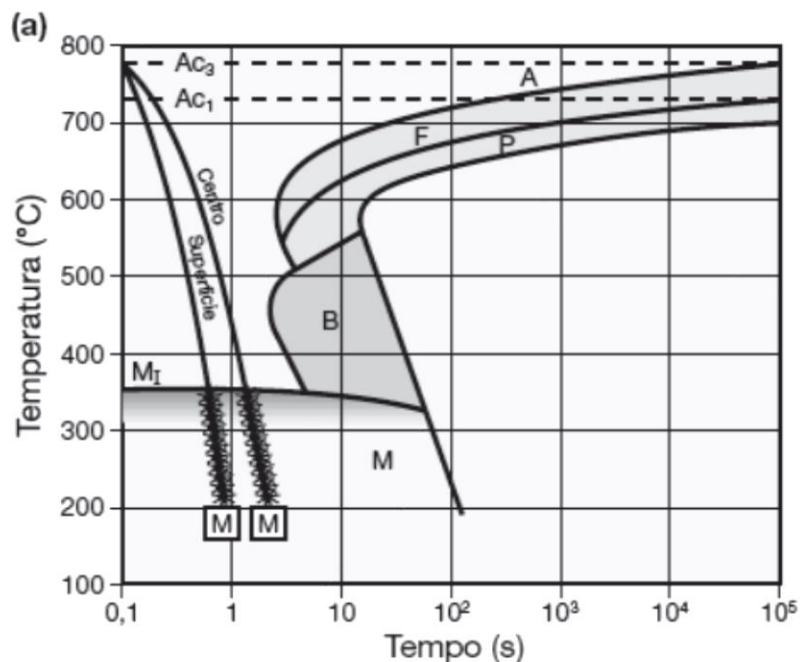
TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

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

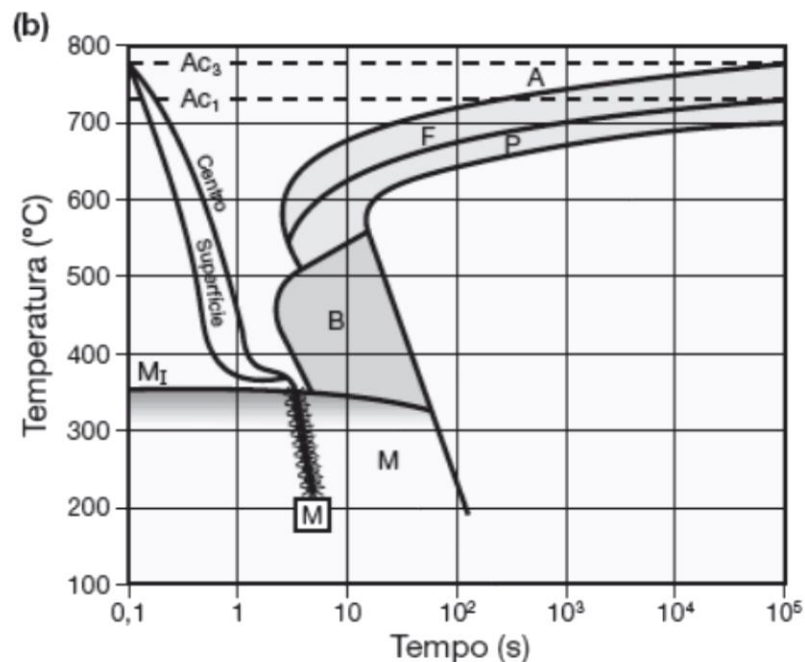
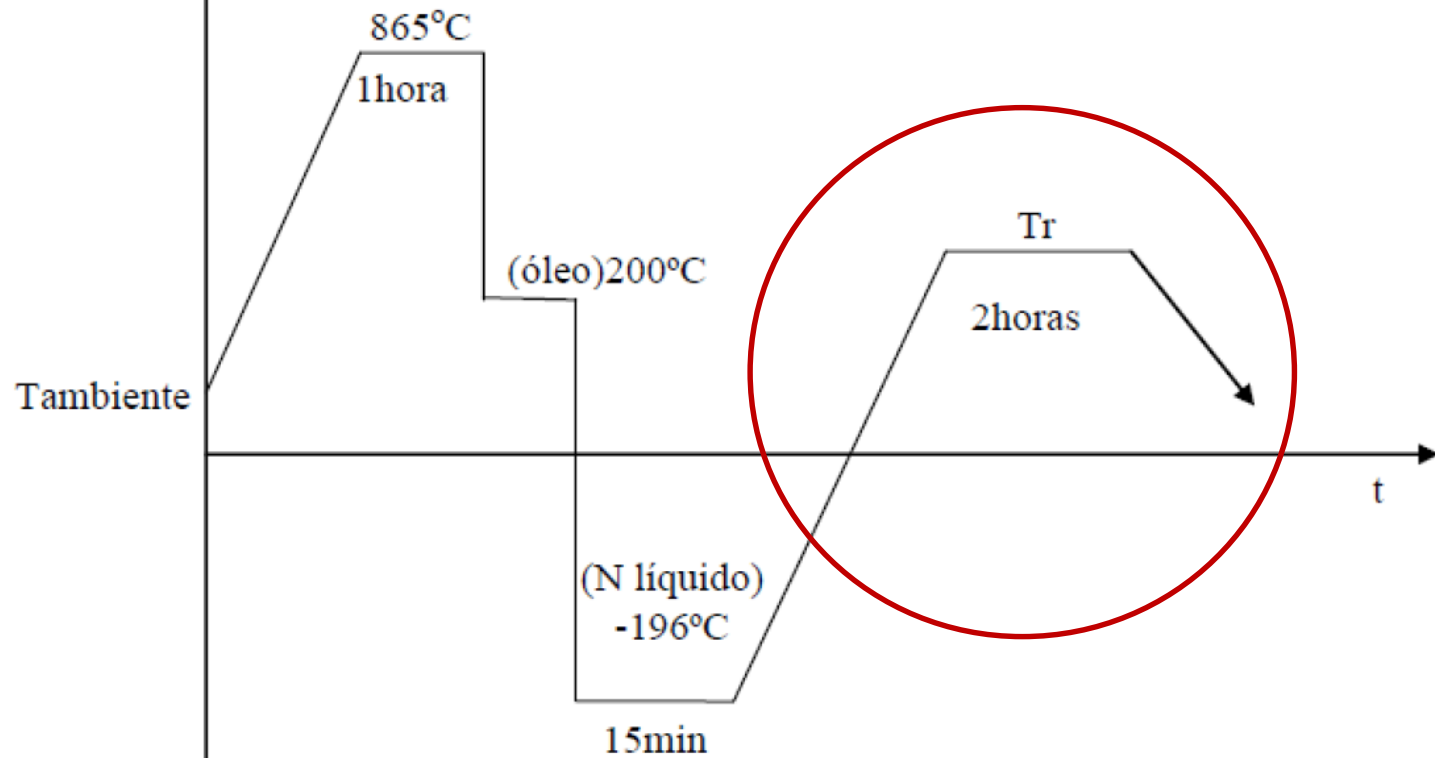


Figura 10.79

Em uma têmpera (a), a superfície e o núcleo da peça atingem a temperatura M_I 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_I , reduzindo sensivelmente as tensões de têmpera.

(Colpaert)

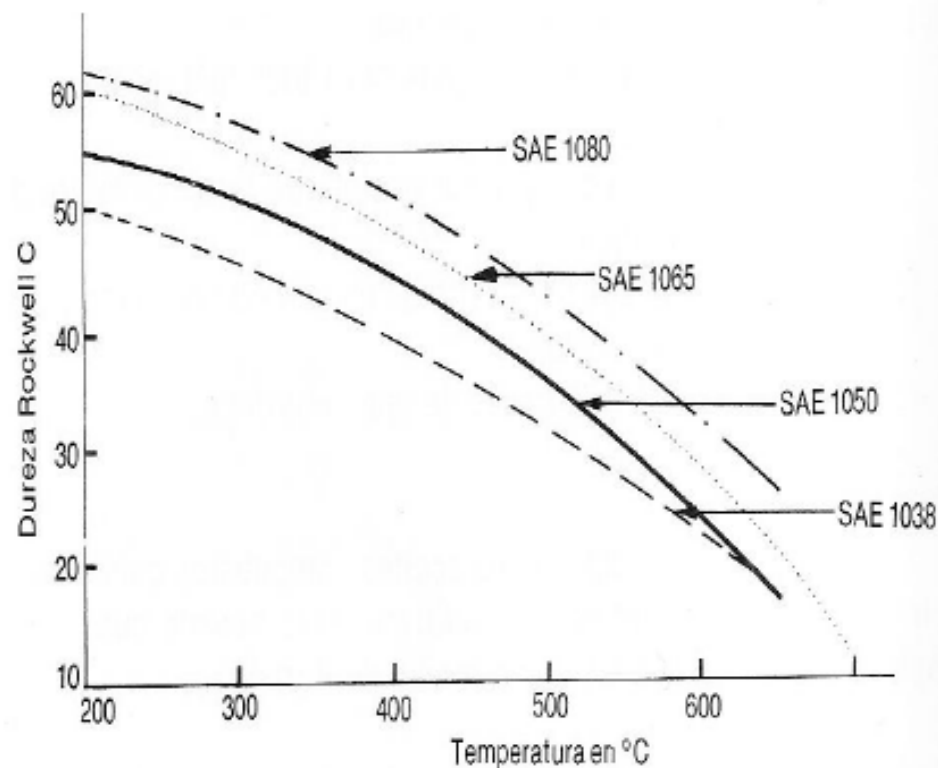
REVENIMIENTO



REVENIMENTO

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

CURVA DE REVENIMENTO



MARTENSITA REVENIDA

MARTENSITA BRUTA

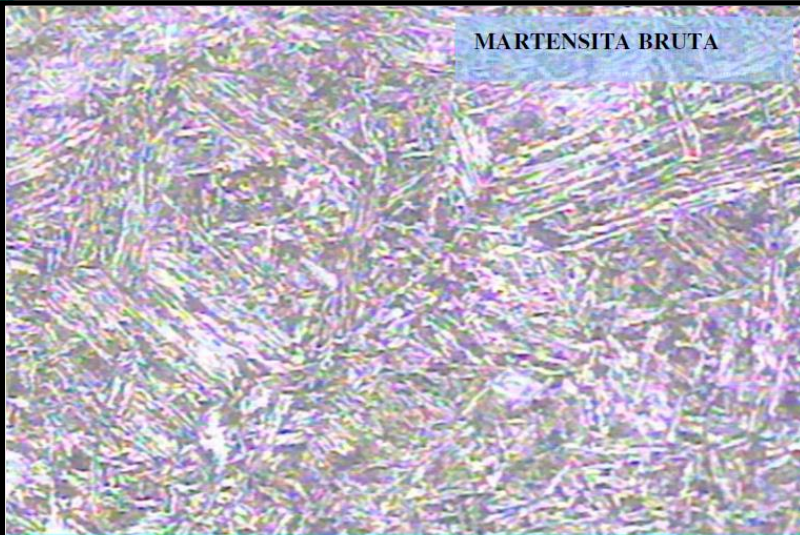


Figura 3– Micrografia apresentando estrutura martensitica.
Ataque nital 3% , Aumento 200x.

MARTENSITA BRUTA

MARTENSITA REVENIDA



Prof.Dr. José Benedito Marcomini

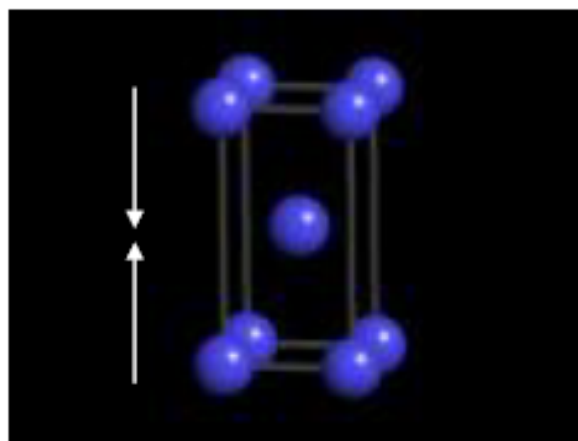
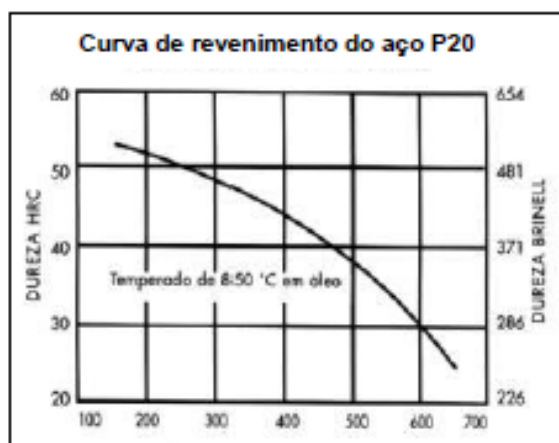
ETAPAS DO REVENIDO

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

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

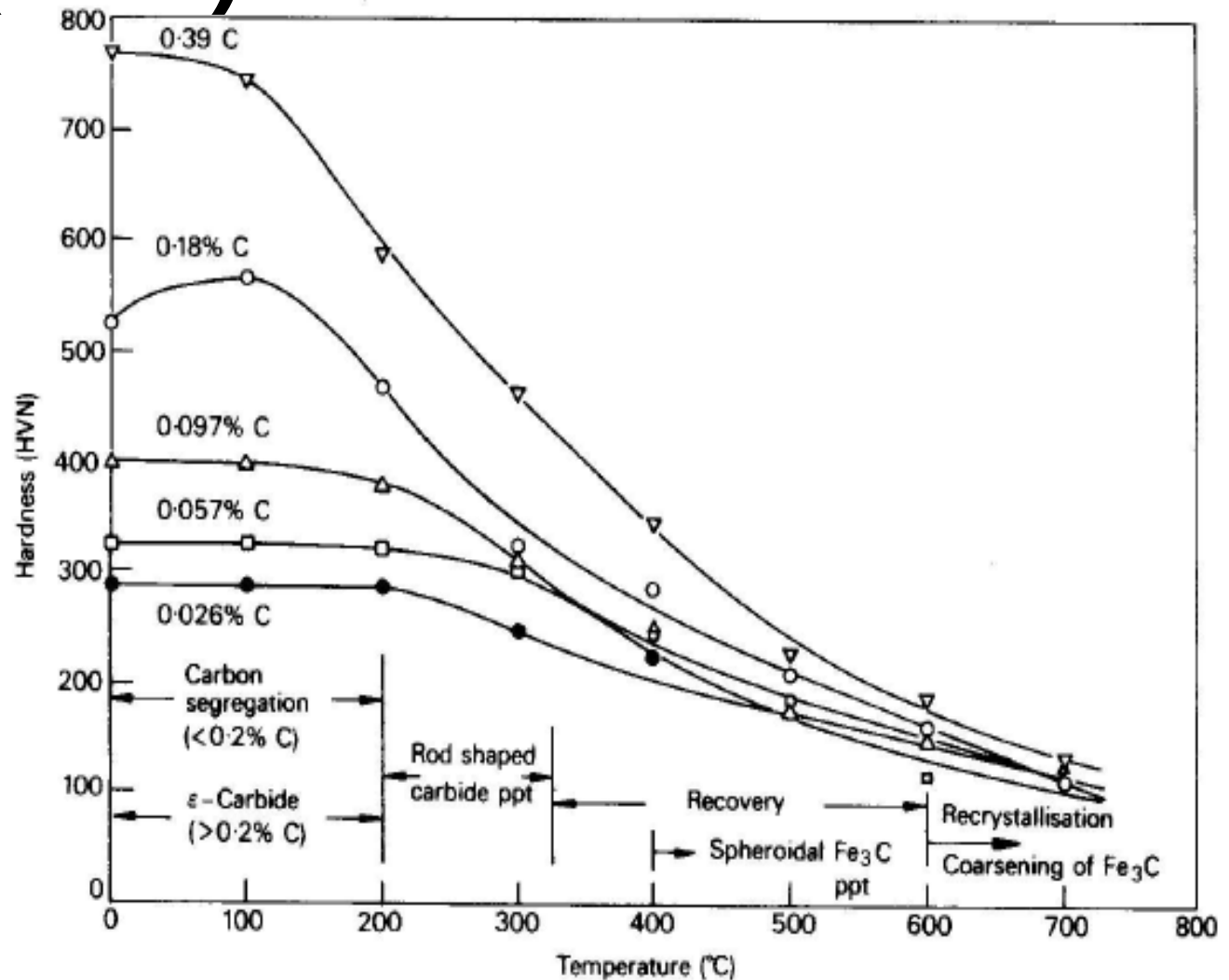
Etapa 3, entre 300 e 350°C – substituição do carboneto de ferro - ϵ pela cementita; a martensita perde a tetragonalidade

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



Seqüência de revenimento de Speich(1972)

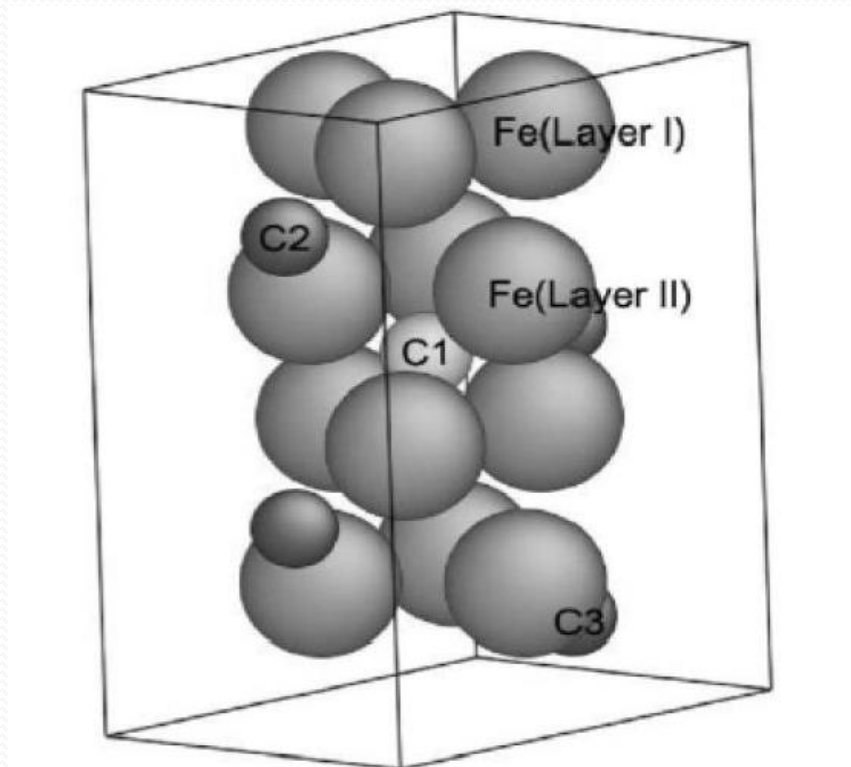
□ A seqüência de revenimento apresentada por Speich é resumida com o auxilio da figura:

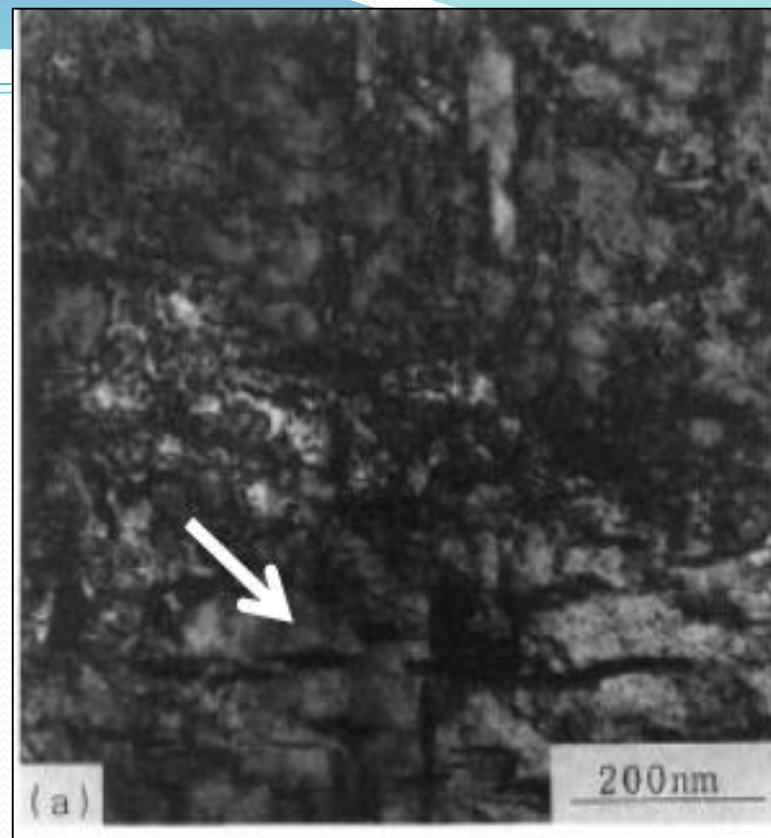


OBSERVAÇÕES:

- $T_a - 200^\circ\text{C} \rightarrow$ 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 $300^\circ\text{C} \rightarrow$ decomposição da austenita retida em bainita;
- $400^\circ\text{C} \rightarrow$ transição do carboneto ϵ para cementita;
- 250°C e $500^\circ\text{C} \rightarrow$ transição do carboneto ϵ para cementita (MORRA et al, 2001).
- Padmanabhan e Wood (1984) $\rightarrow$ 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 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.



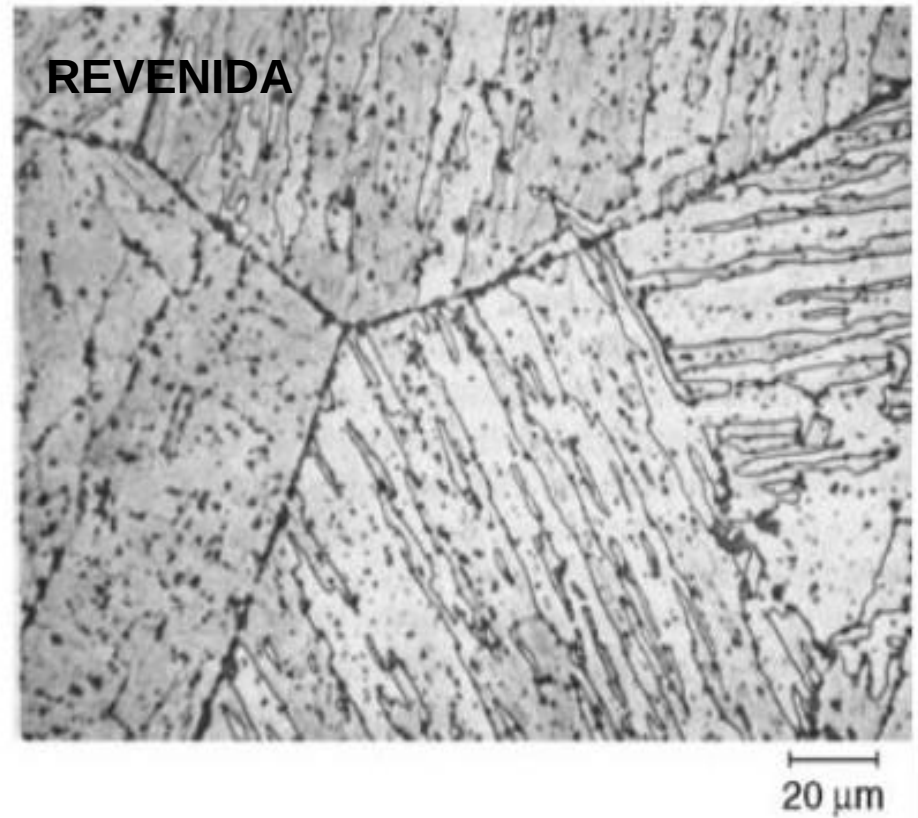
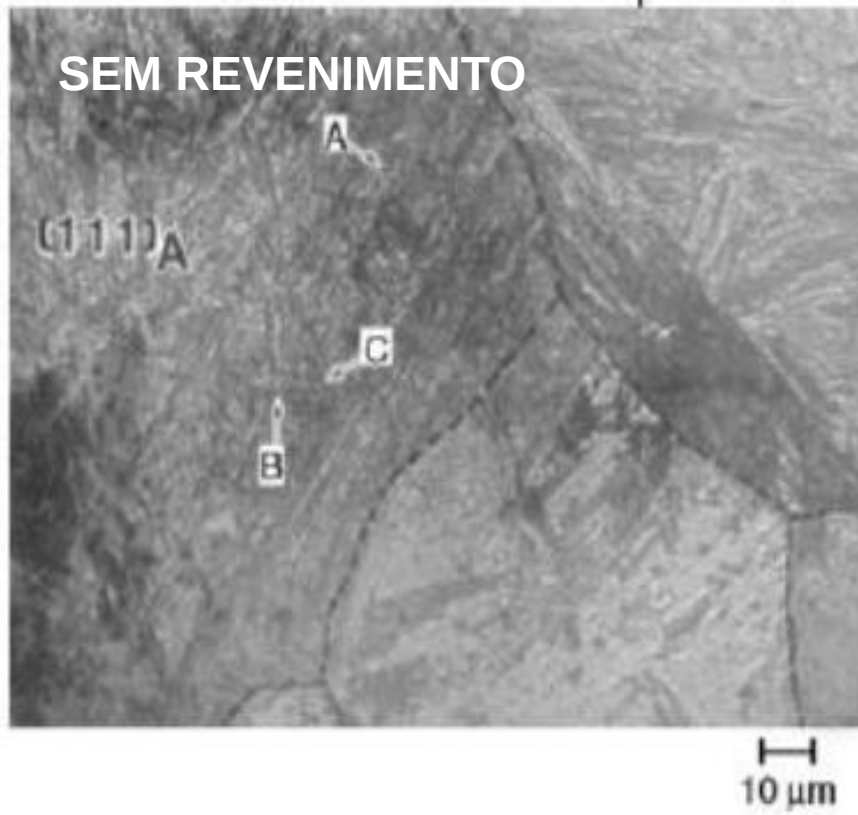


Ohmori e Tamura (1992): carbonetos ϵ em forma de discos na martensita revenida em 225°C (MET).

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**).

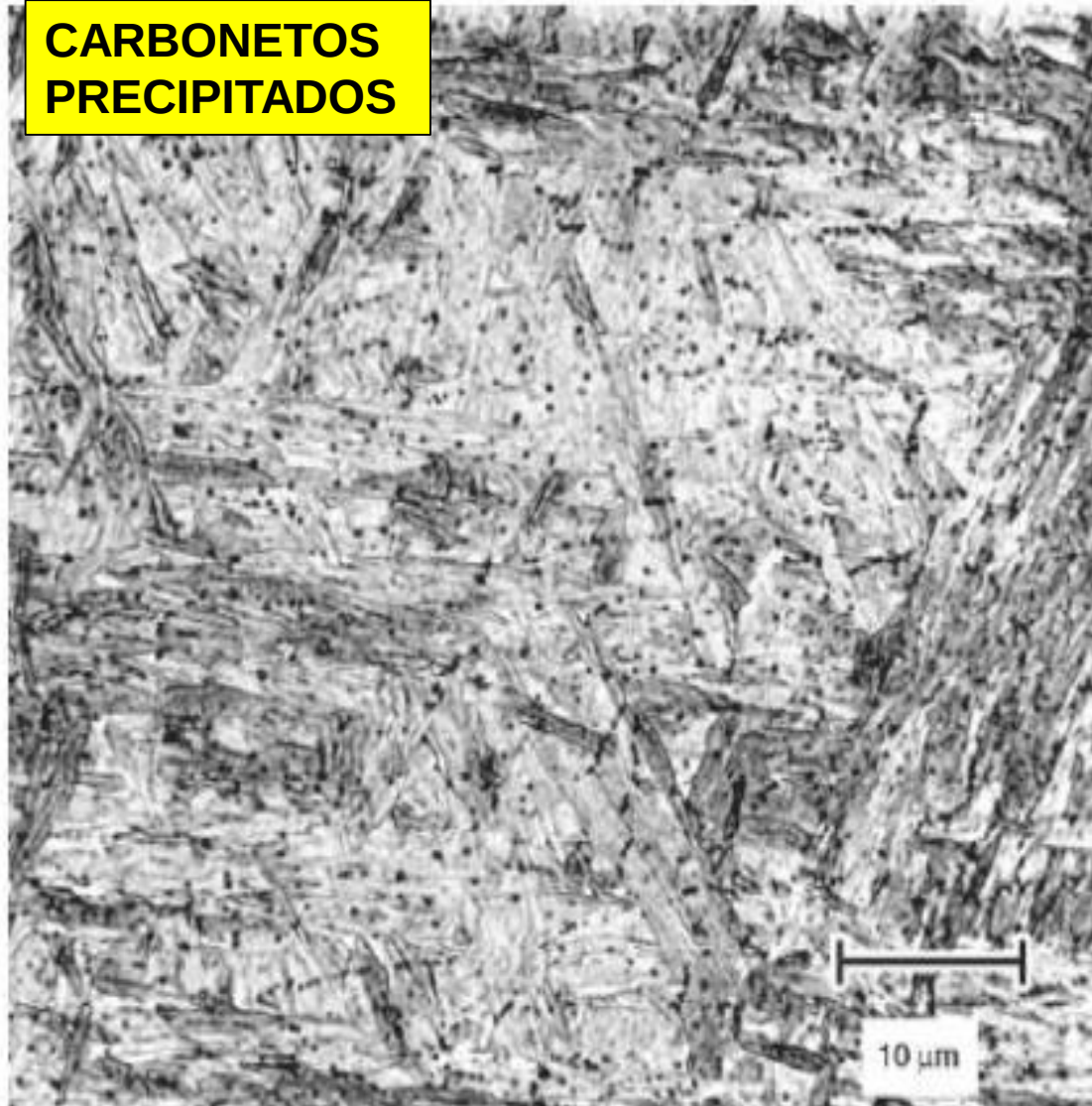
Revenimento dos aços

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

- 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

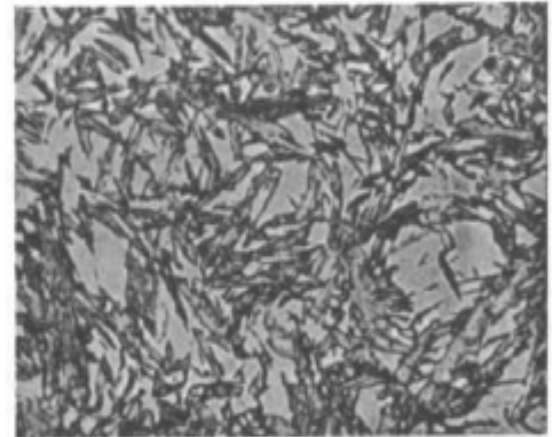


FIGURA 243
Templado y revenido a 175°



FIGURA 244
Templado y revenido a 200°.

Transformação da Austenita Retida

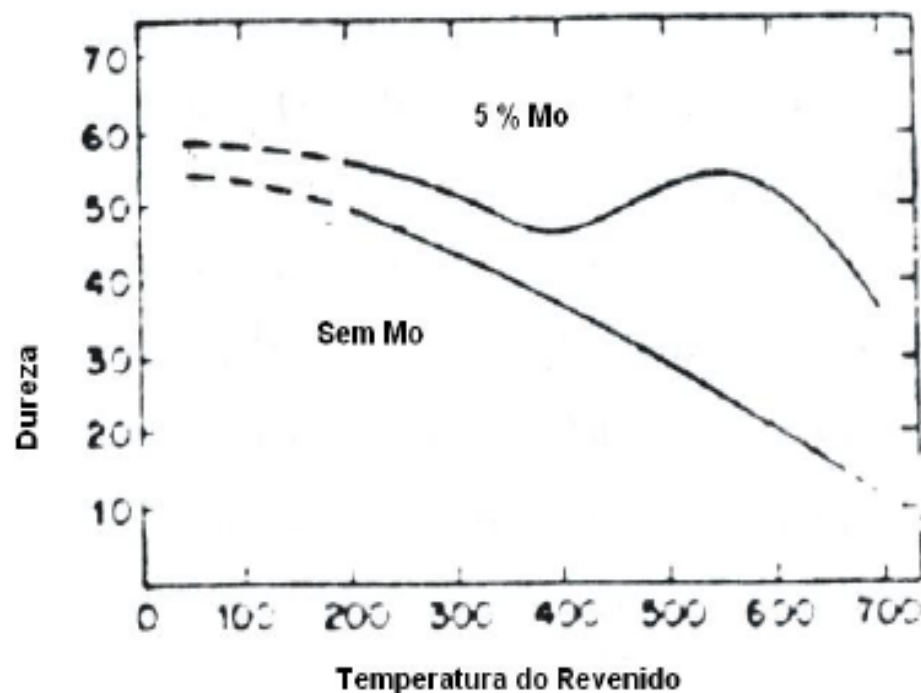
- O processo de transformação de austenita retida é influenciada também pela adição de elementos de liga
- Em aços alto C, alto Cr, aços ferramenta, a austenita é muito estável, exigindo muito tempo para se transformar, e em muitos casos nem após 1000 horas de permanência ela se transforma

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 a austenita, aumenta M_s e no resfriamento subsequente essa austenita se transforma em martensita
- Dessa forma tem-se martensita revenida e essa nova martensita formada sem revenir
- Essa situação induz uma certa fragilidade, portanto torna-se necessário mais um revenido
- Em aços de alto C e alta liga são feitos 4 revenidos

Revenido nos aços ligados

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



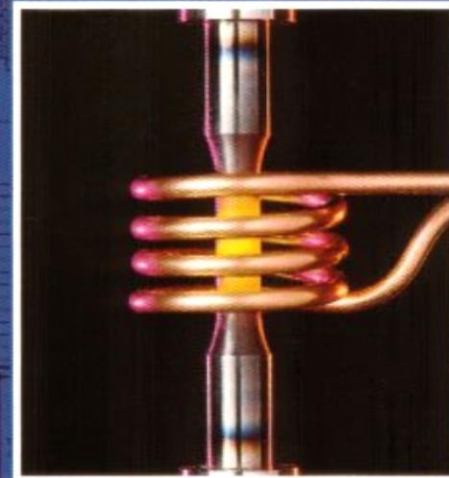
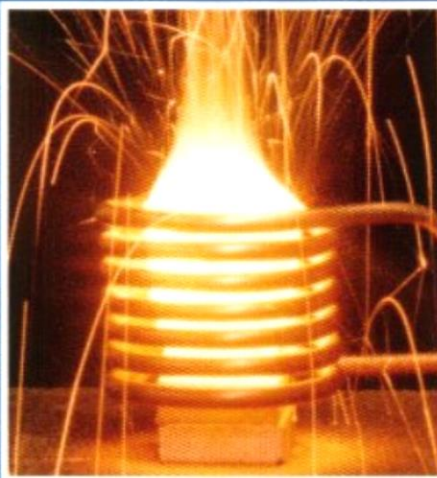
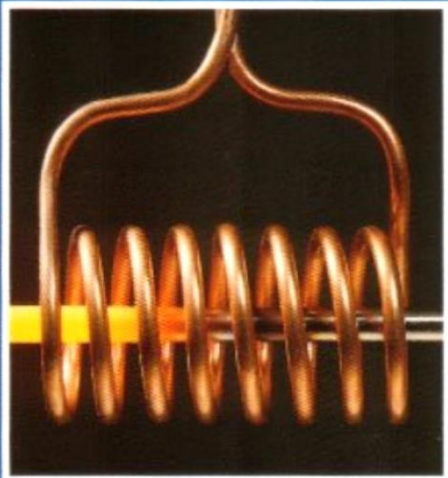


FRAGILIZAÇÃO AO
REVENIDO

X

FRAGILIZAÇÃO DA
MARTENSITA REVENIDA

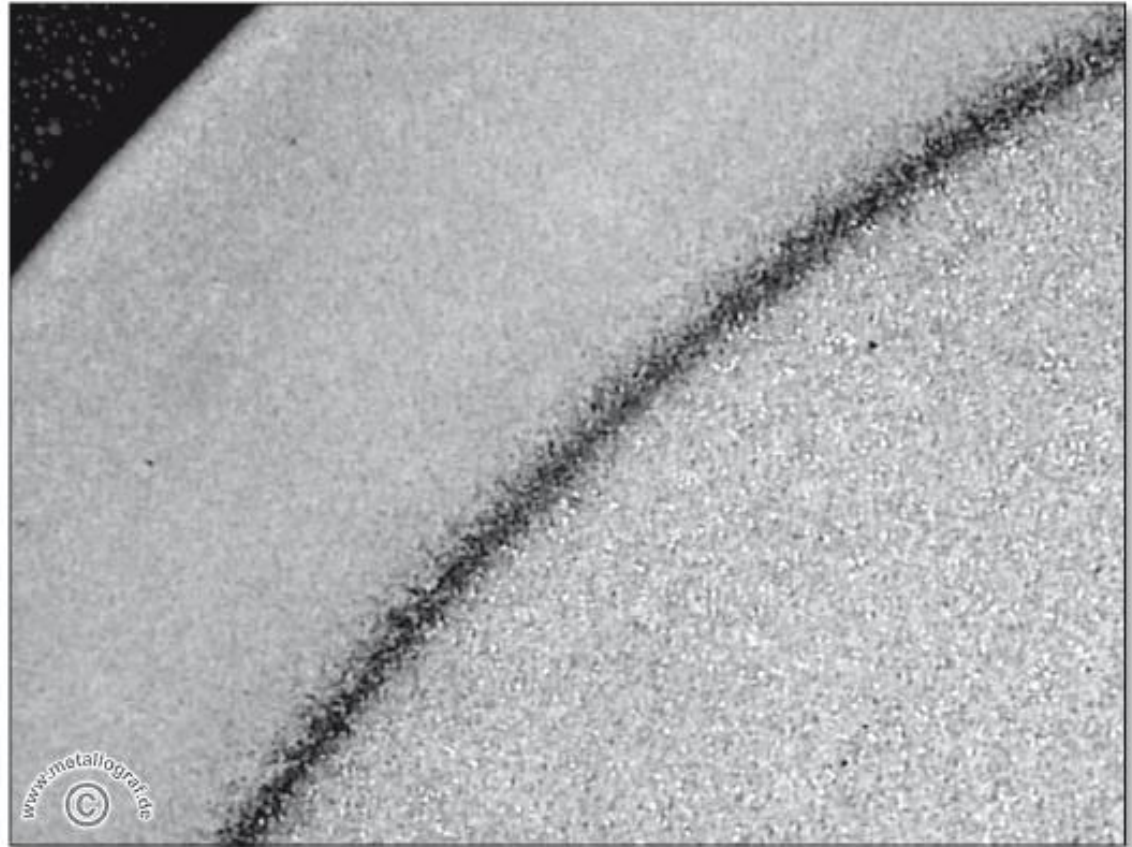
TÊMPERA POR INDUÇÃO



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].

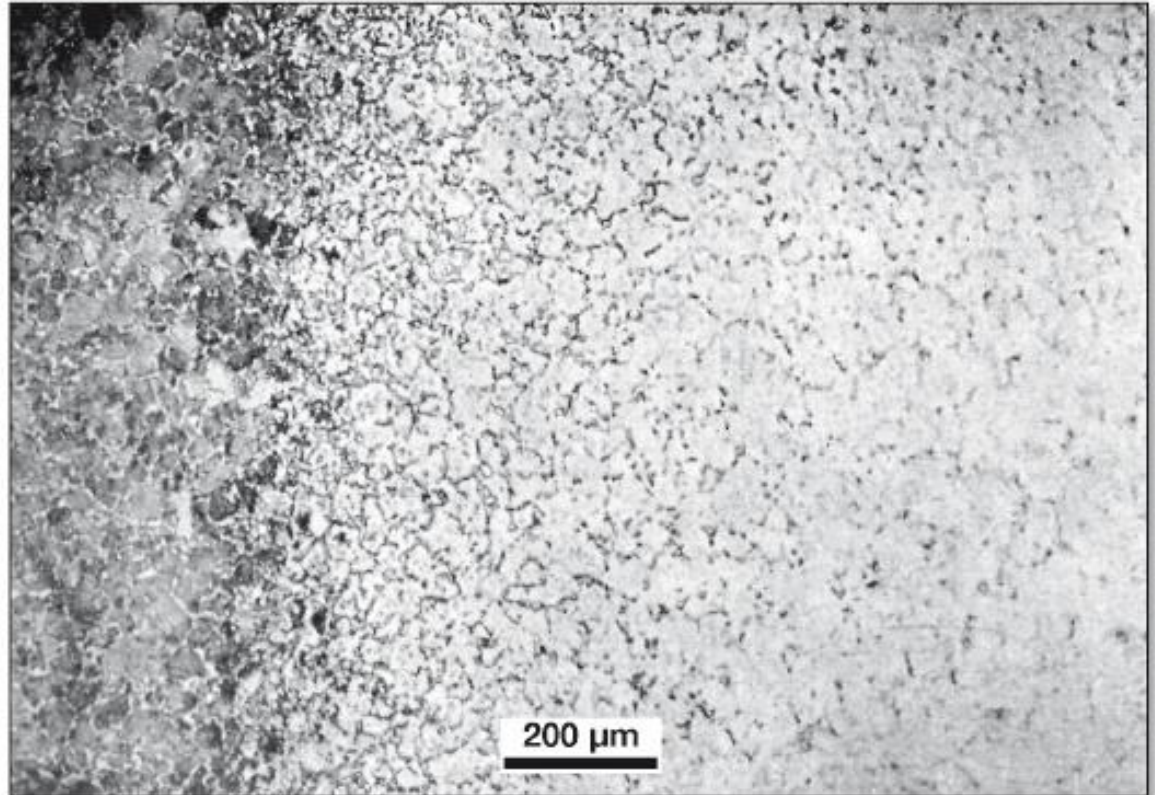


Prof.Dr. José Benedito Marcomini

TÊMPERA SUPERFICIAL

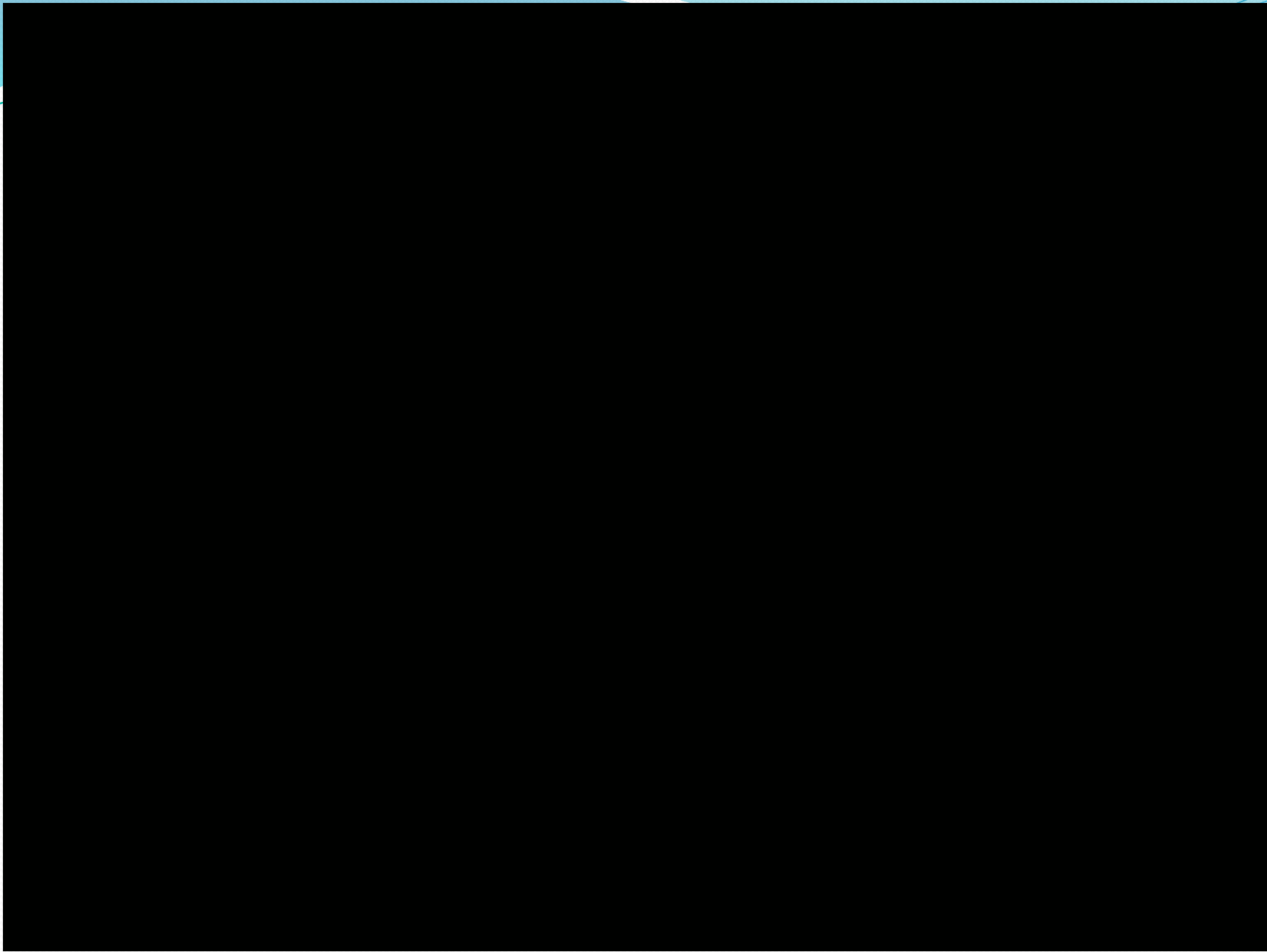
Figura 10.72

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.



Prof.Dr. José Benedito Marcomini









FIM

Prof.Dr. José Benedito Marcomini