

PCC 5726

Fratura

Antonio Figueiredo &
Renata Monte



Objetivos da aula

- Entender como ocorre o processo de fratura em distintos materiais.
- Ter domínio do conceito de resistência pelo ponto de vista de engenharia
- Entender o processo de fadiga
- Entender o processo de ruptura por carga mantida.

Fratura

- Fratura ou falha de um material é um conceito importante de engenharia:
 - A ruptura de uma estrutura está vinculada à ruptura dos materiais que a compõem.
 - O conceito de resistência (propriedade de engenharia) está associada à fratura do material sob determinadas condições padrão de ensaio.
- Conceito ***fundamental*** que não pode ser ignorado

Resistência

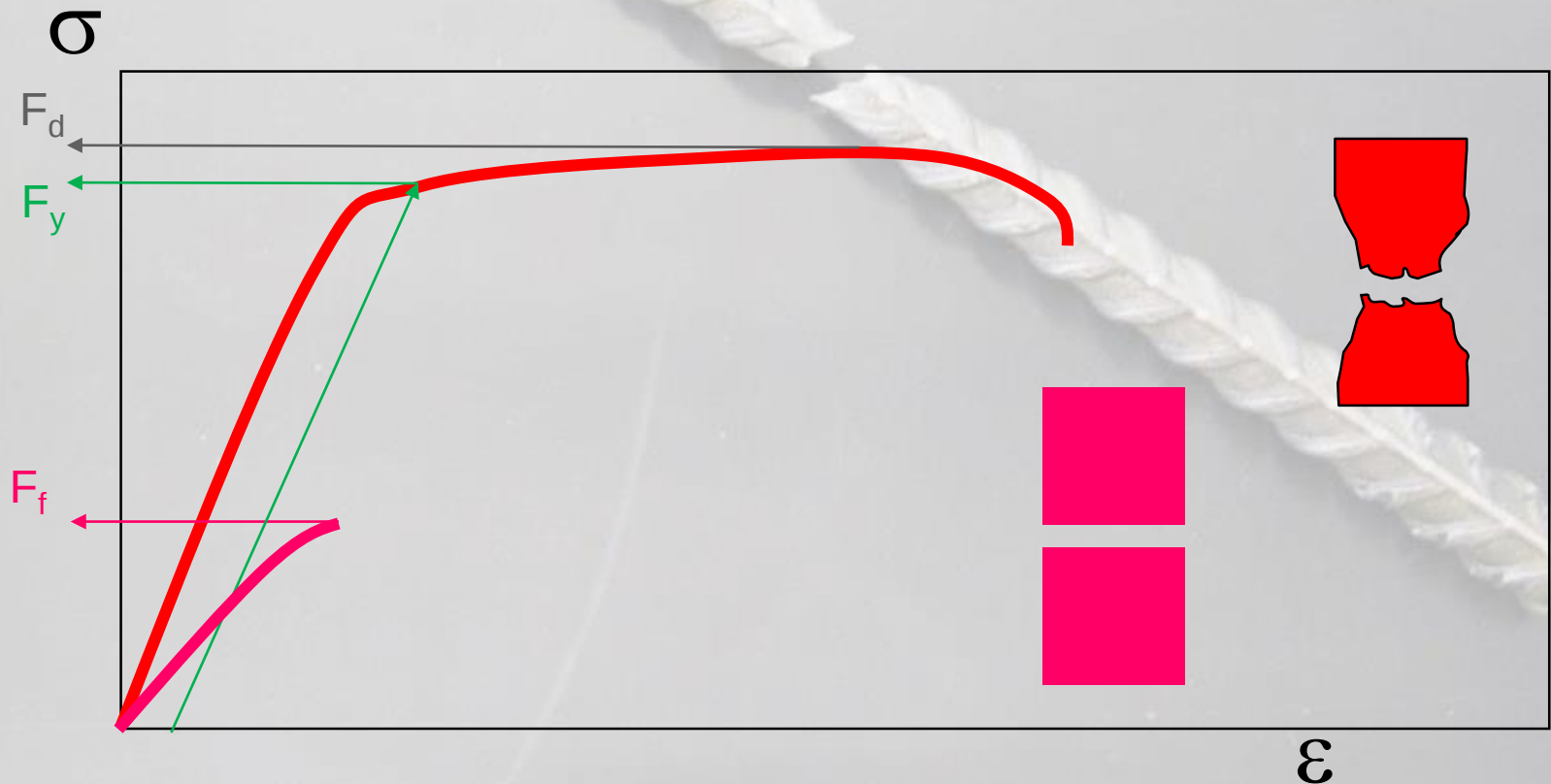
- Definição: é a tensão necessária para provocar o escoamento ou a ruptura do material.
- Comparar com definição Jastrzebski:
 - “Resistência é a habilidade de um material resistir a forças sem escoamento ou fratura”.
- Convenção de engenharia: resistência é o resultado em termos de tensão obtidos em ensaio padrão.

O que é fratura?

- Fratura é a formação de uma superfície de separação de um sólido em, pelo menos, duas partes.
- Formação de superfície no material por aumento de **tensão estática, esforço cíclico (fadiga), impacto, fluência, ruptura por carga mantida**.
- Comportamento claro em materiais frágeis.
- Materiais muito dúcteis não apresentam superfície de fratura bem definida.

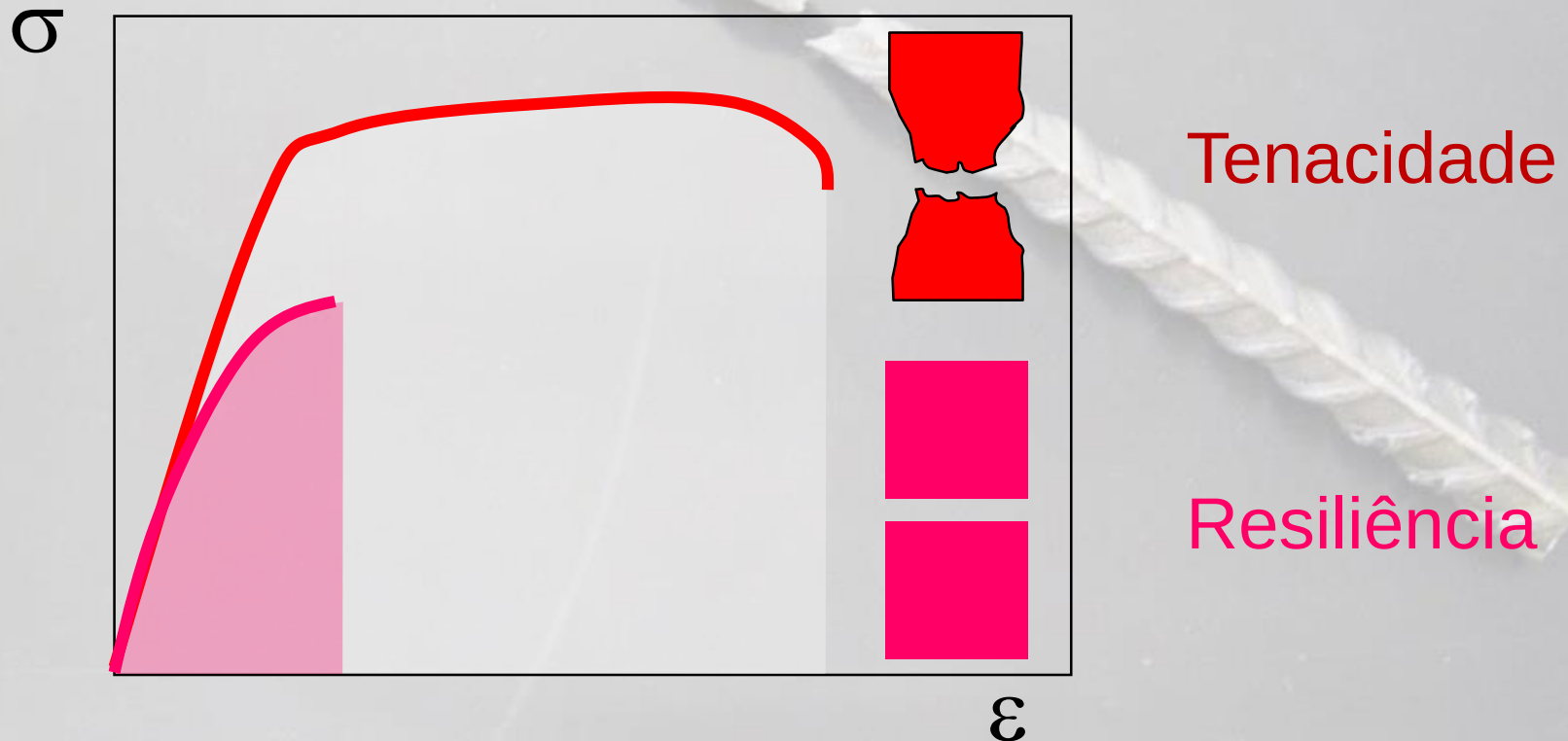
Resistências de materiais frágeis e dúcteis

- Materiais frágeis tem determinação simples
- Materiais dúcteis exigem convenções.



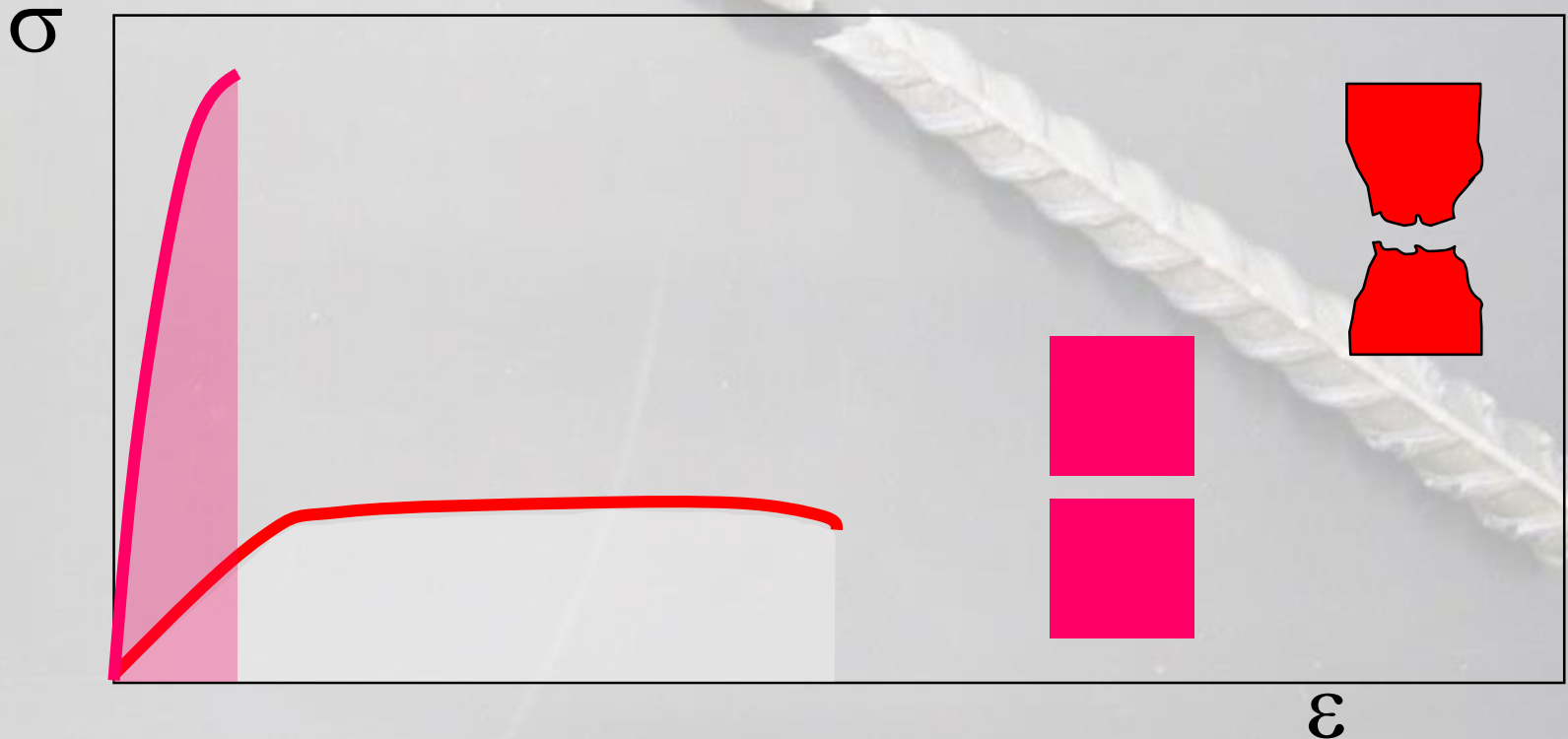
Fratura simples

- Diferenciação pela energia absorvida com presença ou não de deformação plástica: ductilidade e fragilidade

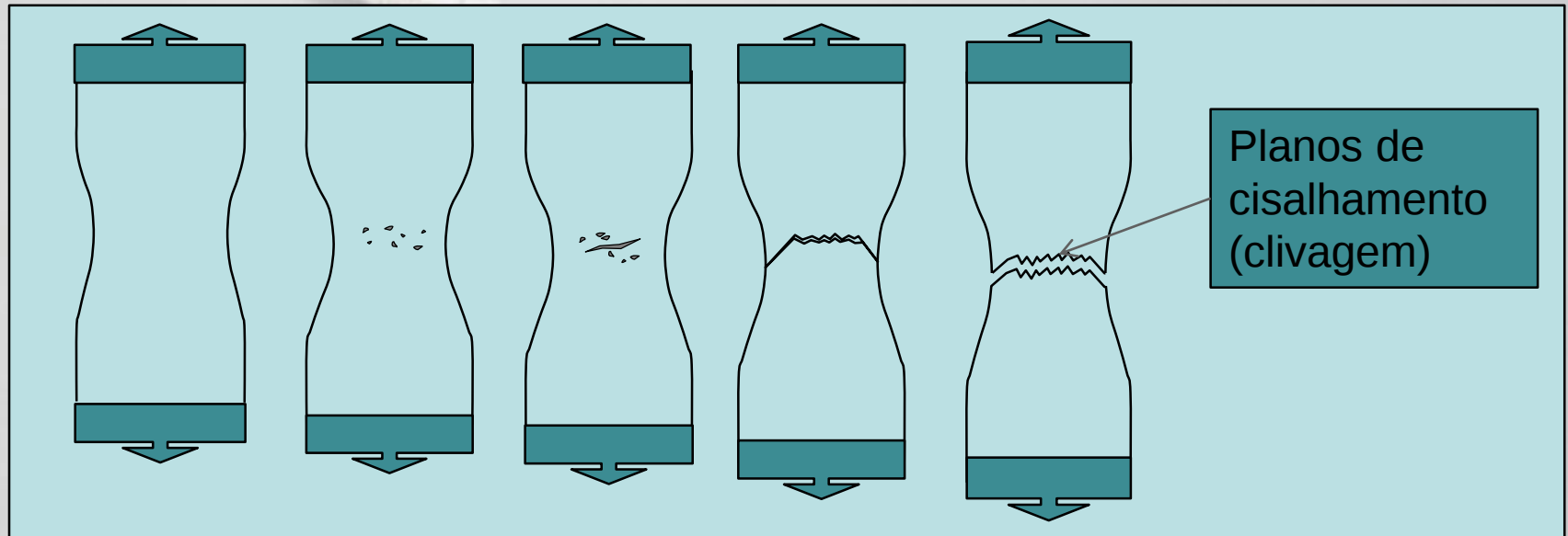


Fratura simples

- Fragilidade não é baixa resistência.

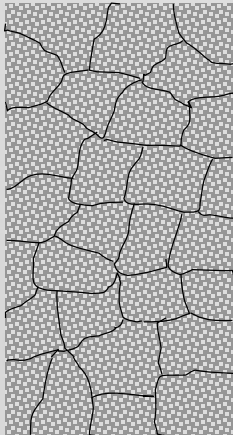


Formação de superfície de fratura em materiais dúcteis

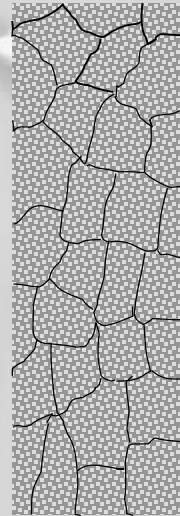
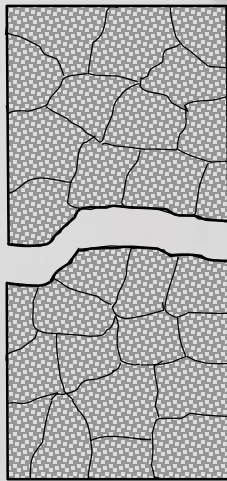


- Formação da estrição
- Intensificação do estrangulamento
- Indução de pequenas falhas
- Coalescência de pequenas falhas
- Formação da superfície de fratura
- Ruptura

Formação de superfície de fratura

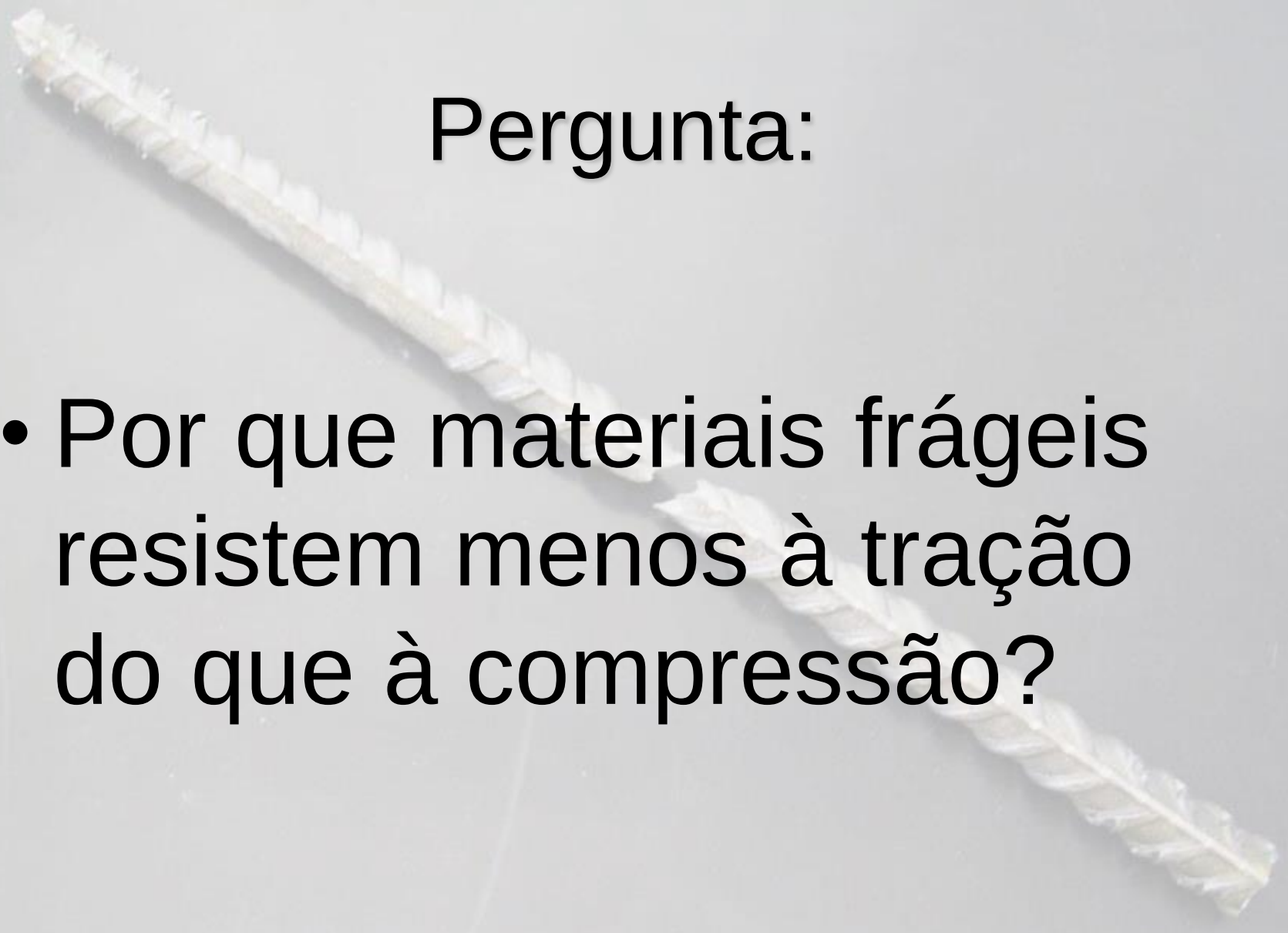


Intergranular
(frágil)



Transgranular
(dúctil)





Pergunta:

- Por que materiais frágeis resistem menos à tração do que à compressão?

Concentração de tensões

- A ocorrência de singularidades ou falhas internas ou externas irão impor uma concentração de tensões
- Isto ocorre principalmente para tensões de tração

$$\sigma_m = \sigma_0[1+2(a/\rho_e)^{1/2}]$$

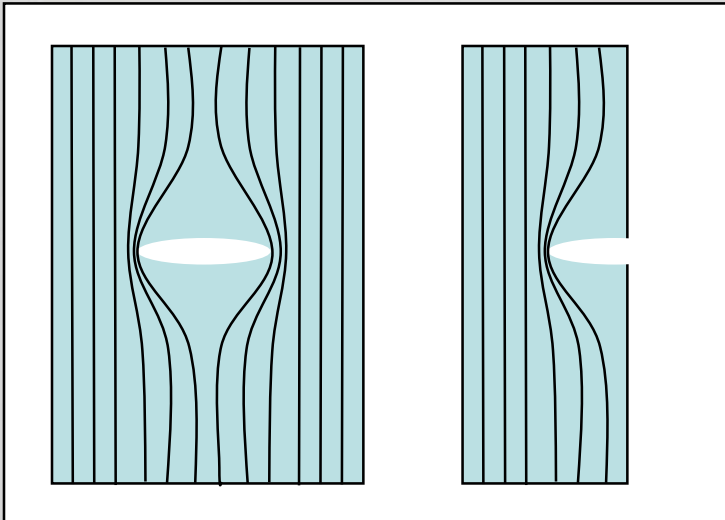
Onde,

σ_m = tensão na extremidade da fissura

σ_0 = tensão de tração aplicada no material

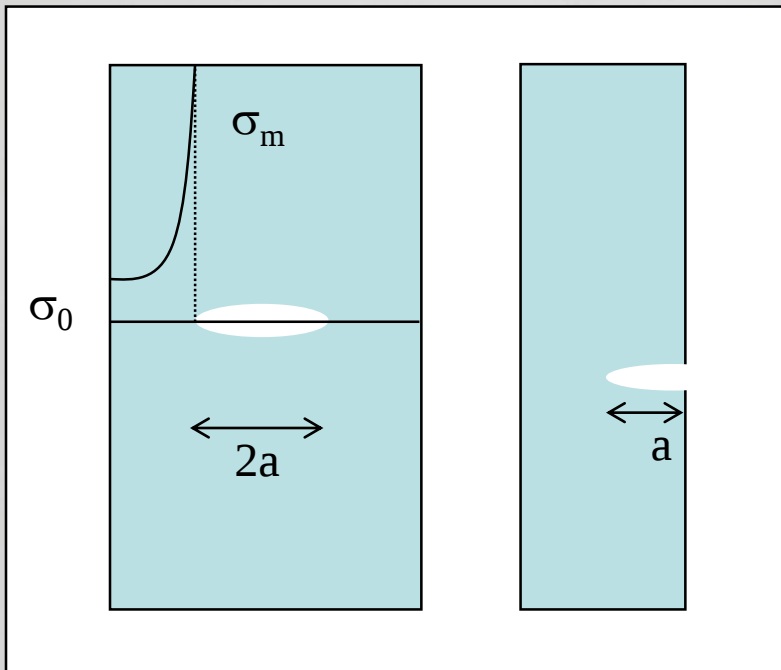
a = $\frac{1}{2}$ comprimento da trinca interna ou comprimento da trinca superficial

ρ_e = raio de curvatura da extremidade da fissura



Concentração de tensões

- Quando $a \gg \rho_e$
tem-se nova
situação:



$$\sigma_m = 2\sigma_0(a/\rho_e)^{1/2}$$

Onde,

σ_m = tensão na extremidade da fissura

σ_0 = tensão de tração aplicada no material

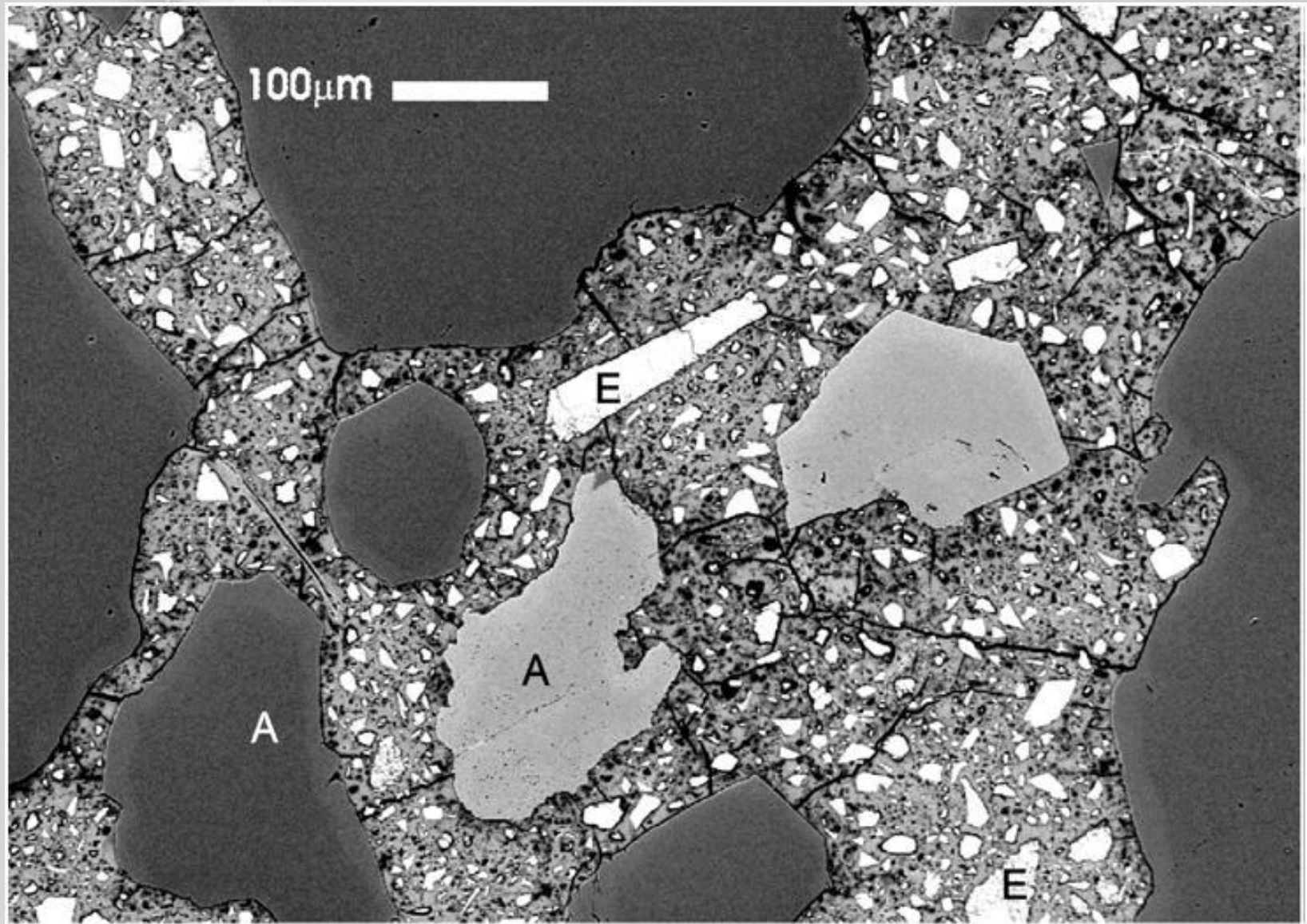
$a = \frac{1}{2}$ comprimento da trinca interna ou
comprimento da trinca superficial

ρ_e = raio de curvatura da extremidade da
fissura

$$K_e = \sigma_m/\sigma_0 = 2(a/\rho_e)^{1/2}$$

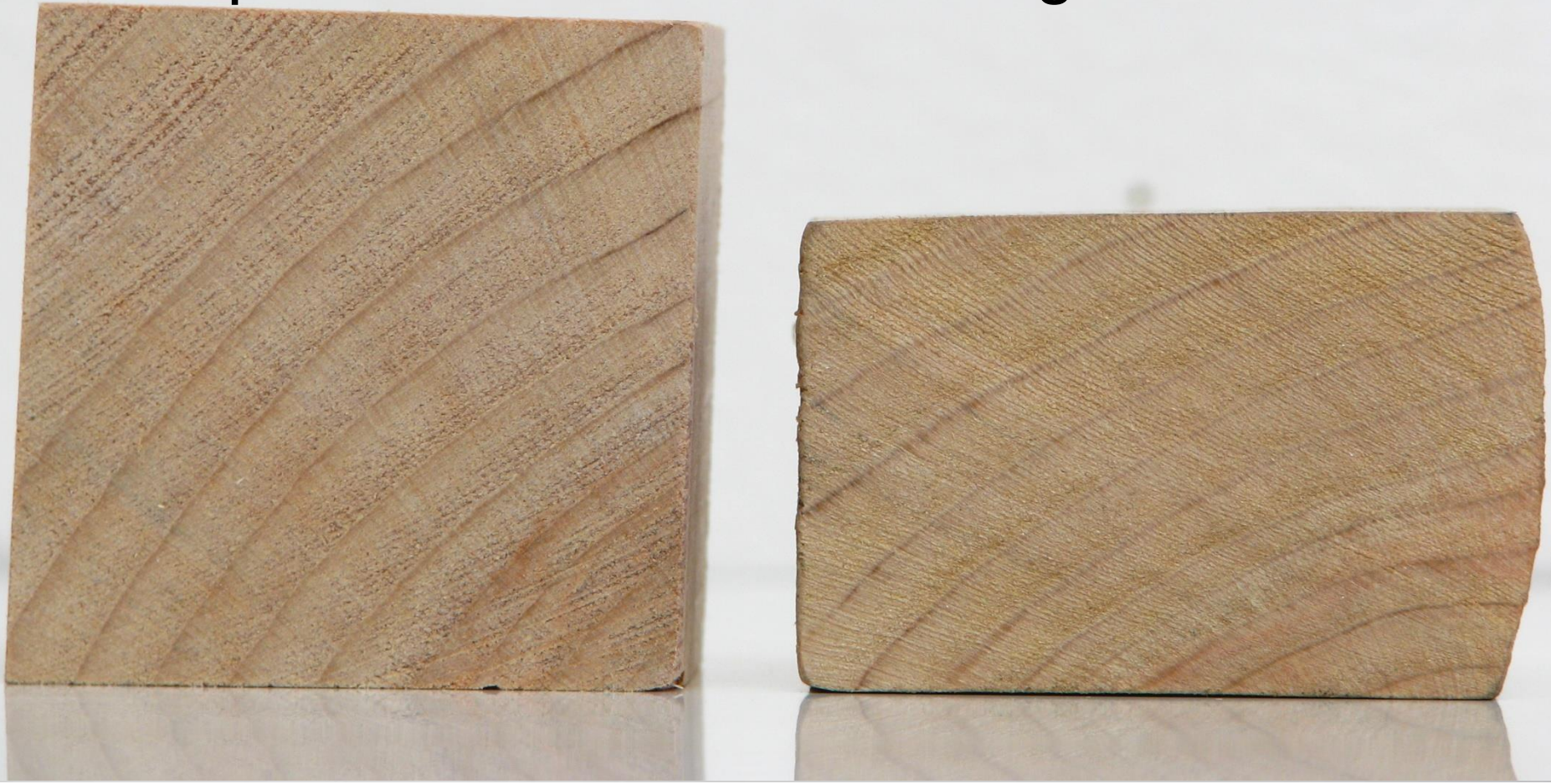
K_e = fator de concentração de tensões

O que acontece com o concreto?

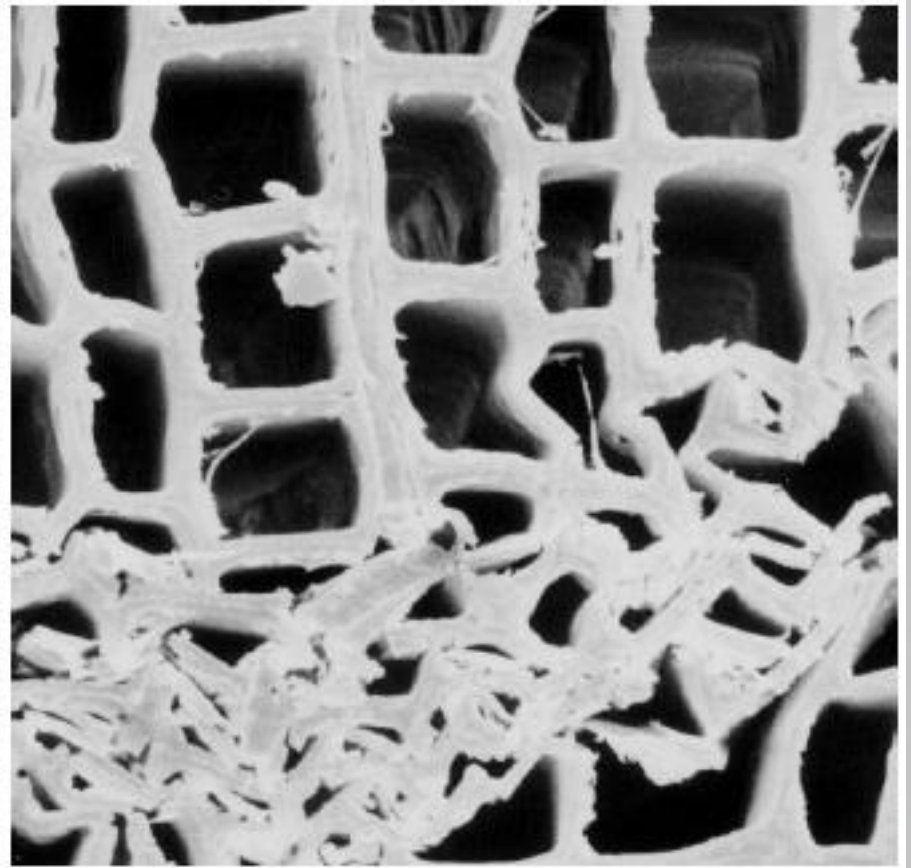
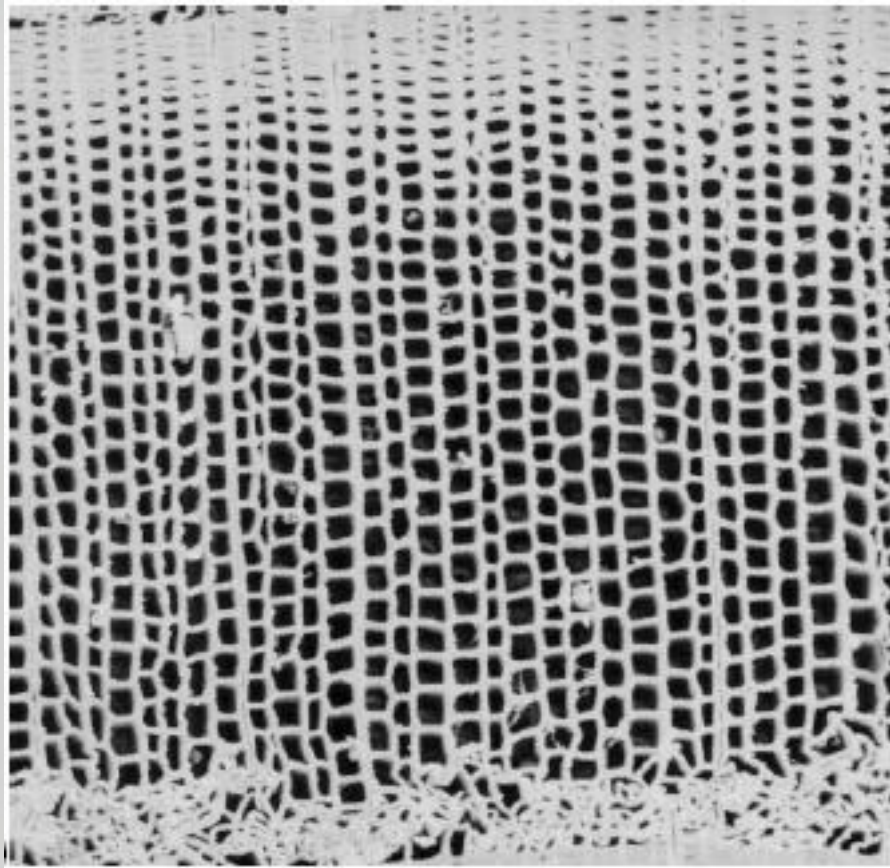


Condições especiais de ruptura

Compressão radial da madeira: o comportamento é dúctil ou frágil?

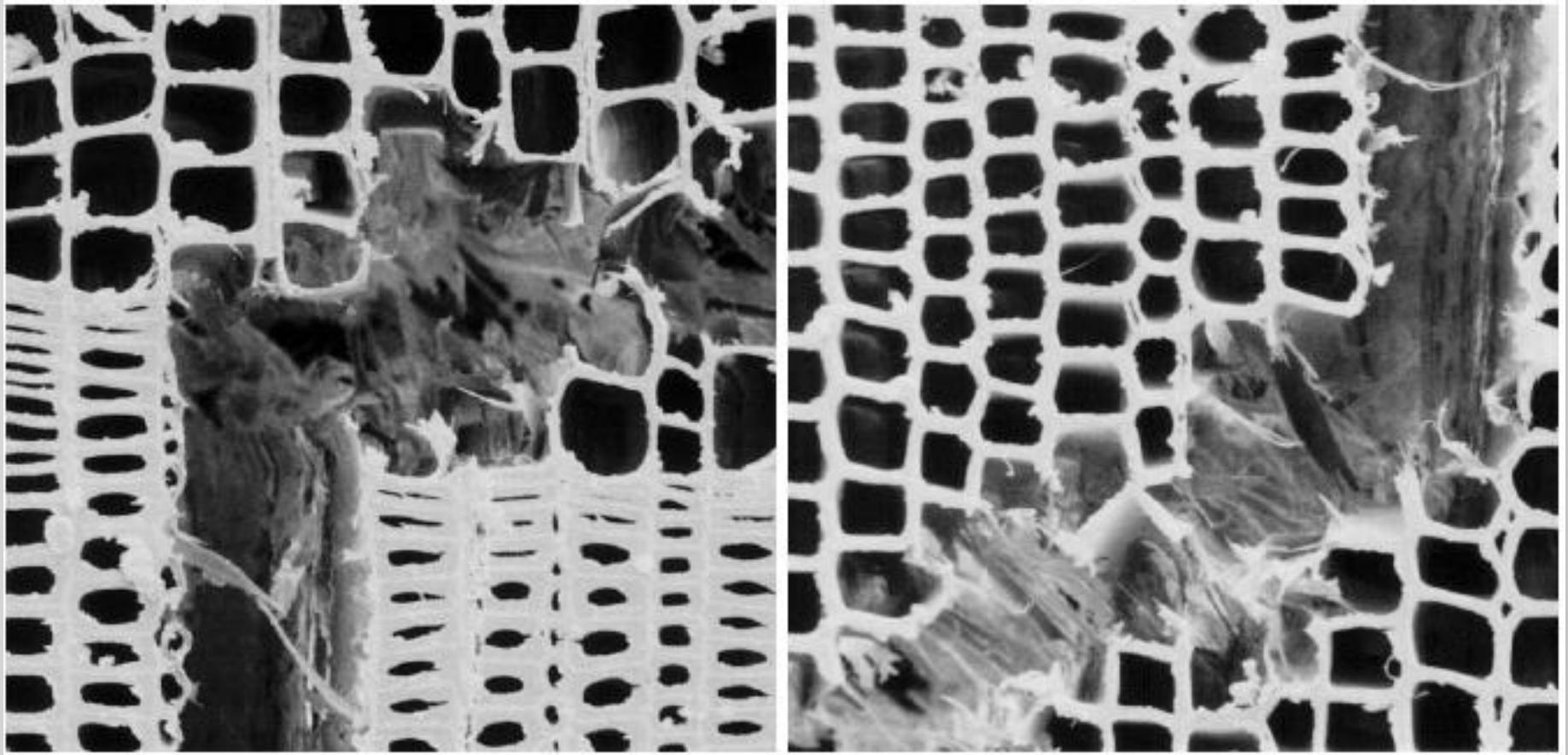


Ruptura por compressão radial



Kent Persson. Micromechanical Modelling of Wood And Fibre Properties (Tese),
Suécia, 2000

Como é a ruptura por tração radial da madeira?



Kent Persson. Micromechanical Modelling of Wood And Fibre Properties (Tese),
Suécia, 2000

Compressão axial da madeira: é dúctil ou frágil?



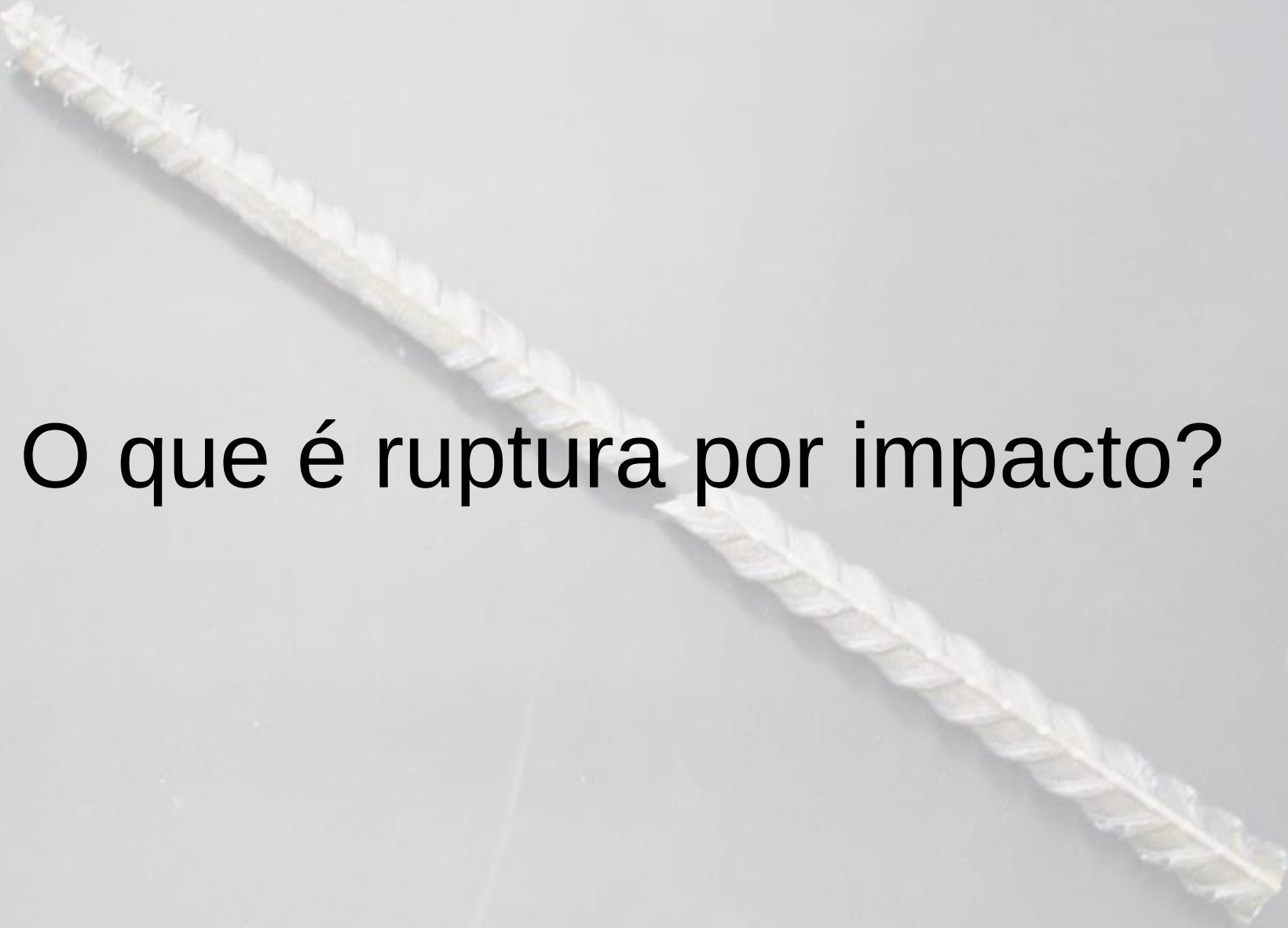
Ruptura de escoras em minas:



<http://www.wj.com.au/mining/propping.html>

Como é a fratura da madeira na flexão?

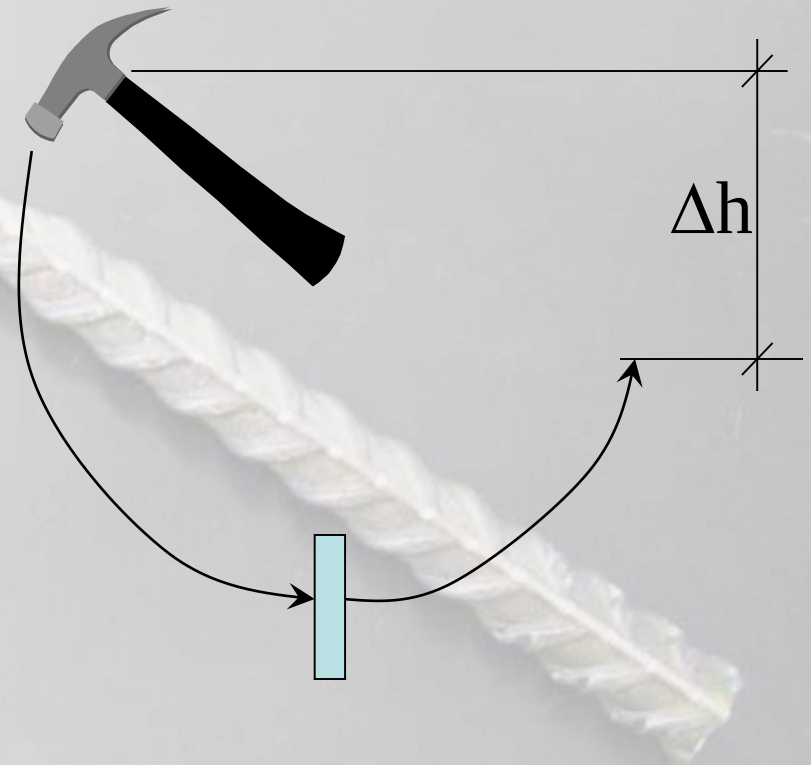


A long, double-flute drill bit is positioned diagonally from the top-left to the bottom-right of the image. The bit is silver-colored with two distinct flutes running along its length. The background is a plain, light gray surface.

O que é ruptura por impacto?

Impacto

- Impacto = carga de curta duração
- Associado a capacidade de absorção de energia
 - Trabalho de deformação
 - Formação de superfície



Ensaio de pendulo de Charpy

Impacto

- Qual é a grande dificuldade?
- A medida e a extrapolação do resultado.
- Alternativa:
- Desenvolver ensaio padronizado – técnica de Charpy e Izod.
 - Entalhe em V
 - Energia fixa (altura h)
 - Bom para avaliação comparativa de desempenho.

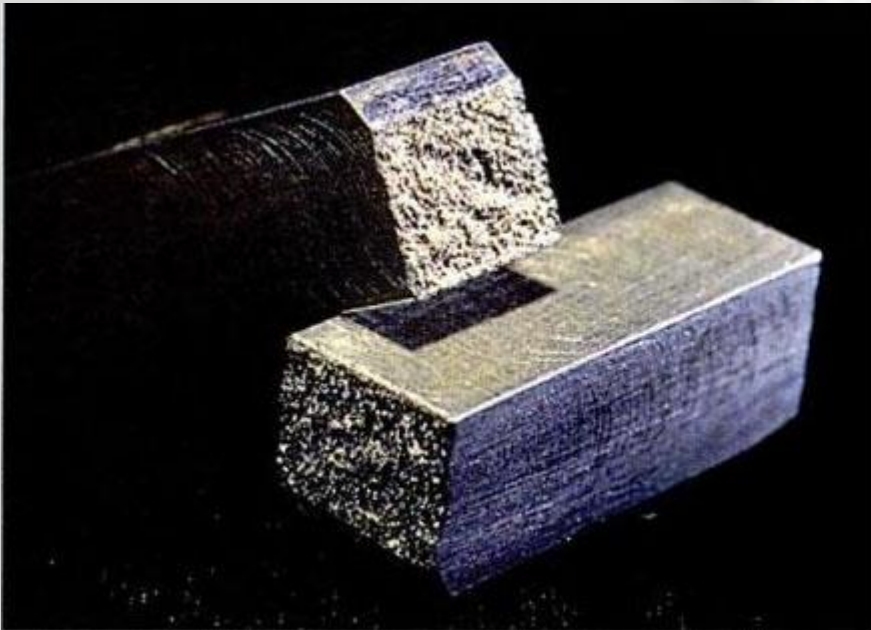
Impacto



© Woods Hole Oceanographic Institution, 1986

Impacto

Corpos de prova ensaiados no pêndulo de Charpy:



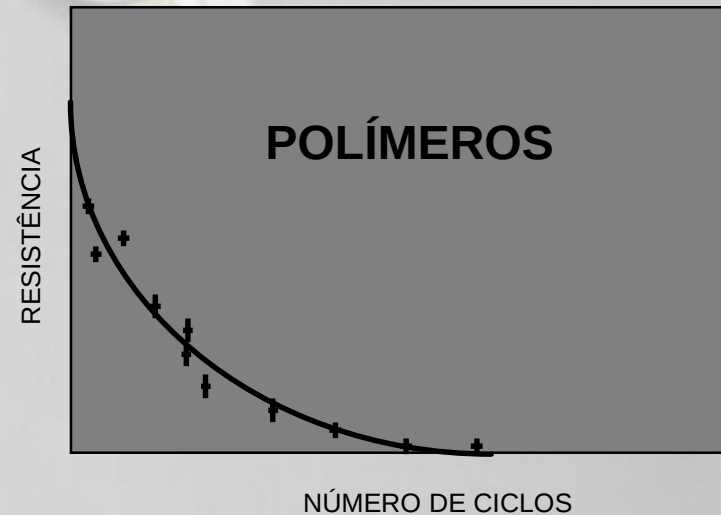
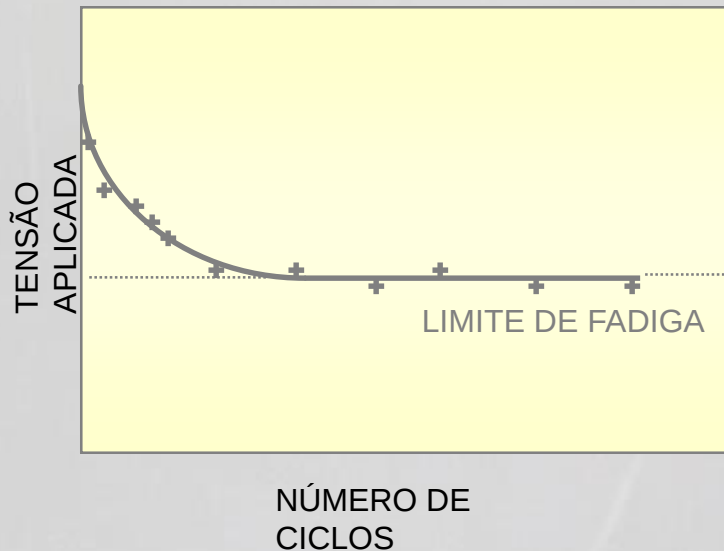
<https://bsclarified.files.wordpress.com/2012/04/titanic-fractured-hull.jpg>

A long, double-flute metal drill bit is positioned diagonally from the top-left to the bottom-right of the image. The bit has a silver, metallic finish and two distinct flutes running along its length. The background is a plain, light gray surface.

O que é fadiga?

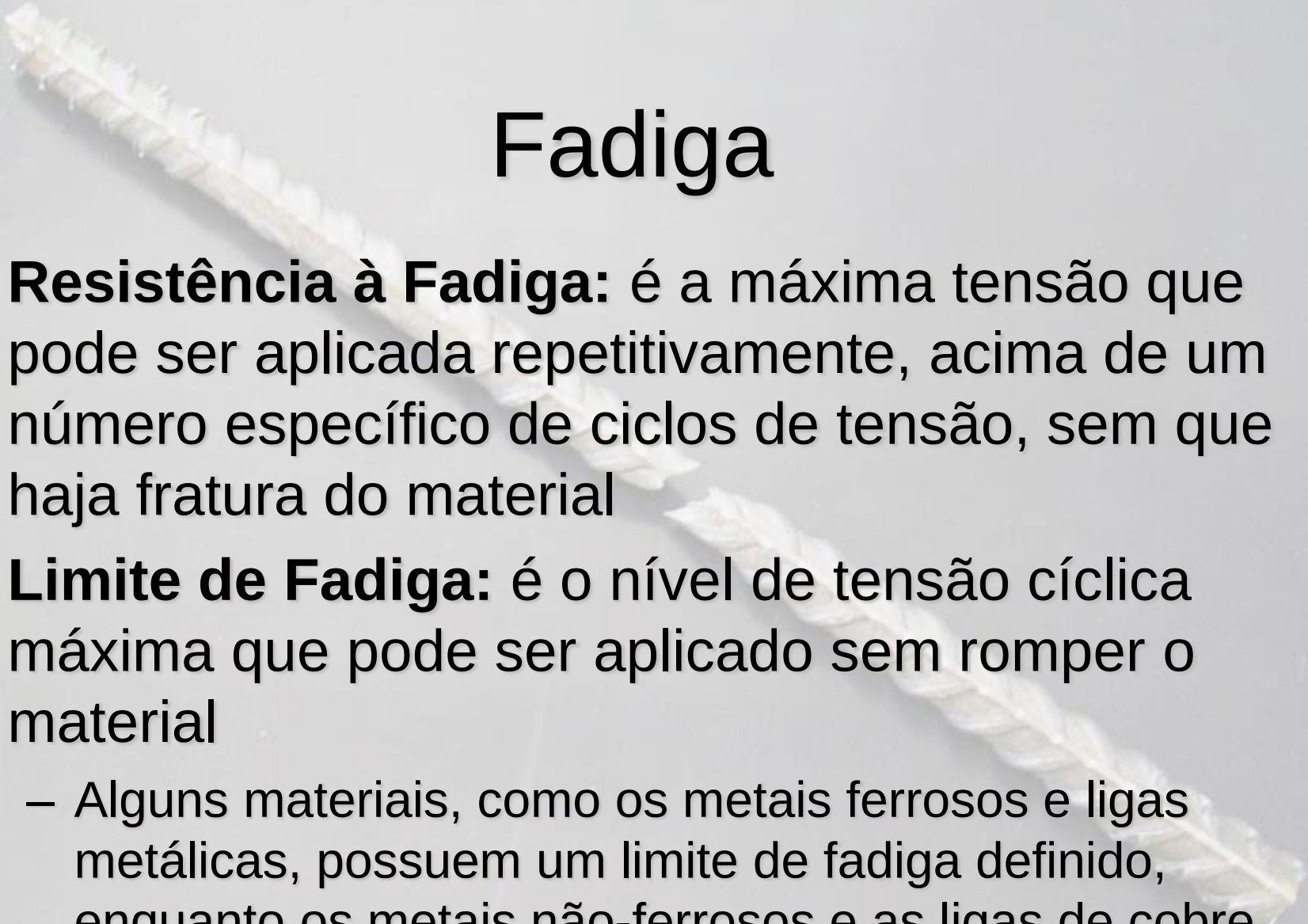
Fadiga

- esforço cíclico → rompe em tensão < R_{mec}
- função do **nível de tensão**



Fadiga

- **JASTRZEBSKI (1977):** Sob tensões cíclicas, um material pode romper sob tensões muito menores que sua máxima resistência estática
- A fadiga pressupõe concentração de tensão em falha ou em fissura induzida: é preponderantemente associada a esforços de tração.



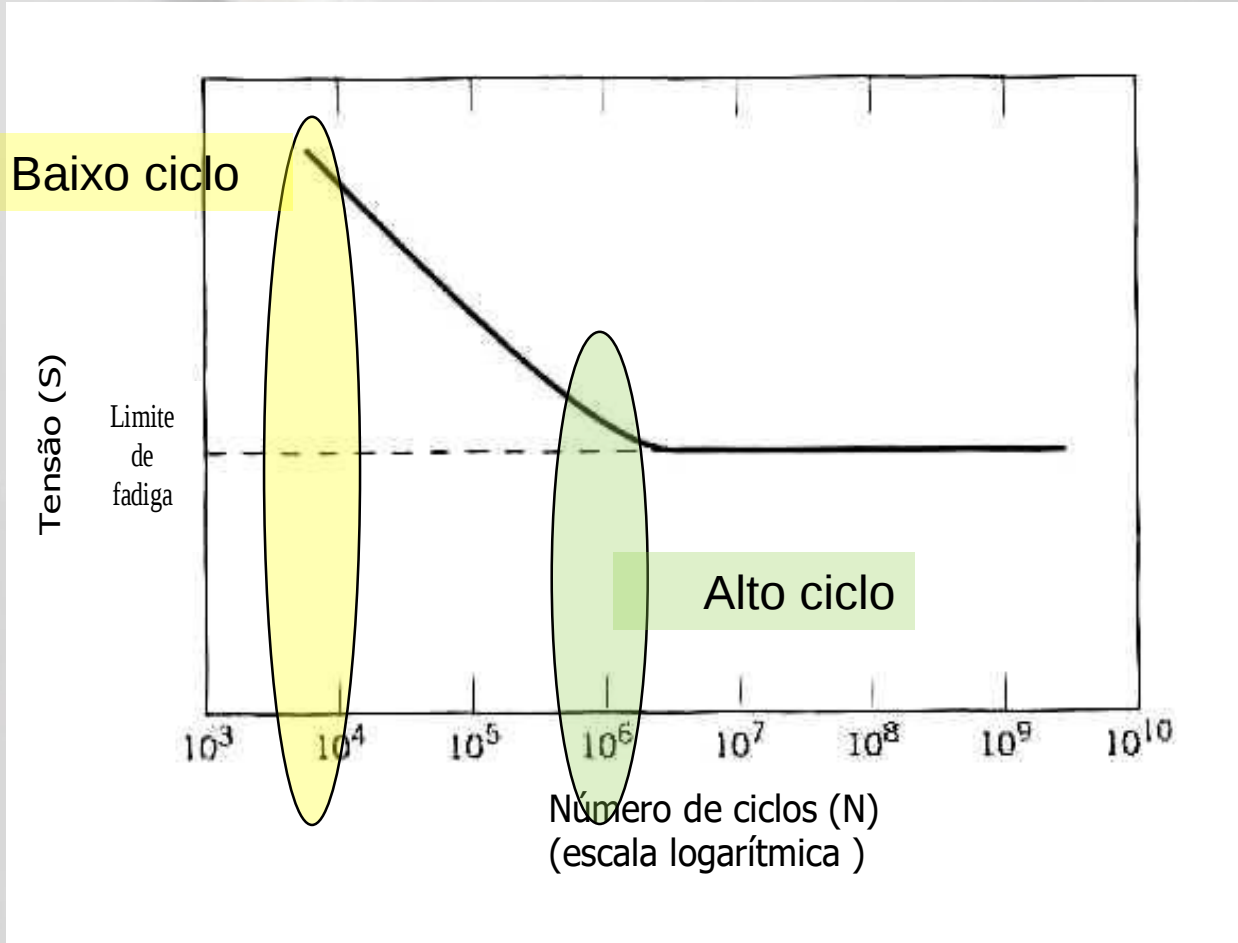
Fadiga

- **Resistência à Fadiga:** é a máxima tensão que pode ser aplicada repetitivamente, acima de um número específico de ciclos de tensão, sem que haja fratura do material
- **Limite de Fadiga:** é o nível de tensão cíclica máxima que pode ser aplicado sem romper o material
 - Alguns materiais, como os metais ferrosos e ligas metálicas, possuem um limite de fadiga definido, enquanto os metais não-ferrosos e as ligas de cobre, alumínio, magnésio não mostram um limite de fadiga claro.

TIPOS DE CICLOS DE FADIGA

- **Altos ciclos:** *carregamentos de baixo nível de tensão em à resistência estática e alto número de ciclos*, por consequência: ruptura por fadiga com ciclos de *carregamento* totalmente *incluídos no trecho elástico*
- **Baixos ciclos:** ciclos de *carregamento* de nível relativamente *alto de tensão (acima do limite elástico)* induzindo a *deformação plástica* durante cada ciclo: ruptura com *baixo número de ciclos* e de *curta duração*

Parametrização



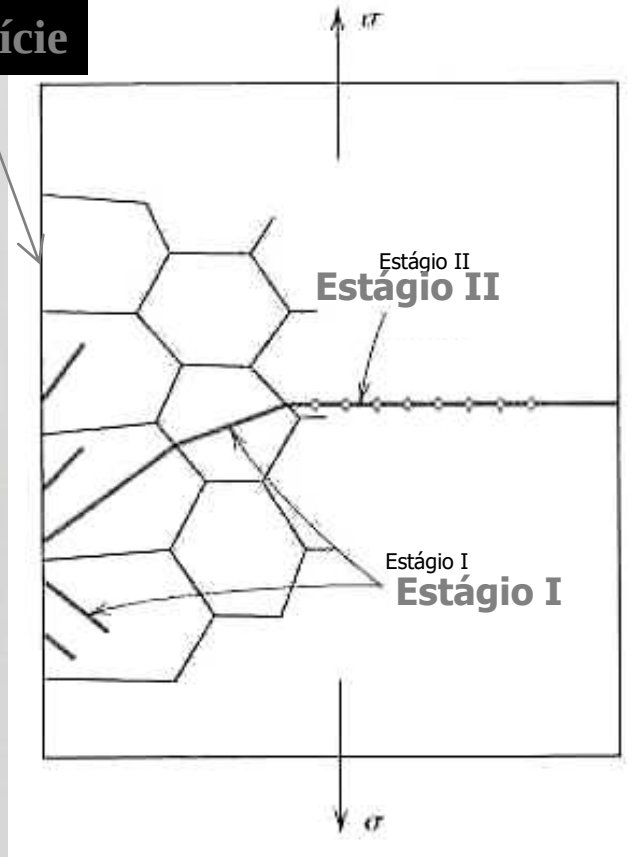
Mecanismo de fadiga em materiais dúcteis

- **I) Formação de fissuras microscópicas** nos locais de concentração de tensões
- **II) Crescimento e propagação das fissuras** concentrações de tensões nas bordas e propagação a cada ciclo
- **III) Ruptura por fadiga** propagação de fissura principal e geração de superfície de fratura



Mecanismo de fadiga

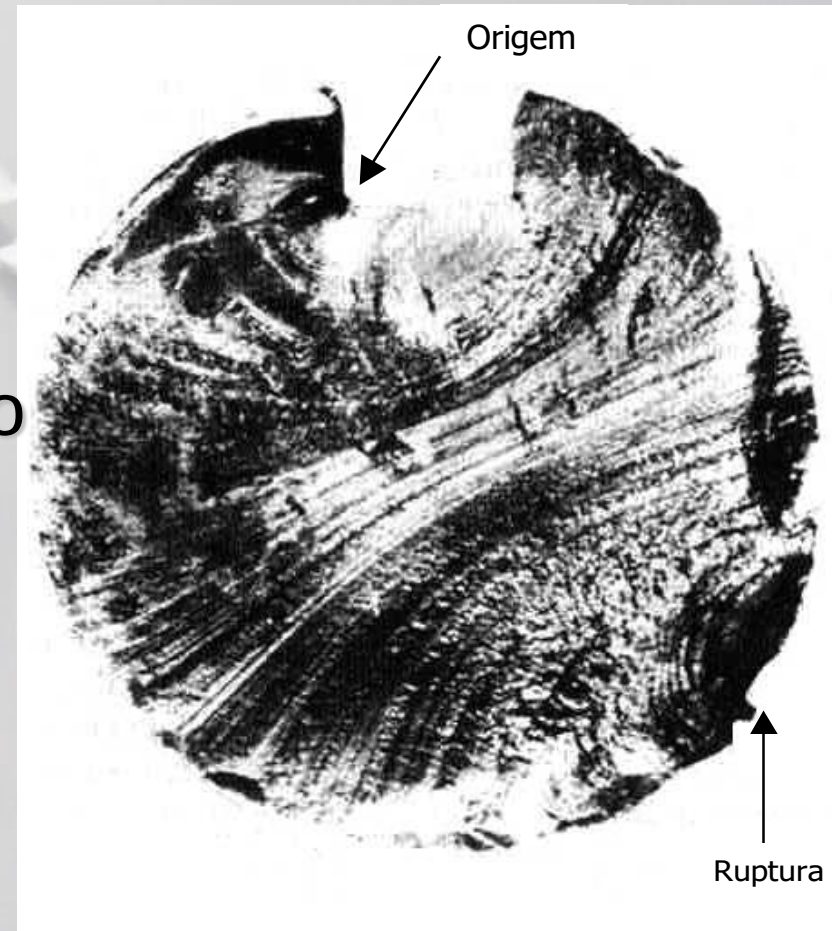
Superfície



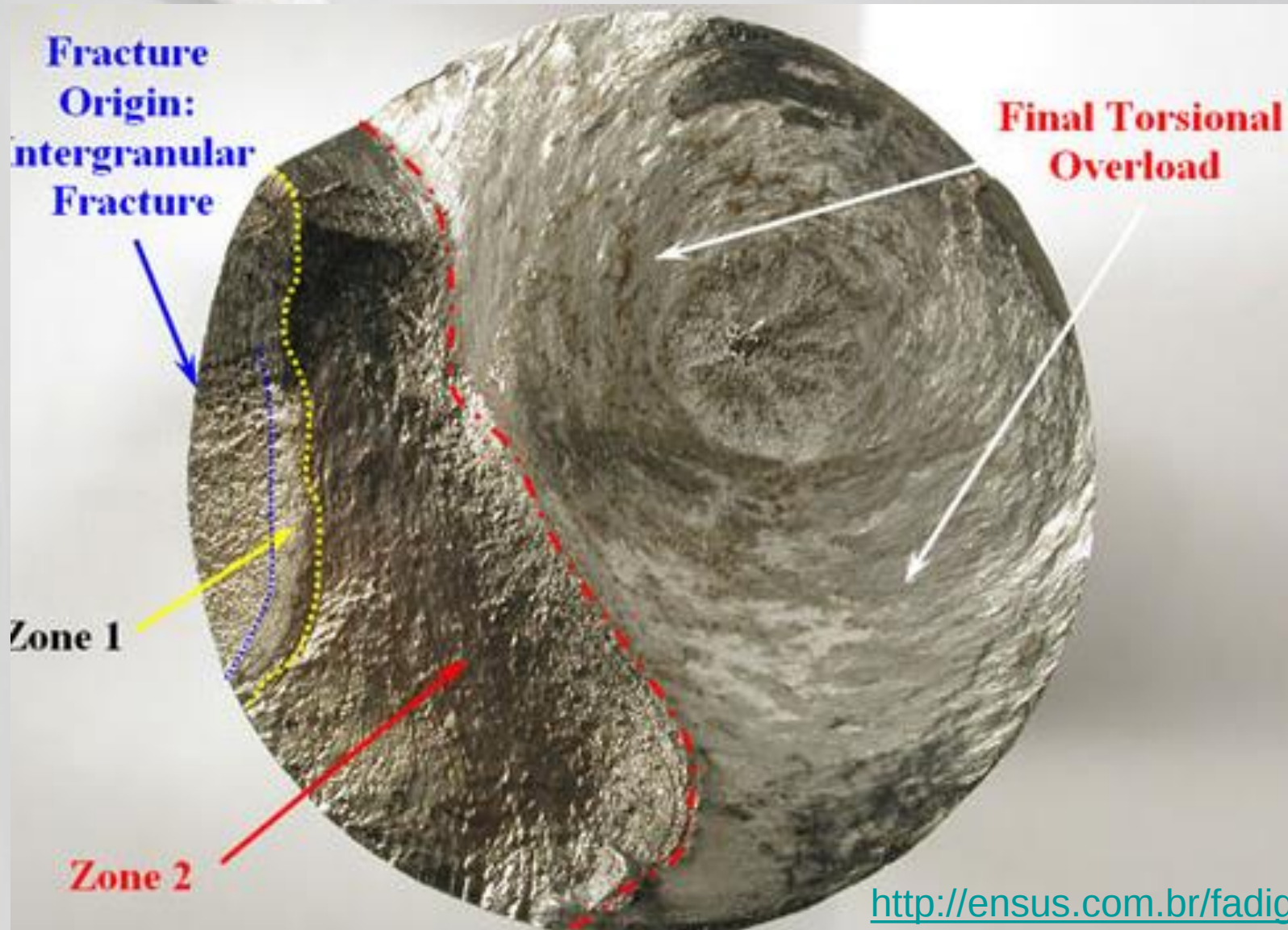
- Propagação de fissuras microscópicas (efeito de entalhe das fissuras concentra ainda mais tensões)
- Ruptura frágil do material
- Estágio I – nucleação
- Estágio II – propagação

Ruptura por fadiga (macroscópico)

- Numa superfície fraturada por fadiga tem-se:
 - um ponto de origem da fissura (fratura intergranular)
 - uma superfície com fissuras crescentes (região lisa/brilhante em metais)
 - uma superfície fraturada final (região áspera/rugosa).



Ruptura por fadiga (macroscópico)



Fatores que afetam a fadiga

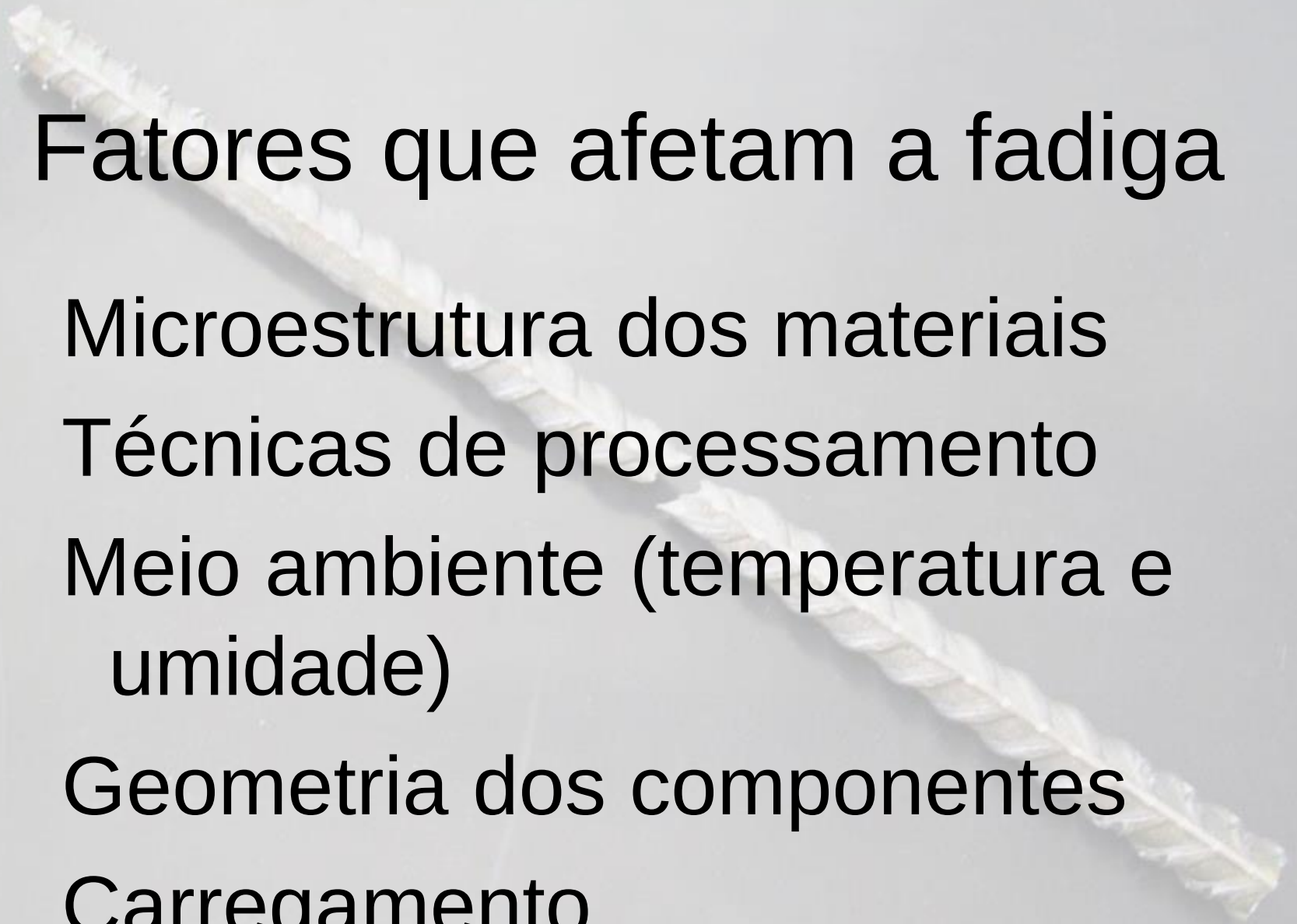
Microestrutura dos materiais

Técnicas de processamento

Meio ambiente (temperatura e umidade)

Geometria dos componentes

Carregamento



Fatores que afetam a fadiga

- Microestrutura dos Materiais
 - Falhas e defeitos: geram concentração de tensão e início de propagação de dano
 - Nível de encruamento: aproxima a carga de trabalho da tensão de ruptura do material

Fatores que afetam a fadiga

Efeito das Técnicas de Processamento

- **Fabricação:**

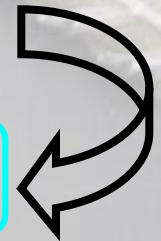
**Tensão Residual
de Compressão**



> Resistência à Fadiga

**Tensão Residual
de Tração**

< Resistência à Fadiga



Fatores que afetam a fadiga

Efeito das Técnicas de Processamento

- Fabricação:

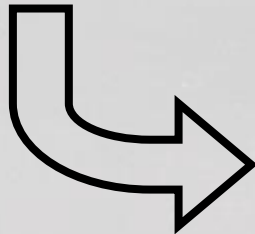


Fatores que afetam a fadiga

Efeito do meio ambiente



Temperatura



**Resistência à
fadiga**

Fatores que afetam a fadiga

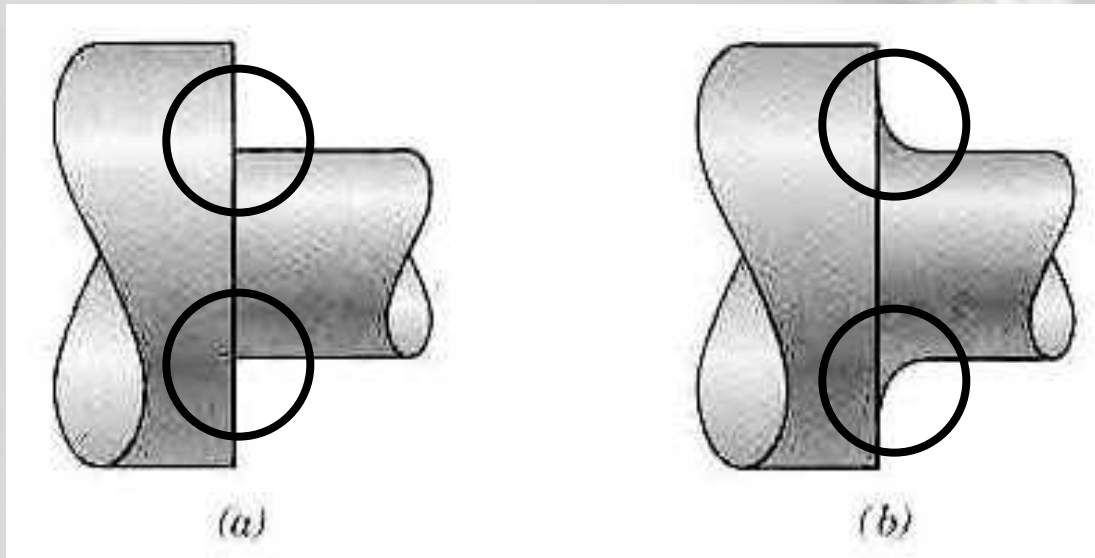
Efeito da geometria

Roscas, entalhes, furos, arranhões, riscos,
juntas

Concentrações de Tensões

Fissuração

Redução de irregularidades
superficiais → aumenta a resistência à fadiga



Fatores que afetam a fadiga

- Concentração de tensões



Excesso de tensão em fixação de parafuso

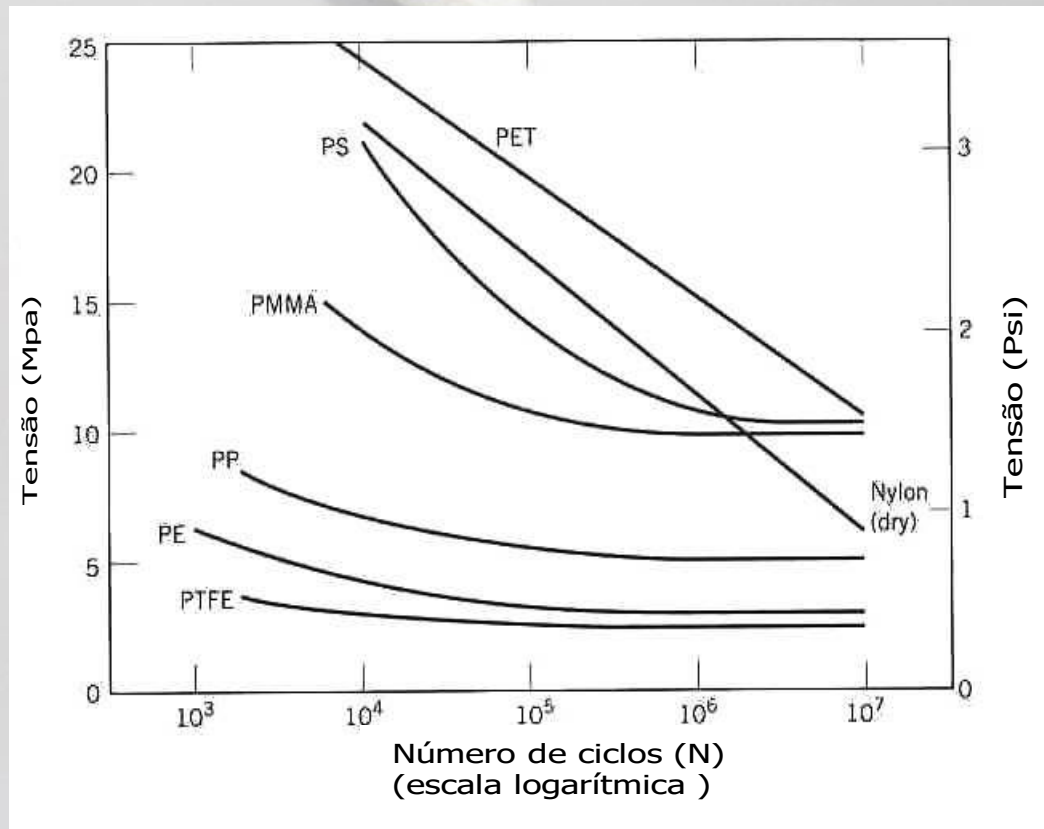


Excesso de tensão em fixação de parafuso



Polímeros

- A fadiga em polímeros é complexa:
- Alguns polímeros, como nylon, polietileno, não indicam claramente o limite de fadiga



Materiais Cerâmicos

- São materiais que apresentam ruptura frágil, e podem apresentar ruptura por fadiga nas mesmas condições que os materiais já citados:

Propagação de fissura no material quando submetido a esforços cíclicos.



Perguntas:

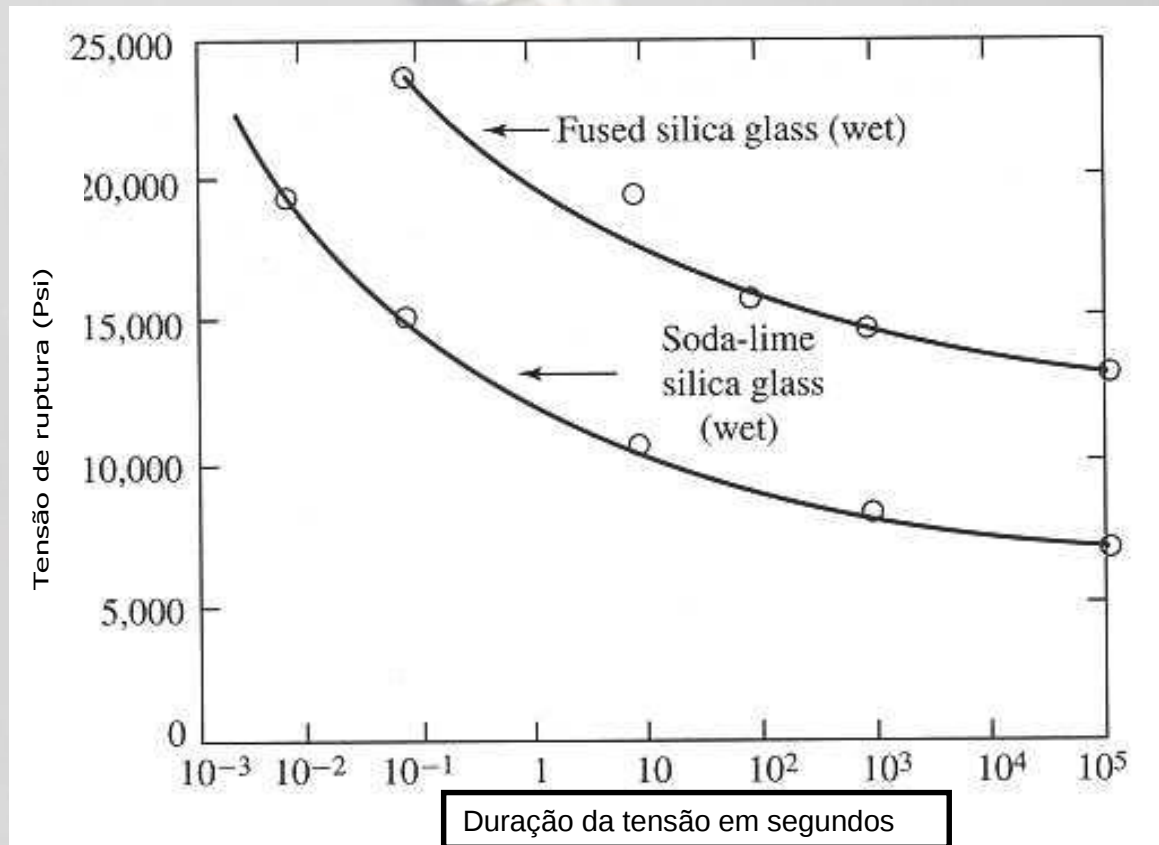
- Alguém sabe o que é fadiga estática?
- Alguém sabe o que é fratura retardada?
- Alguém sabe o que é propagação sub-crítica de fratura?

“Fadiga estática”

- Em algumas circunstâncias a ruptura dos materiais cerâmicos pode ser antecedida por uma propagação lenta de fissuras, sob tensões estáticas.
- CALLISTER(1999); SHACKELFORD(1996) descrevem o que eles chamam de *fadiga estática* ou *fadiga secundária*
- O próprio CALLISTER reconhece que o nome fadiga é um tanto impróprio, pois a fratura pode ocorrer na ausência de ciclos de tensões.
- Fratura retardada
- Ruptura por carga mantida

Fratura retardada

Este fenômeno é ampliado quando há umidade no ambiente (associado a absorções higroscópicas e aumento de tensões internas)



Medida da resistência à compressão do concreto no Brasil

Moldagem e cura segundo
NBR5738

Ensaio segundo **NBR5739**

Corpos-de-prova cilíndricos:

Dimensões $\Phi 15\text{cm} \times 30\text{cm}$

ou $\Phi 10 \times 20 \text{ cm}$;

Proporção $h/d = 2$

Adensamento padrão
manual ou mecânico;

Desforma com 24 h;

Cura

câmara úmida

Temperatura e HR controlada

Imersão;

Acabamento superficial

Ruptura

velocidade controlada

**As condições de
realização do ensaio
devem ser
padronizadas.**

Como a umidade afeta a resistência do concreto?

- Num ensaio de determinação da resistência à compressão
- Num ensaio de determinação da resistência à tração por flexão

Variação da velocidade de carregamento

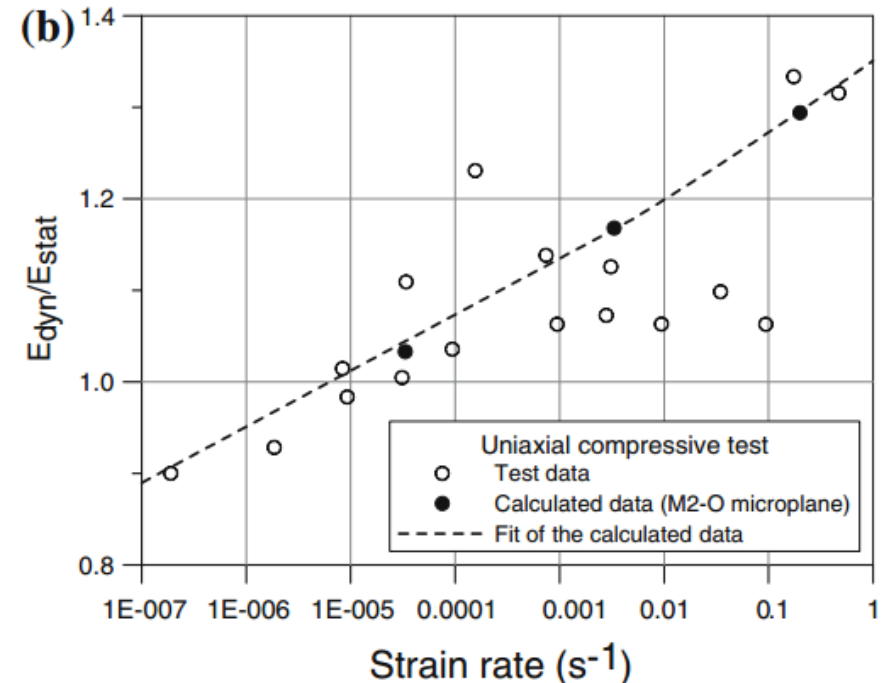
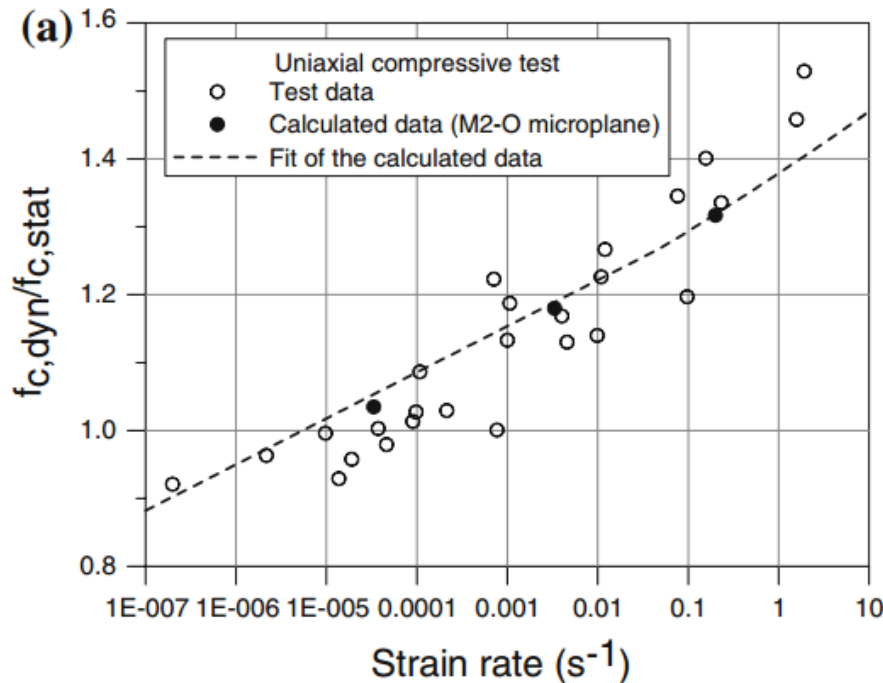
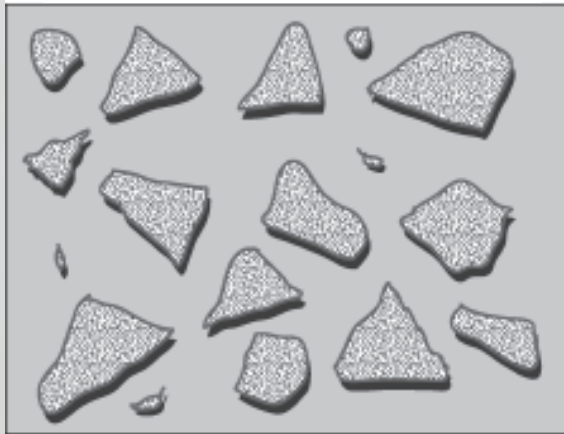


Figure 2. Uniaxial compressive test: (a) rate-dependent compressive strength – test data and model prediction and (b) rate dependent initial Young's modulus – test data and model prediction.

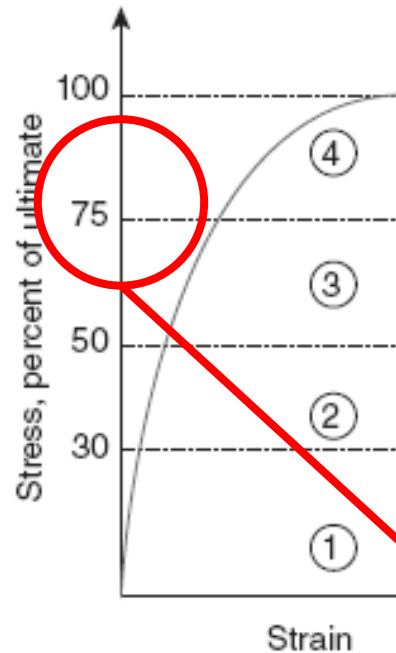
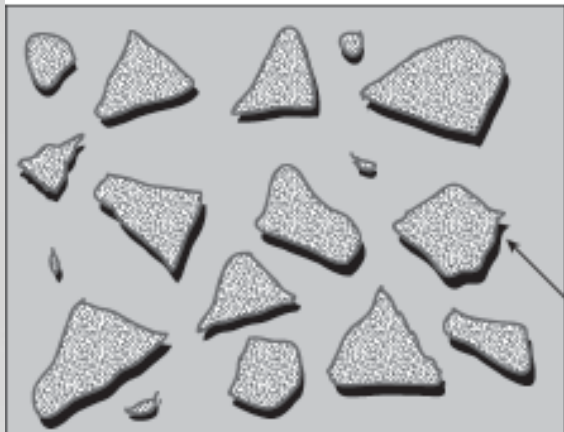
OZBOLT,RAH, MESTROVI. Influence of loading rate on concrete cone failure. International Journal of Fracture (2006) 139:239–252

Processo de propagação das fissuras (Mehta e Monteiro, 2008)

(2) 50% da tensão última



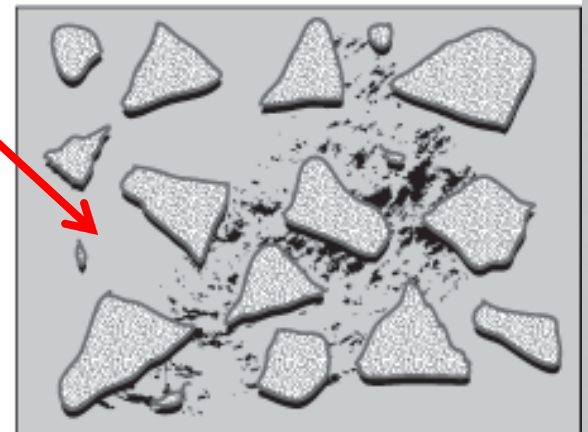
(1) 30% da tensão última



(1) tensão última



(3) 75% da tensão última



Microcracks in the interfacial transition zone

Dinâmica do efeito Rüsç (fadiga estática)

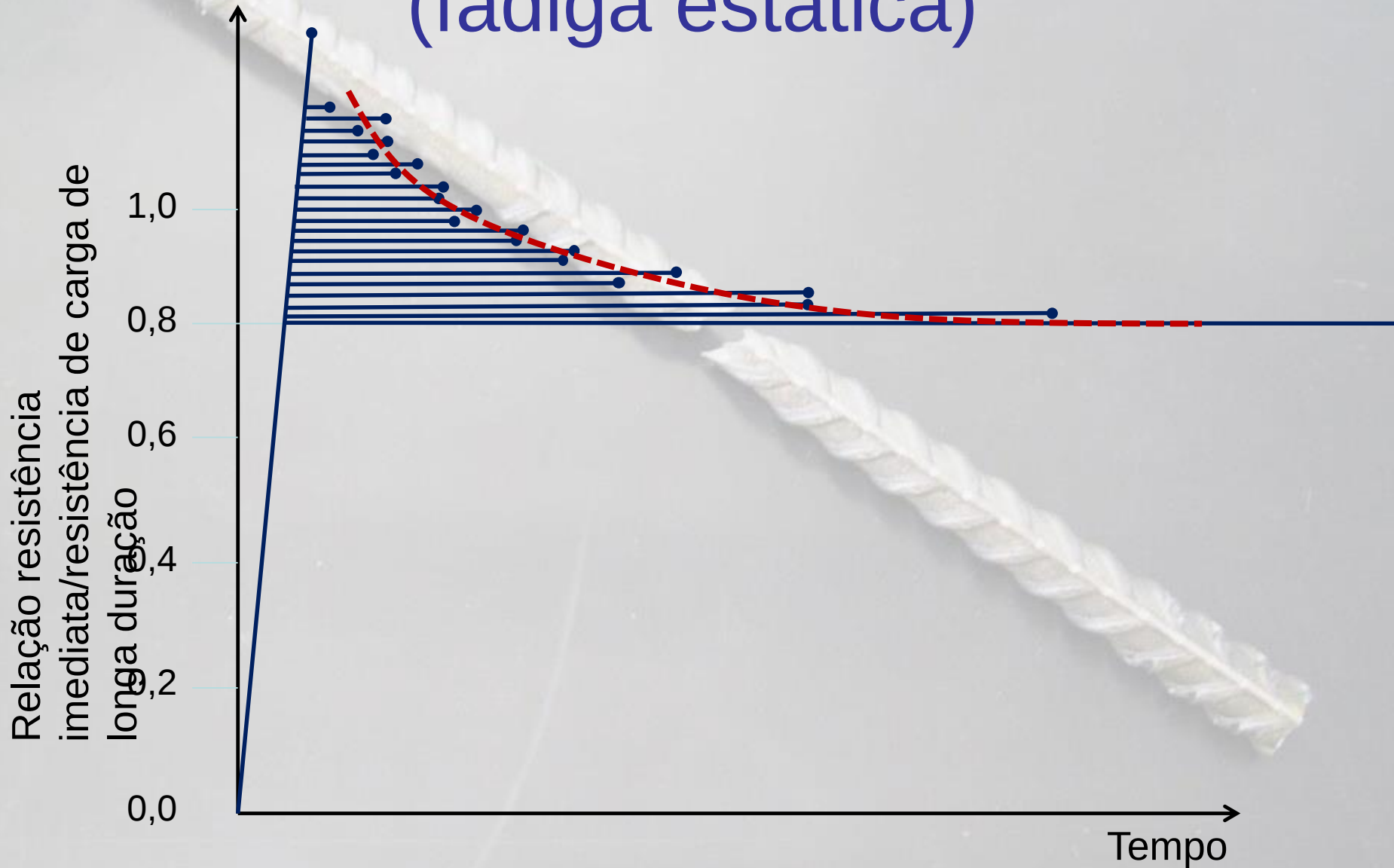
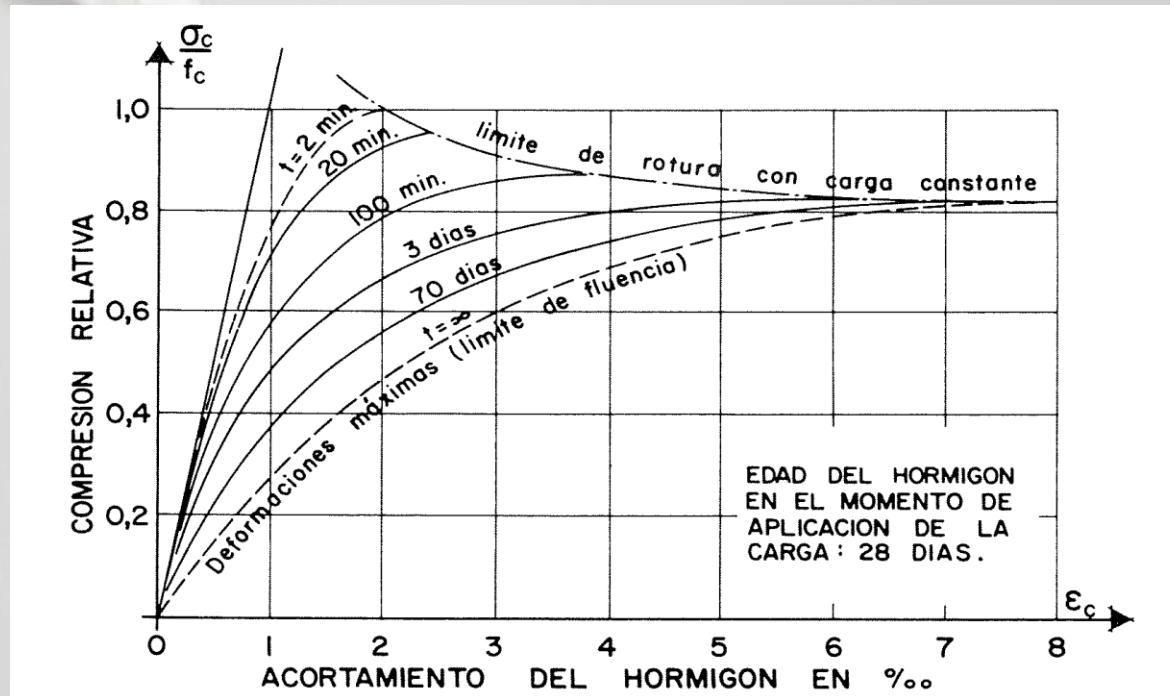


Diagrama σ - ϵ

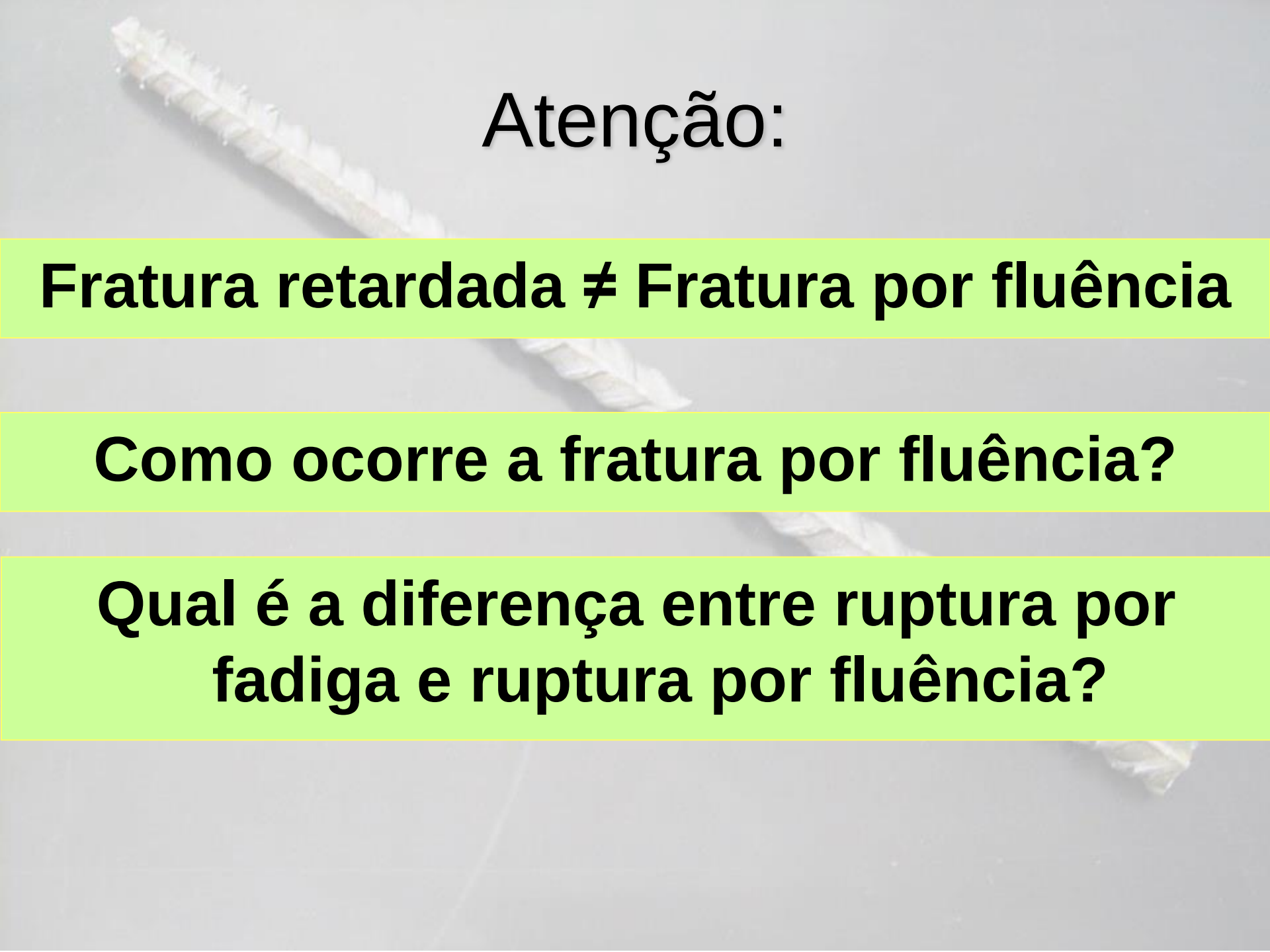
Para cargas duraderas



α_{cc} : Coeficiente de cansancio del hormigón comprimido. Varía entre 0.85 y 1.0. Se tomará 1.0 (criterio proyectista)

α_{ct} : Coeficiente de cansancio del hormigón traccionado. Se tomará 1,0.

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad f_{ctd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ctk}}{\gamma_c}$$



Atenção:

Fratura retardada $\neq$ Fratura por fluência

Como ocorre a fratura por fluência?

Qual é a diferença entre ruptura por fadiga e ruptura por fluência?