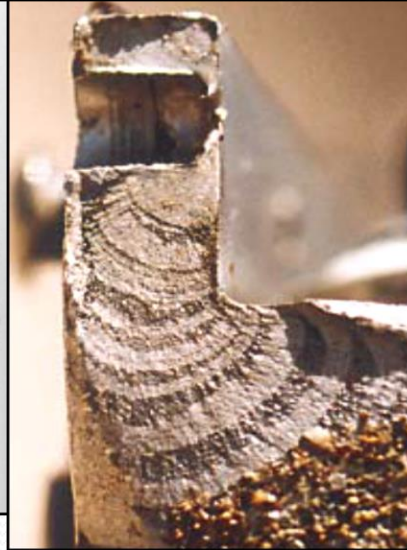
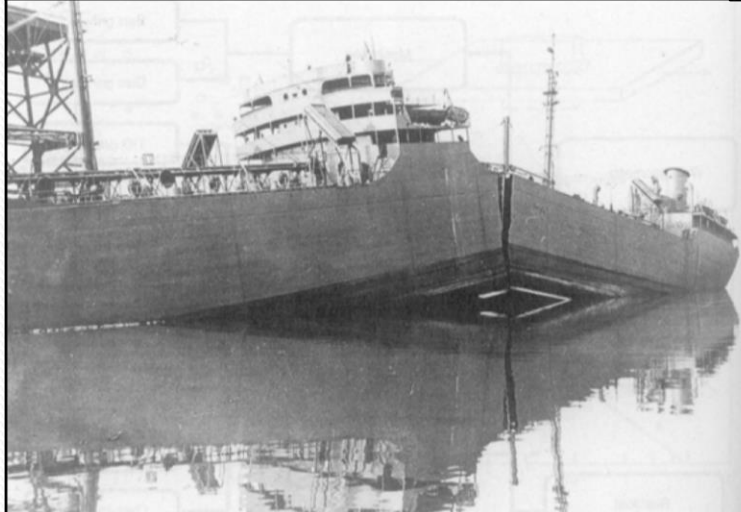


SMM0330-PRINCÍPIOS DE ANÁLISE DE FALHAS EM COMPONENTES



Prof.Dr. José Benedito Marcomini

MICROMECHANISMOS DE FRATURA

**SUPERFÍCIE DE
FRATURA**



**MICROMECHANISMO
DE FRATURA**



GRÃOS



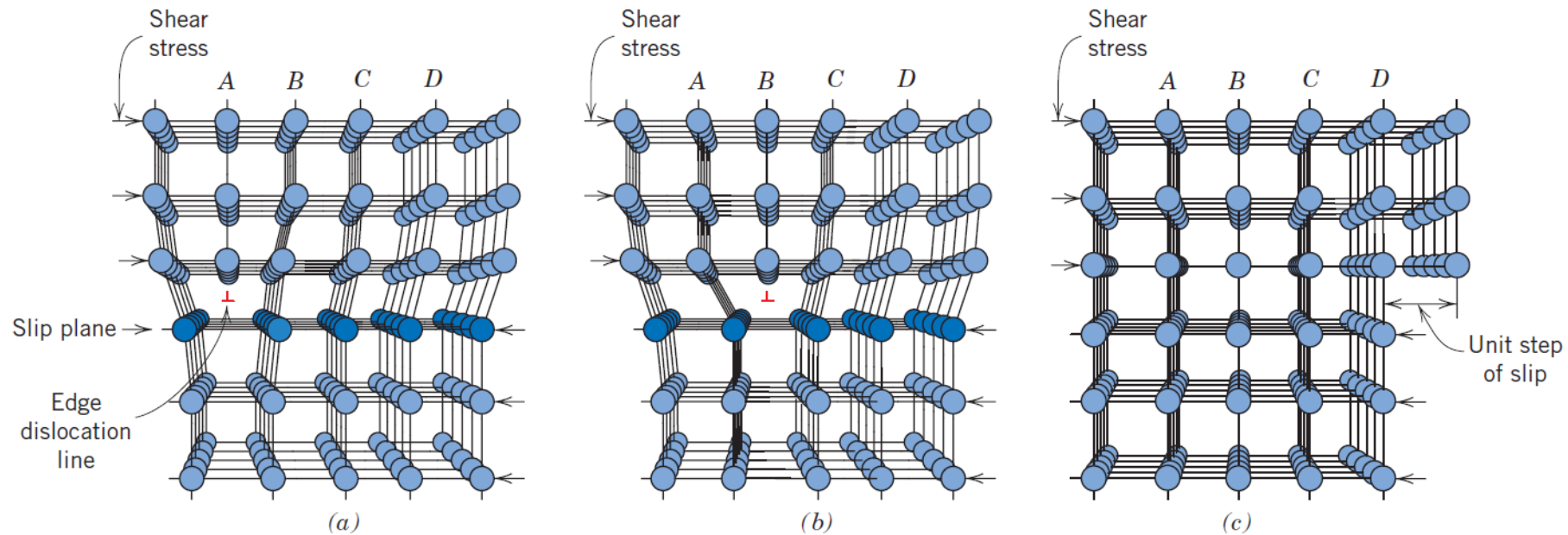
**NÍVEL ATÔMICO MODELOS DE ESFERAS
RÍGIDAS: MODELOS ATOMÍSTICOS-
DISCORDÂNCIAS**



SUBATÔMICO

MECANISMOS DE DEFORMAÇÃO

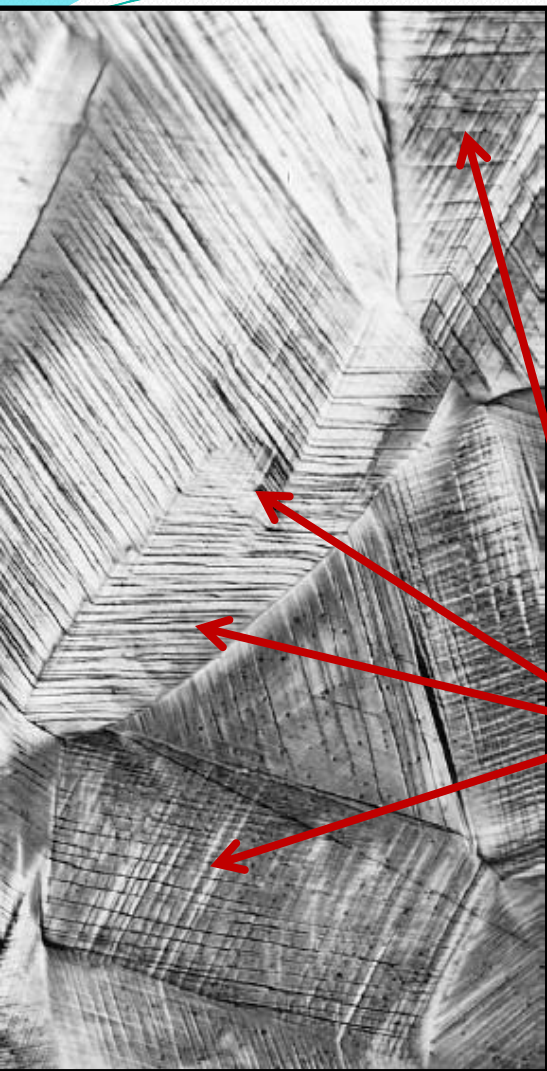
MOVIMENTAÇÃO DAS DISCORDÂNCIAS



É APLICADA UMA **TENSÃO DE CISALHAMENTO**, FORÇANDO A PARTE SUPERIOR DOS PLANOS A, B, C E D. SE A TENSÃO FOR SUFICIENTE, AS **LIGAÇÕES DA PARTE INFERIOR DO PLANO B SÃO ROMPIDAS** E O PLANO A SE LIGA À ESTA PARTE. ISSO OCORRE SUCESSIVAMENTE ATÉ QUE O SEMI-PLANO AFLORA NA SUPERFÍCIE COM A LARGURA DE UMA DISTÂNCIA ATÔMICA.

01-27 00:51:01:3



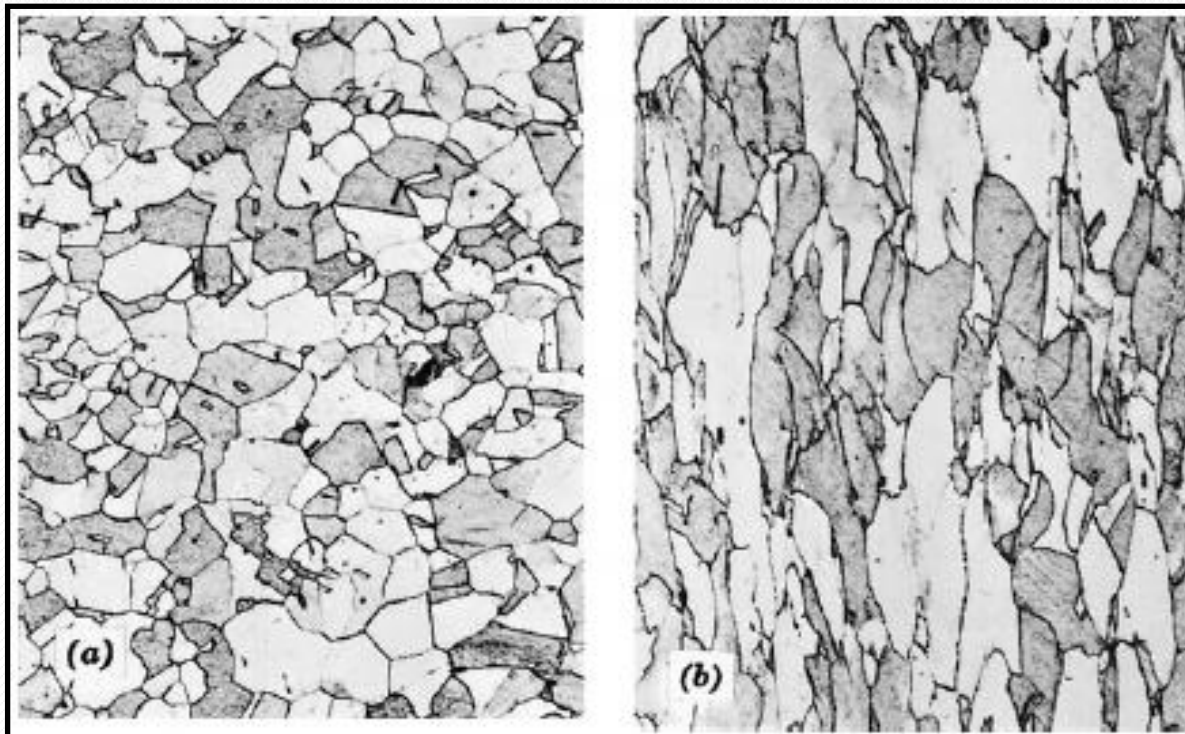


LINHAS DE ESCORREGAMENTO EM AMOSTRA DE COBRE POLICRISTALINO, POLIDA E DEFORMADA. AO MENOS DOIS SISTEMAS DE ESCORREGAMENTO QUE SE CRUZAM, PODEM SER OBSERVADOS.

**LINHAS DE ESCORREGAMENTO QUE SE CRUZAM.
DIFERENTES ORIENTAÇÕES EM CADA GRÃO.**

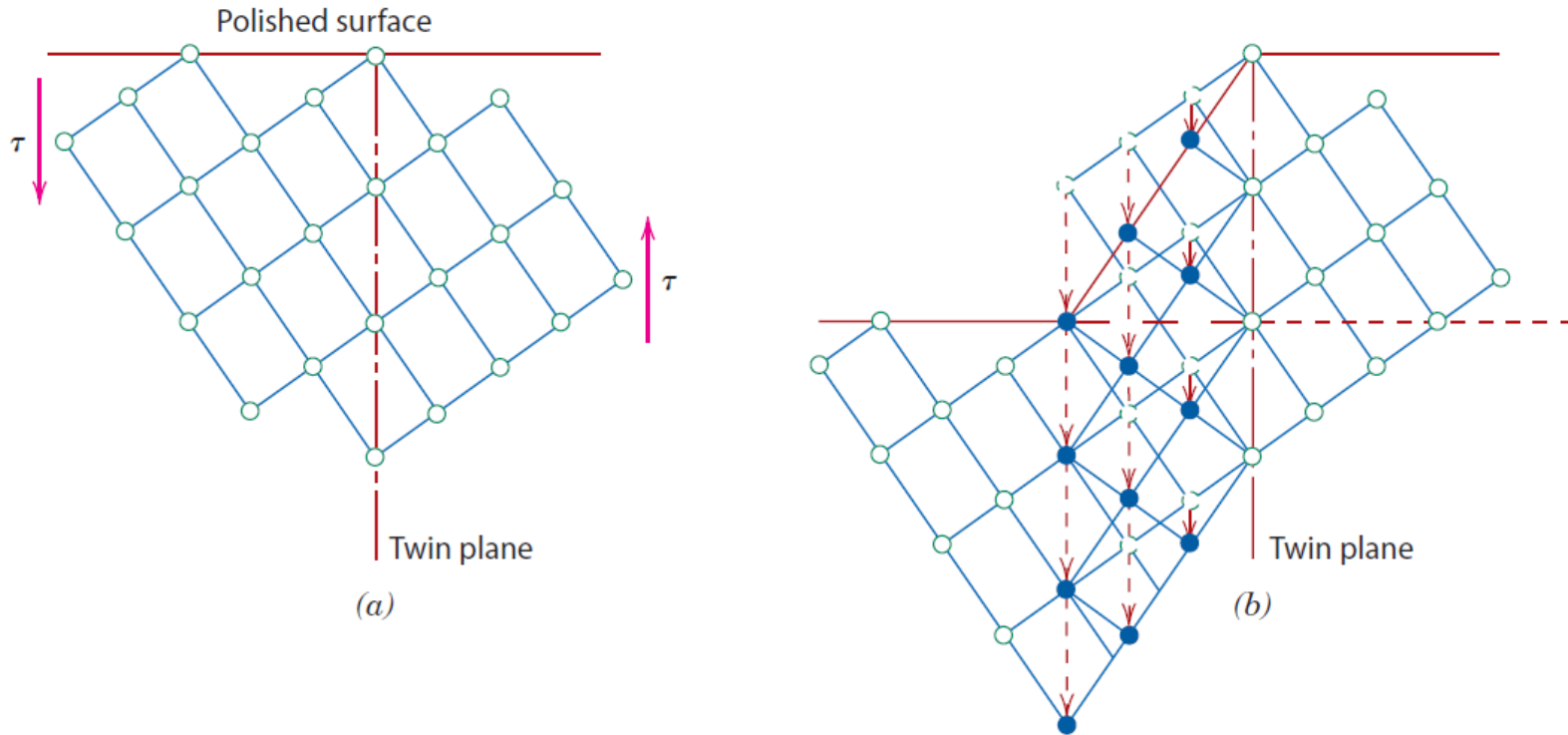


**DISCORDÂNCIAS EM LINHA DE ESCORREGAMENTO (INÓX
- 10% DEFORMAÇÃO)**



GRÃOS EQUIAXIAIS ANTES DA DEFORMAÇÃO (a) E ALONGADOS APÓS A DEFORMAÇÃO (b) DE UM METAL POLICRISTALINO.

DEFORMAÇÃO POR MACLAÇÃO



(ADAPTADO DE :CALLISTER)

MACLAS MECÂNICAS – LENTICULAR – AÇO 5160H (MO)



MACLAS MECÂNICAS- LINHAS DE
NEUMANN

FRANZ ERNEST NEUMANN-MINERALOGISTA,
FÍSICO E MATEMÁTICO ALEMÃO.OBSERVOU
MACLAS EM METEORITOS (LEI DE NEUMANN
SOBRE CALOR ESPECÍFICO)

MACLAS MECÂNICAS

(Marcomini, diss. Mestrado)

CONSEQUÊNCIAS DA MIGRAÇÃO DE CONTORNOS

MACLAS DE RECOZIMENTO

- O MECANISMO DE FORMAÇÃO AINDA ESTÁ SENDO ESTUDADO;
- É UM “ACIDENTE” DE CRESCIMENTO (MIGRAÇÃO DE CONTORNOS);
- SÃO MAIS FREQUENTES QUANTO MENOR FOR A ENERGIA DO CONTORNO COERENTE DE MACLA, QUE POR SUA VEZ VARIA DE MATERIAL PARA MATERIAL;
- NOS METAIS E LIGAS COM ESTRUTURA CFC, O PLANO DO CONTORNO COERENTE DE MACLA É DO TIPO $\{111\}$;
- CONTORNOS COERENTES DE MACLA TÊM BAIXA ENERGIA ($-1/2$ EDE);
- CONTORNOS INCOERENTES DE MACLA = ENERGIA CONTORNO DE GRÃO;
- SE A ENERGIA DO SISTEMA FICAR MAIS BAIXA COM OS CONTORNOS COERENTES E INCOERENTES DE MACLA QUE A RECRISTALIZAÇÃO COMPLETA, ELAS OCORREM;

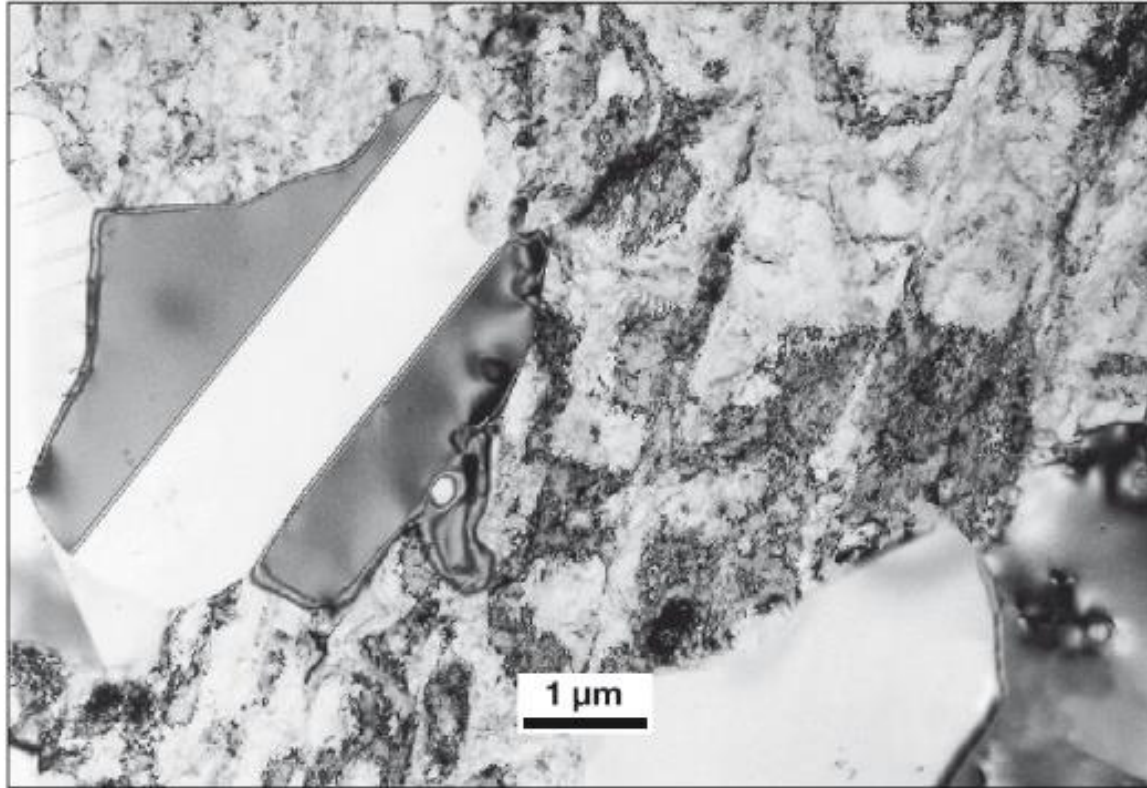
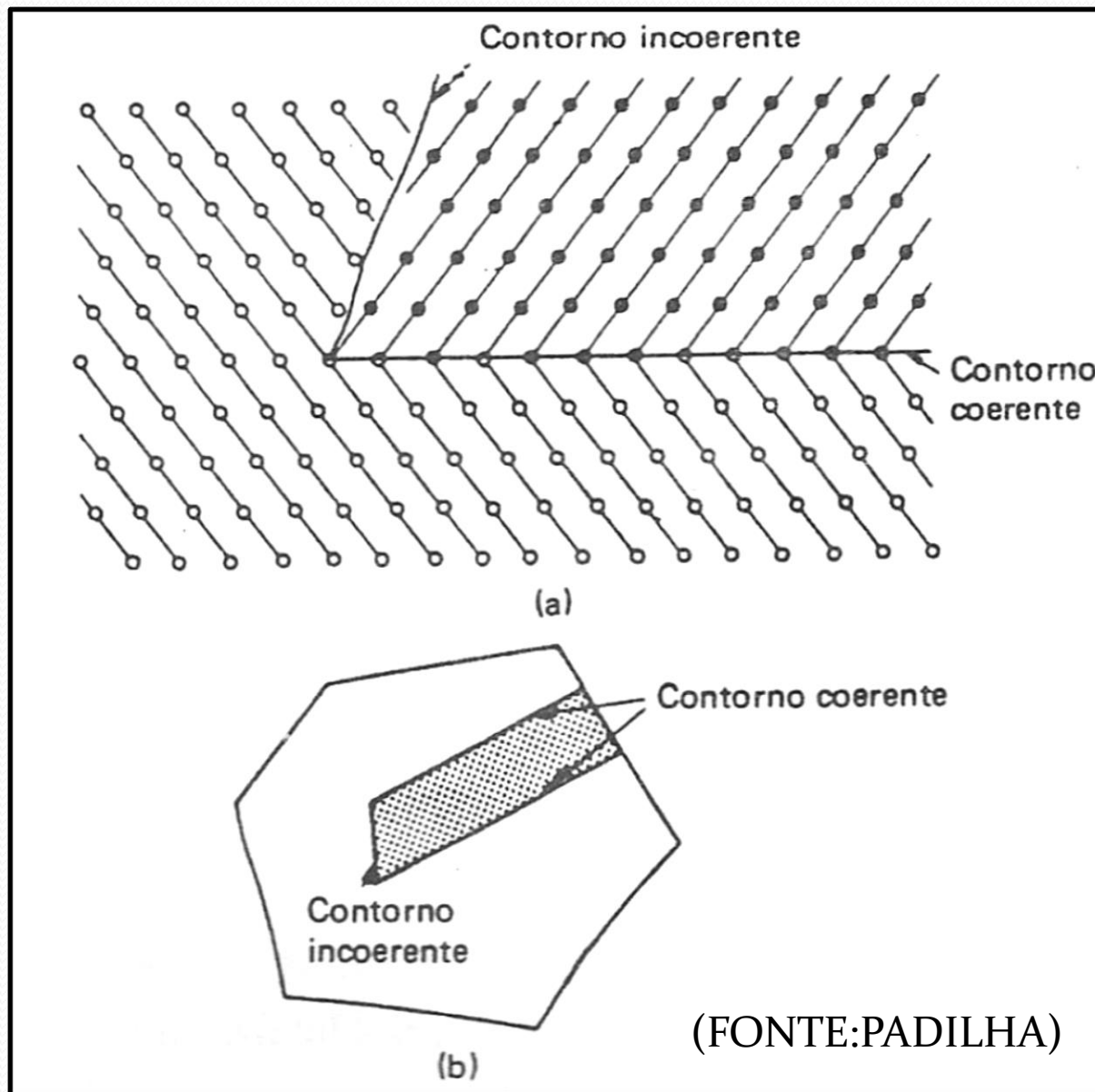


Figura 12.31

Aço inoxidável austenítico AISI 302, laminado a frio, seguido de tratamento de recozimento para recristalização por 1 h a 704 °C. Observa-se grãos recristalizados livre de discordâncias cercados por uma matriz ainda encruada, de alta densidade de discordâncias. O grão recristalizado, a esquerda, contém macla de recozimento (bandas paralelas com contraste). MET, 200 kV. Reproduzido com permissão de DoITPoMS, University of Cambridge, Cambridge, Inglaterra.

(ADAPTADO DE: COLPAERT)

CONTORNOS DE MACLAS



DEFORMAÇÃO EM NÍVEL DE LINHAS DE DISCORDÂNCIAS

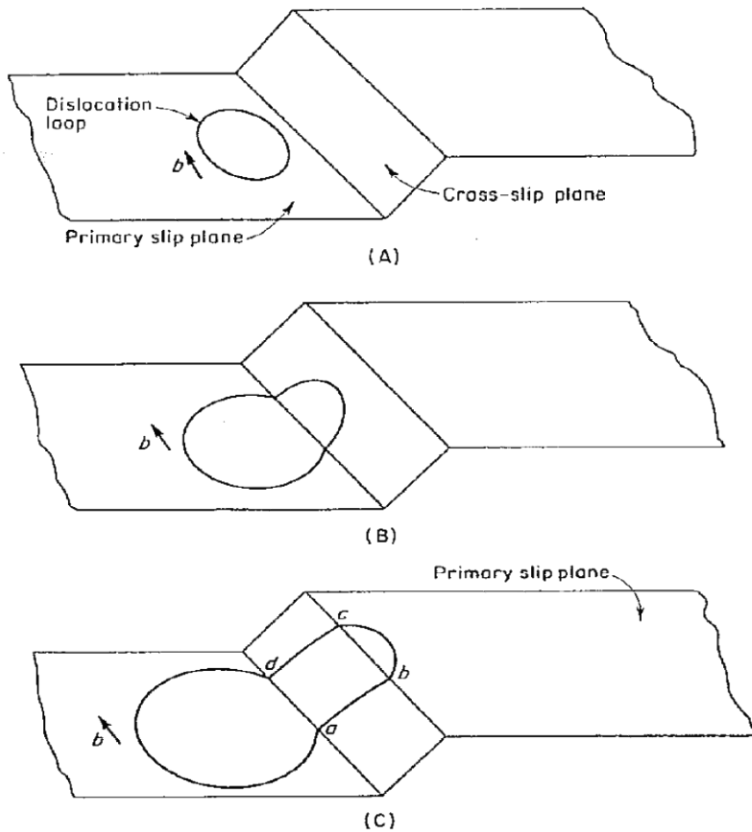


Fig. 5.5 Double cross-slip.

NORMALMENTE LD SÃO EM ANÉIS

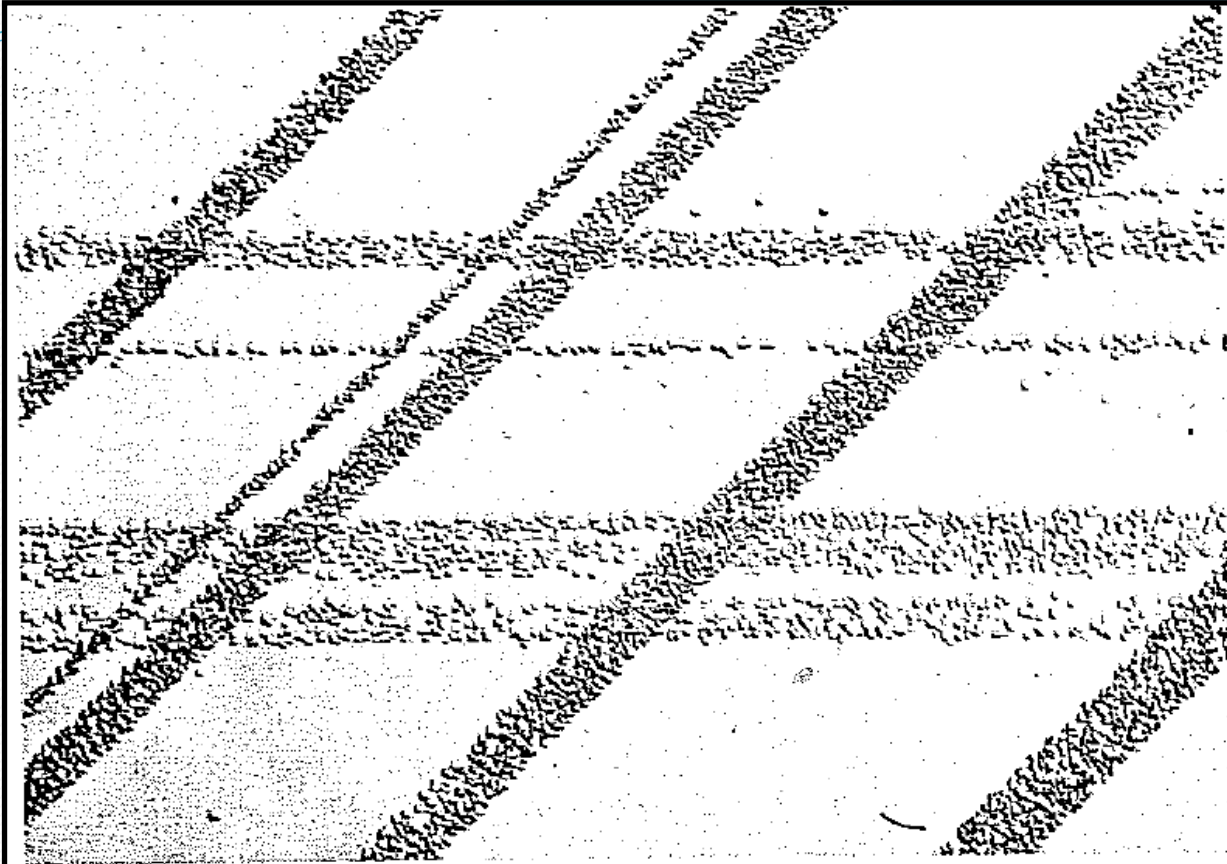
O PLANO DE ESCORREGAMENTO DE UMA DISCORDÂNCIA É DEFINIDO COMO O PLANO QUE CONTÉM A DISCORDÂNCIA E O SEU VETOR DE BURGERS.

O VETOR DE BURGERS DE UMA DISCORDÂNCIA EM HÉLICE É PARALELO, ENTÃO, QUALQUER PLANO QUE CONTENHA A DISCORDÂNCIA É UM PLANO POSSÍVEL DE ESCORREGAMENTO.

A PARTE EM HÉLICE SE DESLOCA NO DESLIZAMENTO CRUZADO.

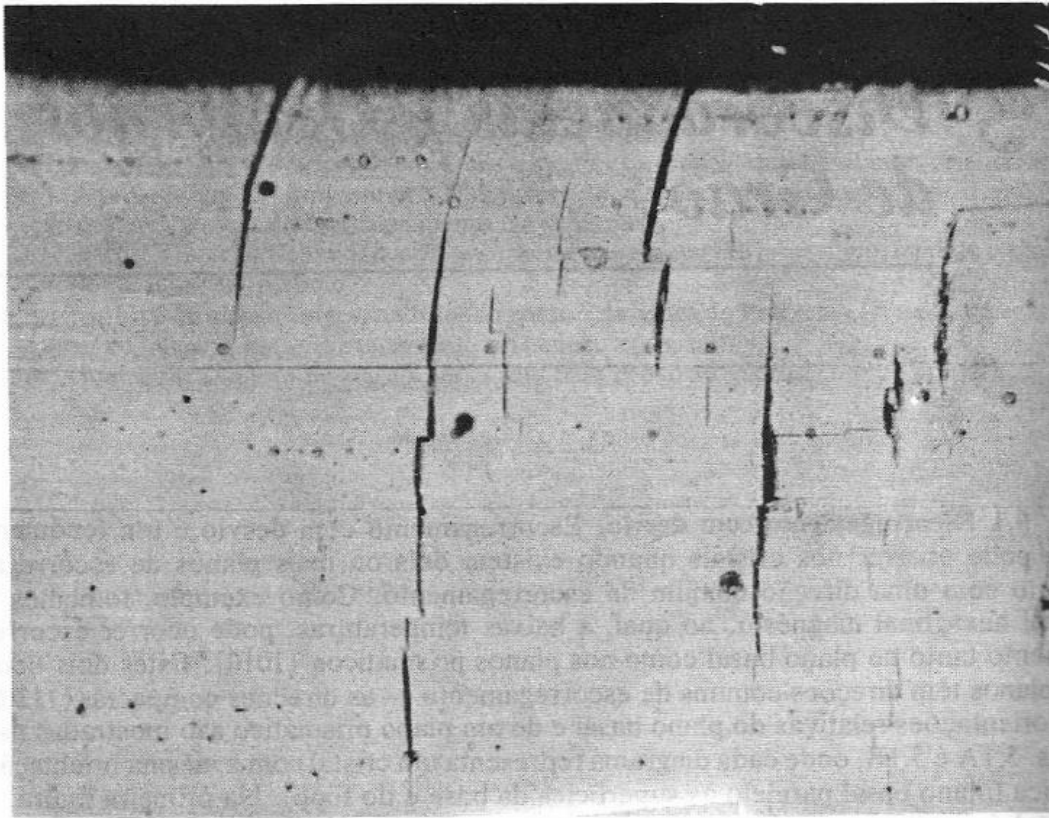
LEVA À FORMAÇÃO DE BANDAS DE CISALHAMENTO.

(FONTE:DIETER)



5.4 Slips bands in LiF. Bands formed at -196°C and 0.36 per cent strain. (Inston, W. G., and Gilman, J. J., *Jour. Appl. Phys.*, 30 129 [1959].)

BANDAS DE CISALHAMENTO: CONJUNTO DE LINHAS DE DESLIZAMENTO. FORMAM UMA REGIÃO ENCRUADA E FRÁGIL E...



(REED-HILL)

Fig. 5.2 Escorregamento com desvio no magnésio. Os traços dos planos verticais de escorregamento correspondem ao plano prismático $\{10\bar{1}0\}$, enquanto os traços dos planos horizontais de escorregamento correspondem ao plano basal (0002) . $290\times$. (Reed-Hill, R. E. e Robertson, W. D., *Trans. AIME*, 209, 496 [1957].)

...PODEM LEVAR À FRATURA!

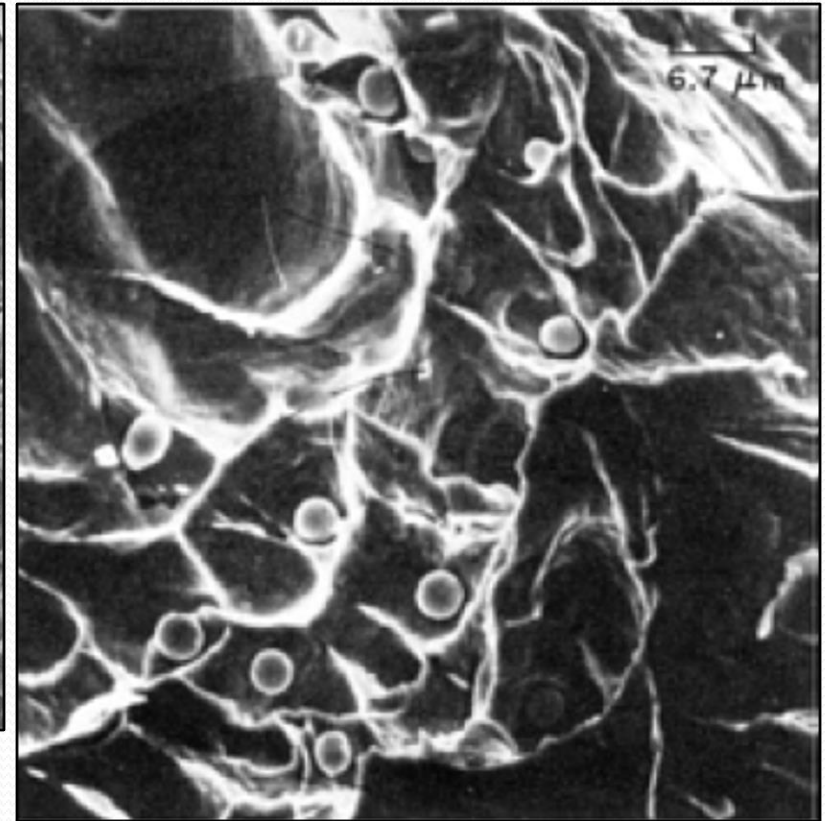
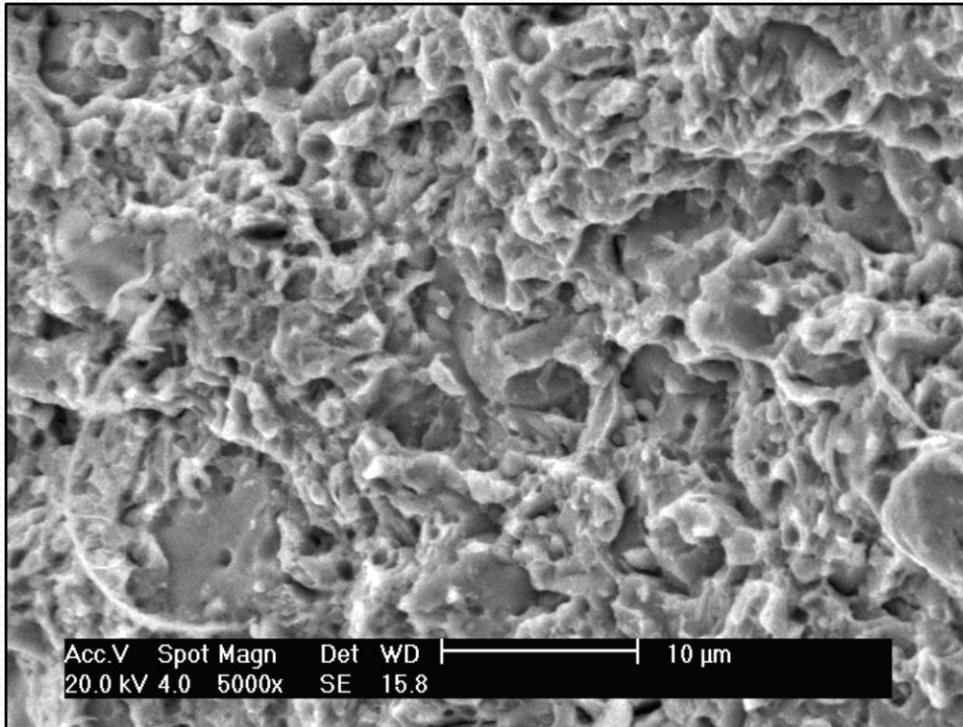
**MICROMECHANISMOS DE
FRATURA**

MICROMECHANISMOS DE FRATURA

- **ALVEOLAR (DIMPLES);**
- **INTERGRANULAR;**
- **TRANSGRANULAR (CLIVAGEM E QUASE-CLIVAGEM);**
- **FADIGA (ESTRIAS).**

SÃO OBSERVADOS EM MEV (MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA).

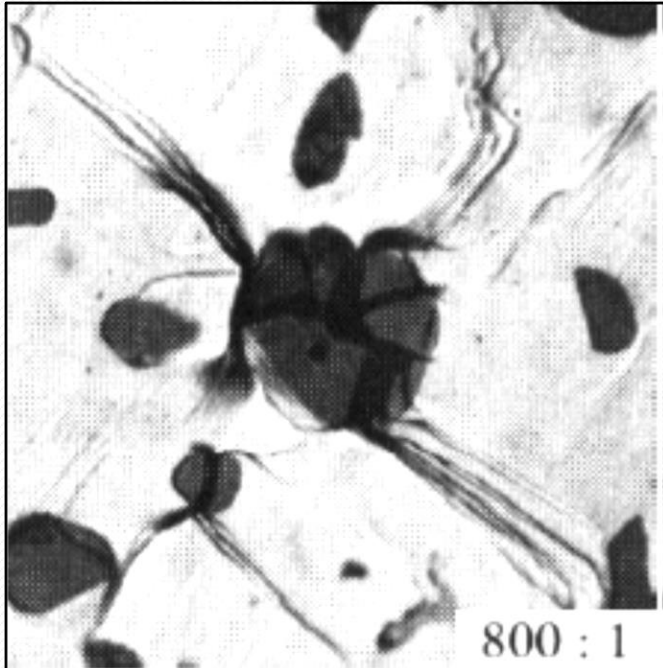
DIMPLES OU ALVEOLAR – DESCOLAMENTO ENTRE MATRIZ E PARTICULA.



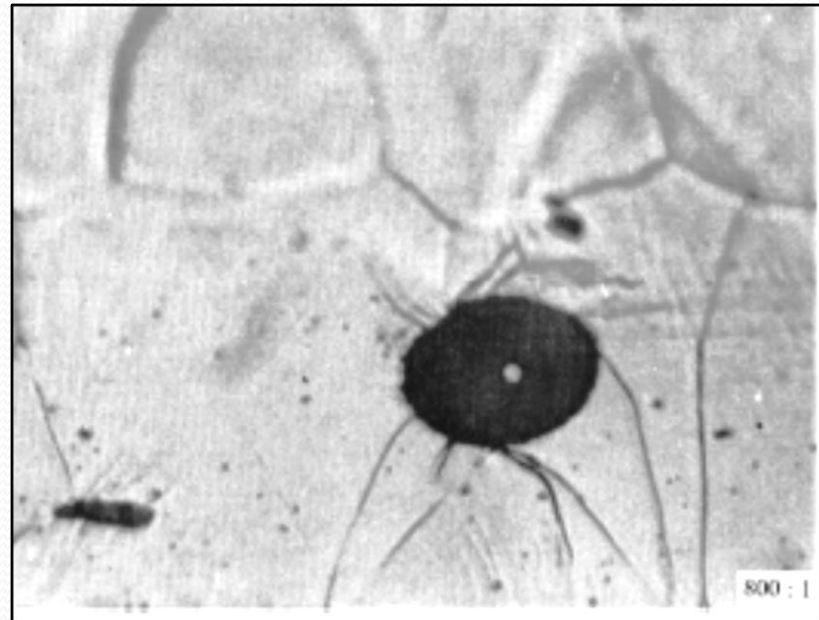
- Quando o diâmetro da partícula é grande, a tensão crítica para clivagem da partícula é pequena – a partícula cliva;
- Quando a partícula é muito pequena, a tensão crítica seria muito grande - partícula descola;
- $S^2 = \frac{\pi E \gamma_0}{(1-\nu) d p}$ S – tensão crítica para clivagem, γ_0 - energia interface matriz/partícula (Ritchie);
- Depende também da diferença de dureza entre partícula e matriz e da forma – descola ou fratura.

DIMPLES OU ALVEOLAR

$$S^2 = \frac{\pi E \gamma_0}{(1-\nu) dp}$$



PARTÍCULA CLIVADA



DEFORMAÇÃO EM TORNO DA PARTÍCULA

TEORIA DO ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO

**PARTÍCULAS COERENTES COM DIMENSÃO DE
ALGUNS ÁTOMOS**

**O PLANO DE DESLIZAMENTO CONTÉM A
DISCORDÂNCIA E A PARTÍCULA**

DEVIDO Á TENSÃO EM TORNO DO PRECIPITADO

**AUMENTO DA TENSÃO APLICADA PARA A
DISCORDÂNCIA ATRAVESSAR A PARTÍCULA**

DEFORMAÇÃO

TEORIA DO ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO

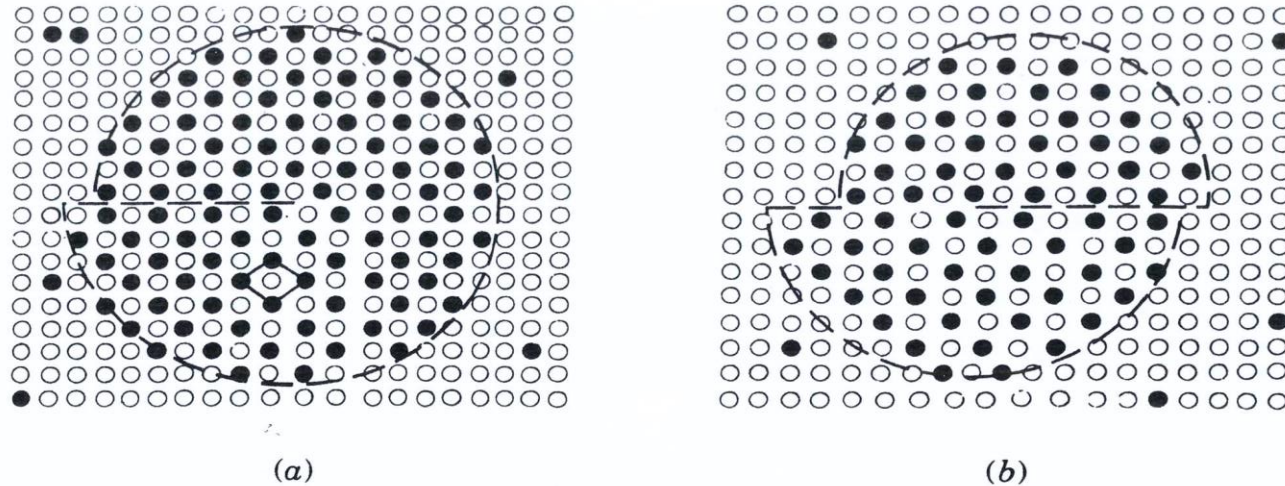


FIGURE 2.20 (100) planar view of spherical Ni_3Al particle in Ni lattice. (a) Initial superlattice dislocation disorders atom pairs along slipped portion of glide plane. Note orientation of cube face in Ni_3Al particle. (b) Passage of second superlattice dislocation reorders Ni_3Al lattice. Dotted horizontal line corresponds to APB. Nickel (○) and aluminum (●) atom locations noted. (From Gleiter and Hornbogen.²⁰)

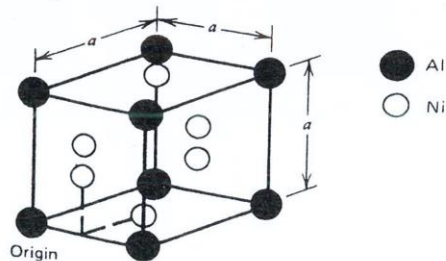


FIGURE 2.19 Nickel and aluminum atom locations in ordered Ni_3Al phase.

(Fonte: Porter & Easterling)

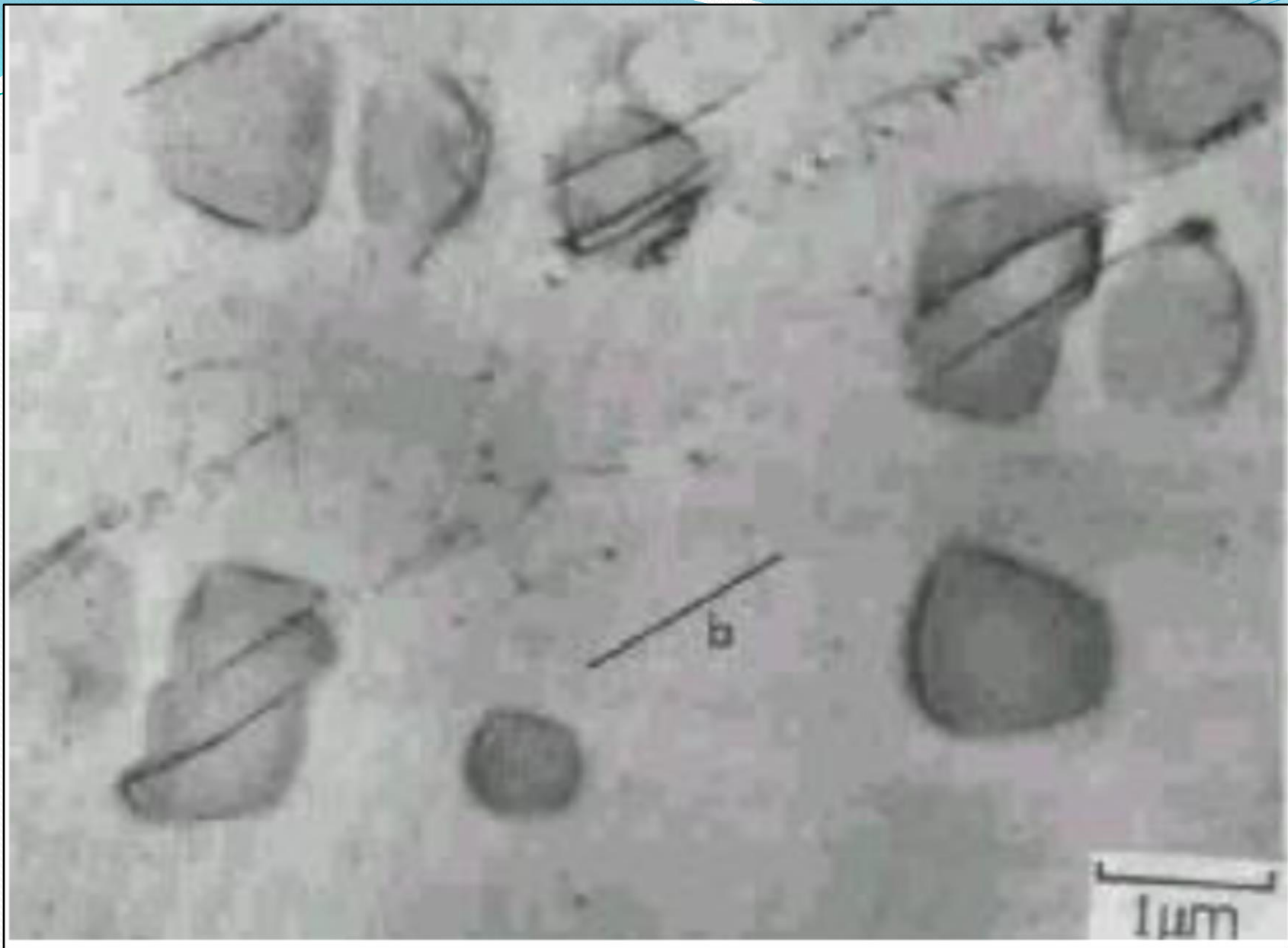


IMAGEM DE MET (MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE TRANSMISSÃO)

TEORIA DO ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO

O SEGUNDO MECANISMO OCORRE QUANDO A TENSÃO NECESSÁRIA PARA A DISCORDÂNCIA ATRAVESSAR O PRECIPITADO É MUITO ALTA E É CARACTERÍSTICO DE PRECIPITADOS METAESTÁVEIS INTERMEDIÁRIOS.

MECANISMO DE OROWAN (1948)

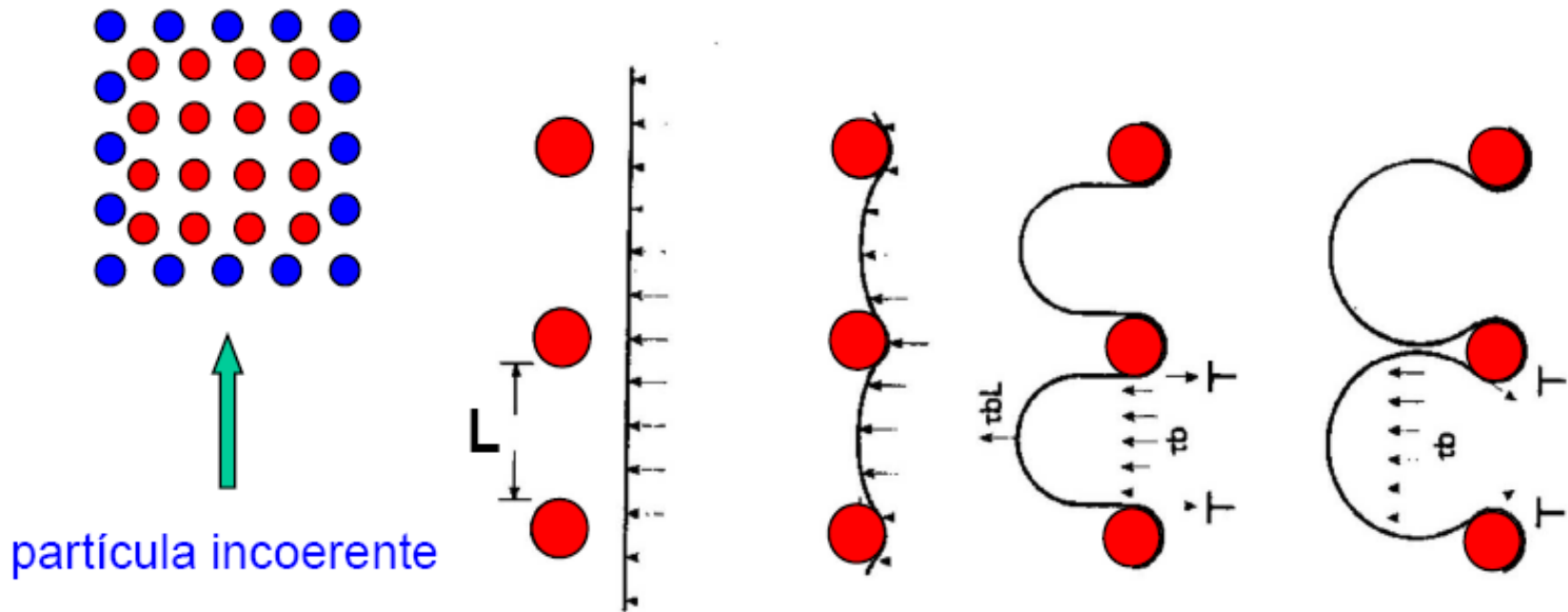
ANÉIS DE DISCORDÂNCIA EM TORNO DOS PRECIPITADOS

PRÓXIMA DISCORDÂNCIA ENFRENTA OS ANÉIS DA 1ª.

**MAIOR ENCRUAMENTO DURANTE A DEFORMAÇÃO
MAIOR AUMENTO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA**

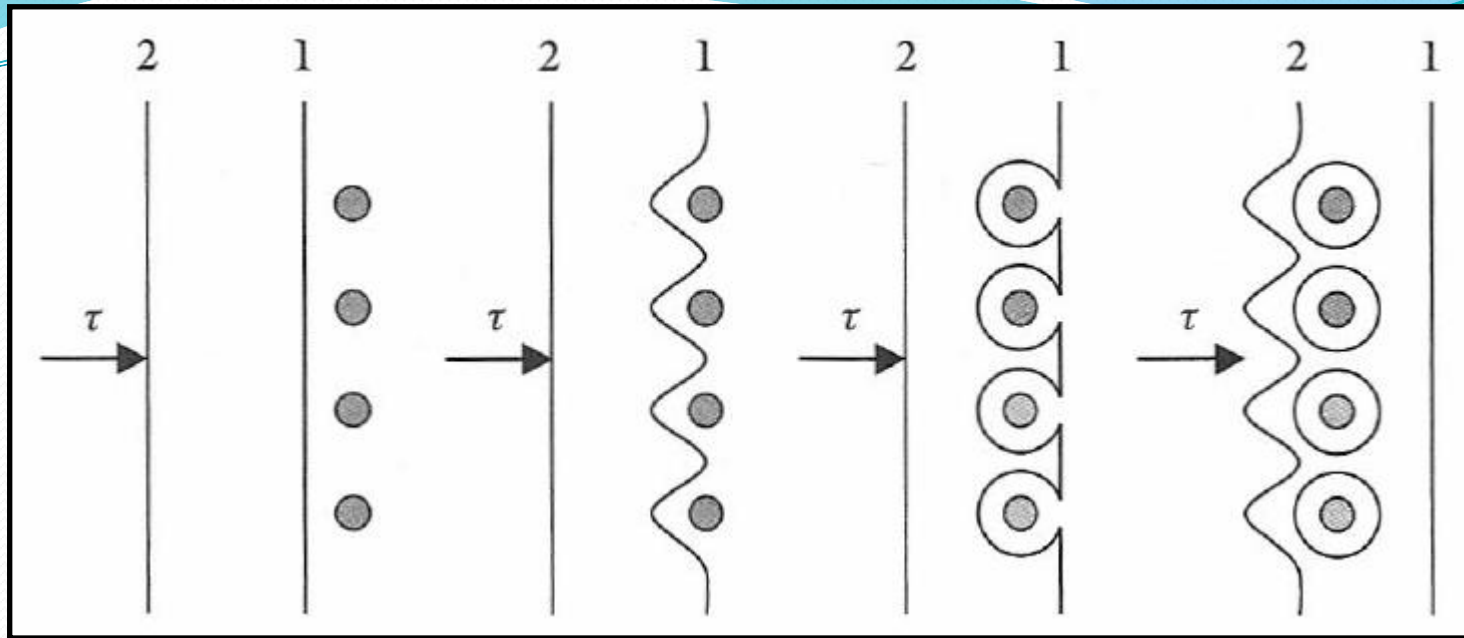
TEORIA DO ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO

➤ **Endurecimento por precipitação:** se as partículas forem incoerentes as discordâncias devem ultrapassá-las.



Modelo de Orowan:

$$\Delta\sigma_p = \frac{G \cdot b}{L}$$



- **QUANTO MENOR O ESPAÇAMENTO, MAIOR O EFEITO DO ENDURECIMENTO;**
- **ALGUMAS LIGAS, O AUMENTO DO LIMITE DE ESCOAMENTO É DE 5 VEZES;**
- **NO SUPERENVELHECIMENTO, O AUMENTO DOS PRECIPITADOS LEVA AO AUMENTO DA DISTÂNCIA ENTRE ELES E A RESISTÊNCIA CAI.**

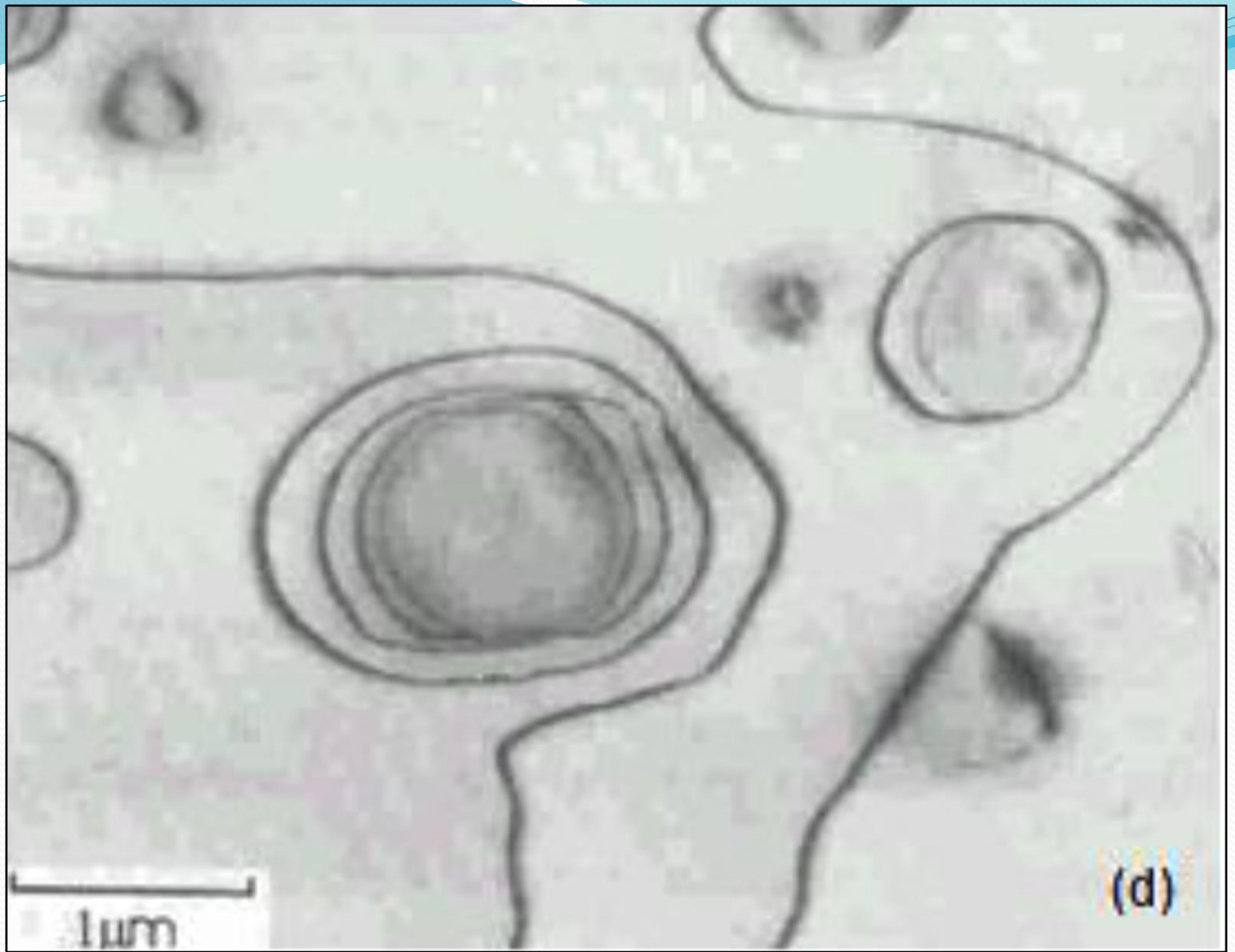
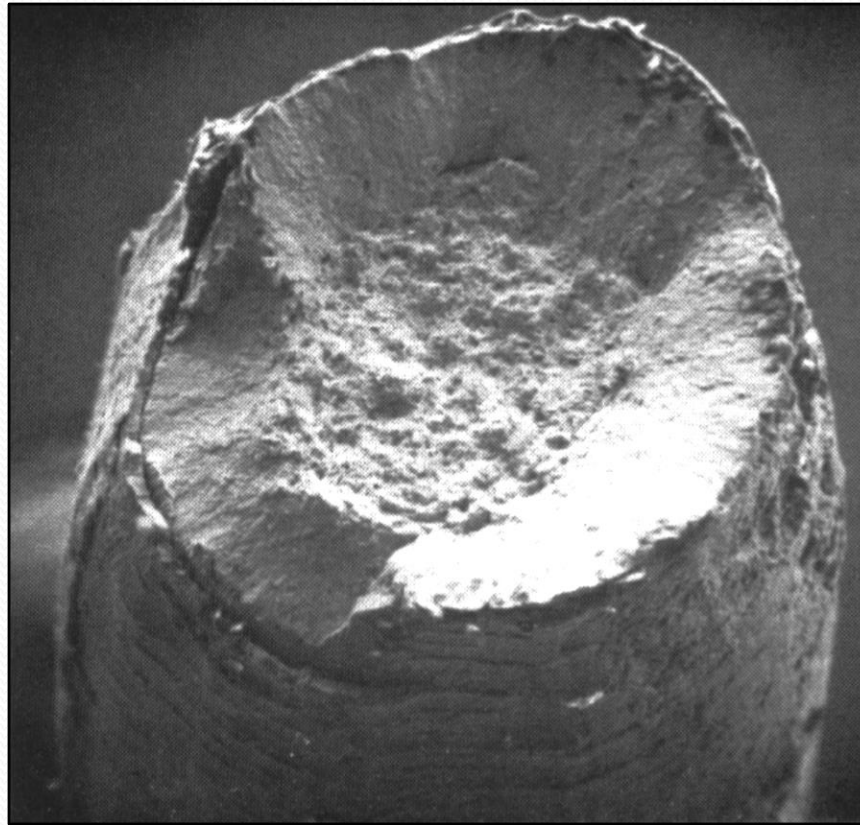


IMAGEM DE MET (MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE TRANSMISSÃO)

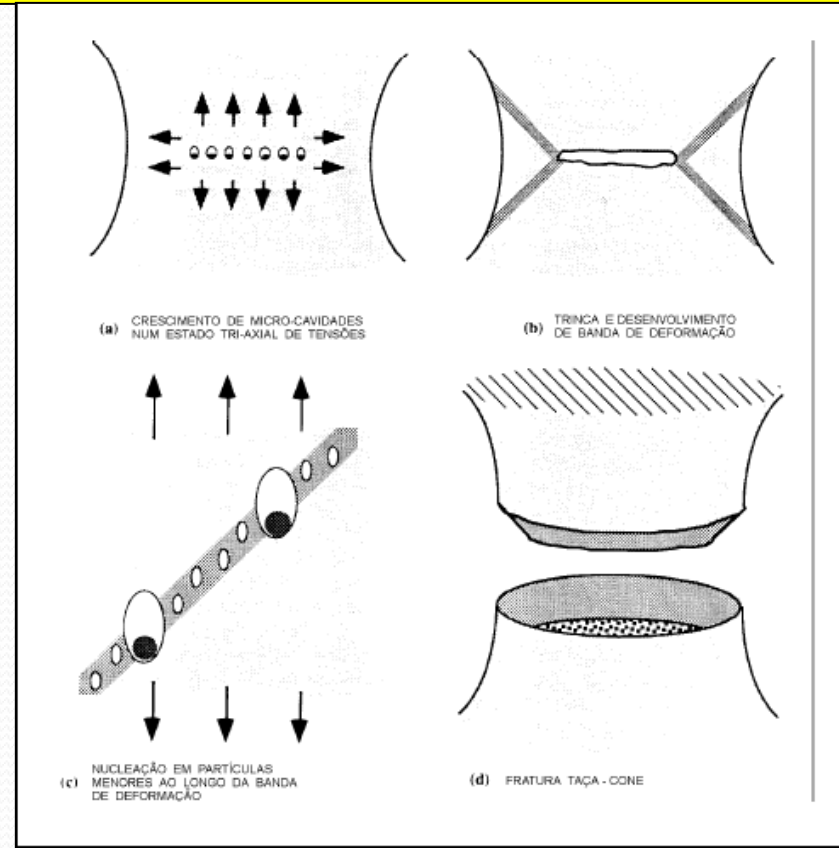
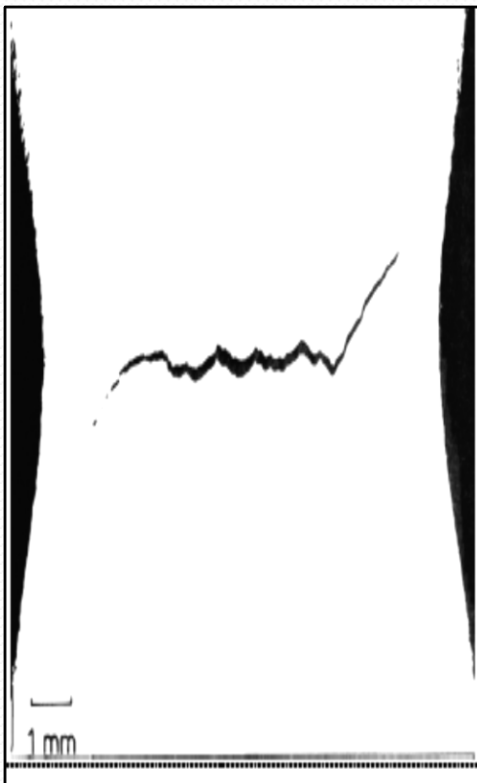
DIMPLES OU ALVEOLAR

EXEMPLO MAIS CLÁSSICO: TRACÃO - ESPECIALMENTE A ZONA FIBROSA DA TAÇA-CONE - 45° - TENSÕES PRINCIPAIS (BANDAS DE LÜDERS)



DIMPLES OU ALVEOLAR

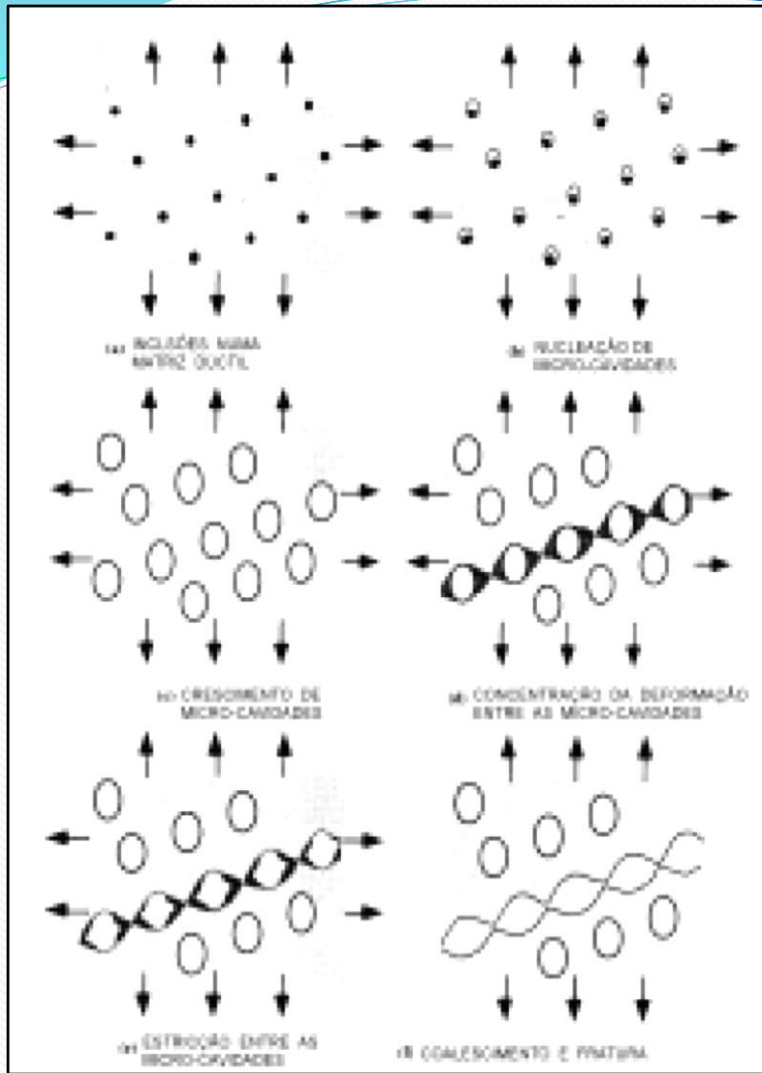
No **centro** da seção de **menor diâmetro** (após o **empescoçamento**), tem-se a máxima tensão longitudinal e a **máxima triaxialidade** de tensões. Quando a fratura se aproxima da superfície livre do c.p., a trinca segue a trajetória a 45° com o eixo, sem sofrer mais alterações na sua direção de propagação, formando a “**zona de cisalhamento**”(termo equivocado).
Mecânica da Fratura: cisalhamento fratura em Modo II ou III. Neste caso, **nem seria possível: geometria do cp.**



DIMPLES OU ALVEOLAR TAÇA-CONE



DIMPLES OU ALVEOLAR

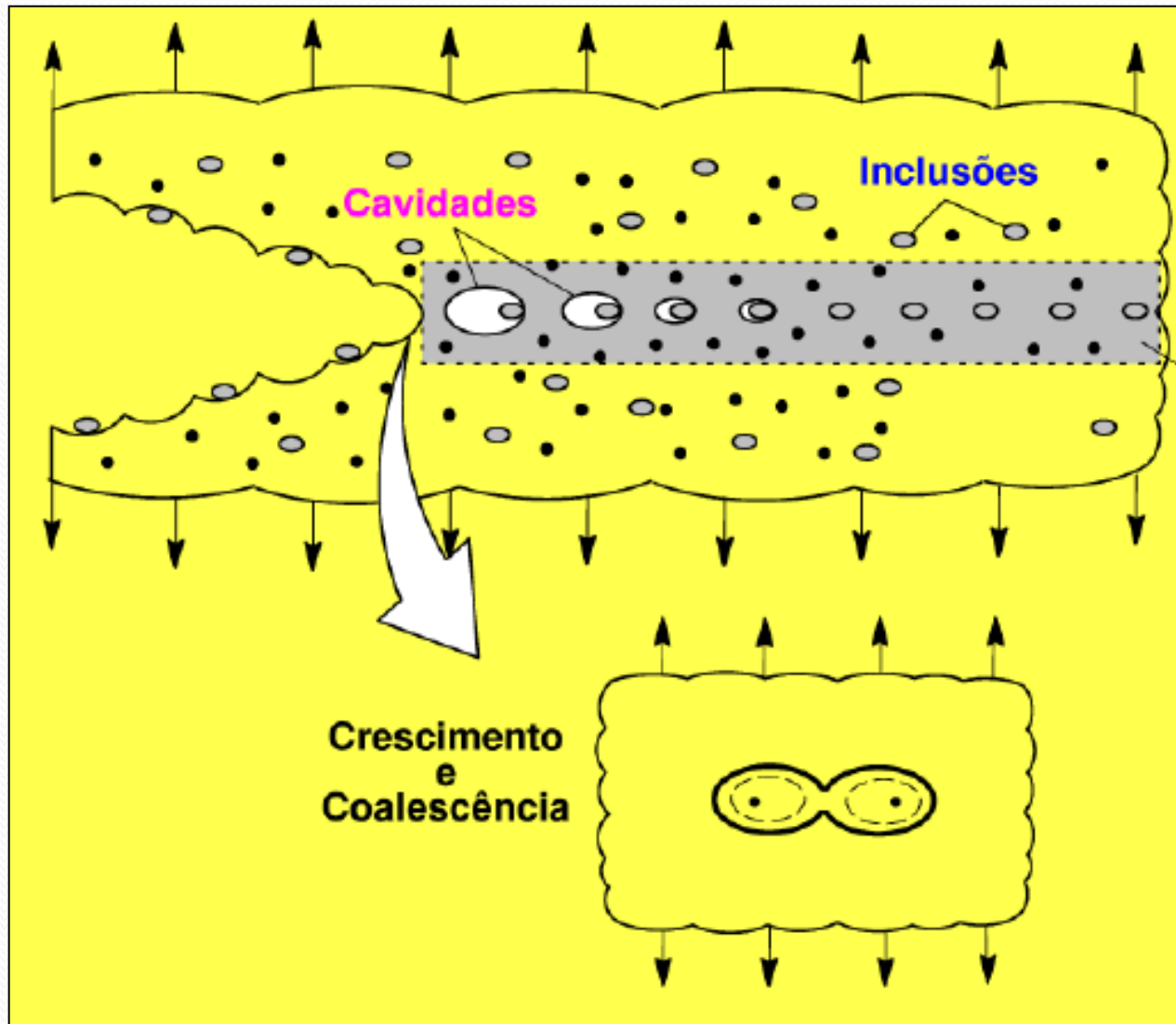


Mecanismo:

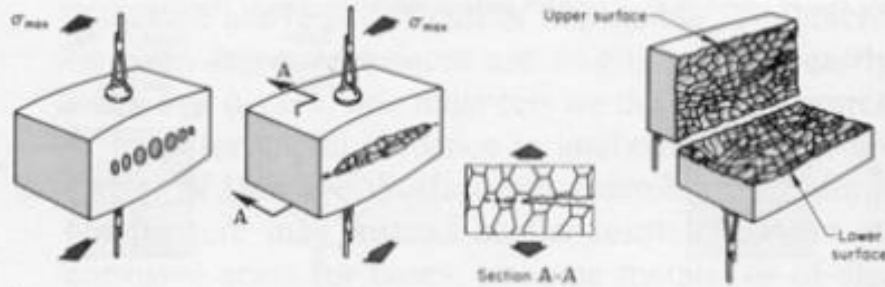
Ocorre em três etapas:

- (i) nucleação de micro-cavidades;
- (ii) crescimento de micro-cavidades;
- (iii) coalescimento de micro-cavidades.

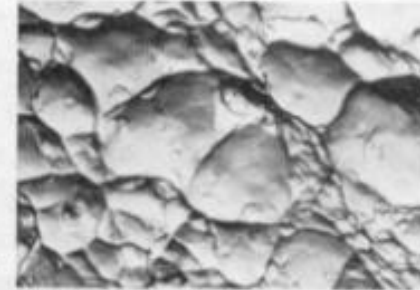
DIMPLES OU ALVEOLAR NA PROGRESSÃO DA TRINCA



DIMPLES OU ALVEOLAR

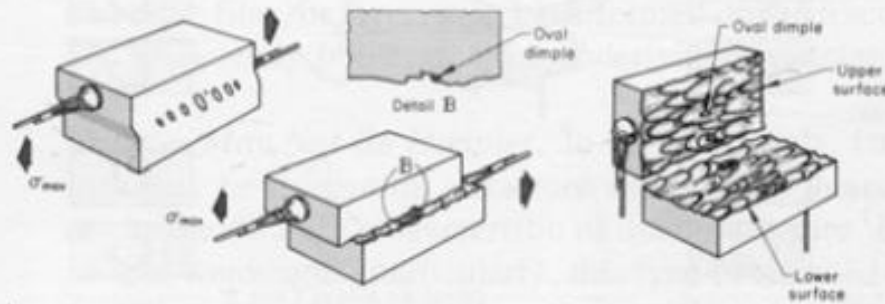


(a) Equiaxed dimple (tension)

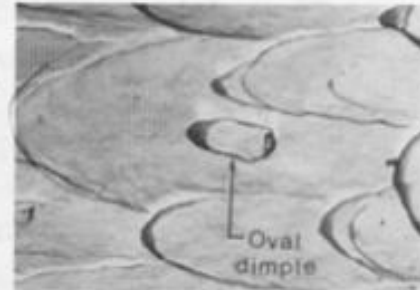


TEM fractograph (p-c replica)

5300X

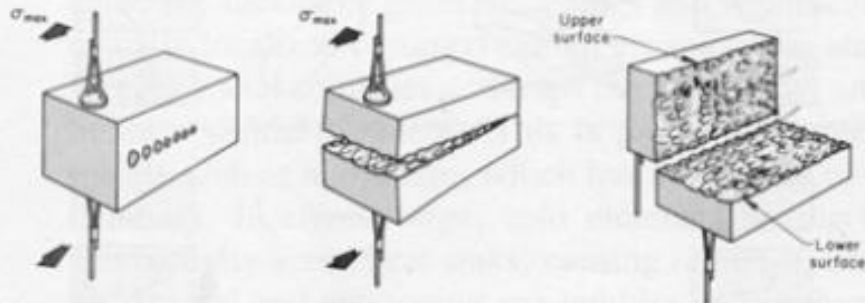


(b) Elongated dimple (shear)

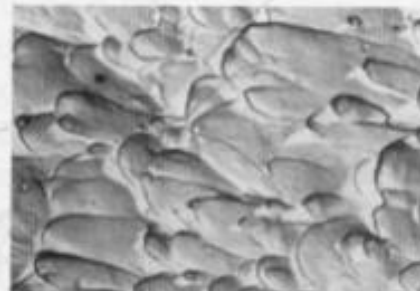


TEM fractograph (p-c replica)

5400X



(c) Elongated dimple (tensile tearing)



TEM fractograph (p-c replica)

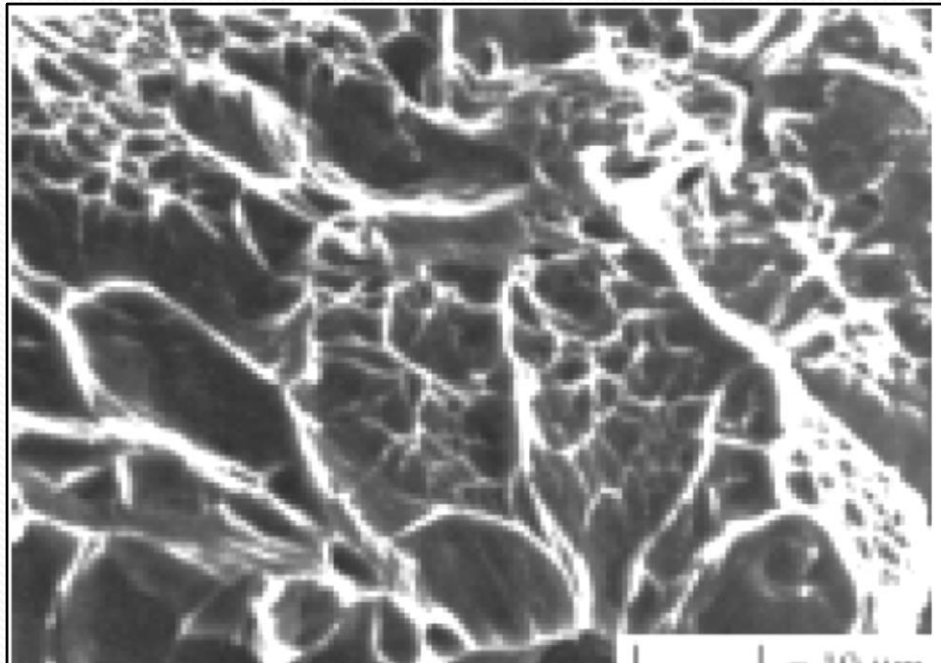
6500X

DIMPLES OU ALVEOLAR

Para:

- **Elevados gradientes de tensões;**
- **Partículas não homogêneas, quanto a forma, natureza ou distribuição;**

O processo de concentração das deformações e do coalescimento das microcavidades pode adquirir outra geometria, dando à fratura aspectos diferentes como por exemplo, a distribuição **bimodal de alvéolos**.



Distribuição bimodal de alvéolos

DIMPLES OU ALVEOLAR

TEORIAS DA NUCLEAÇÃO DA FRATURA DÚTIL (POR DIMPLES)

Goods e Brown

Acta Metallurgica, vol. 27, 1979, pp.1-15

Leva em consideração o aumento da tensão na interface partícula/matriz-acúmulo de discordâncias.

$$\Delta\sigma_d = 5,4 \times \alpha \times \mu \sqrt{\frac{\epsilon_1 \times b}{r}}$$

α cte: 0,14 a 0,33, μ : rigidez, ϵ_1 é a deformação máxima longe da interface, b é o vetor de Burgers e r é o raio da

partícula

$$\sigma_c = \Delta\sigma_d + \sigma_1$$

PARTÍCULAS < 1 μm

σ_c é a tensão crítica para nucleação de fratura dútil (combinação partícula/matriz).

modelo de Argon, Im e Safoglu

Met.Trans.vol. 6A, 1975, pp. 825-837

tensão efetiva ou de von Mises

$$\sigma_m$$

componente hidrostática do estado de tensões

$$\sigma_e$$

$$\sigma_c = \sigma_e + \sigma_m$$

PARTÍCULAS > 1 μm

DIMPLES OU ALVEOLAR

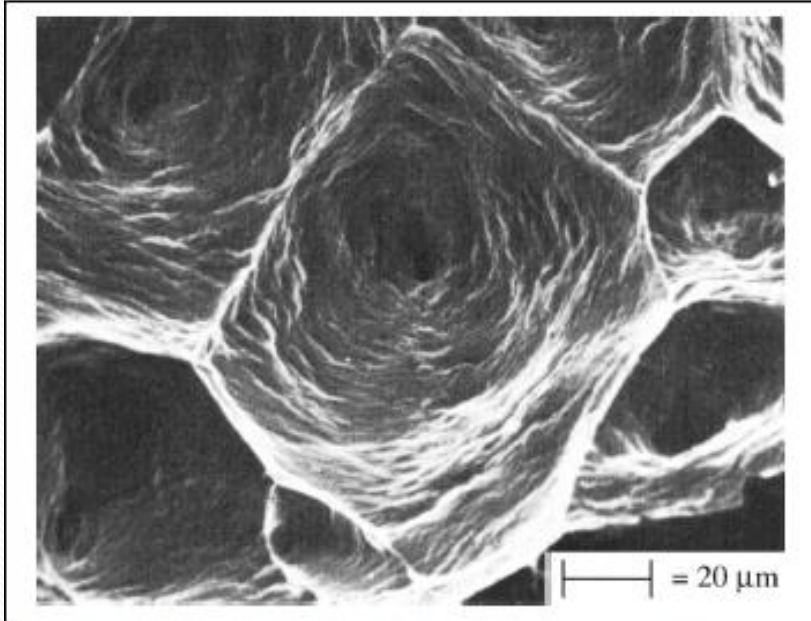


Fig. 3.18. Linhas de deformação no interior dos alvéolos (8)

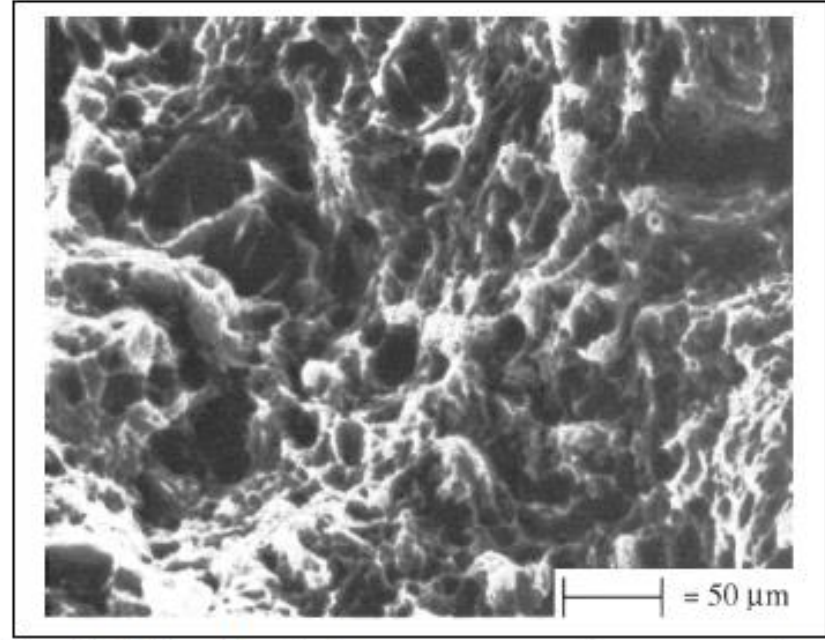


Fig. 3.19. Alvéolos em aço temperado e revenido (8)

**MATERIAIS MUITO DÚTEIS:
ALVÉOLOS GRANDES E ATÉ
COM LINHAS DE
DESLIZAMENTO INTERNAS.**

DIMPLES OU ALVEOLAR

Esse micromecanismo também aparece em fraturas frágeis

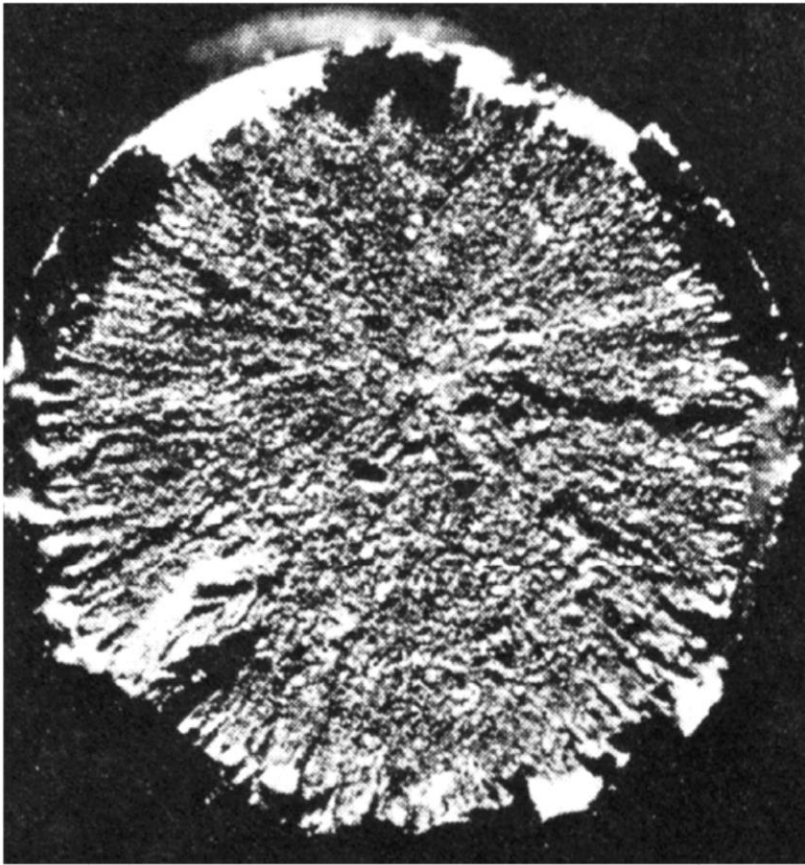


Fig. 3.13. Zonas radial e de cisalhamento (2b)

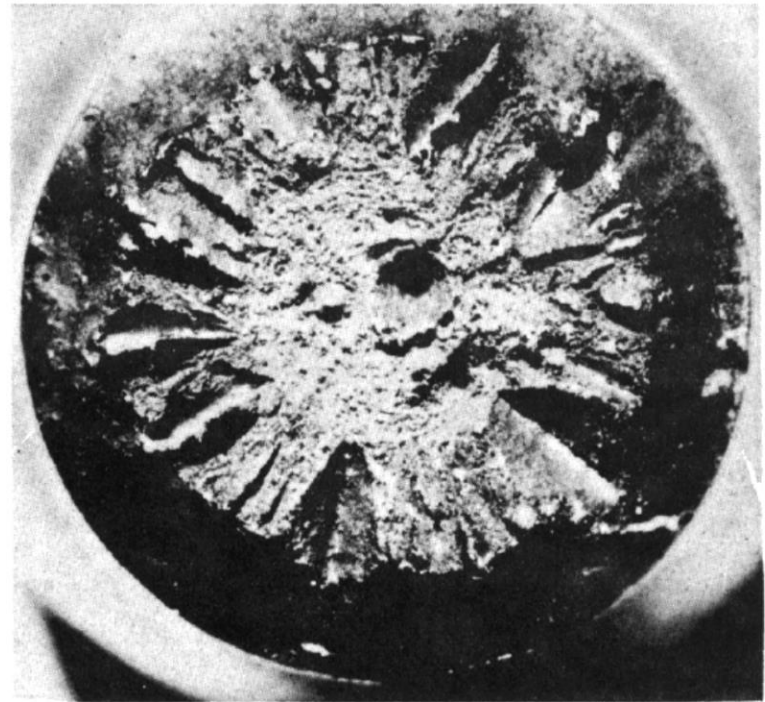


Fig. 3.11. Três zonas distintas na fratura (2b)

Zona radial, Zona Fibrosa e Zona de Cisalhamento



**INCLUSÕES PODEM LEVAR À
FRATURA ALVEOLAR**

SOLIDIFICAÇÃO

Figura 8.44

Contração de solidificação em lingotes. À direita, lingote sem “cabeça-quente”: A solidificação progride uniformemente ao longo de toda a parede da lingoteira. O isolamento e os materiais exotérmicos na “cabeça-quente” retardam a solidificação desta região em relação ao restante do lingote (à esquerda). O metal líquido contido na “cabeça” alimenta o lingote, compensando sua contração. Todo o volume correspondente à contração fica contido na “cabeça”. (Ver Figura 8.45).

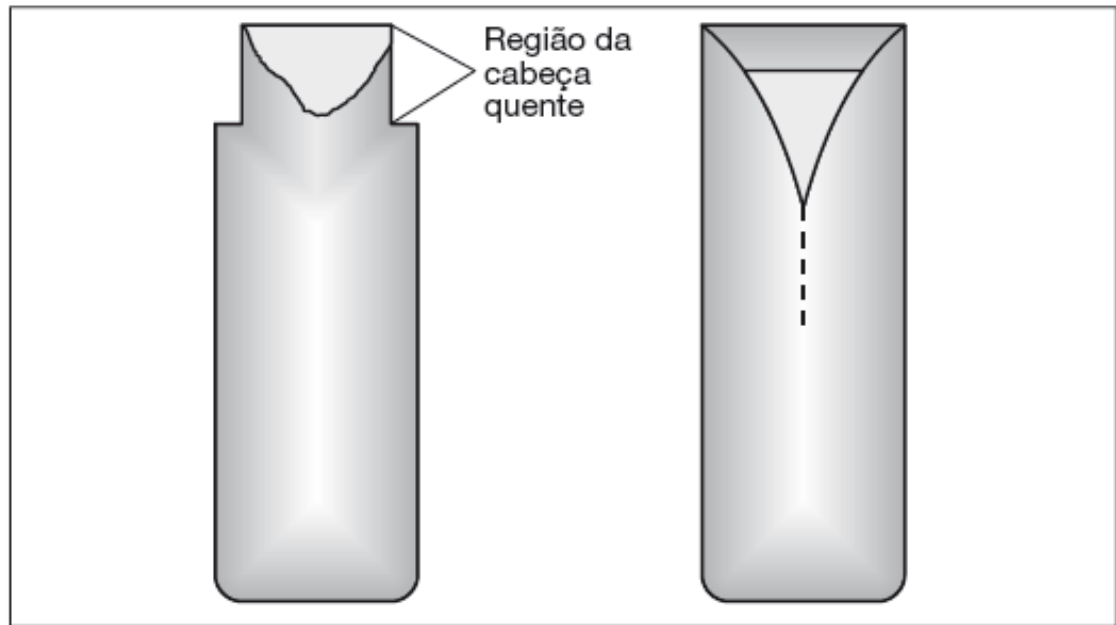
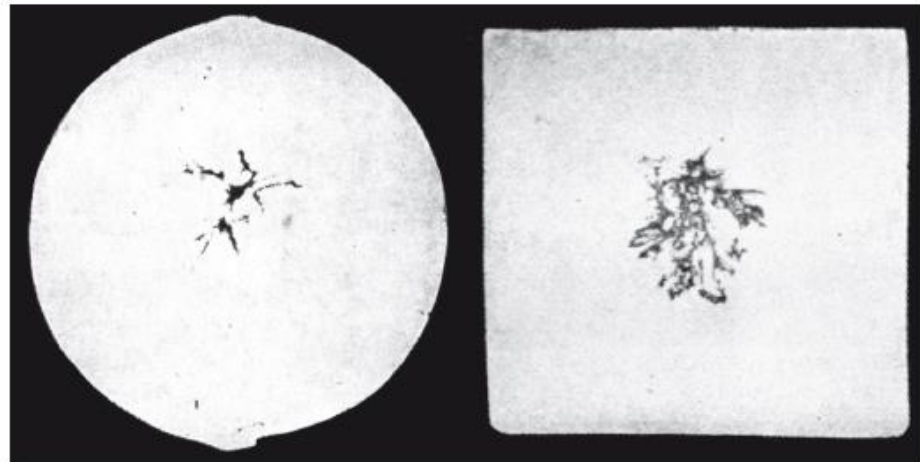


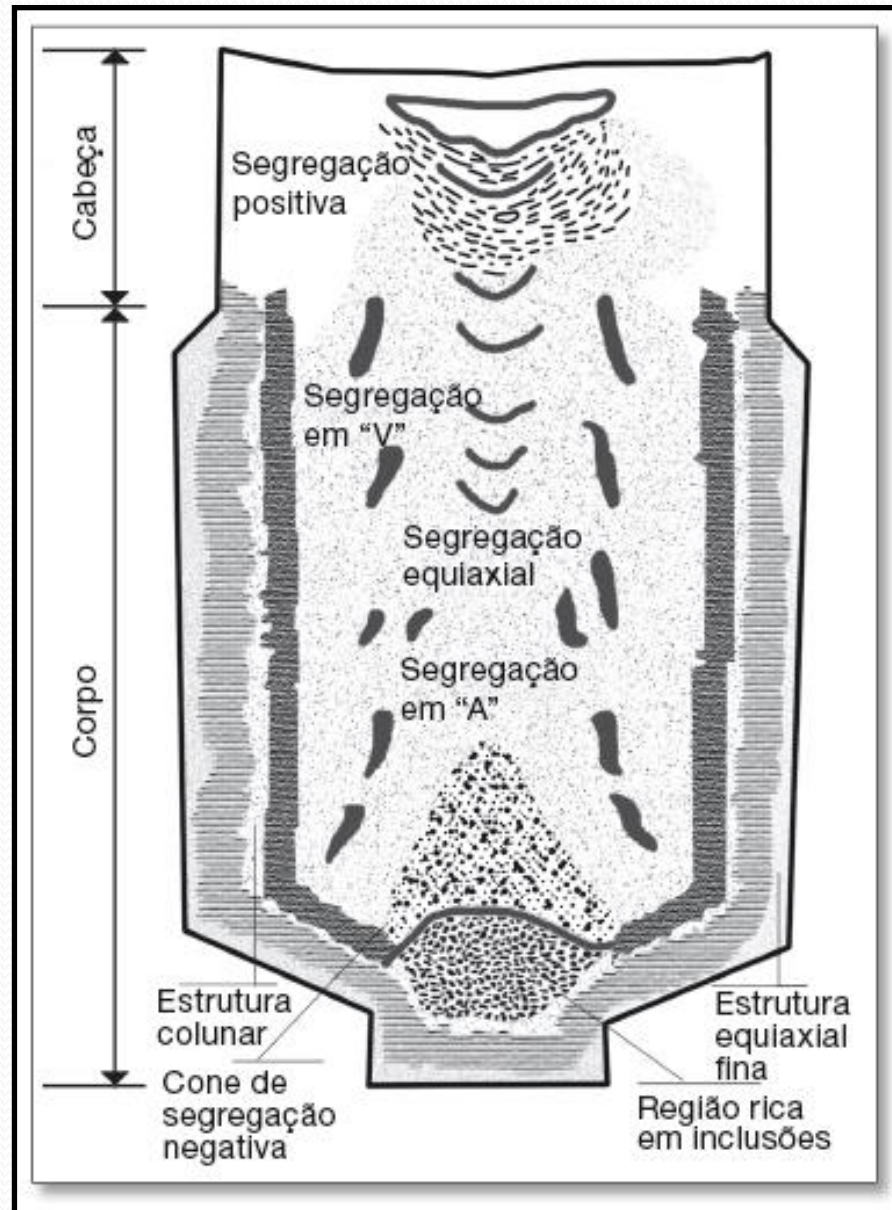
Figura 8.45

Macrografias de exemplos de “restos de vazio” em barras conformadas a quente. Sem ataque.

(Colpaert)



SOLIDIFICAÇÃO



(Colpaert)

**MINÉRIO/SUCATA/
COQUE/REFRATÁRIO
(S,P,Si)**

**CONVERSORES
(O₂)**

**TRATAMENTOS PARA
ACALMAR
(Ca,Al,Mn,Mg)**

**INCLUSÕES NÃO
METÁLICAS: ENDÓGENAS E
EXÓGENAS**

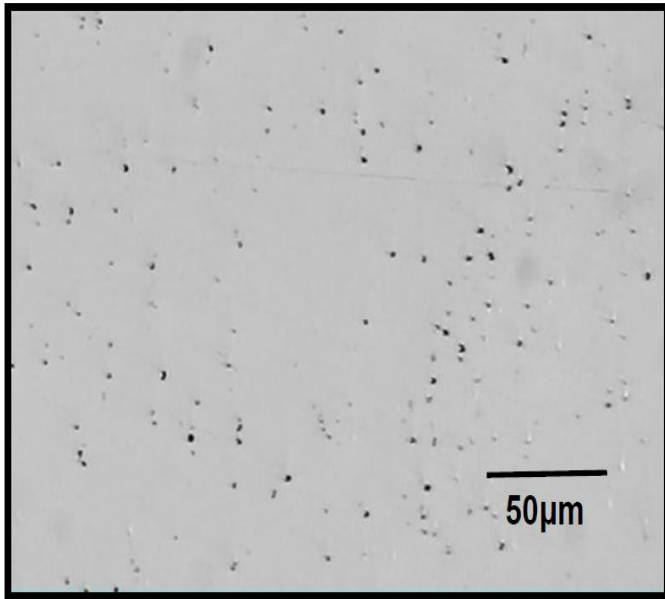
**TIPO A
SULFETOS
(Mn,Fe,Ca)**

**TIPO B
ALUMINA
(Al₂O₃)**

**TIPO C
SILICATOS
(SiO₂)**

**TIPO D
ÓXIDOS
GLOBULARES
(Mn,Fe,Ca)**

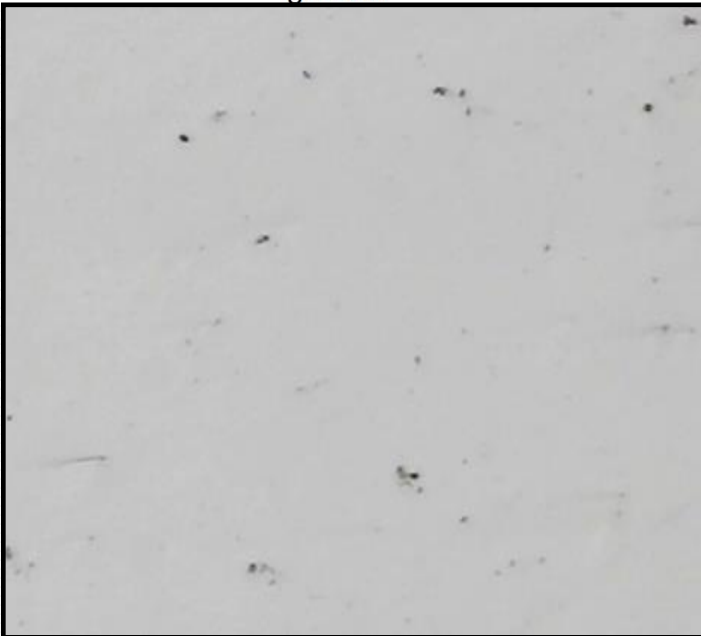
(MARCOMINI)



Amostra 3. Inclusões de óxido globular (tipo D), nível 3, série fina e grossa.

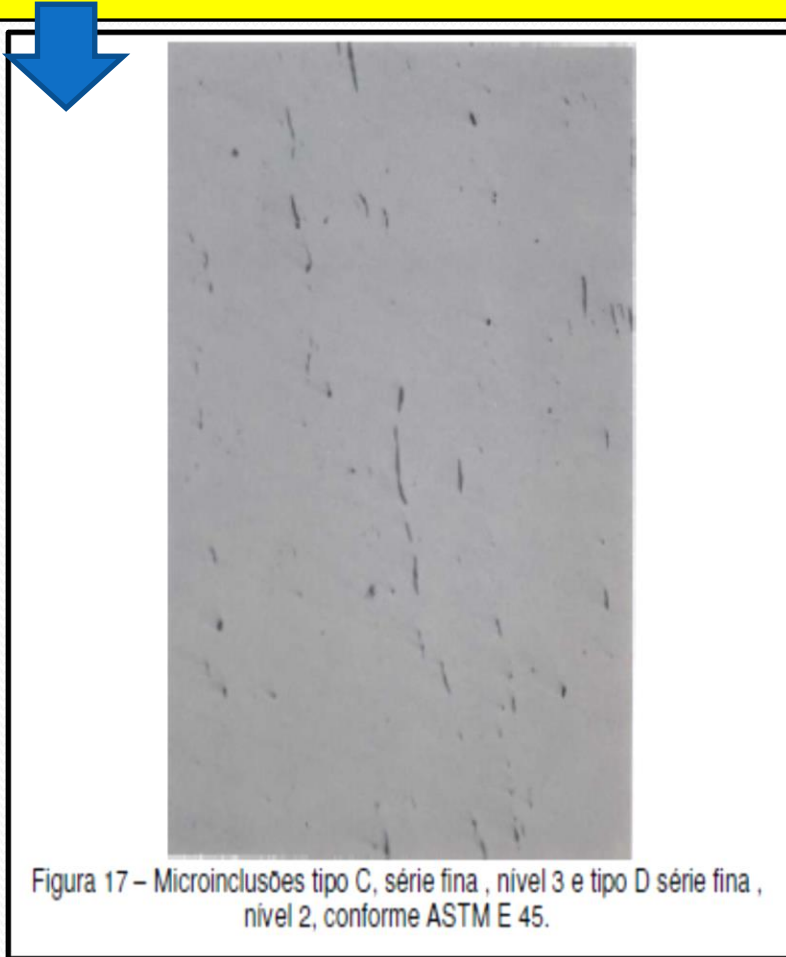


INCLUSÕES DE SULFETO-
1000X

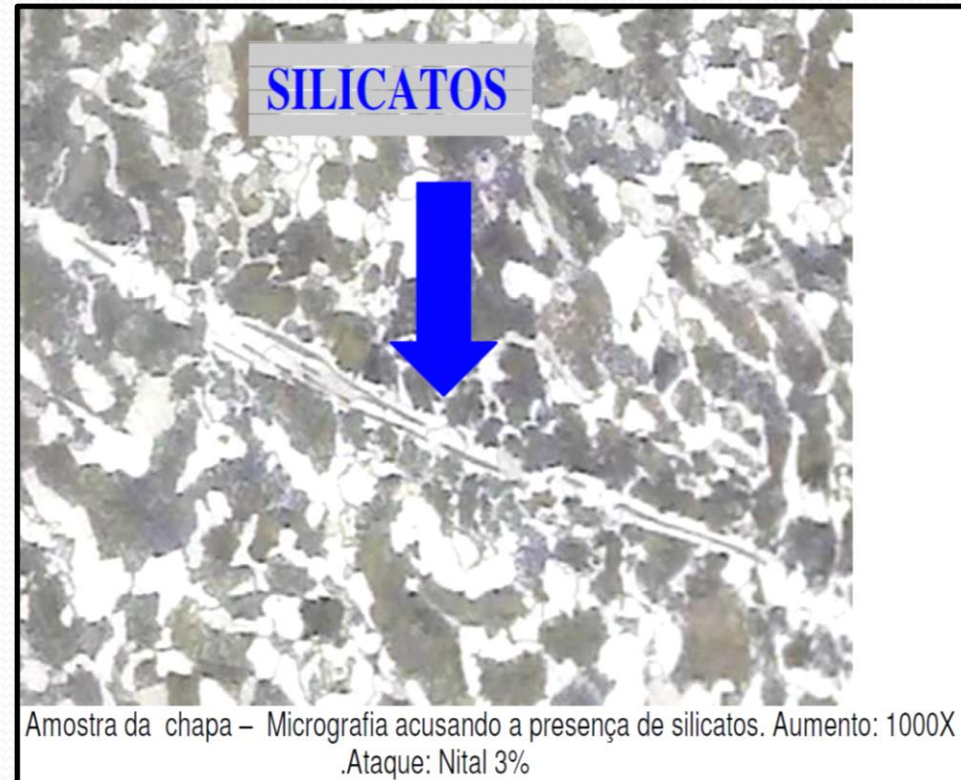


análise de microinclusões do CP3. Tipos A,B, nível1, série fina

**ANÁLISE DE INCLUSÕES: AMOSTRA LONGITUDINAL,
SEM ATAQUE
AUMENTO DE 100X**



(MARCOMINI)



(MARCOMINI)

**ANÁLISE DE INCLUSÕES: AMOSTRA LONGITUDINAL,
SEM ATAQUE
AUMENTO DE 100X**



Figura 4 – Micrografia apresentando sulfetos tipo médio curto com boa distribuição.

Material ABNT 1213/ DIN 9SMn28 Rd. 22,22mm trefilado

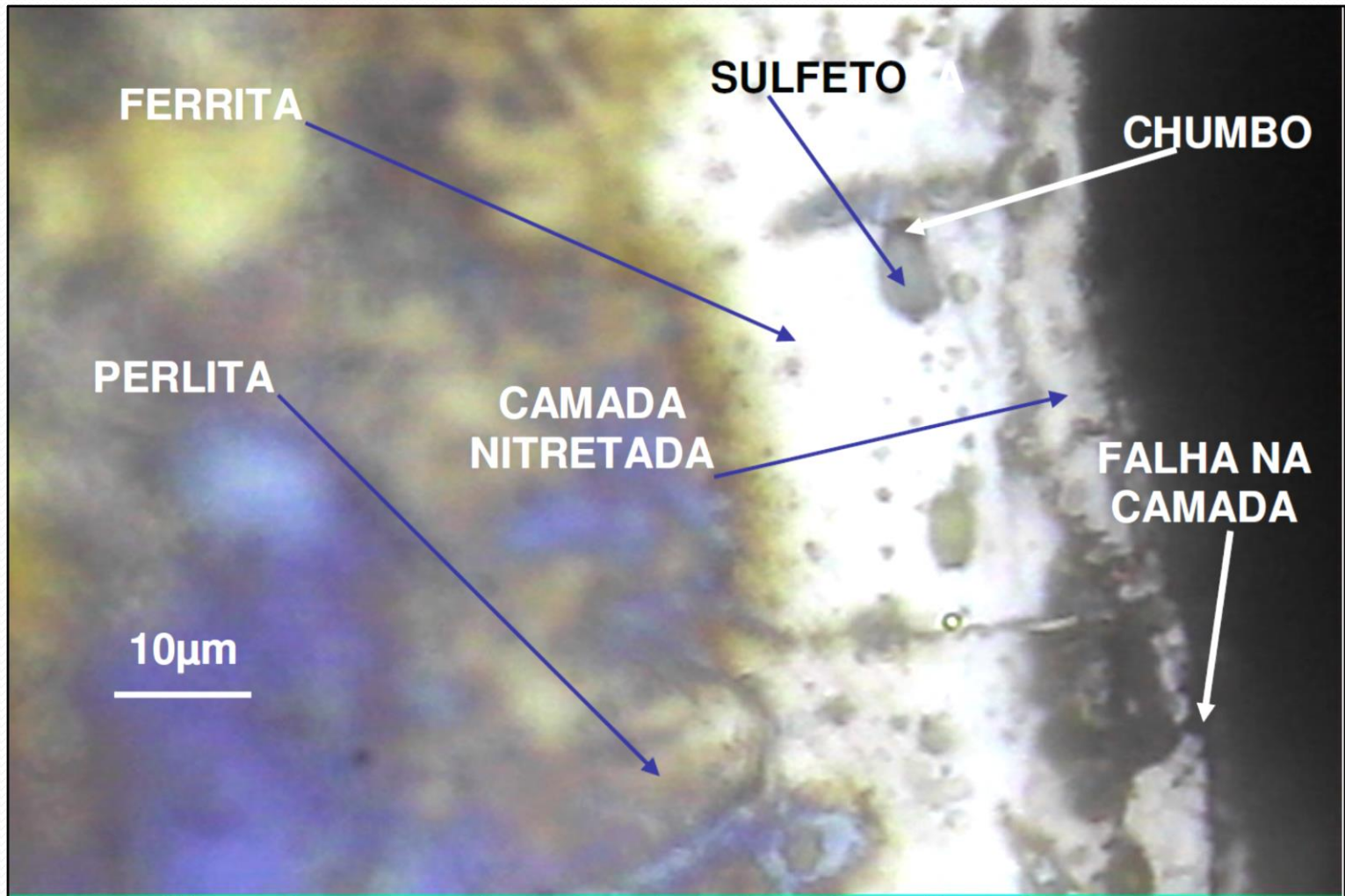
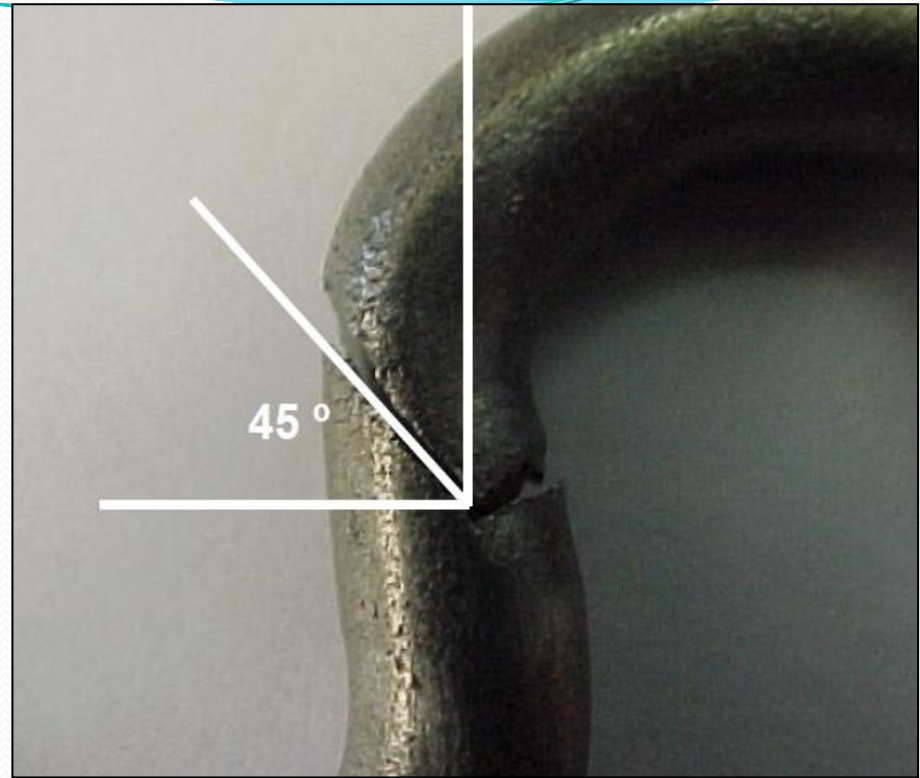


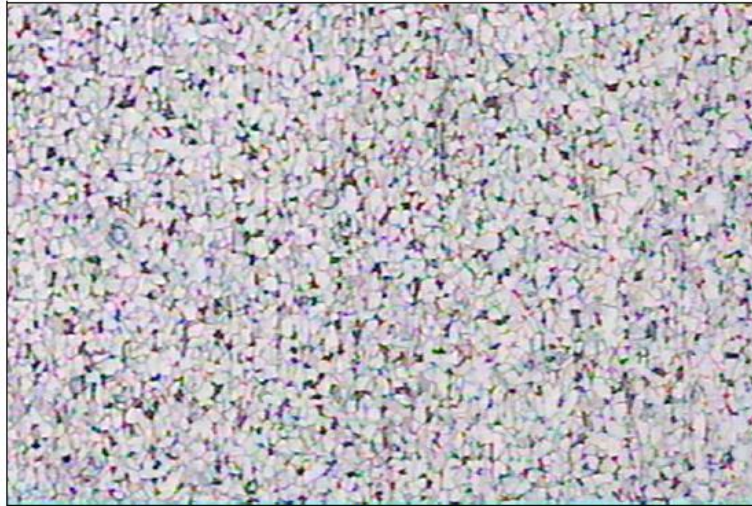
Figura 1 – Micrografia apresentando estrutura de ferrita, perlita e sulfetos. Camada nitretada com falhas..Ataque: Nital 3% seguido de solução aquosa de tiosulfato de sódio. 1000X

CASO II – FRATURA DÚTIL DE EIXO CURVO



- ANÁLISE QUÍMICA AÇO ABNT 1010 – COERENTE COM FORNECIDO;
- GRANDE QUANTIDADE DE DEFORMAÇÃO – 45° -SIMILAR À TRAÇÃO DE MATERIAL DÚTIL;
- PODERIA SER PROBLEMA DE INCLUSÕES – ANÁLISE METALOGRÁFICA COMPLETA;
- PPODERIA SER DUREZA ABAIXO DO ESPECIFICADO- ENSAIO DE DUREZA OK.

CASO II – FRATURA DÚTIL DE EIXO CURVO



– **Amostra 2 - fraturada.** Micrografia constituída de ferrita e perlita. Tamanho de grão 7/8 Ataque Nital 3%, Aumento 100x



Figura 7 - Análise de microinclusões na **amostra 3, sem fratura.** Inclusões tipo A, nível 1, tipo B, e D, Nível 2, série fina e grossa, conforme ASTM E 45.

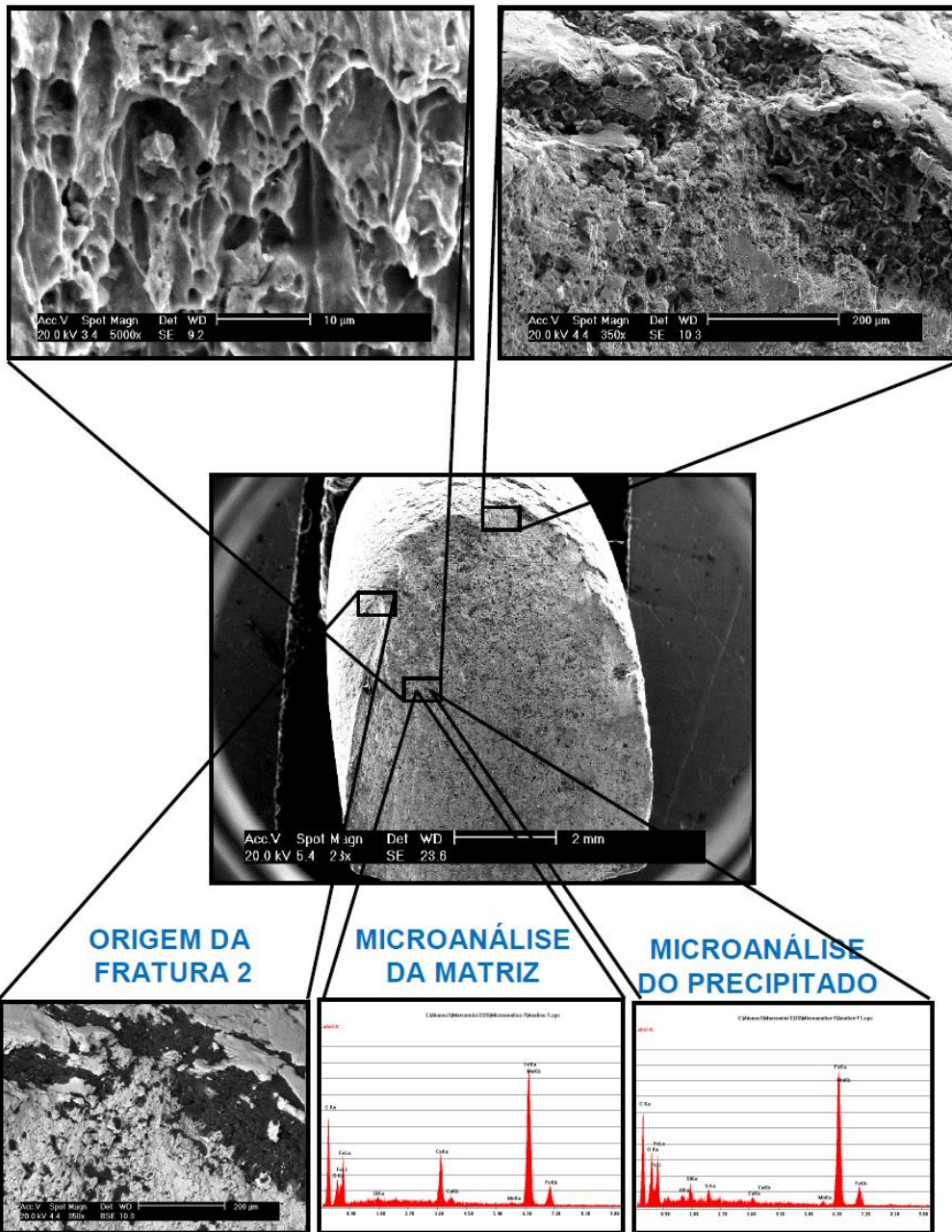
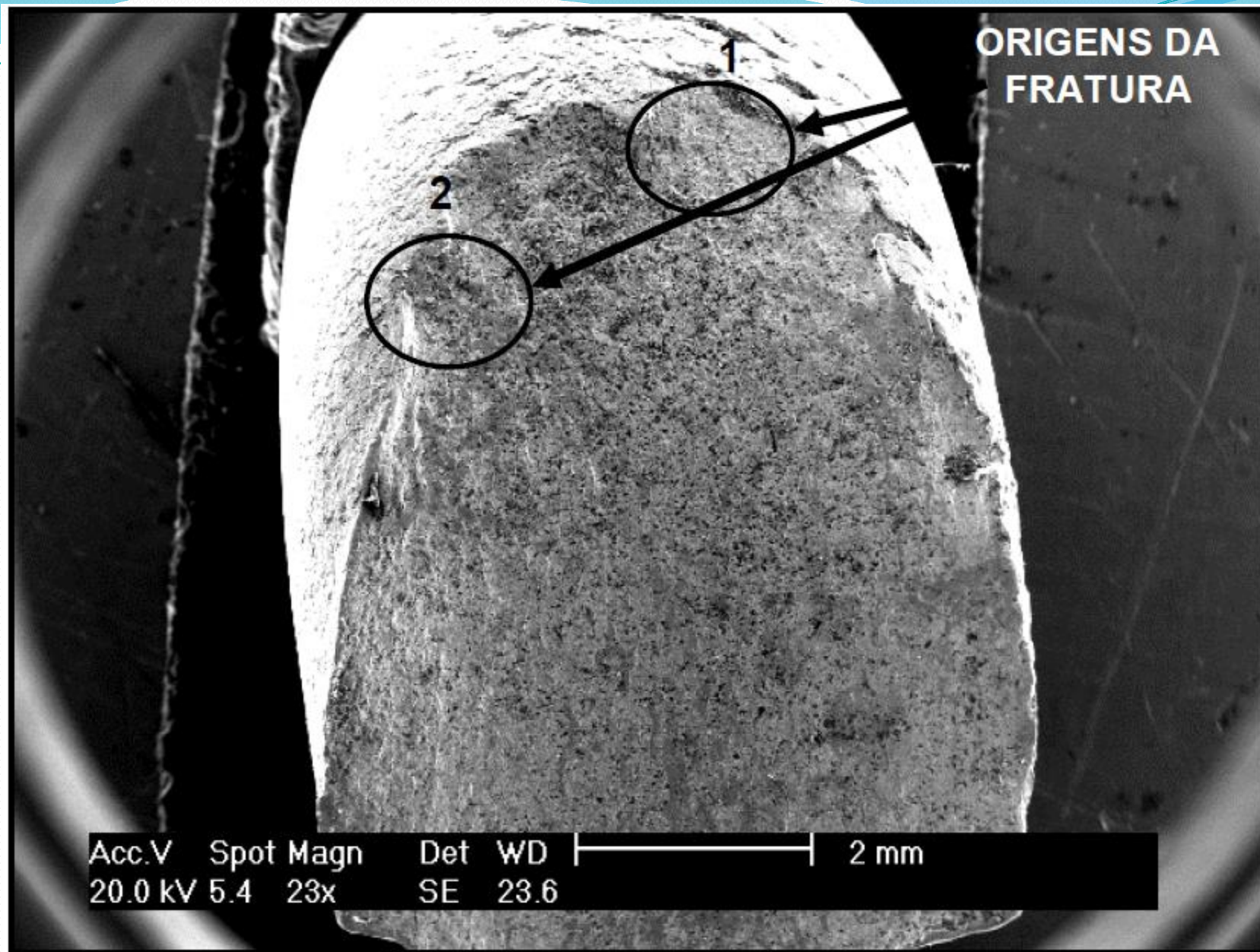
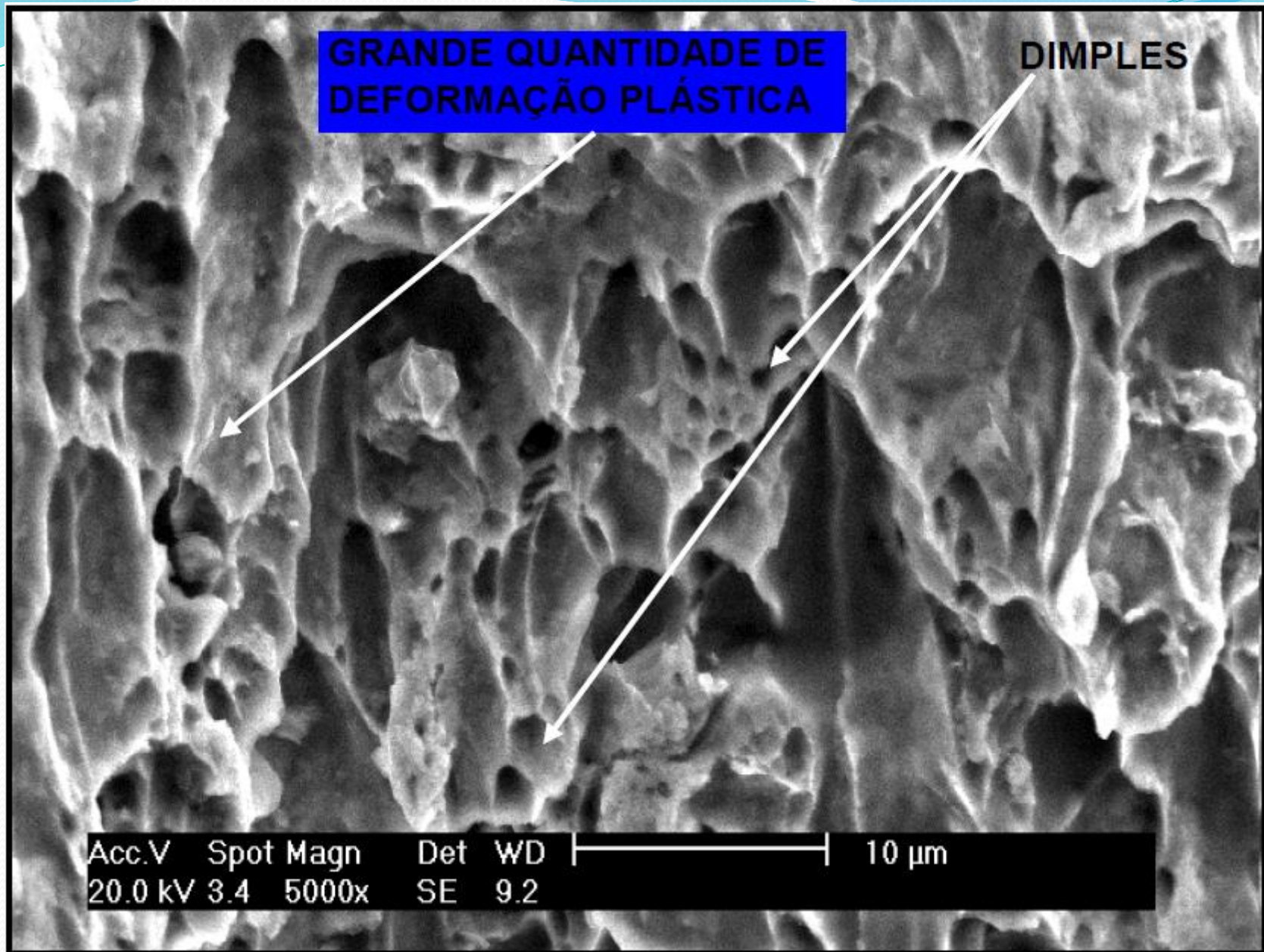


Figura 13 – Mapeamento da análise de MEV.

CASO II - FRATURA DÚTIL DE EIXO CURVO



CASO II - FRATURA DÚTIL DE EIXO CURVO



CASO II - FRATURA DÚTIL DE EIXO CURVO

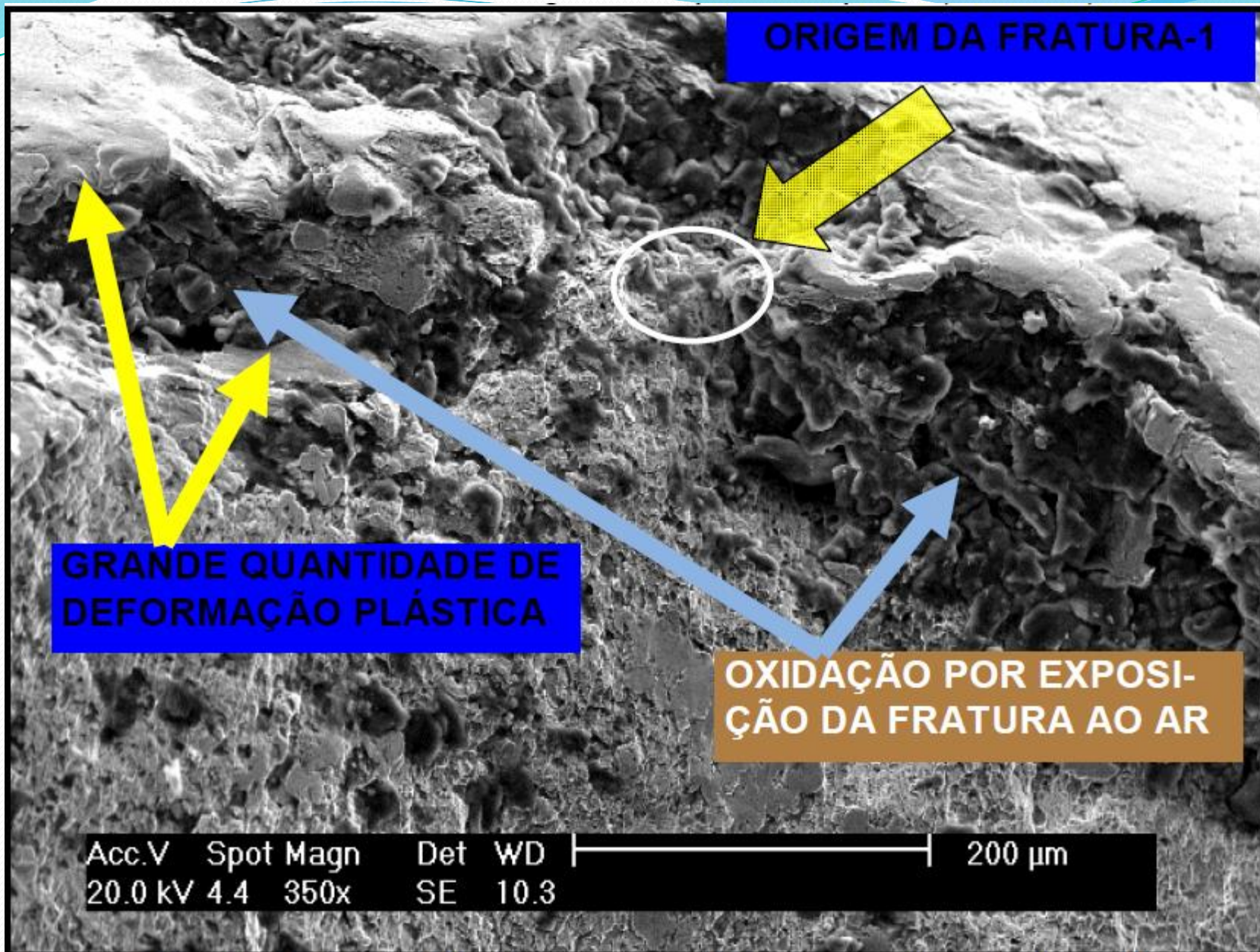
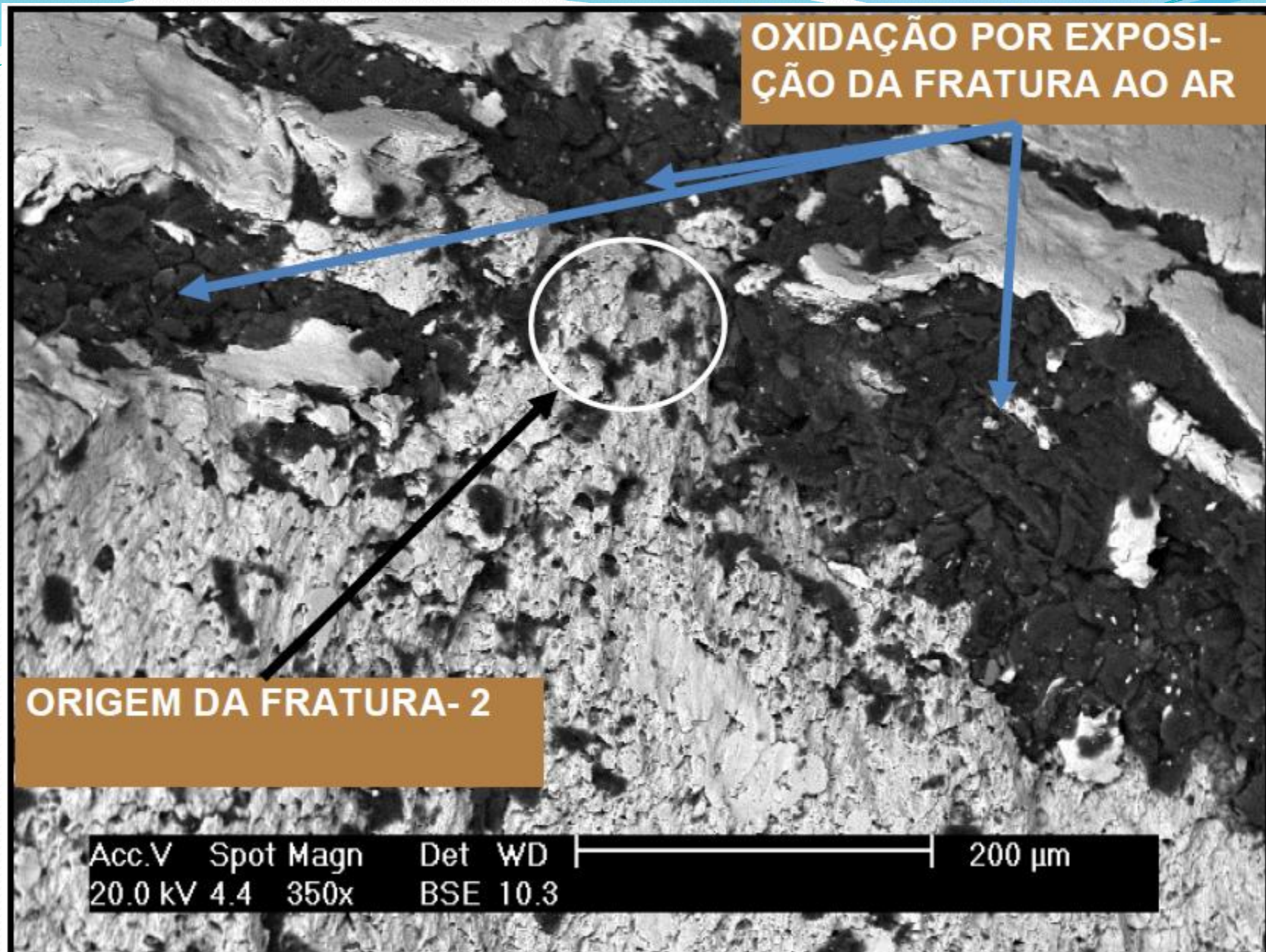


Figura 15 – Análise de MEV da origem da fratura-1. Isenta de inclusões.

CASO II - FRATURA DÚTIL DE EIXO CURVO





FIM