

Mecanismos de Fratura

Tipos de fratura

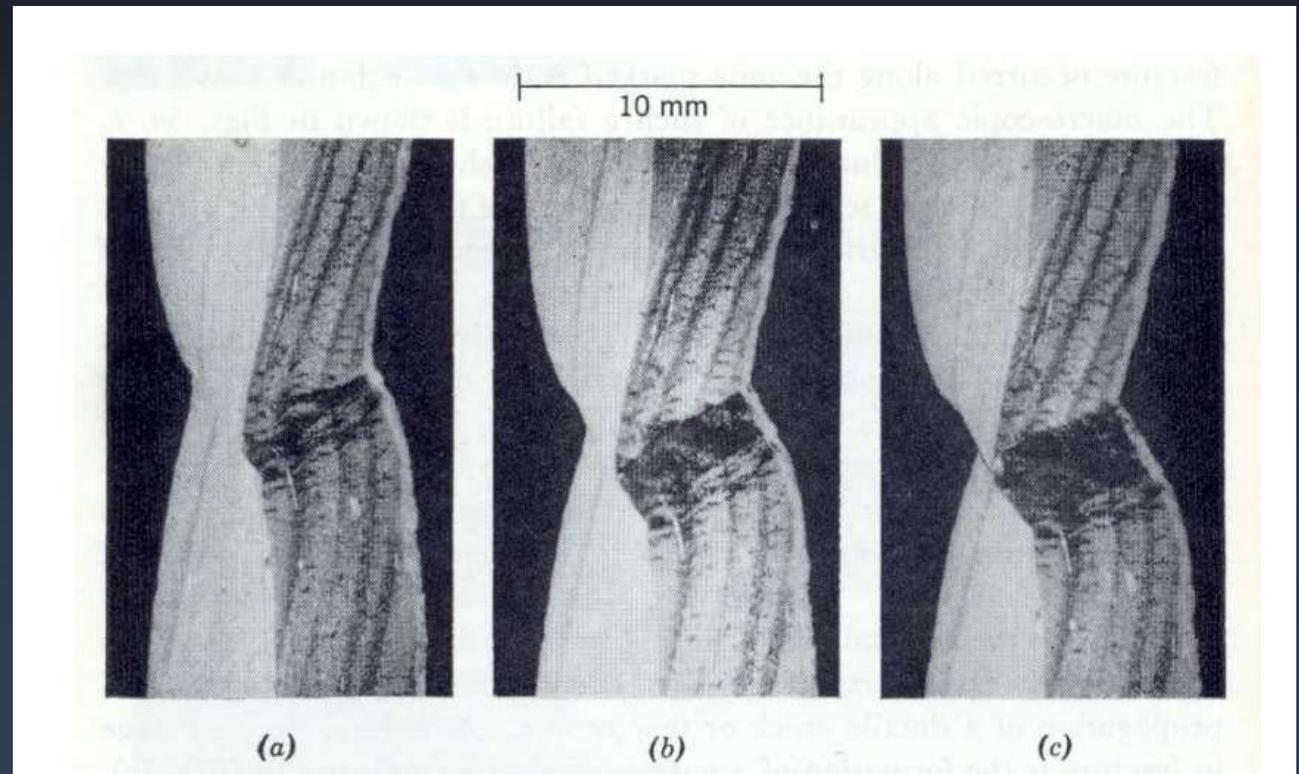
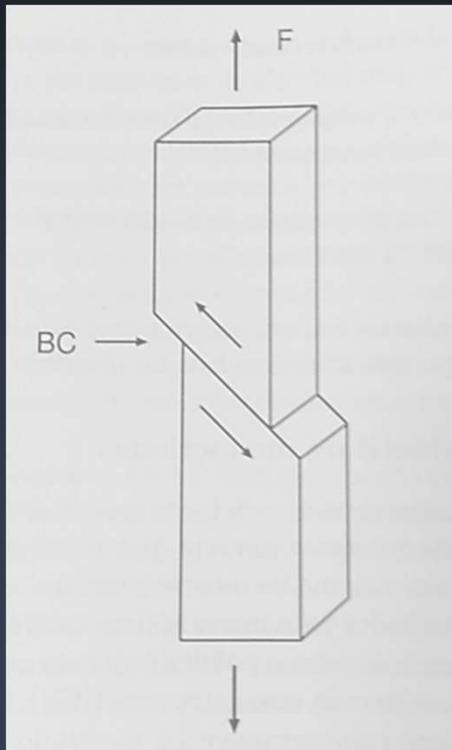
- *“Fratura é a separação ou fragmentação de um corpo sólido em duas ou mais partes sob a ação de tensão.”*
- Fratura Dúctil: acompanhada de intensa deformação plástica
- Fratura Frágil: Não é acompanhada de deformação plástica

Fratura dúctil

- Monocristais
 - Ação sucessiva de linhas de discordâncias em um ou mais sistemas de escorregamento (heterogeneidade de deformação)
 - Cisalhamento – monocristais orientados para ativação de um único sistema de escorregamento

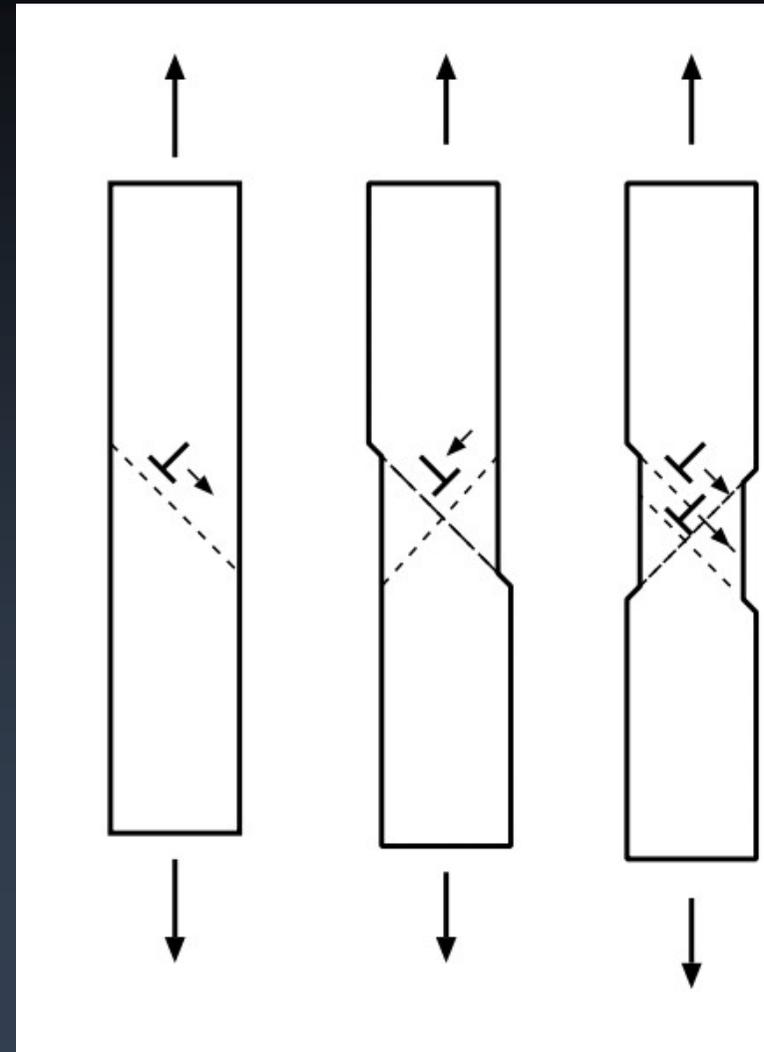
Fratura dúctil por cisalhamento

- A fratura vai ocorrer quando a seção resistente for “uma linha”:



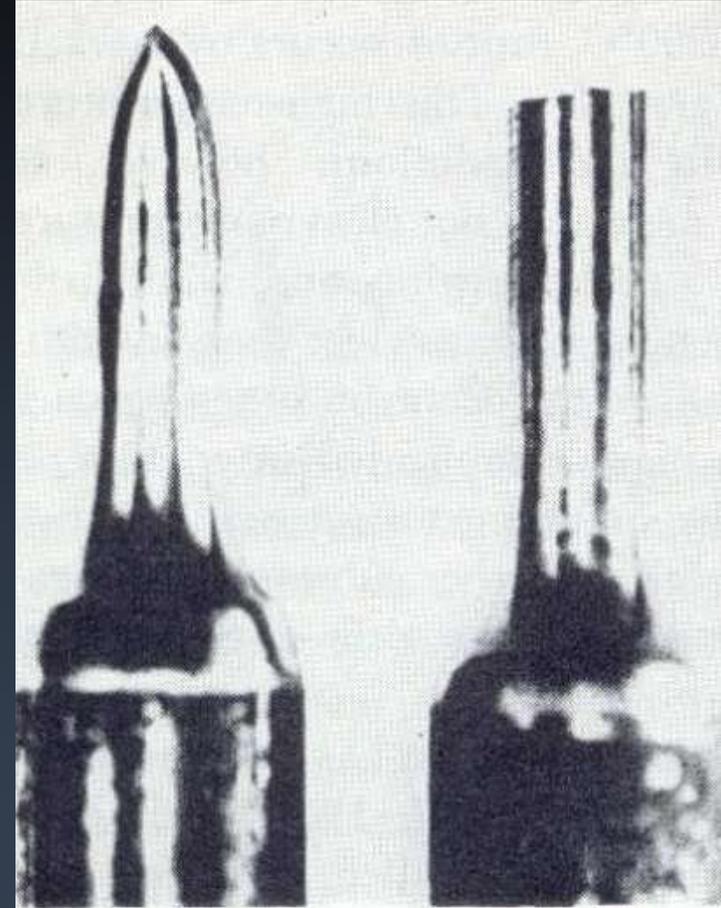
Fratura dúctil

- Ativação de mais de um sistema de escorregamento:
- A evolução da deformação leva à formação da estricção
- Se a amostra for homogênea e livre de partículas, a seção resistente diminui até se tornar um ponto



Fratura dúctil

- Este fenômeno é conhecido como “colapso plástico”
- Se o monocristal for orientado de modo não favorável à ativação de sistemas de escorregamento, a fratura ocorre por clivagem

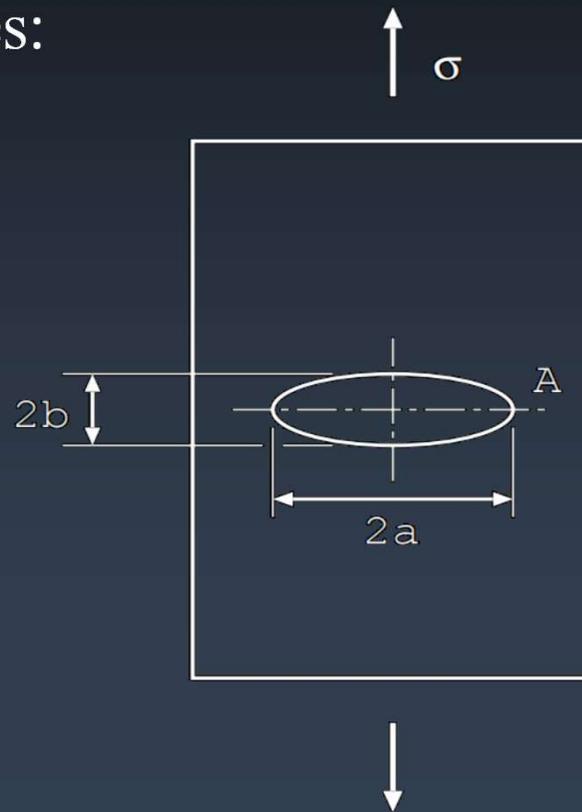


Fratura dúctil

- Cisalhamento e colapso plástico são fenômenos raros
 - Ouro pode fraturar por colapso plástico
 - Materiais “normais” do dia a dia têm barreiras internas às discordâncias:
 - Contornos de grão
 - Contornos de macla
 - Partículas
 - Precipitados
 - Inclusões
 - Partículas imersas na matriz correspondem a uma descontinuidade que atua como concentrador de tensões
 - Partículas em si, na deformação, alteram a distribuição de deformação em torno delas

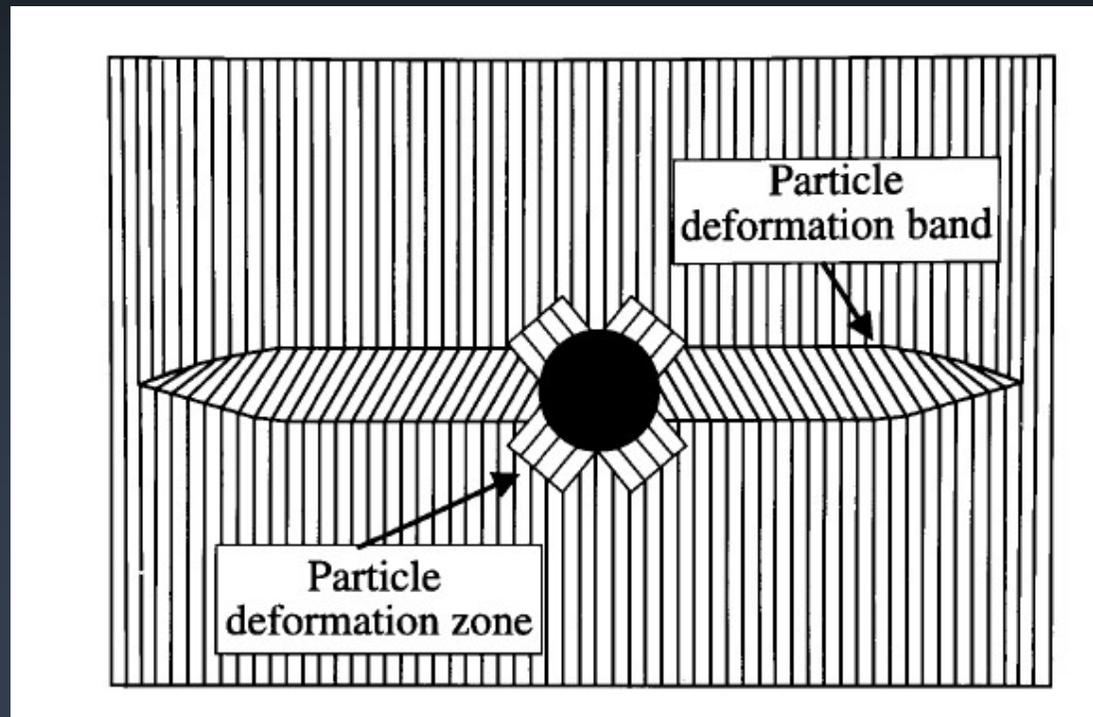
Fratura dúctil

- Um poro pode ser considerado como a trinca passante dos modelos de Inglis e posteriores:



Fratura dúctil

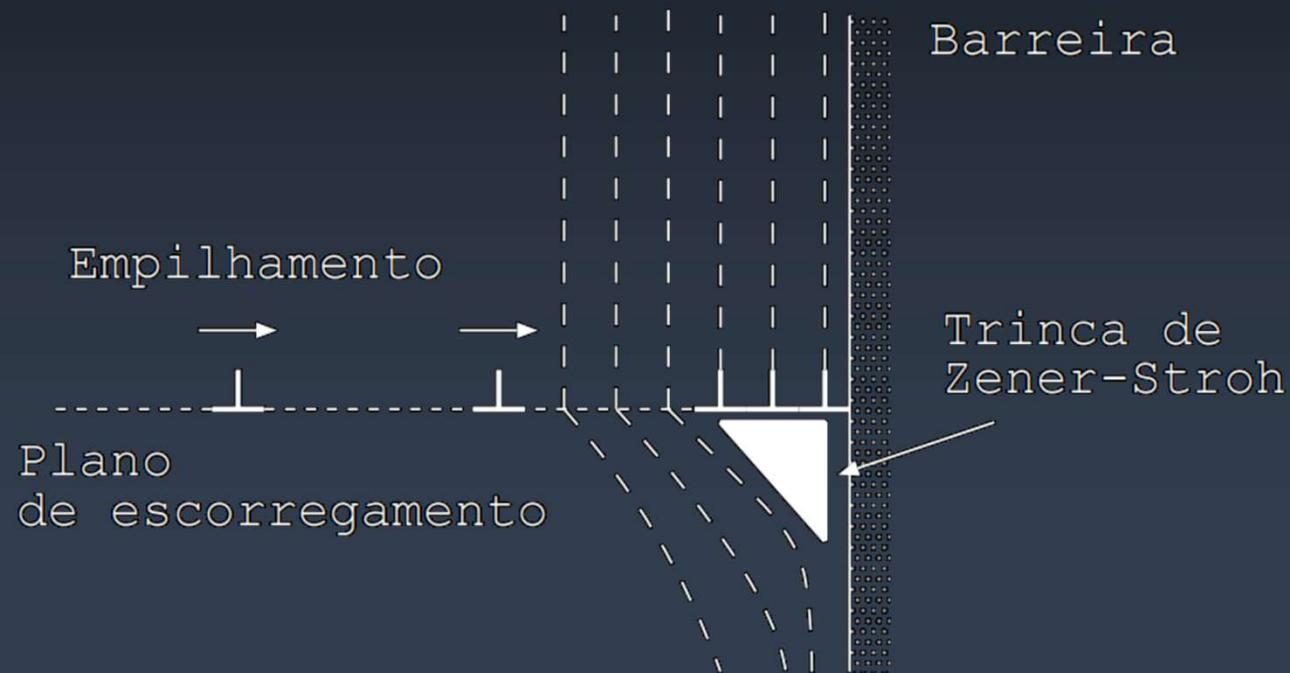
- Partículas interferem na deformação plástica na sua vizinhança



Como uma trinca dúctil nucleia dentro de um material?

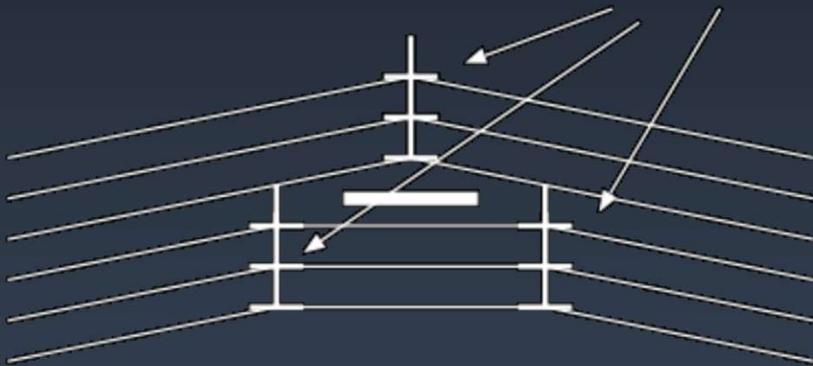
Trincas de Zener-Stroh

- As trincas surgem por empilhamento de discordâncias em uma barreira intransponível

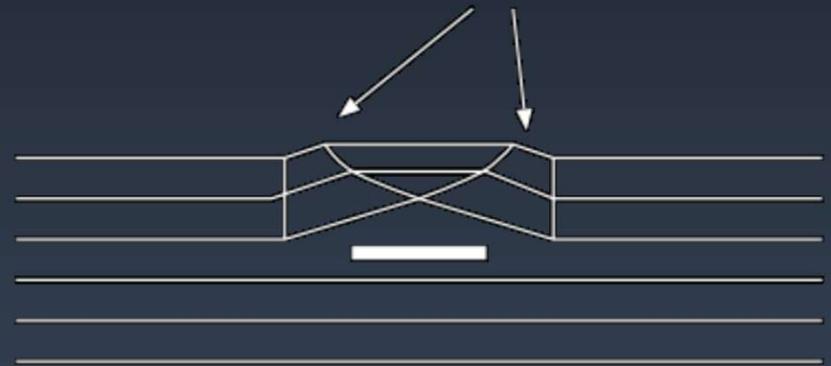


Trincas por rotação do reticulado

cont. sub-grao



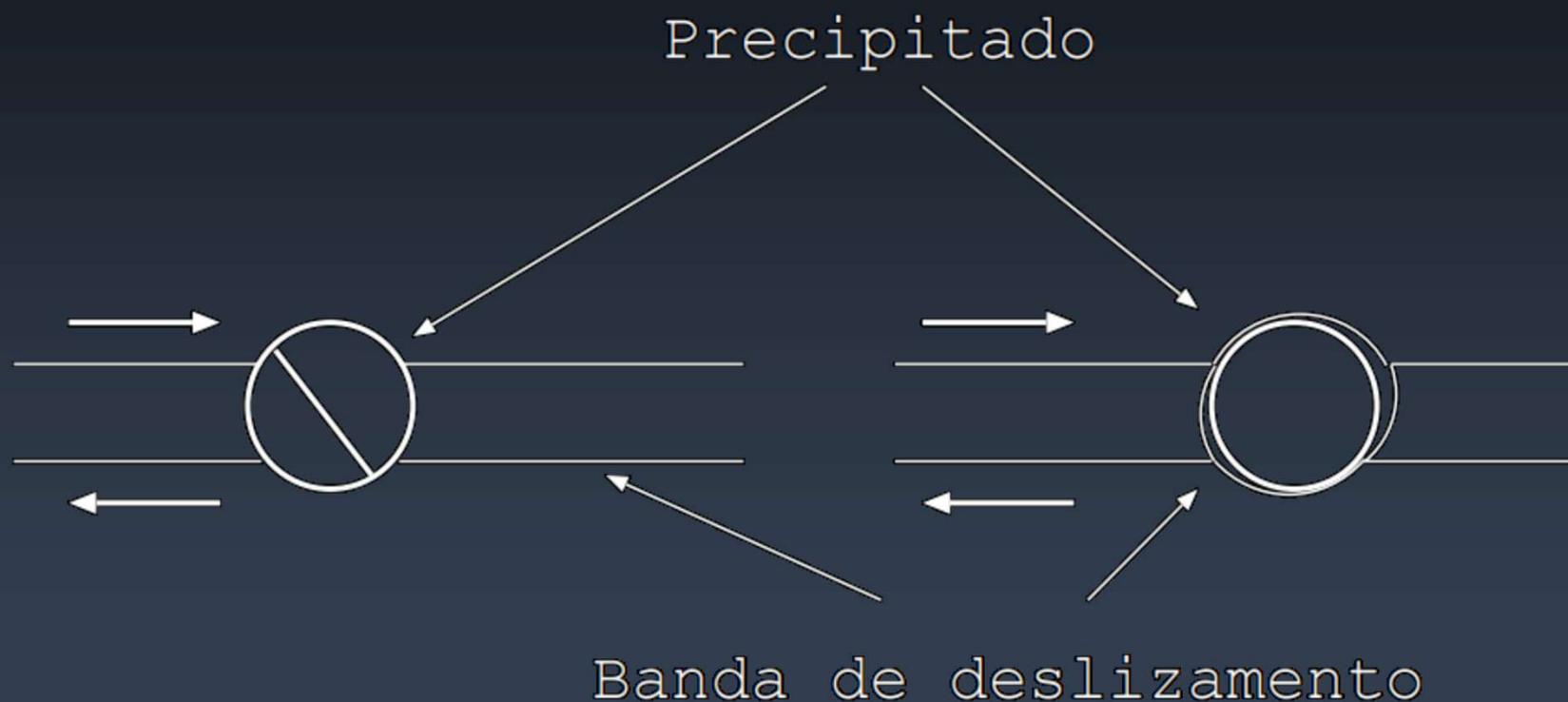
macla



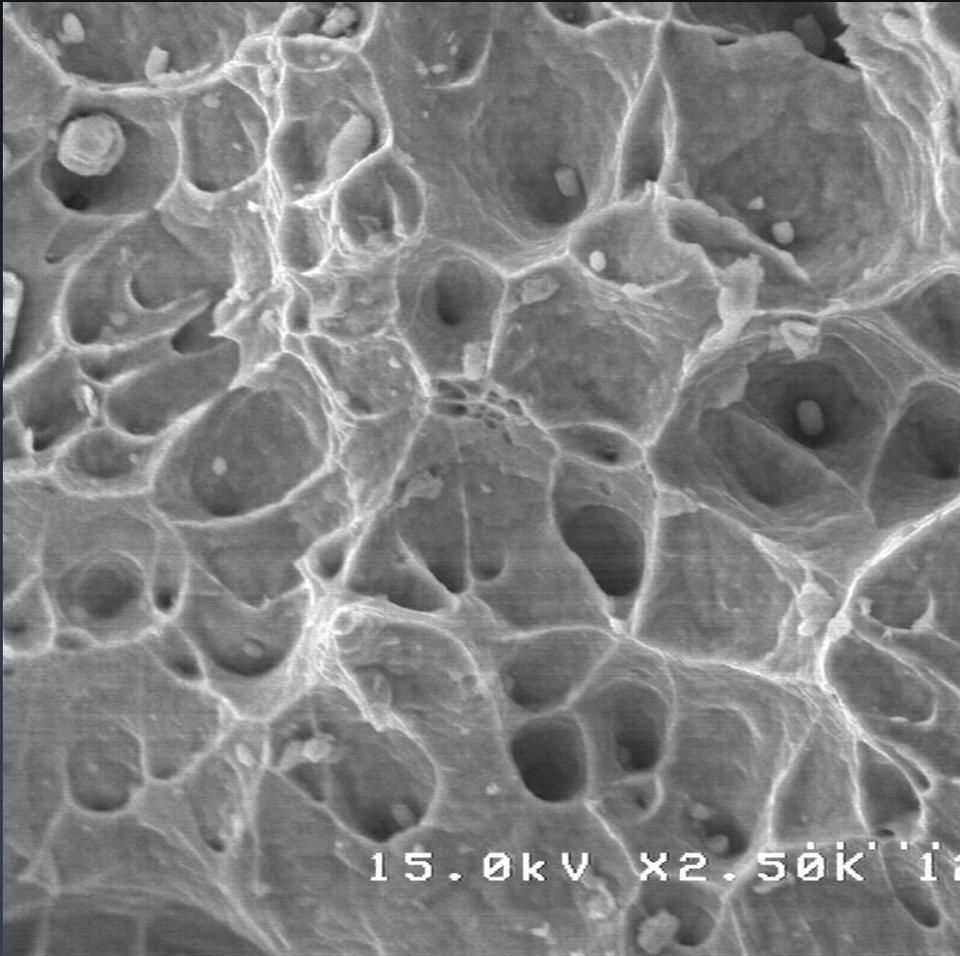
Coalescimento de microcavidades

- Partículas de segunda fase favorecem o aparecimento de microcavidades
 - Fratura da partícula
 - Descolamento da interface

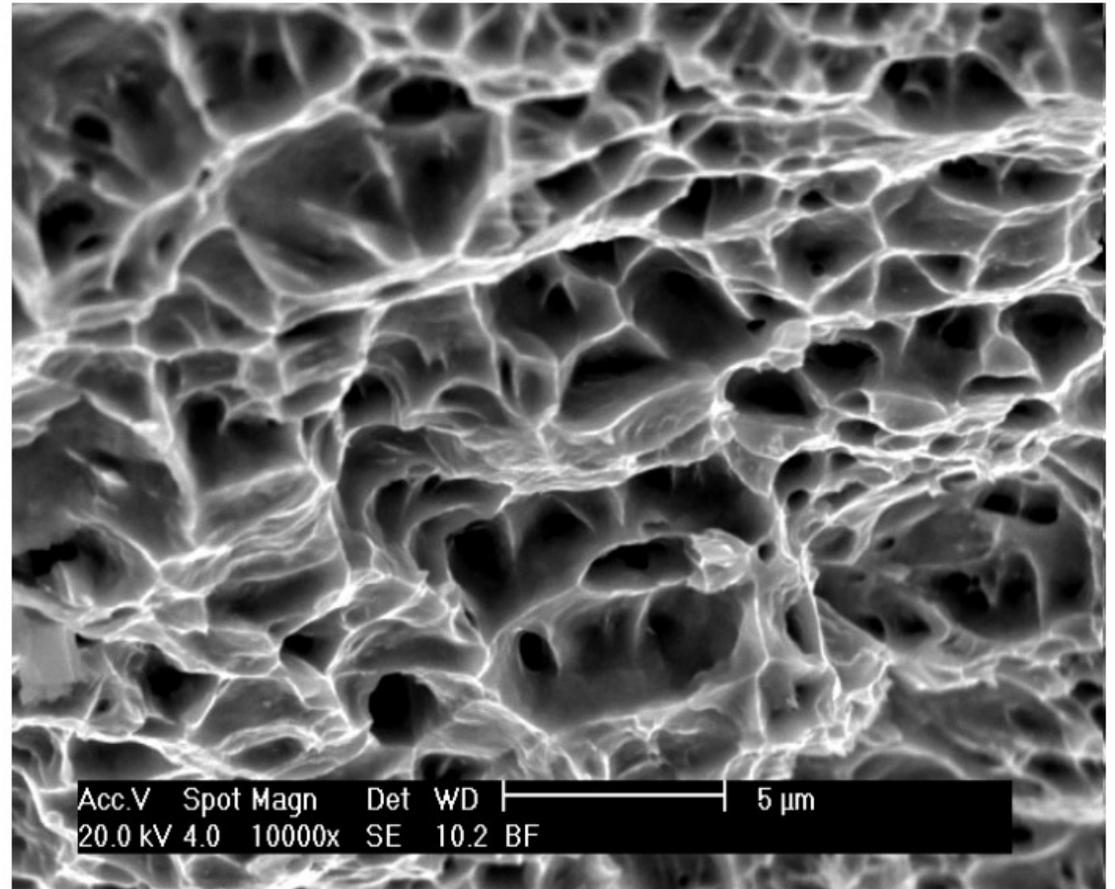
Formação de microcavidades



Coalescimento de microcavidades



Mestrado – Luis Monobe



Formação de microcavidades

- Fratura da partícula

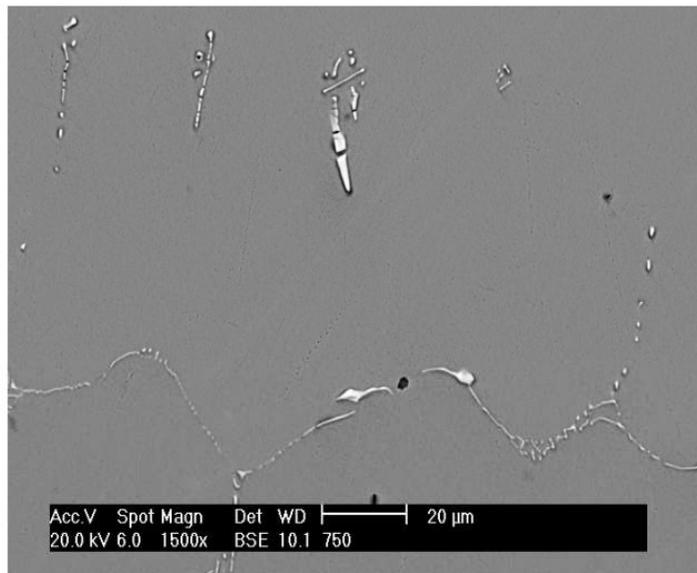


Fig.73 Aspecto da fratura do corpo de prova 750, seção longitudinal (1500X, MEV)

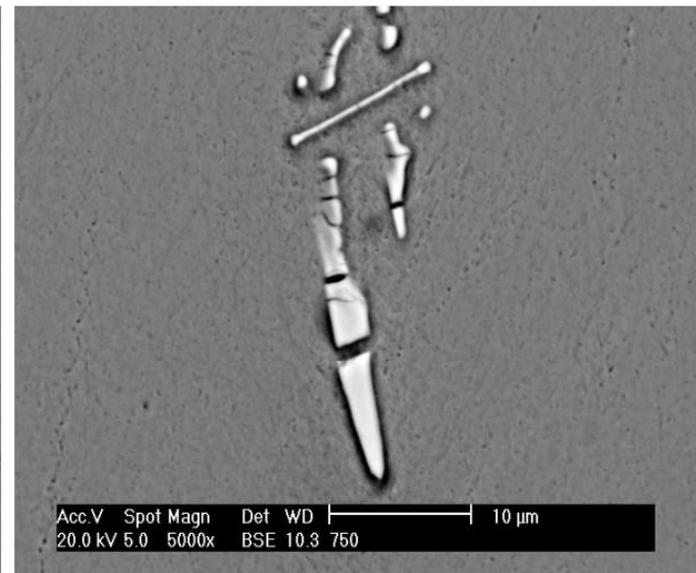


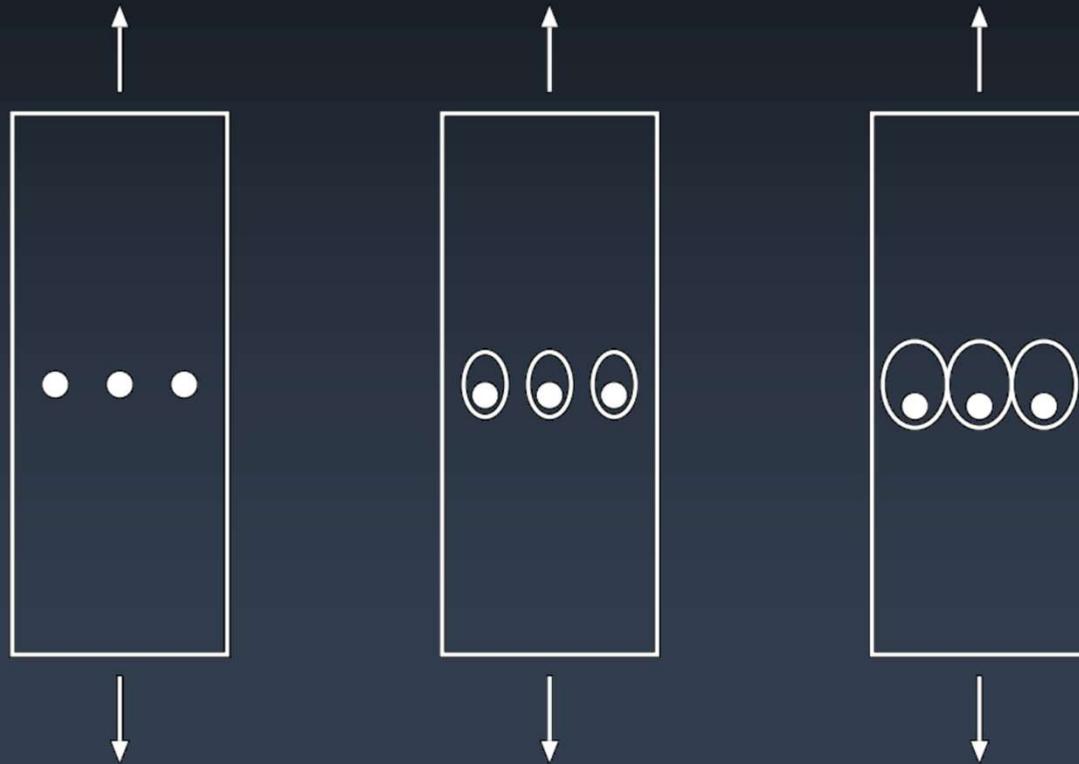
Fig.74. Aspecto da fratura do corpo de prova 750, seção longitudinal (5000X, MEV). Carbonetos de Nióbio fraturados. A seta indica o sentido de tração do corpo de prova.

Coalescimento de microcavidades

- A microcavidade é um concentrador de tensões
- Forma-se a zona plástica na vizinhança
- Arredondamento da superfície
- A microcavidade adquire um formato esférico (ou elipsoidal)
- Seu raio aumenta com o aumento da tensão aplicada

- Crescimento prossegue até que cavidades vizinhas se encontrem ou localmente se supere K_c ou J_c

Coalescimento de microcavidades



Fratura taça-cone

- Etapa 1: a fratura ocorre perpendicularmente à tensão aplicada
- Etapa 2: a fratura ocorre a 45° da aplicação de tensão
- Etapa 2 ocorre devido à formação de uma banda de cisalhamento

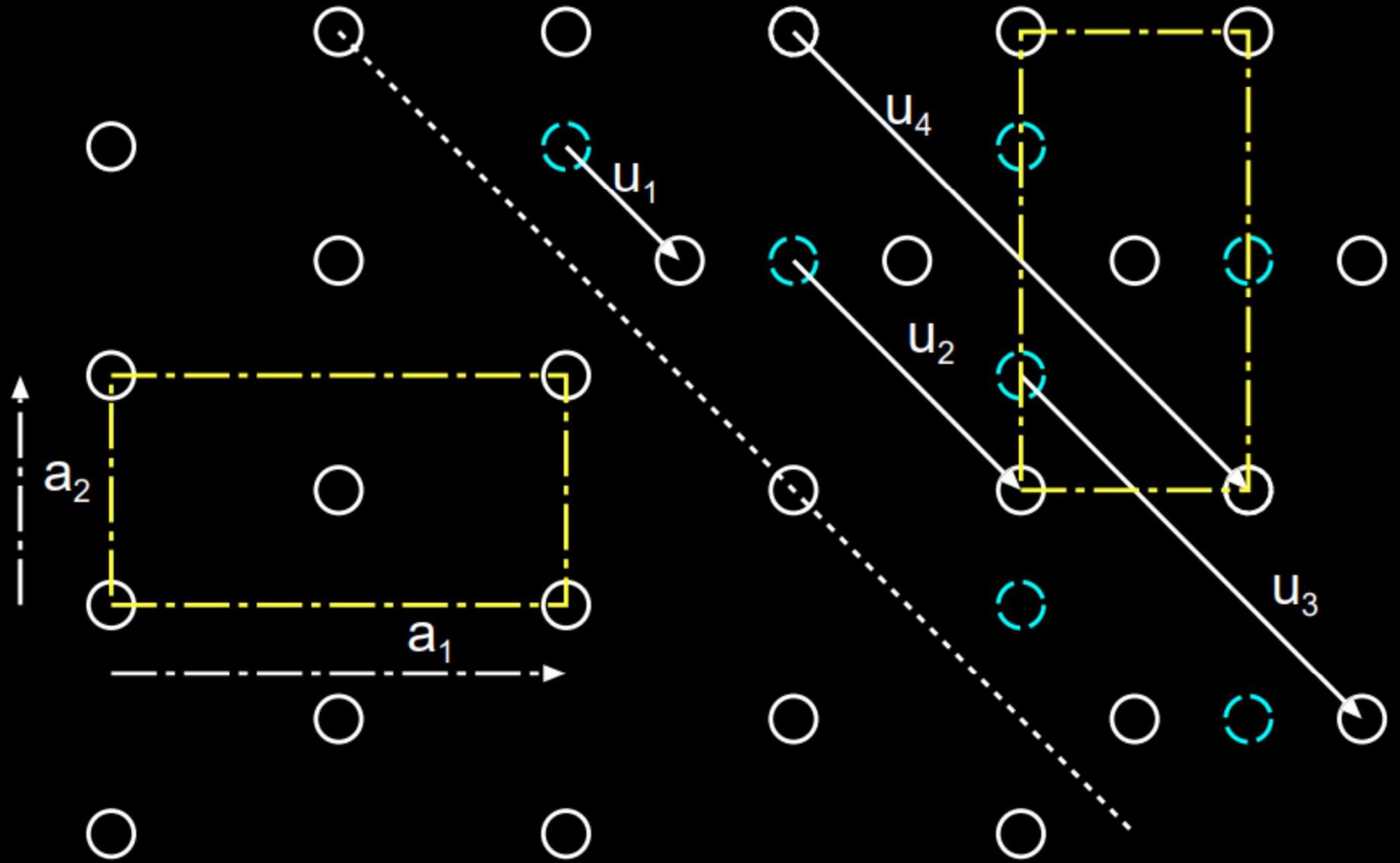
Tá bom, mas e daí?

Fratura taça-cone

- É muito comum a formação da zona cisalhada a 45° na superfície de fratura
- Essa zona se forma na fase final de propagação da trinca
- Logo...
- O ponto de origem de uma trinca **NÃO APRESENTA ZONA CISALHADA A 45° !**

Maclação mecânica

- Mecanismo de deformação mais importante após o escorregamento de discordâncias
- Pode ser mais importante em materiais com poucos sistemas de escorregamento (ex. estanho)



Maclação mecânica

- Dois planos permanecem não distorcidos nos dois lados da interface (planos invariantes):
 - Plano de hábito (corresponde ao plano de maclação)
- Cisalhamento relativo de duas porções do cristal

Representação geométrica

- Esfera unitária
- $X' = X$
- $Z' = Z$
- $Y' = Y + SZ$ (S = magnitude da deformação angular)

$$X'^2 + Y'^2 + Z'^2 = 1 \Rightarrow X^2 + Y^2 + 2SZY + Z^2 (S^2 + 1) = 1$$

Tensão de maclação

- Tensão para nuclear uma macla é 5 vezes maior do que a necessária para sua propagação
- Fenômeno controlado por nucleação
(em termos leigos: formou, já era)
- A tensão de maclação σ_M é aparentemente independente de temperatura. τ_{CRSS} aumenta com a queda da temperatura.

Tensão de maclação

- Segue sua relação de Hall-Petch
- Porém, K_M é 3 a 6 vezes maior do que para o escorregamento de discordâncias
- É afetada pela energia de defeito de empilhamento

$$\sigma_M = \sigma_M^0 + \frac{k_M}{\sqrt{d}}$$

$$\sigma_M \propto \sqrt{\frac{\gamma_{EDE}}{Gb}}$$

Fratura Frágil

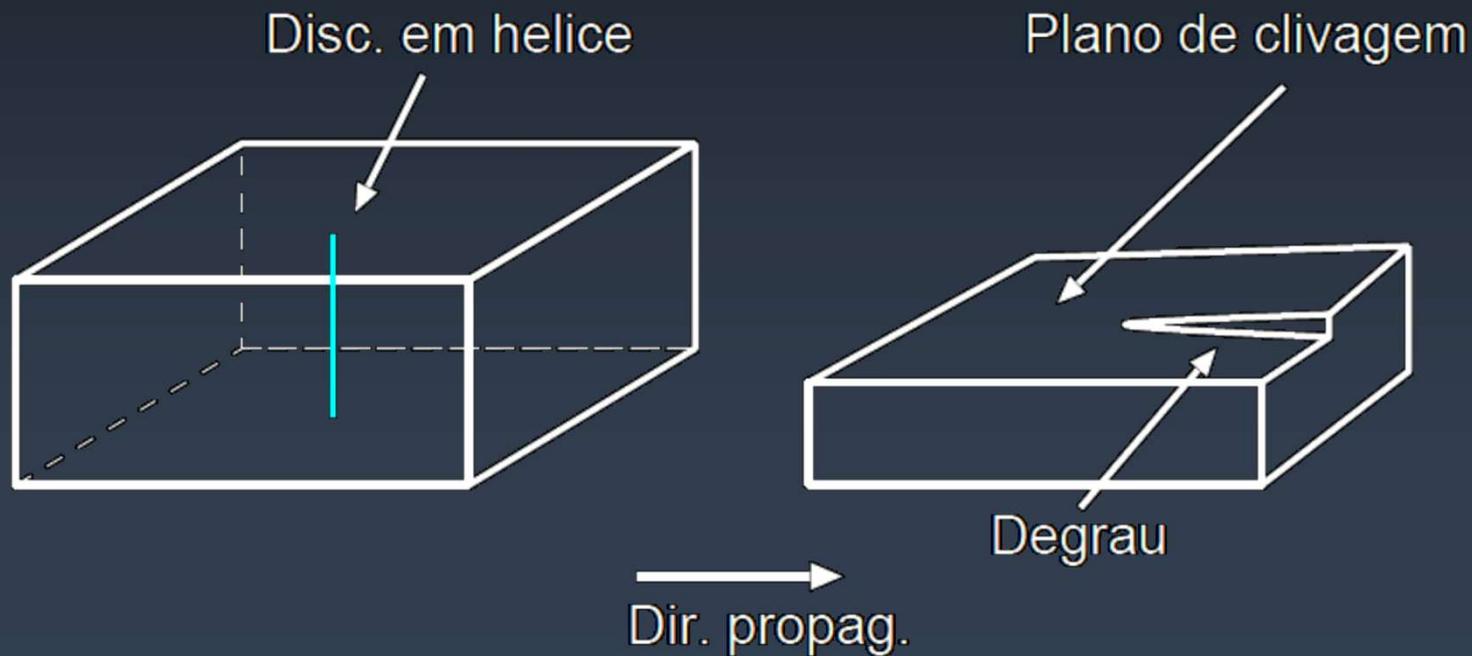
- Ocorre com baixa absorção de energia – Pouca ou nenhuma deformação plástica
- Mecanismos
 - Clivagem – Ruptura total de ligações químicas ao longo de um plano cristalino (fratura transgranular)
 - Fratura intergranular – Decoesão de contornos de grão

Fratura por clivagem

- Característica: presença de facetas correspondentes ao plano cristalográfico
- A trinca pode se propagar em planos paralelos, mudando de plano à medida que propaga.
- A mudança de plano causa o aparecimento de degraus
- O acúmulo de degraus resulta em uma morfologia chamada de “Marcas de rio” (River marks)

Fratura por clivagem

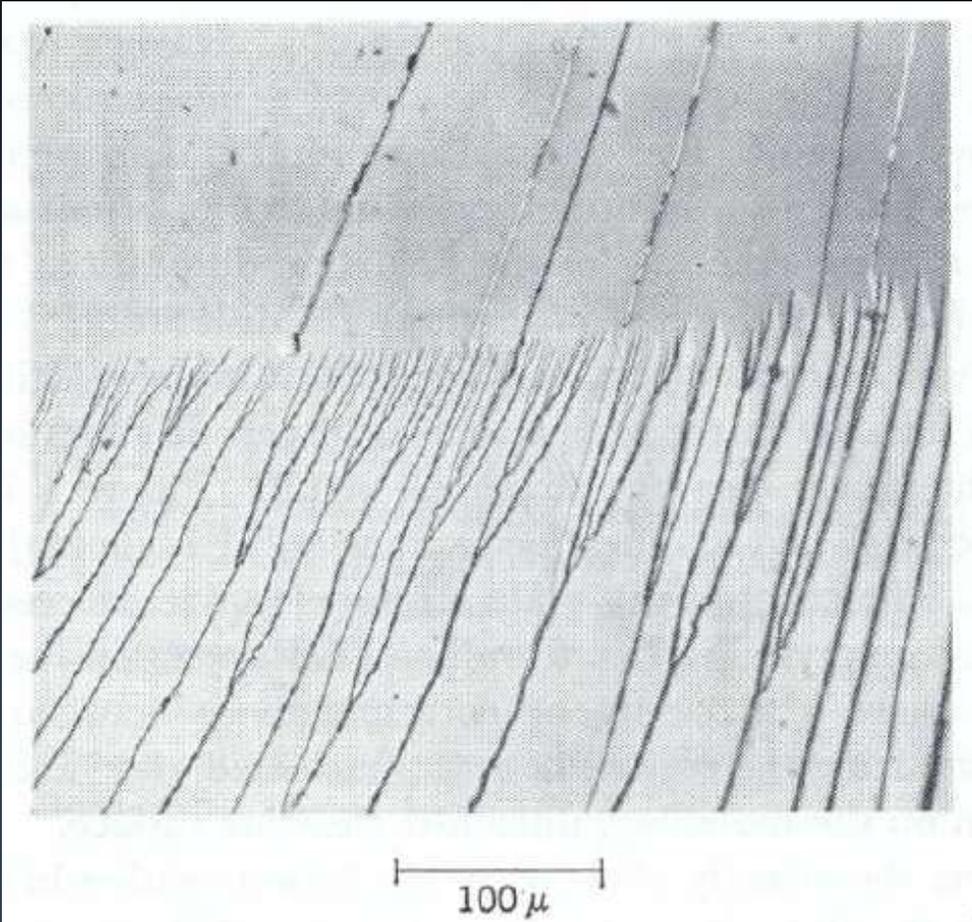
- Mecanismo de mudança de plano e formação de degrau:
 - Interação com uma linha de discordância em hélice



Fratura por clivagem

- Uma discordância desloca o plano de clivagem em um vetor de Burgers
- Degraus micrométricos resultam da interação sucessivas com diversas linhas de discordâncias
- Contornos de rotação (twist boundaries) são arranjos de discordâncias em hélice.

Fratura por clivagem



Available online at www.sciencedirect.com
ScienceDirect
Engineering Failure Analysis 14 (2007) 877–883

**ENGINEERING
FAILURE
ANALYSIS**

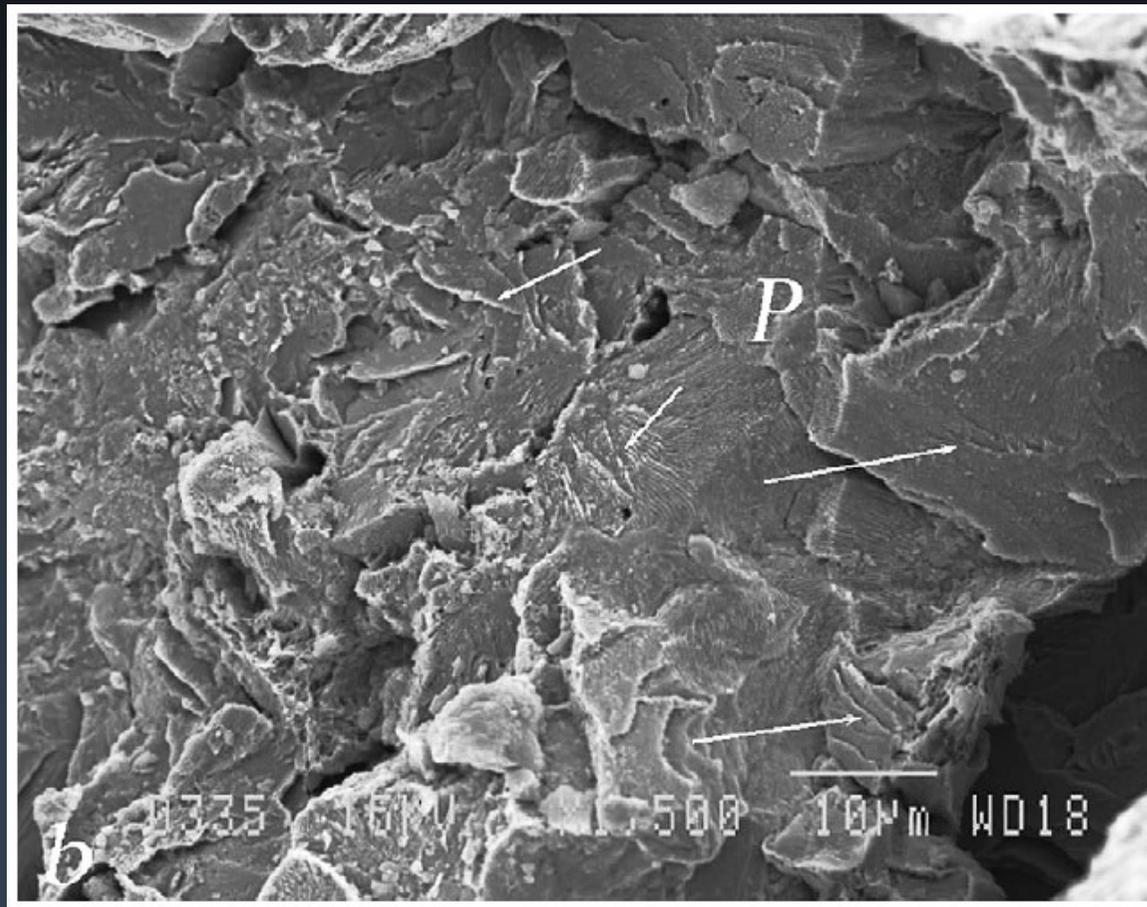
www.elsevier.com/locate/engfailanal

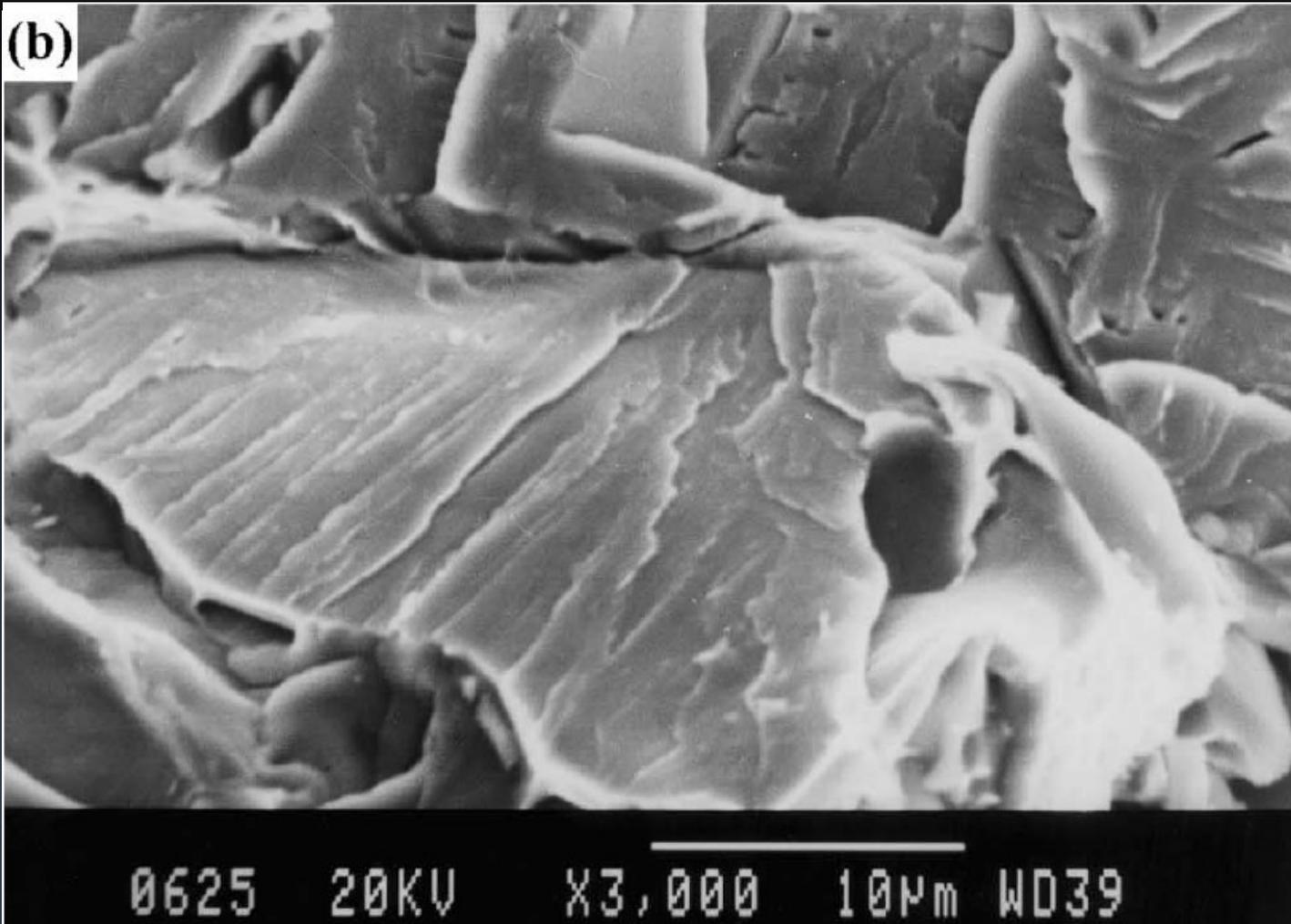
Analysis of the fracture of a turbine blade on a turbojet engine

Kyo-Soo Song *, Seon-Gab Kim, Daehan Jung, Young-Ha Hwang

Engine Division, Aero-Technology Research Institute of Air Force, ROKAF, P.O. Box 304-160, Kumsa Dong,
Daegu 701-799, Republic of Korea

Fratura por clivagem



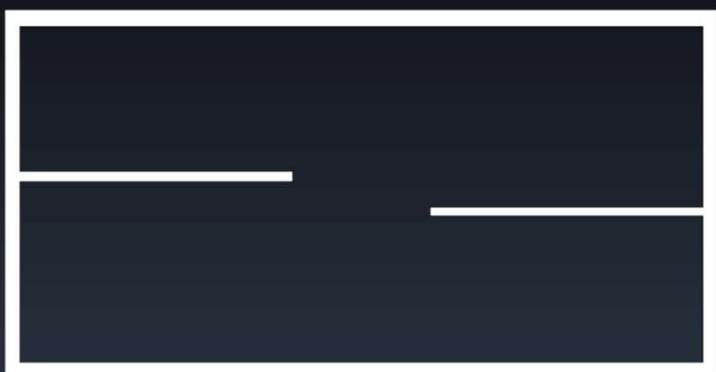


K.V. Sudhakar / Engineering Failure Analysis 9 (2002) 159–165

Degraus

- A clivagem é um processo de baixa energia
- No encontro de dois degraus, a fratura ocorre por deformação plástica, que é um processo de alta absorção de energia
- Isso afeta a energia total absorvida durante a fratura

Ruptura do ligamento entre planos



a



b



c

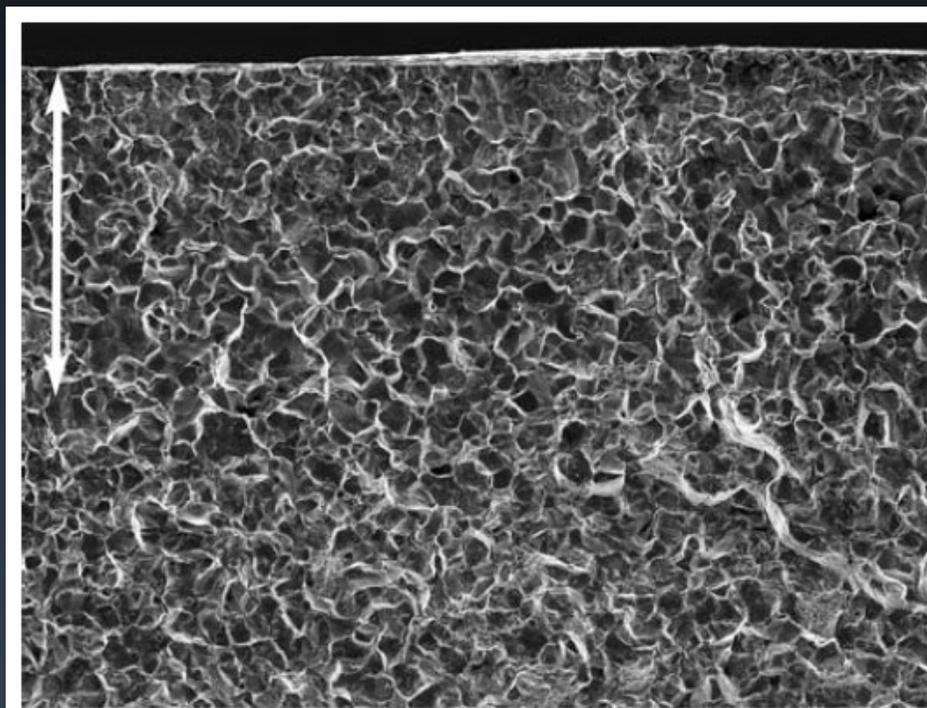
Fratura Intergranular

- Descolamento de contornos de grão ou interfaces entre fases
- O contorno do grão apresenta menor coesão do que seu interior
- Processo pode ser influenciado por:
 - Segregação de elementos de liga para o contorno
 - Contorno ser intrinsecamente menos coeso
 - Estruturas complexas
 - Baixa temperatura

Fratura intergranular

- Facilmente identificável
- Superfície dos grãos ou interfaces distinguível
- Em baixos aumentos pode ser enganoso

Fratura intergranular



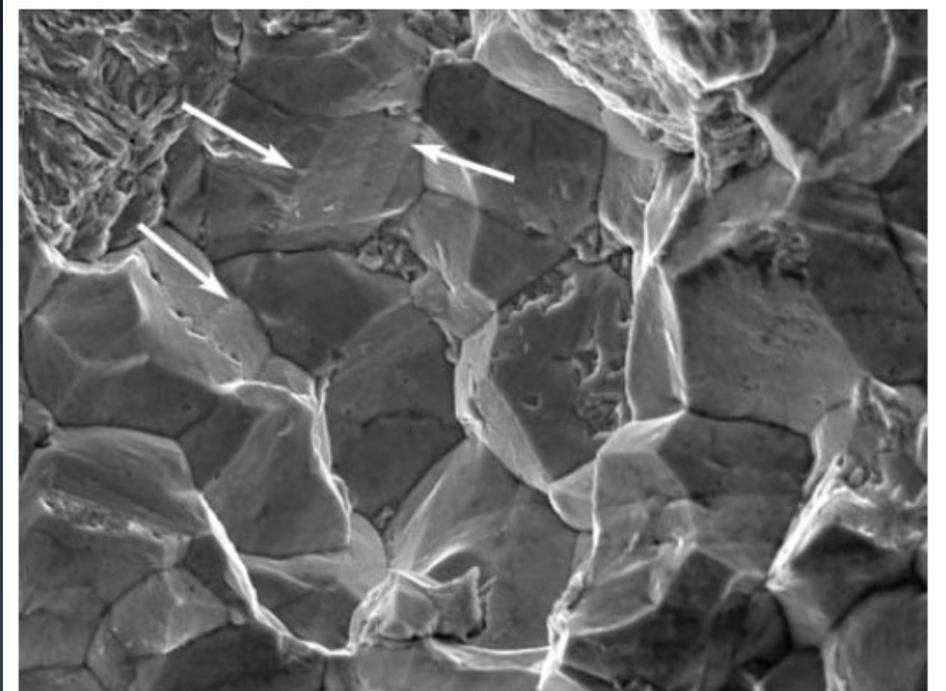
200 μm

J Fail. Anal. and Preven. (2008) 8:386–396
DOI 10.1007/s11668-008-9148-3

TECHNICAL ARTICLE—PEER-REVIEWED

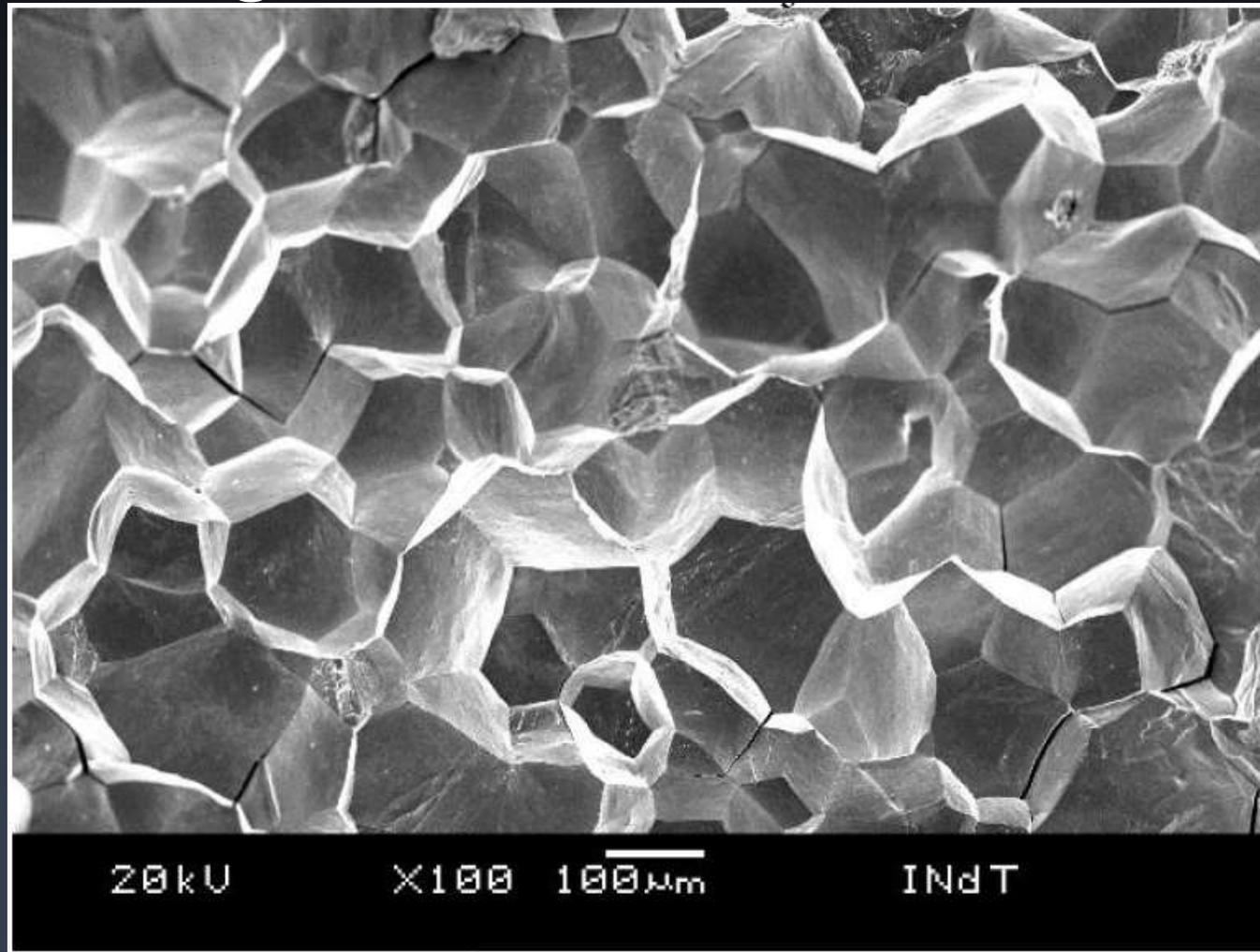
Failure Analysis of Induction Hardened Automotive Axles

C. Kendall Clarke · Don Halimunanda

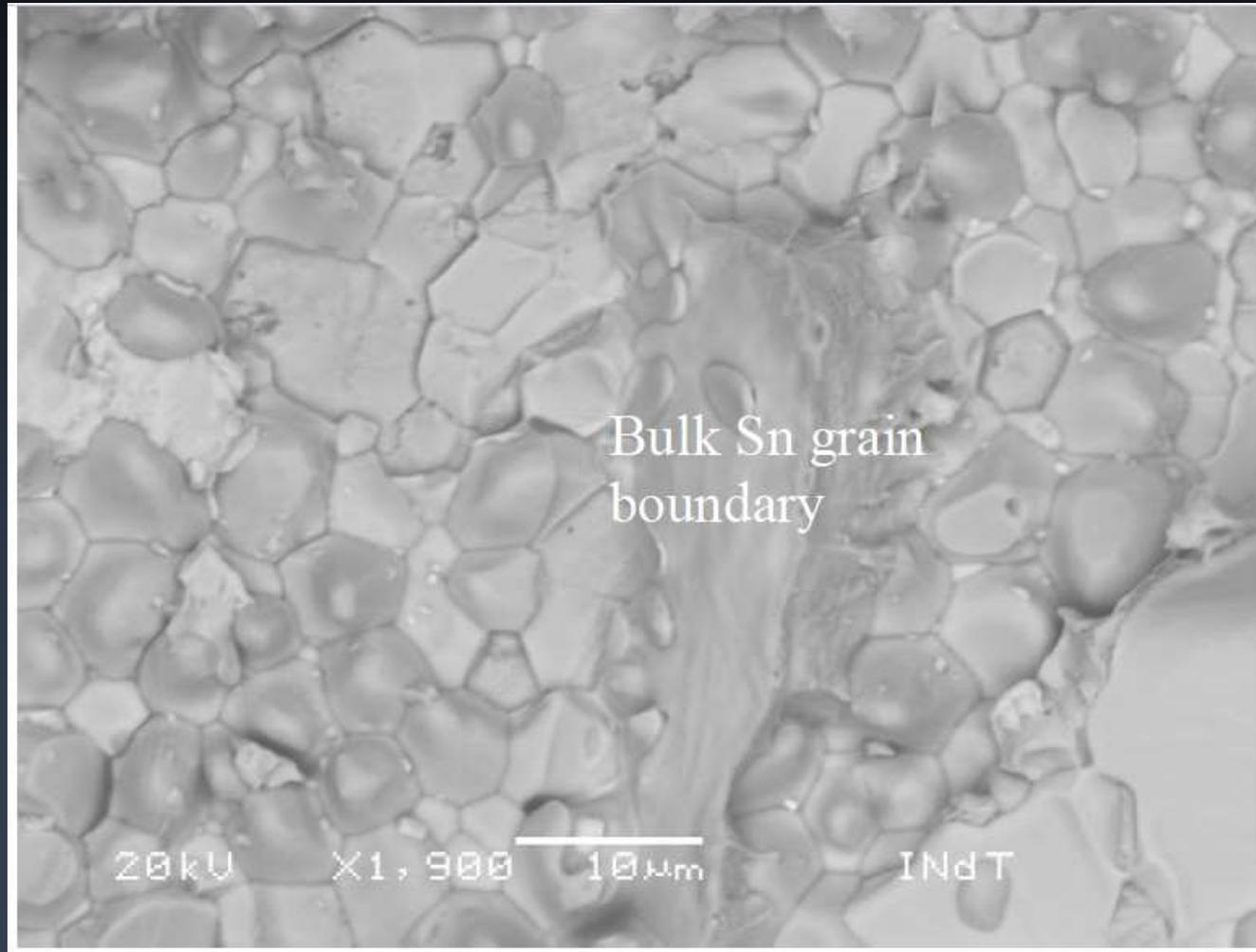


20 μm

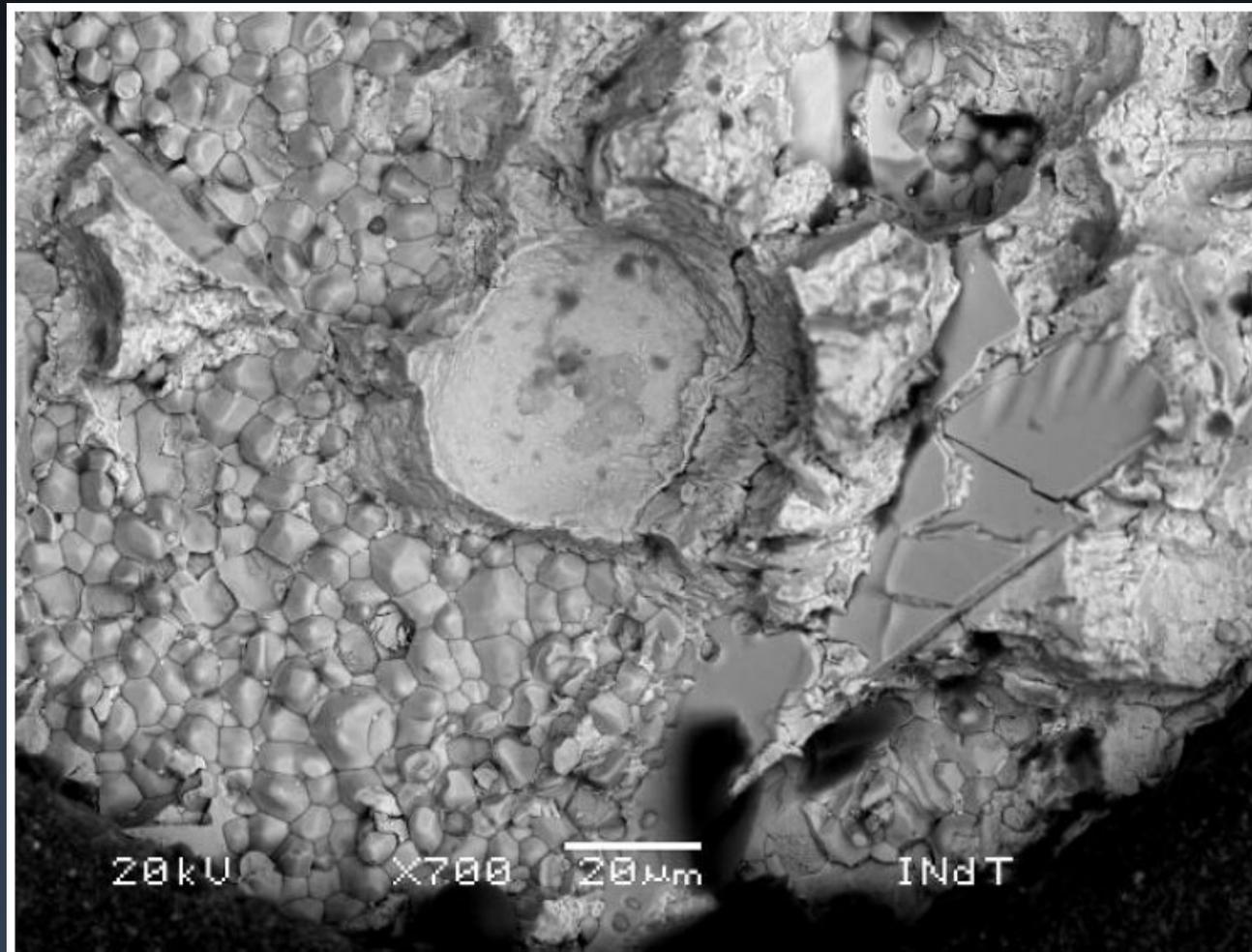
Fratura intergranular



Fratura intergranular

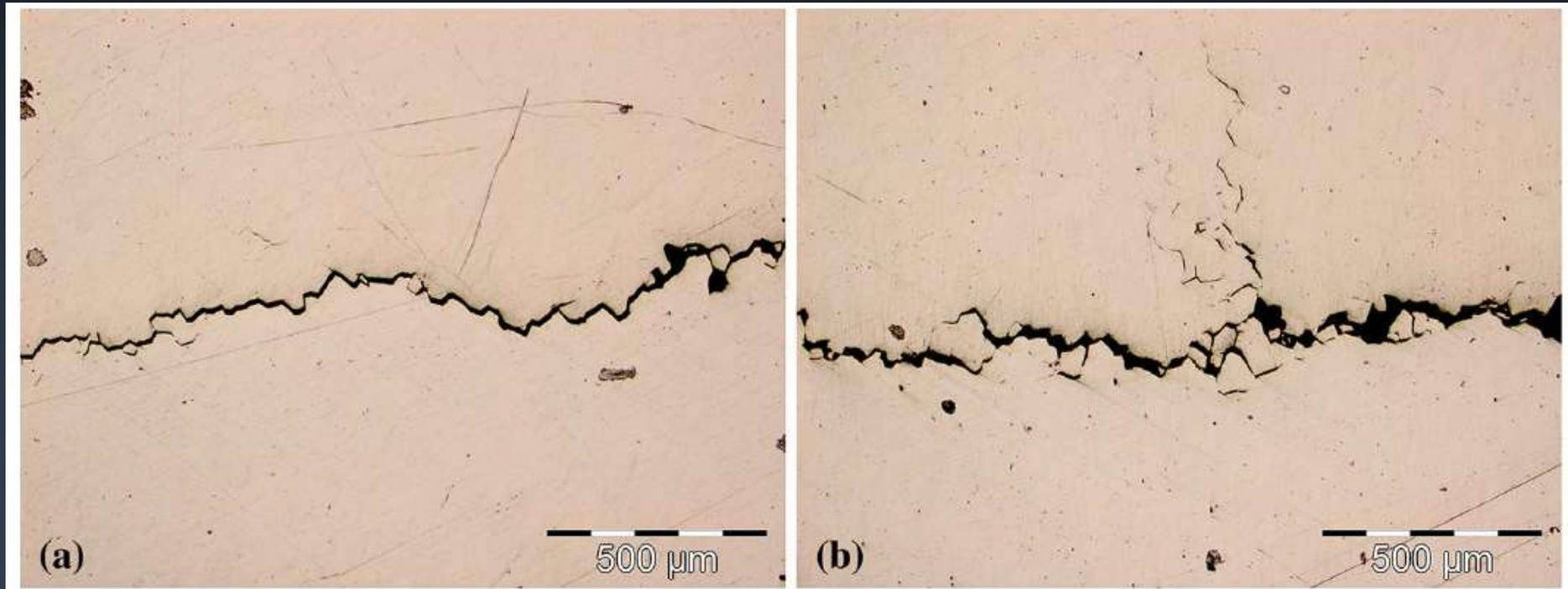


Fratura intergranular

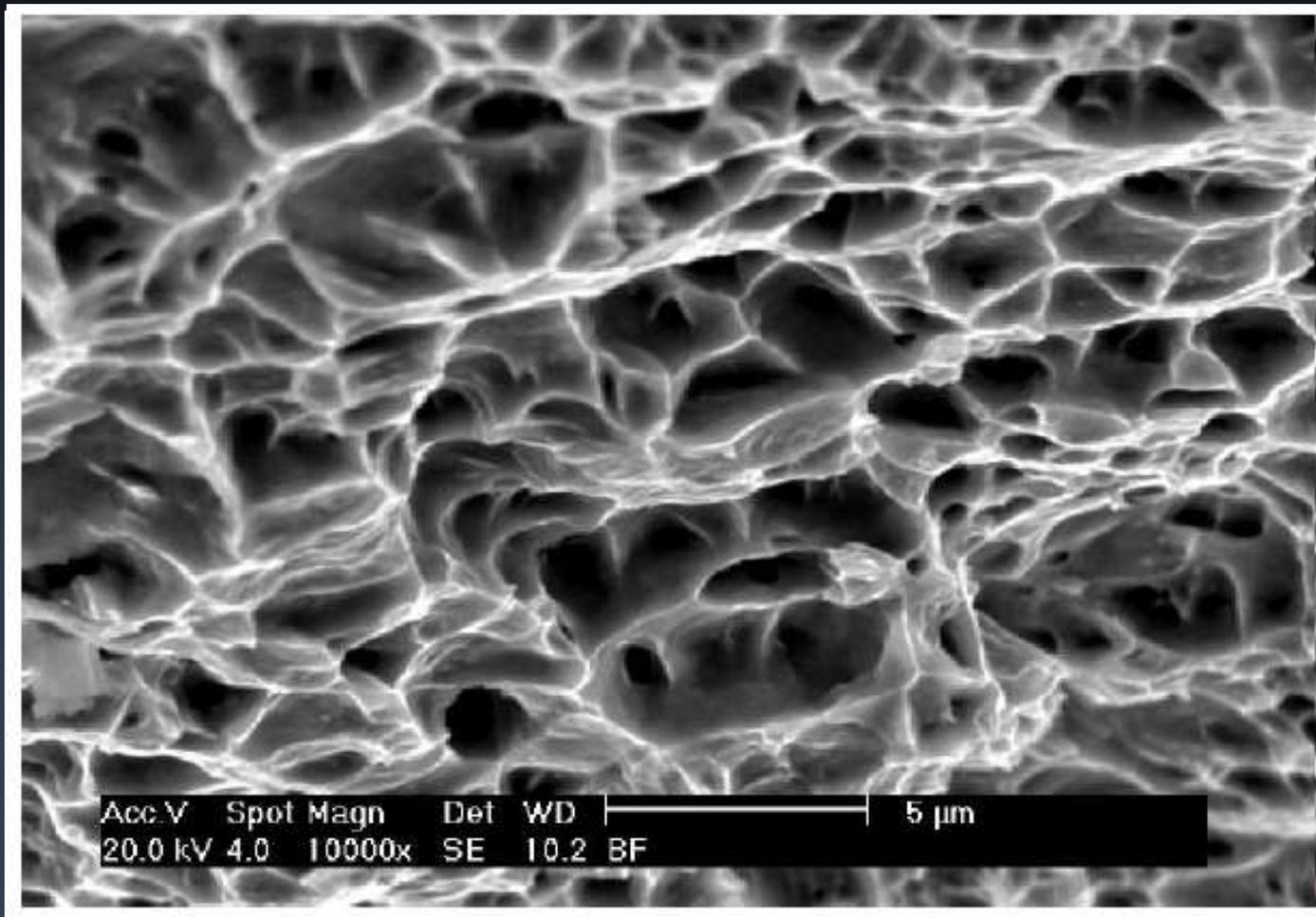


Fratura Intergranular

- Seção transversal ao microscópio óptico



Fratura intergranular



Aspectos Macroscópicos

- Em escalas macroscópicas, há relevos característicos na propagação das trincas frágeis
- Relevo depende da mecânica de propagação e não está ligado a estrutura cristalina ou microestrutura
- Exemplos: interação do plano da trinca com ondas sonoras

Propagação da trinca

- Trinca inicia em repouso e acelera
- Velocidade de propagação é de 0,92 a 0,95 da velocidade de ondas elásticas de cisalhamento no sólido (para $0,25 < \nu < 0,5$)

$$v_{\gamma} = \left(\frac{G}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}$$

- Experimentalmente observa-se que a trinca atinge no máximo $v=0,66v_{\gamma}$
- Acima disso a trinca bifurca

Propagação da trinca

- Três zonas
 - Zona especular – início da propagação
 - Zona difusa – aceleração
 - Zona rugosa – Propagação em velocidade constante
 - Marcas retilíneas que apontam para a origem da trinca (*hackle marks*)
 - Outras marcas como *rib marks* (perpendiculares às *hackle marks*) e que indicam a direção de propagação

Ensaio de Impacto

ENSAIO DE IMPACTO

Determina o comportamento de fratura dos materiais

Determina se existe transição dúctil-frágil

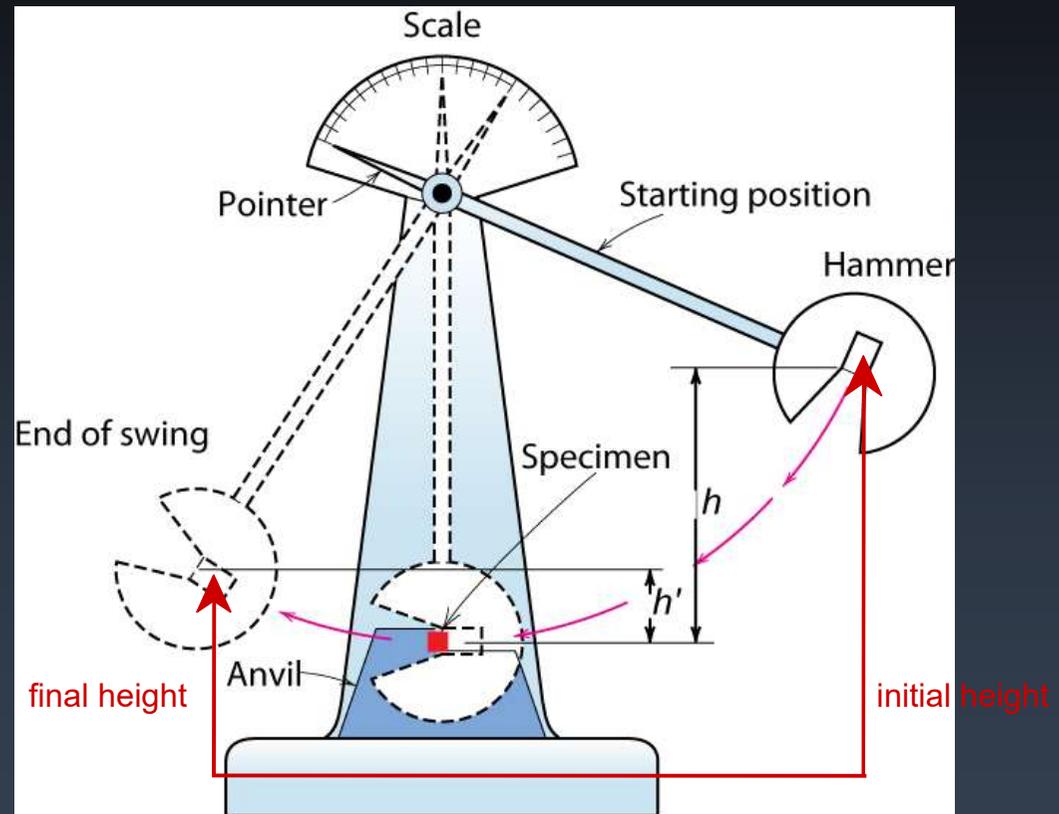
VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO

Ensaio de Tração Convencional

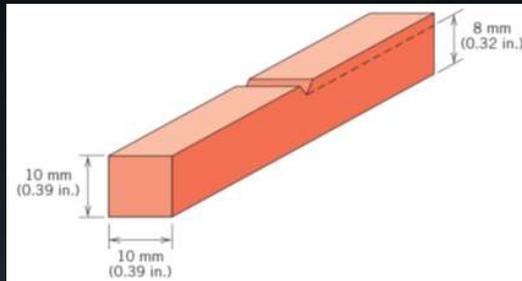
$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \dot{\varepsilon} = \text{entre } 10^{-5} \text{ e } 10^{-1} \text{ s}^{-1}$$

Solicitação de Impacto

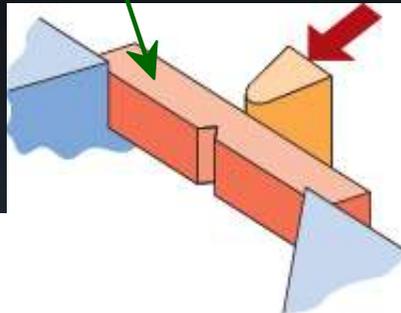
$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \dot{\varepsilon} = \text{entre } 10^2 \text{ e } 10^4 \text{ s}^{-1}$$



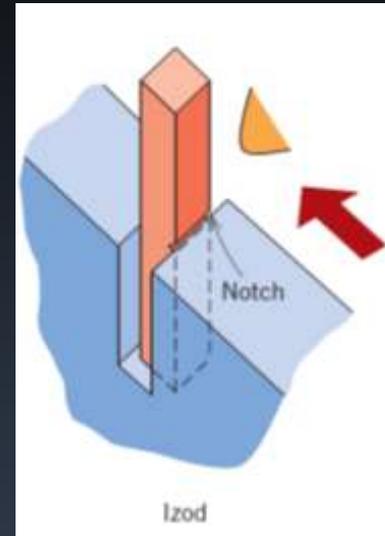
Ensaio de impacto



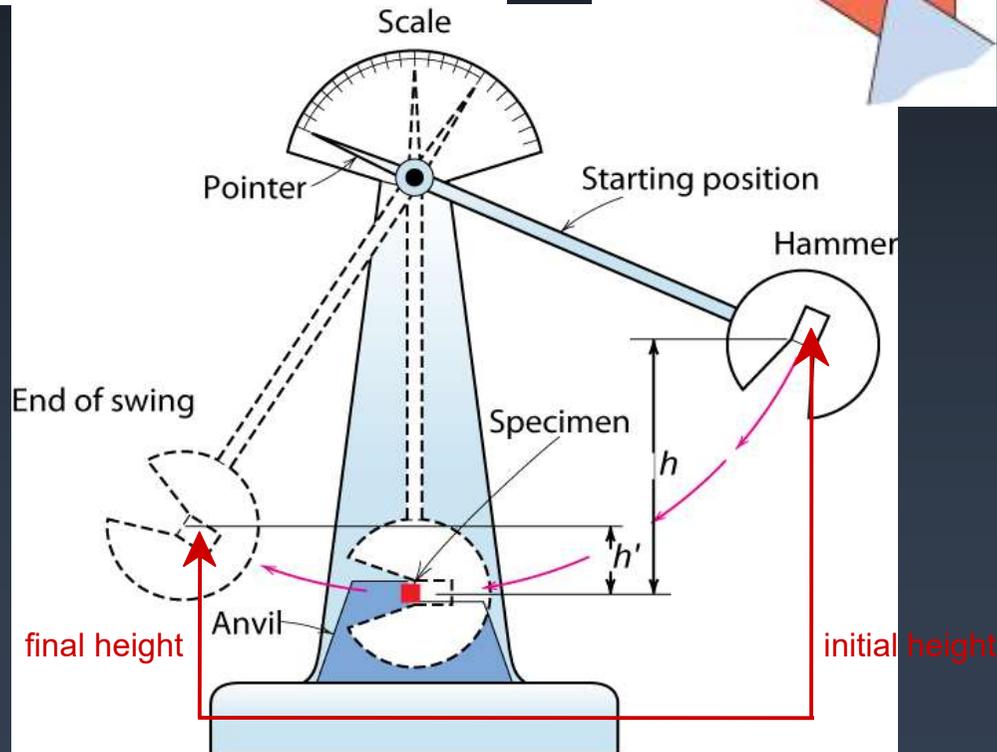
(Charpy)



(Izod)



Detalhes dos corpos de prova e da forma de aplicação dos esforços nos ensaios Charpy e Izod



$$W_f = m \cdot g \cdot (h - h')$$

W_f : trabalho de fratura
 m : massa do pêndulo
 g : aceleração da gravidade
 h : altura inicial do pêndulo
 h' : altura final do pêndulo

- Entalhe nos corpos de prova concentra as tensões.
- Elevada taxa de deformação.



tenacidade e teste de impacto

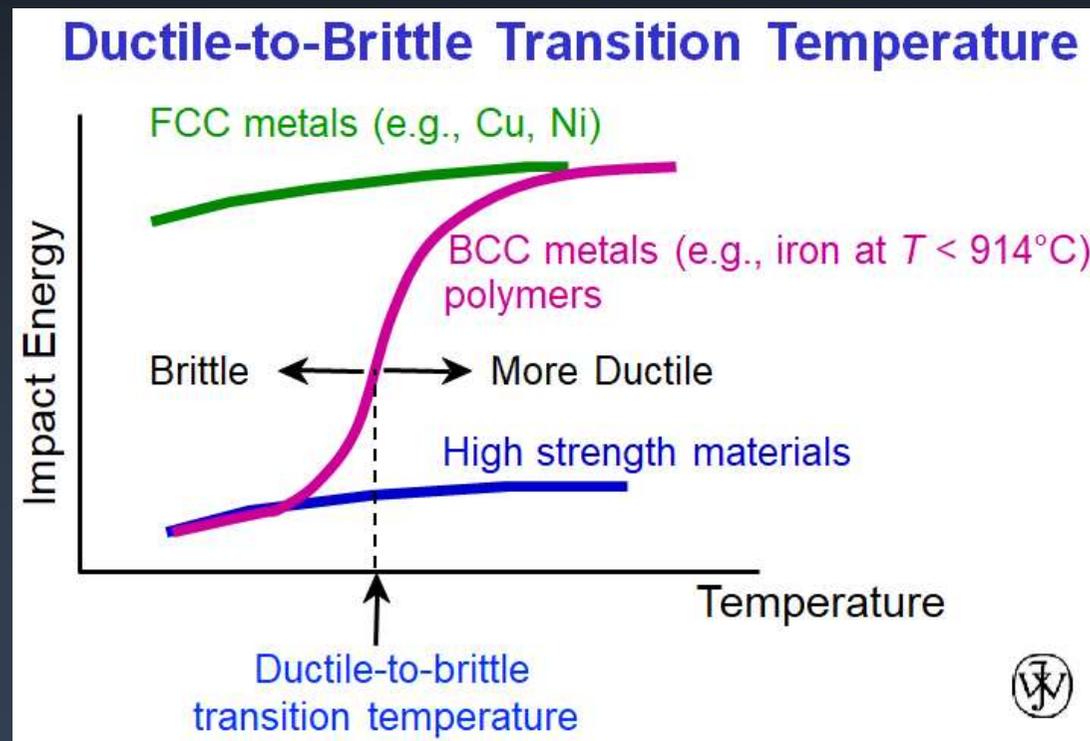
Fratura dúctil tipo taça cone

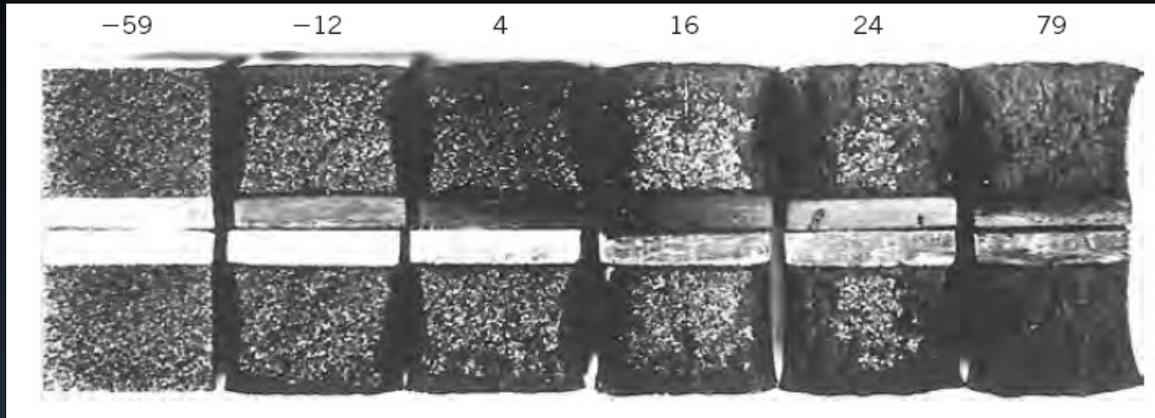
Fratura frágil Material muito dúctil



Transição Dúctil-Frágil

- Com a variação da temperatura, alguns materiais podem apresentar uma variação de comportamento quanto à fratura → materiais que tem comportamento dúctil (*apresentam TENACIDADE elevada*), podem passar a ter comportamento frágil com a diminuição da temperatura.



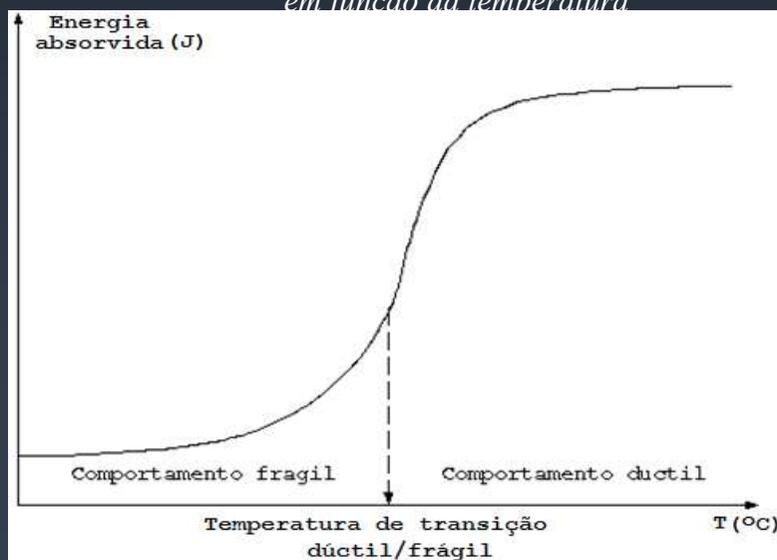


Temperatura, °C

Aço A36

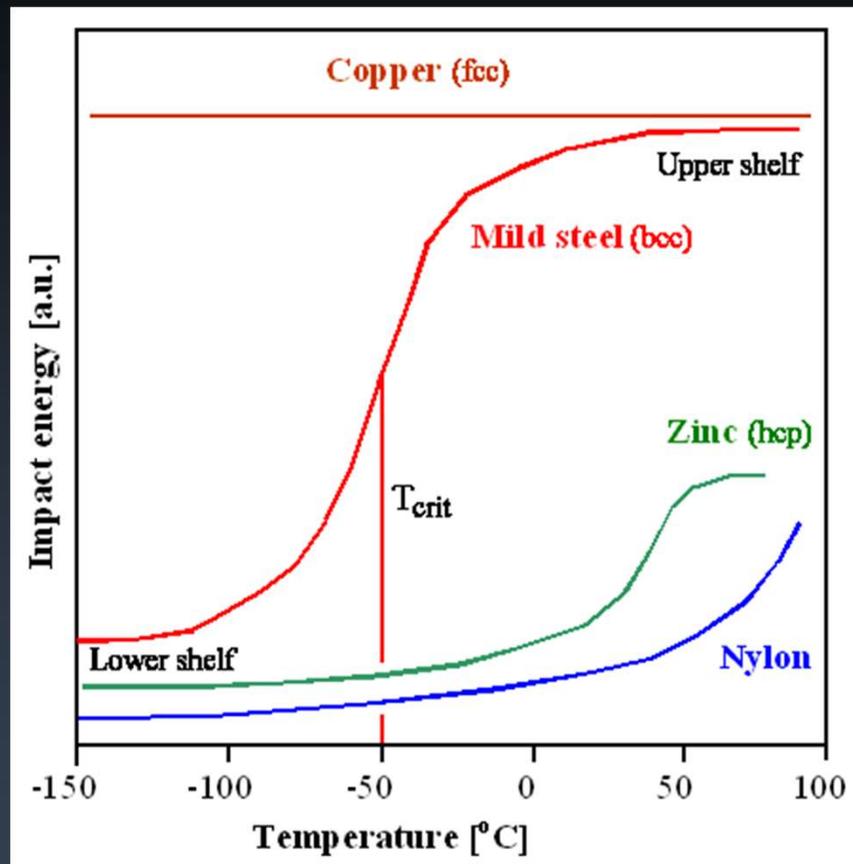
Ensaio Charpy com entalhe V

Energia absorvida no ensaio Charpy em função da temperatura

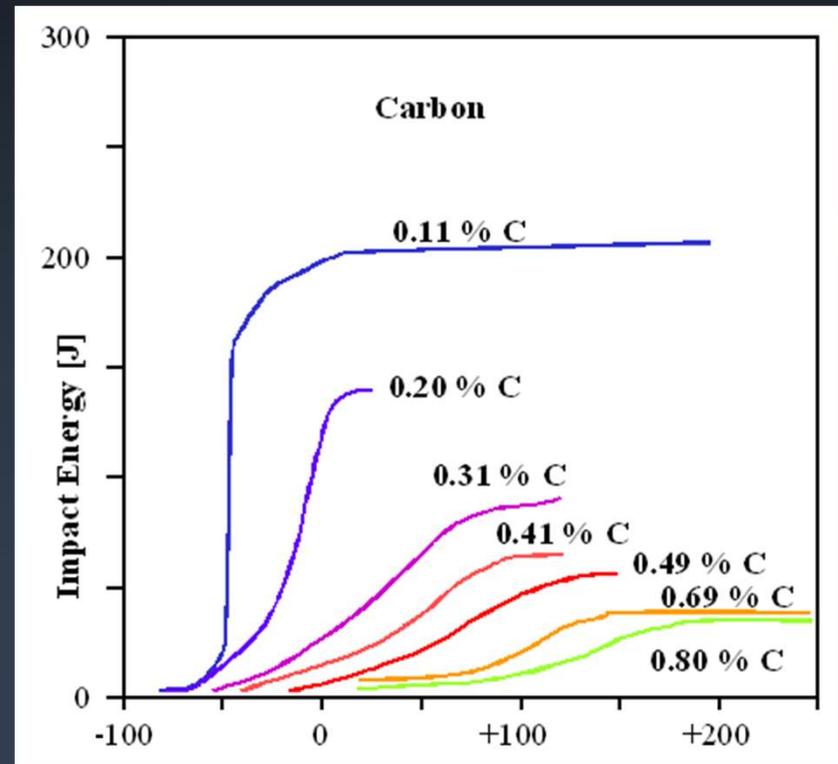


- Transição abrupta de um comportamento frágil, em baixa temperatura, para um comportamento dúctil, em alta temperatura.
- Depende fortemente da geometria da amostra e do critério para definição da **temperatura de transição** ⇒ cuidado em projeto para que um material não sofra essa transição em operação.
- Pode ser observada em metais CCC e HC, polímeros e em cerâmicas (em temperaturas elevadas).

Transição Dúctil-Frágil : Exemplos de Materiais



Aços com diferentes teores de carbono





A temperatura de operação deve ser sempre superior à de transição dúctil-frágil → evitar a mudança de comportamento de fratura ,de dúctil para frágil (= *fratura repentina , catastrófica*), durante a operação

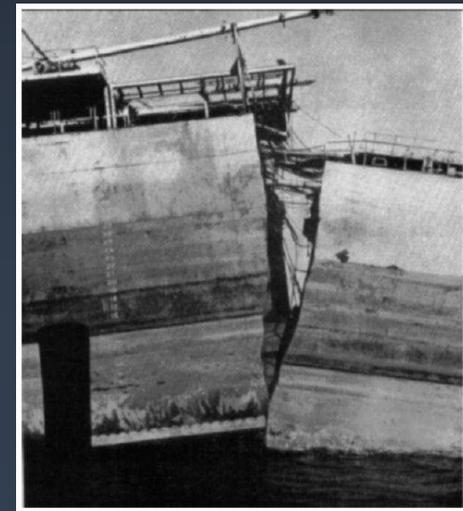
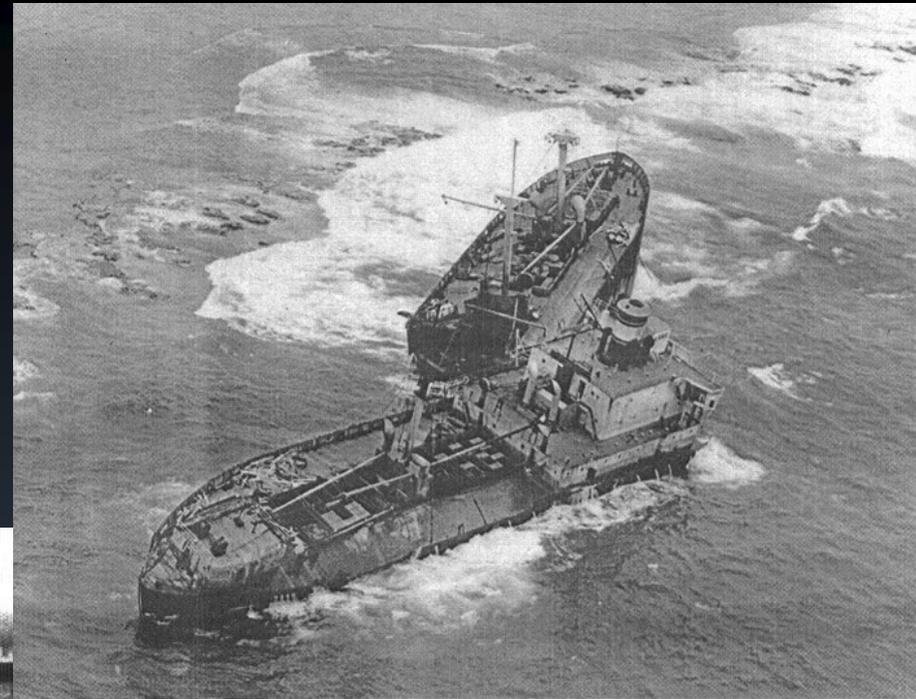
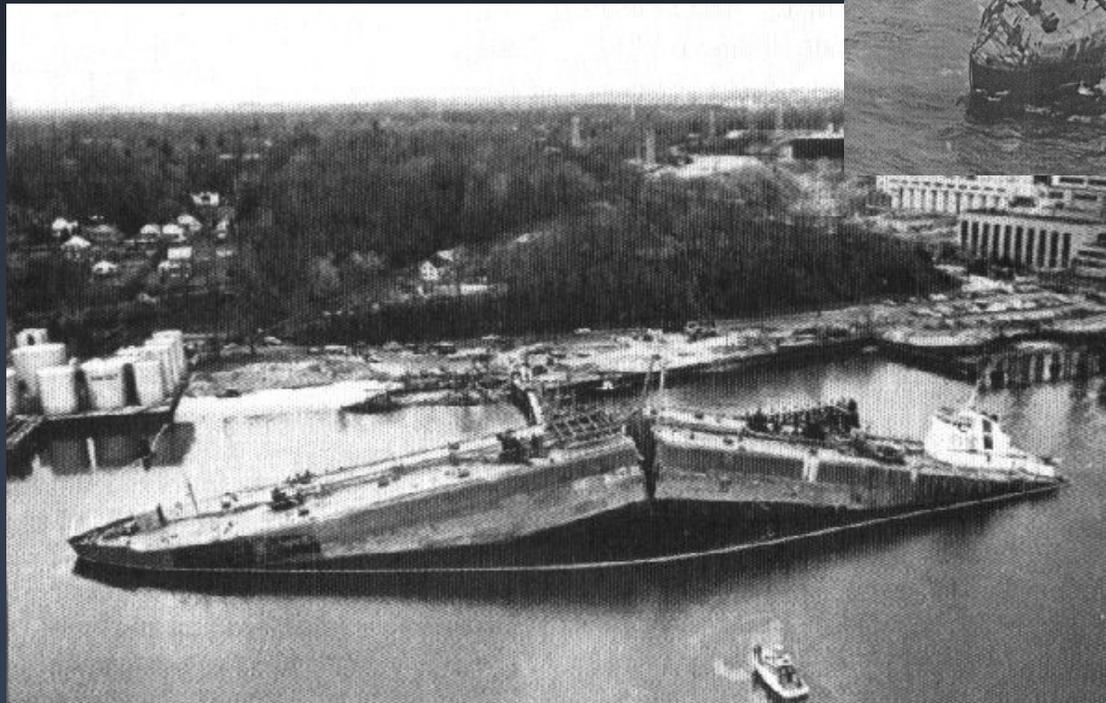
Transição Dúctil-Frágil

Ruptura de uma ponte metálica
(*Ponte Duplessis, Québec, 31.01.1951*). A estrutura rompeu de forma frágil numa noite de inverno (30°C negativos), num momento em que a ponte não estava sequer submetida a uma grande solicitação. Quatro pessoas morreram.



Transição Dúctil-Frágil

‘**Liberty ships**’ = navios que rompiam ao meio durante a fabricação por soldagem. Os navios foram fabricados para transportar alimentos, remédios e vestimentas para os aliados dos EUA na Europa. Alguns navios romperam ao meio durante a fabricação, outros durante a viagem para a Europa e outros chegaram intactos.



Transição Dúctil-frágil

- Energia absorvida depende de
 - Trabalho de fratura
 - Trabalho de deformação plástica
 - Momento linear transferido à amostra (amostra é lançada)
- Temperatura de transição é afetada por:
 - Composição química, tratamento térmico, processamento, microestrutura e pela geometria do entalhe

Transição Dúctil-Frágil

- Critérios:
- Média da energia dos patamares superior e inferior
- Temperatura correspondente a energia absorvida de 15 J
- Temperatura correspondente a 50% de fratura fibrosa (requer análise visual)
- Temperatura correspondente a ocorrência de 1% de contração no entalhe (requer análise visual)