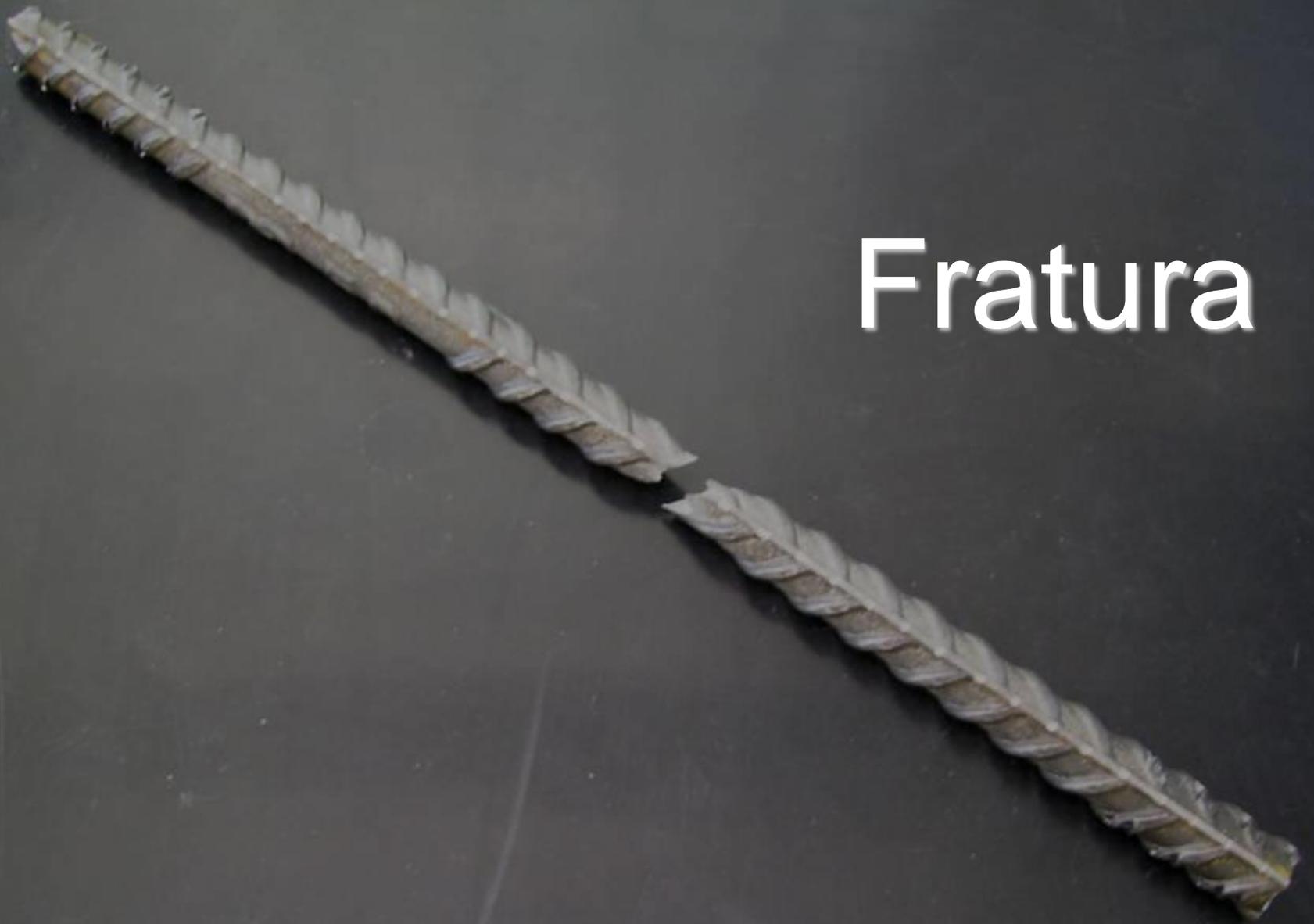
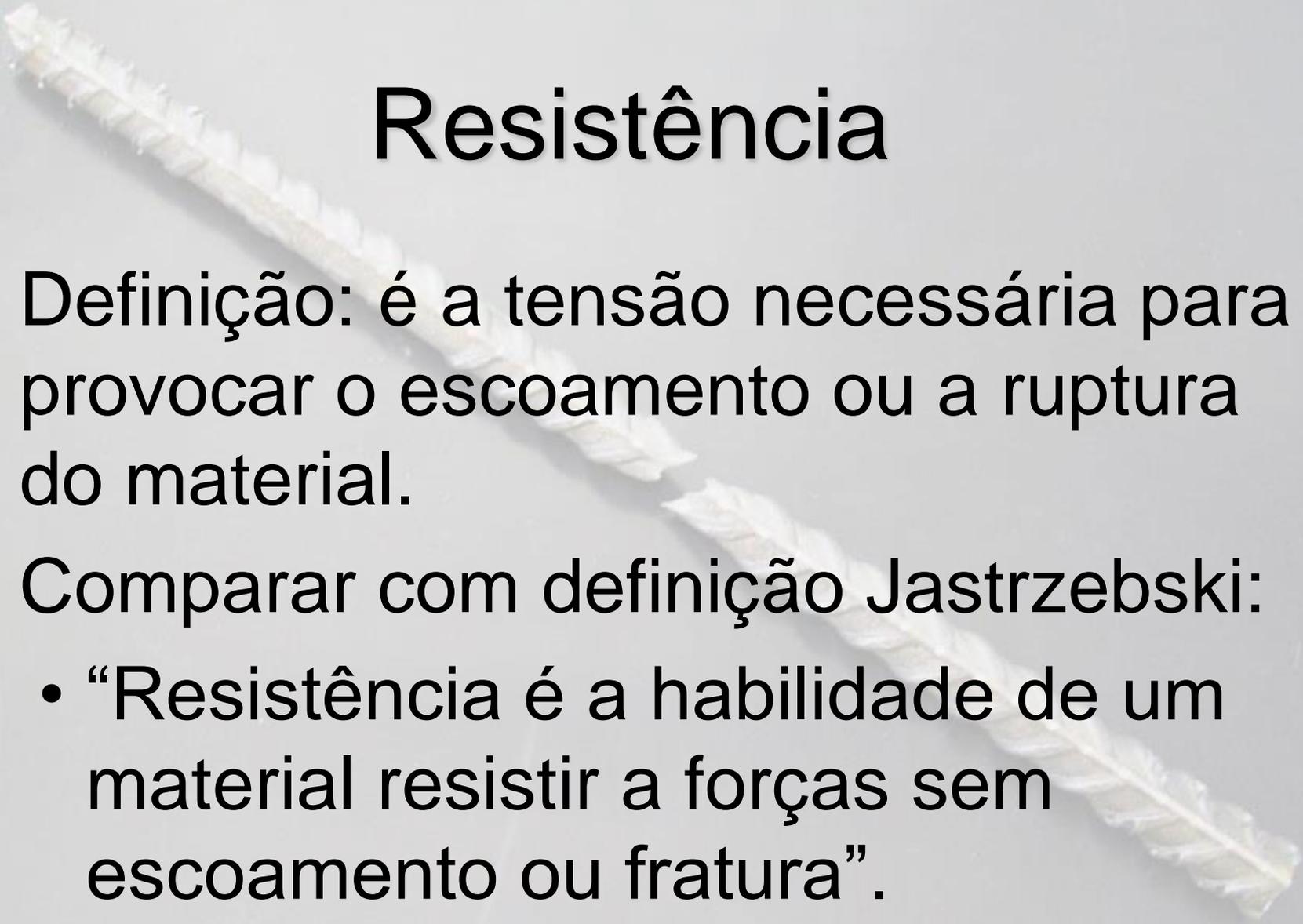


Fratura



# Resistência



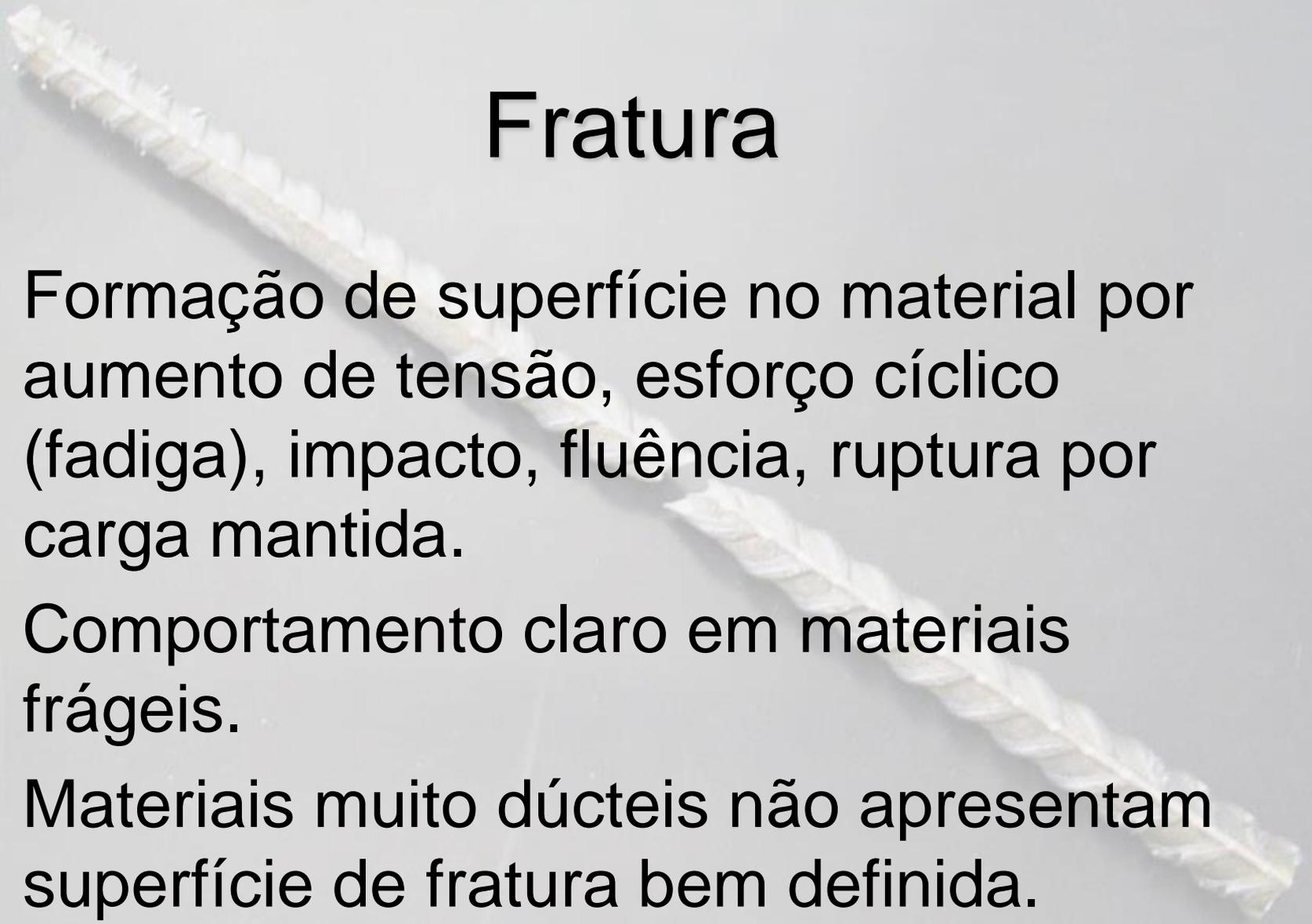
- Definição: é a tensão necessária para provocar o escoamento ou a ruptura do material.
- Comparar com definição Jastrzebski:
  - “Resistência é a habilidade de um material resistir a forças sem escoamento ou fratura”.

# O que é fratura?

- Fratura é a formação de uma superfície de separação de um sólido em, pelo menos, duas partes
- Qual é a diferença entre fratura e falha de um material?
- São consideradas como equivalentes.

# Fratura

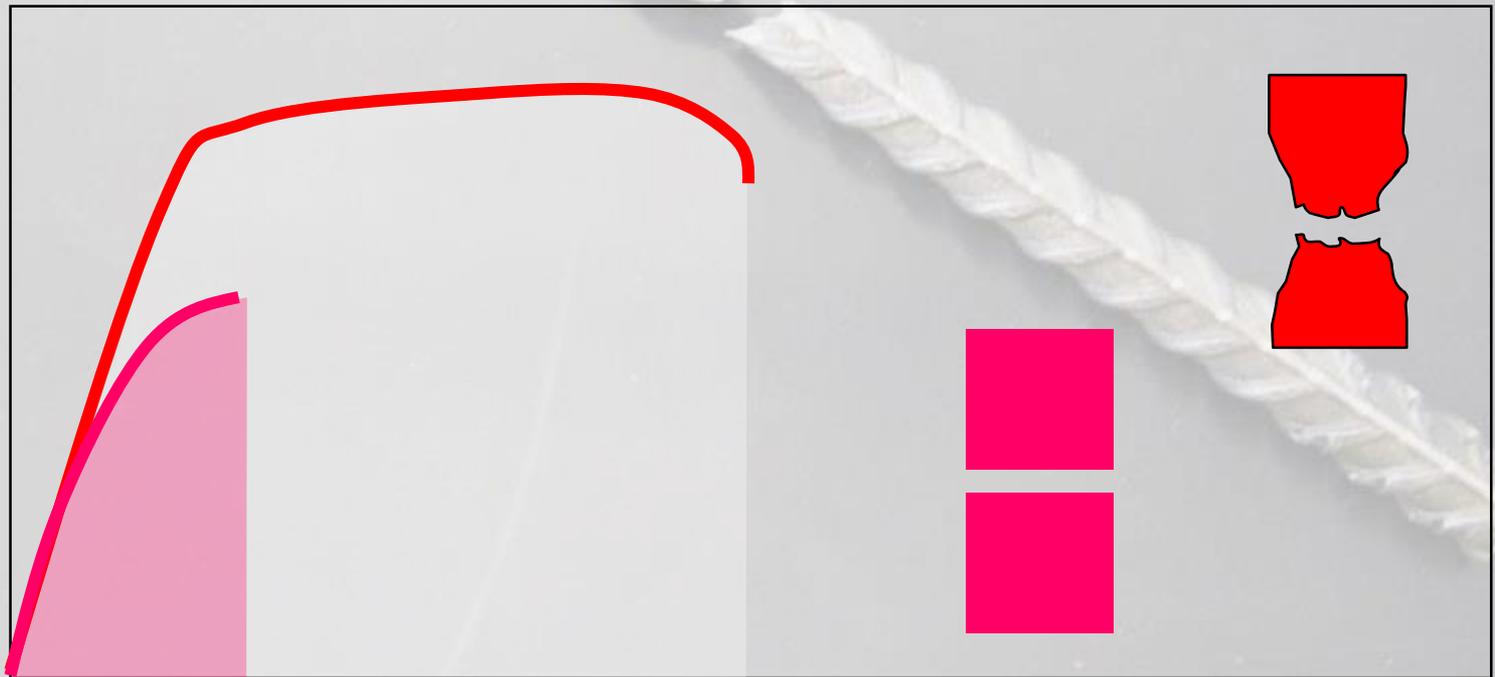
- Formação de superfície no material por aumento de tensão, esforço cíclico (fadiga), impacto, fluência, ruptura por carga mantida.
- Comportamento claro em materiais frágeis.
- Materiais muito dúcteis não apresentam superfície de fratura bem definida.



# Fratura simples

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

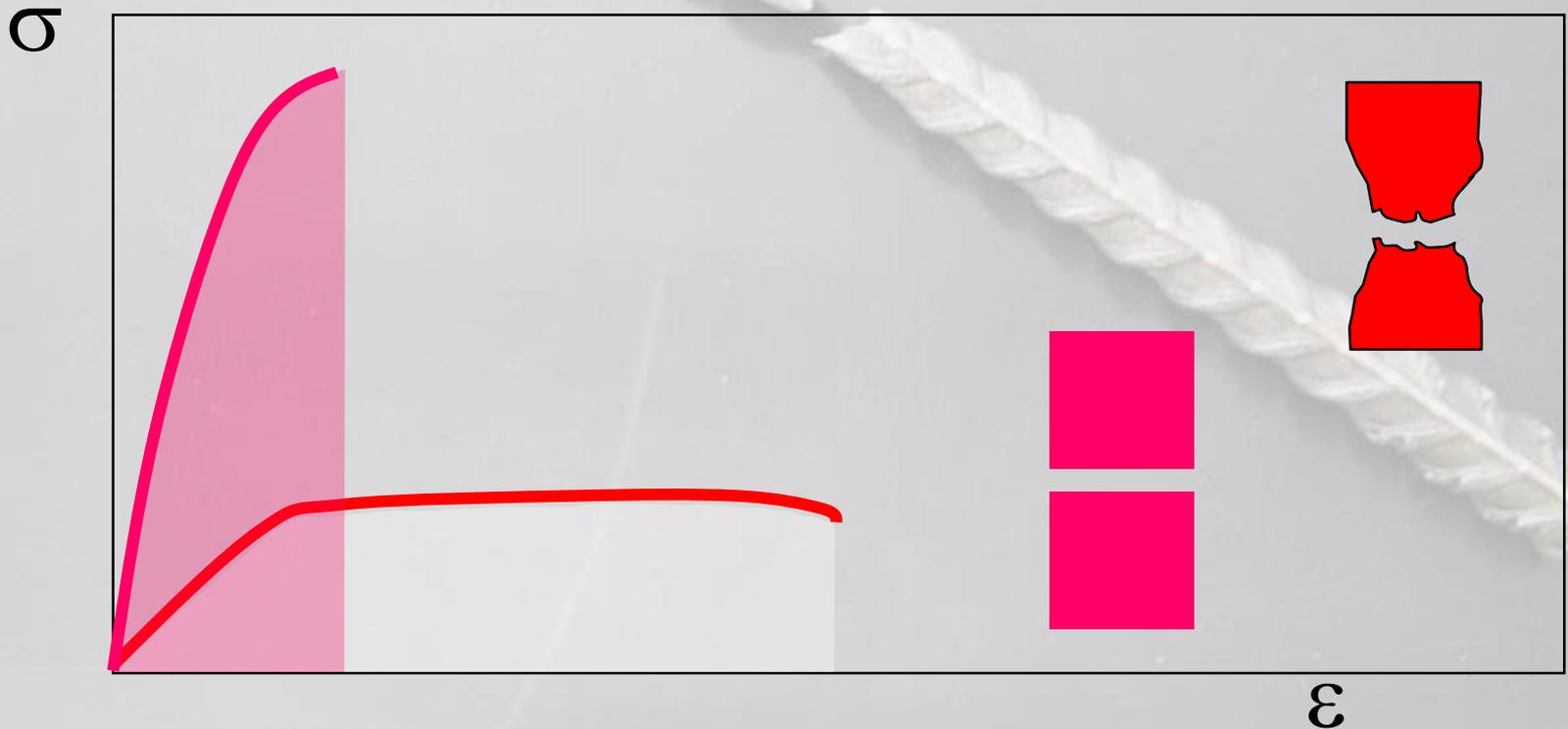
$\sigma$



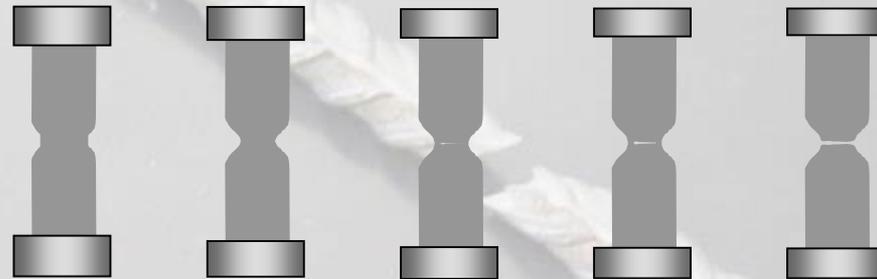
$\epsilon$

# Fratura simples

- Fragilidade não é baixa resistência.

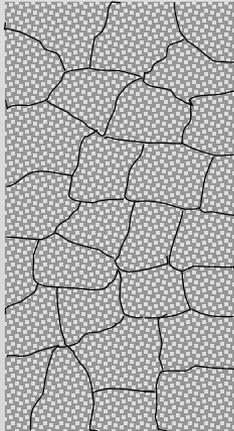


# Formação de superfície de fratura em materiais dúcteis

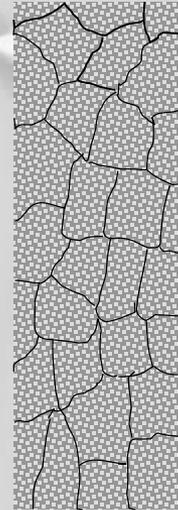
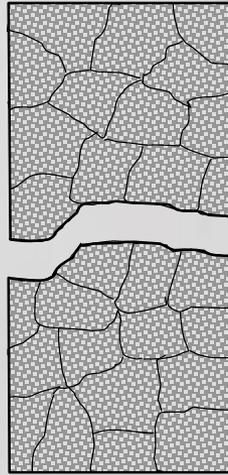


- Formação da estrição
- Intensificação do estrangulamento
- Indução de pequenas falhas
- Coalescência de pequenas falhas
- Formação da superfície de fratura

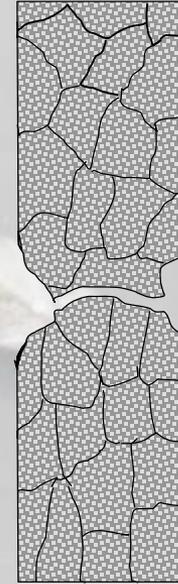
# Formação de superfície de fratura



Intergranular  
(frágil)

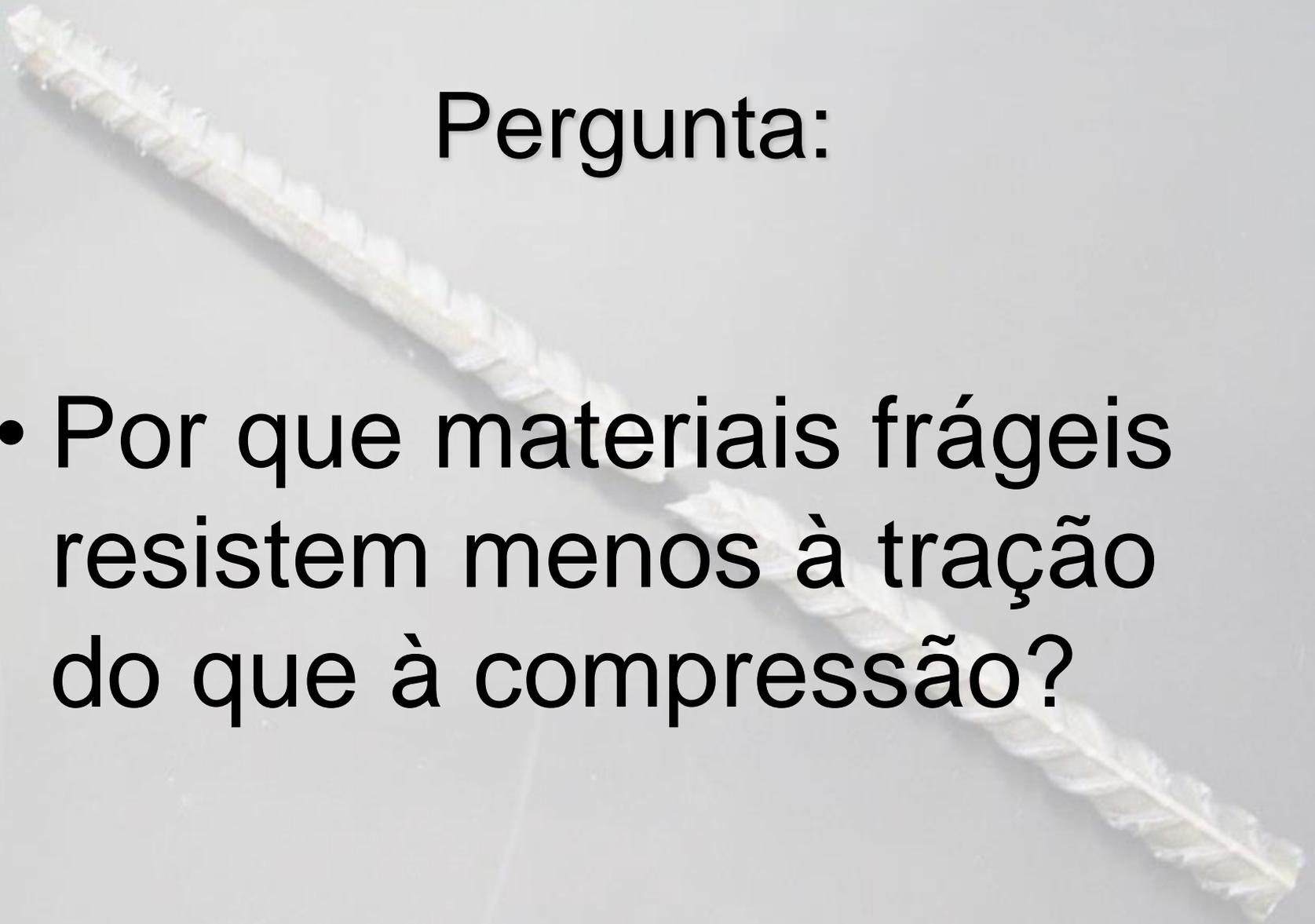


Transgranular  
(dúctil)



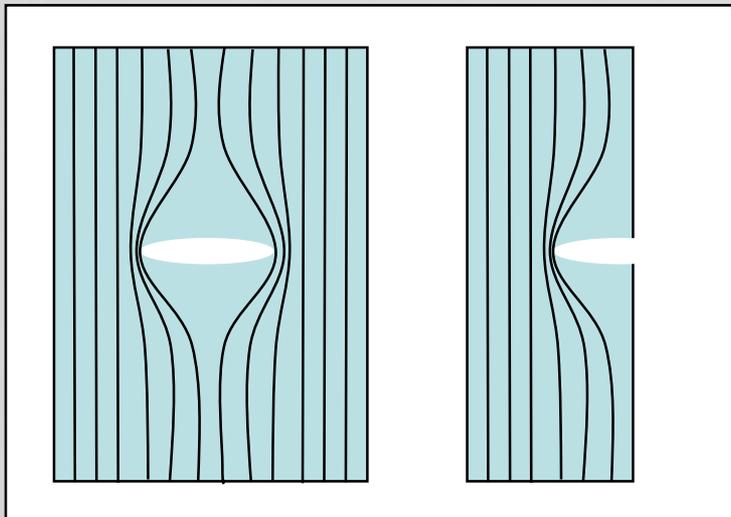
## Pergunta:

- 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,

$\sigma_m$  = tensão na extremidade da fissura

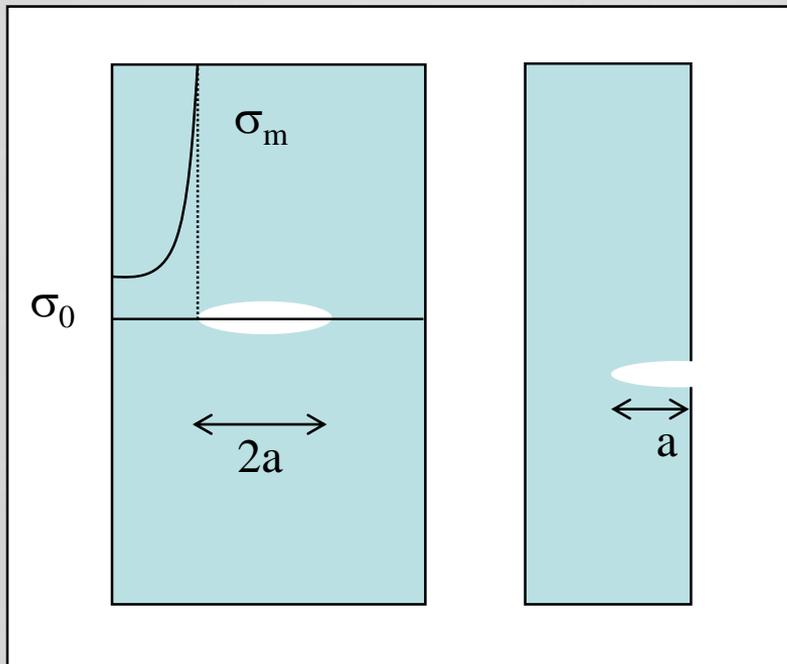
$\sigma_0$  = tensão de tração aplicada no material

$a$  =  $1/2$  comprimento da trinca interna ou comprimento da trinca superficial

$\rho_e$  = 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,

$\sigma_m$  = tensão na extremidade da fissura

$\sigma_0$  = tensão de tração aplicada no material

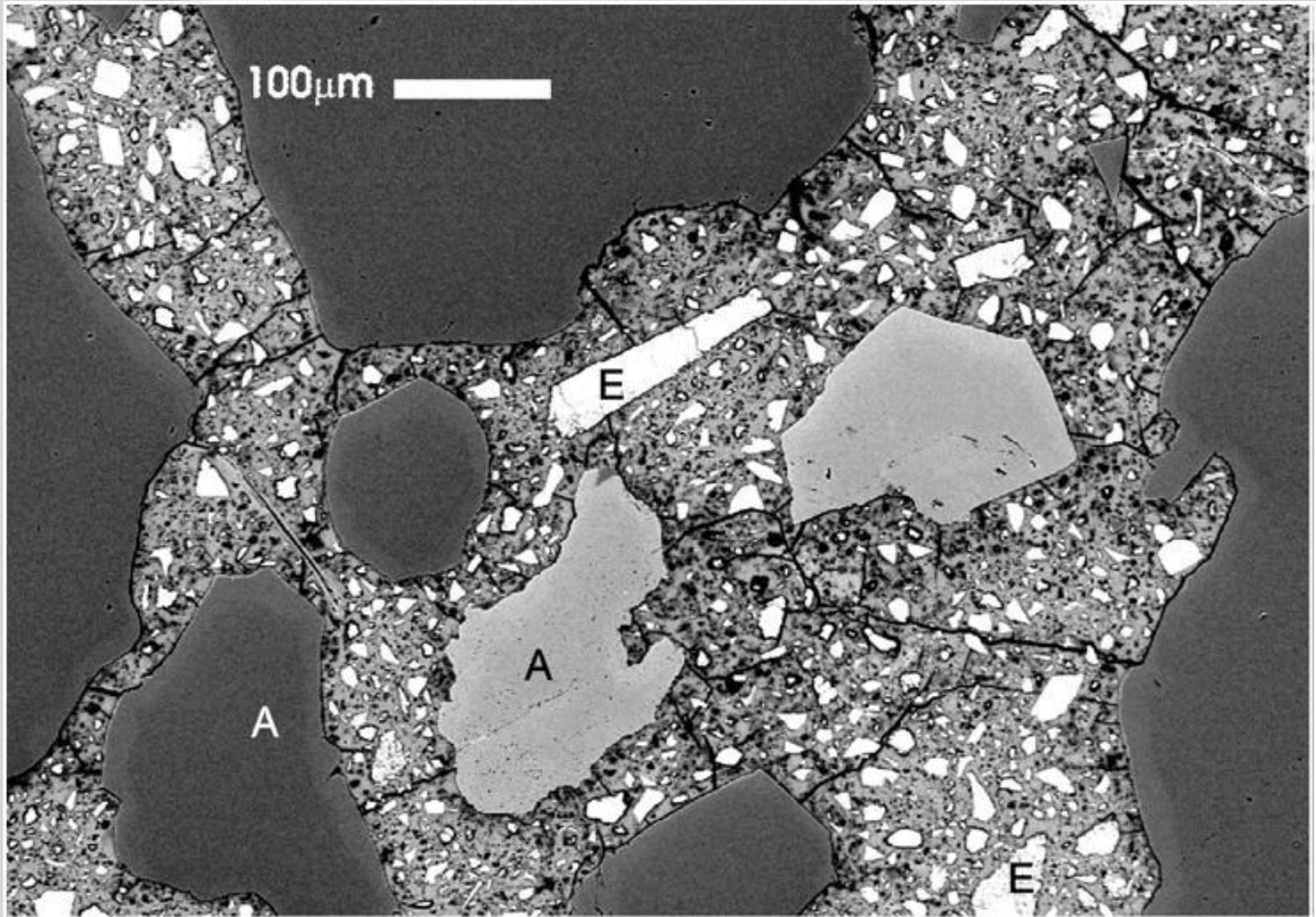
$a$  =  $1/2$  comprimento da trinca interna ou comprimento da trinca superficial

$\rho_e$  = 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?

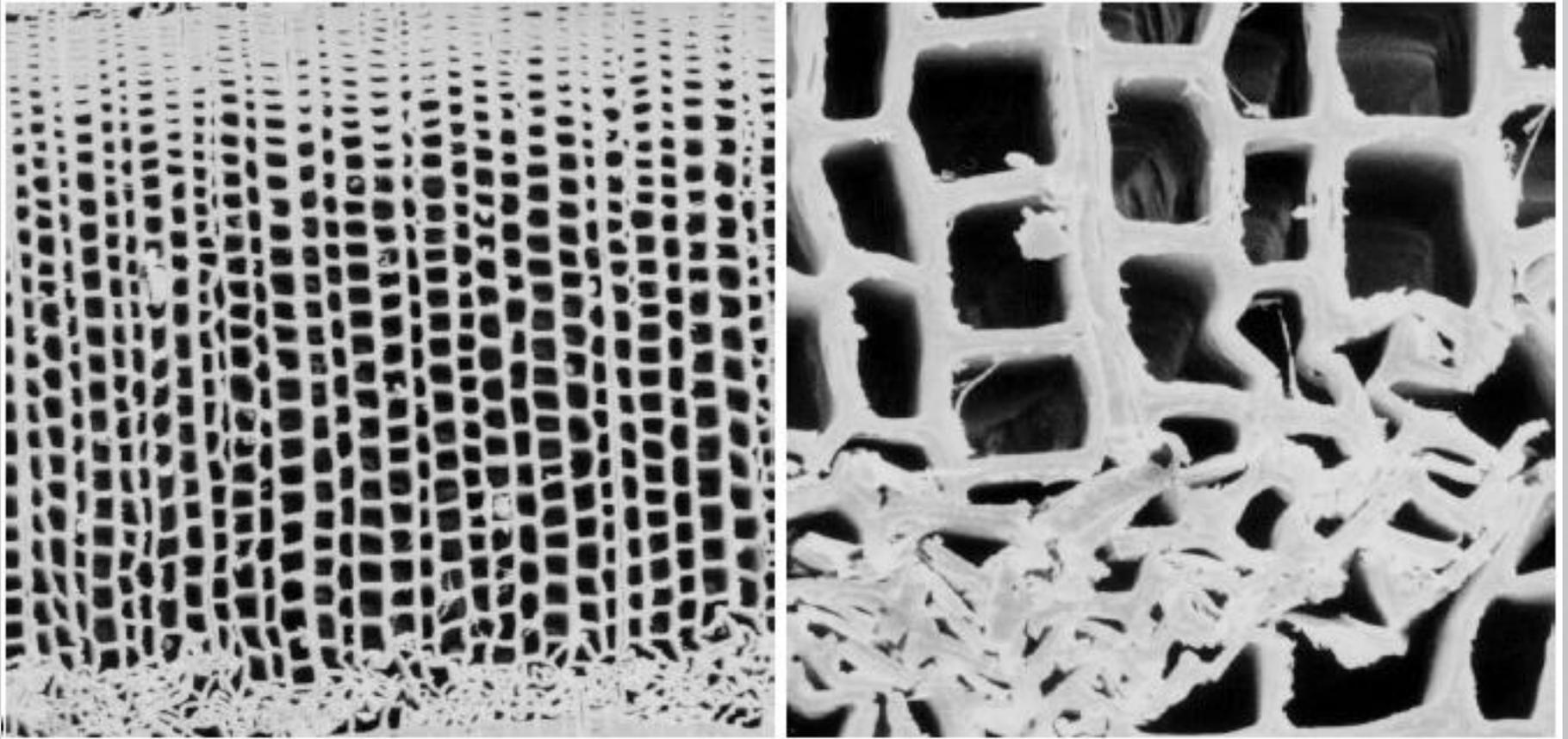


# Condições especiais de ruptura

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

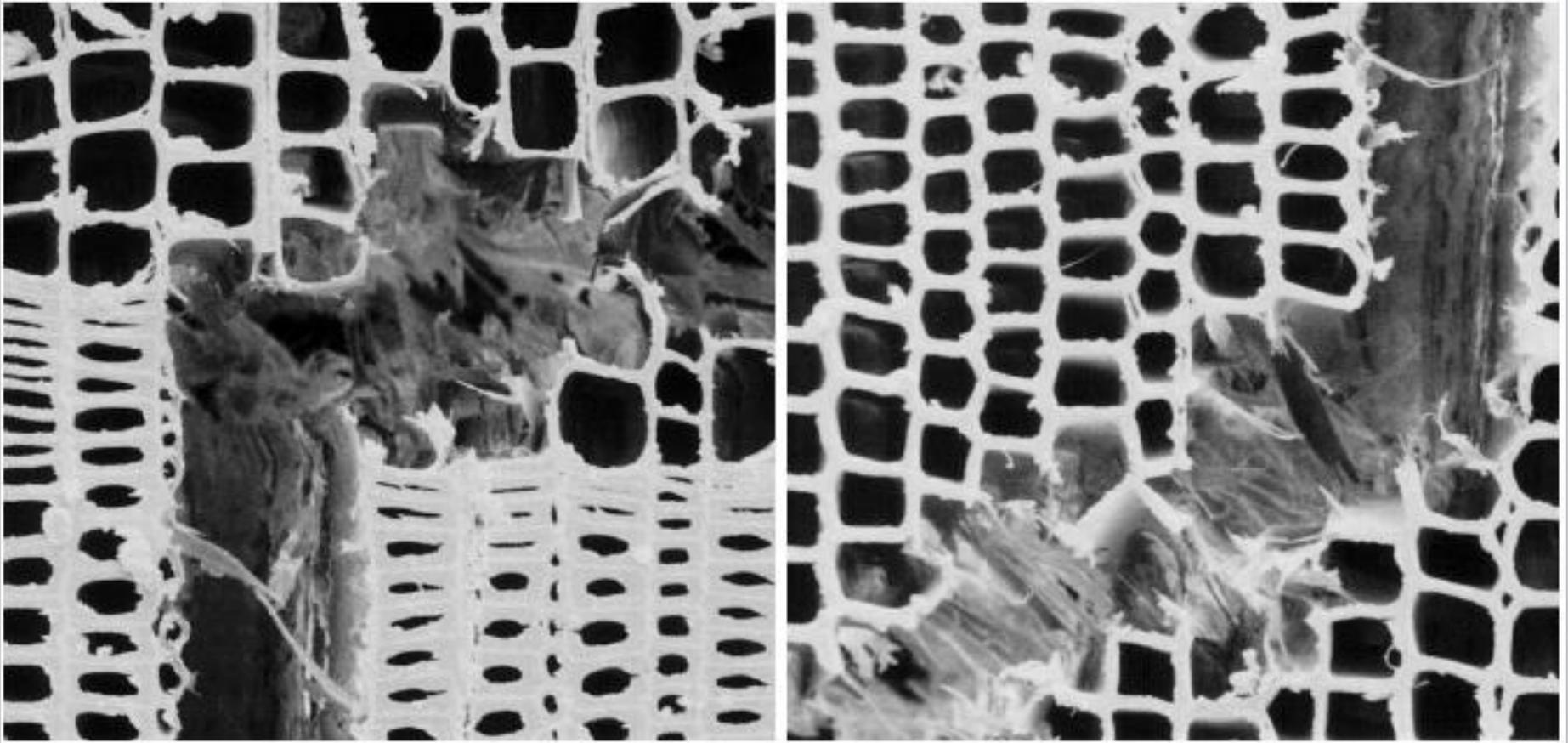


# Ruptura por compressão radial



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?



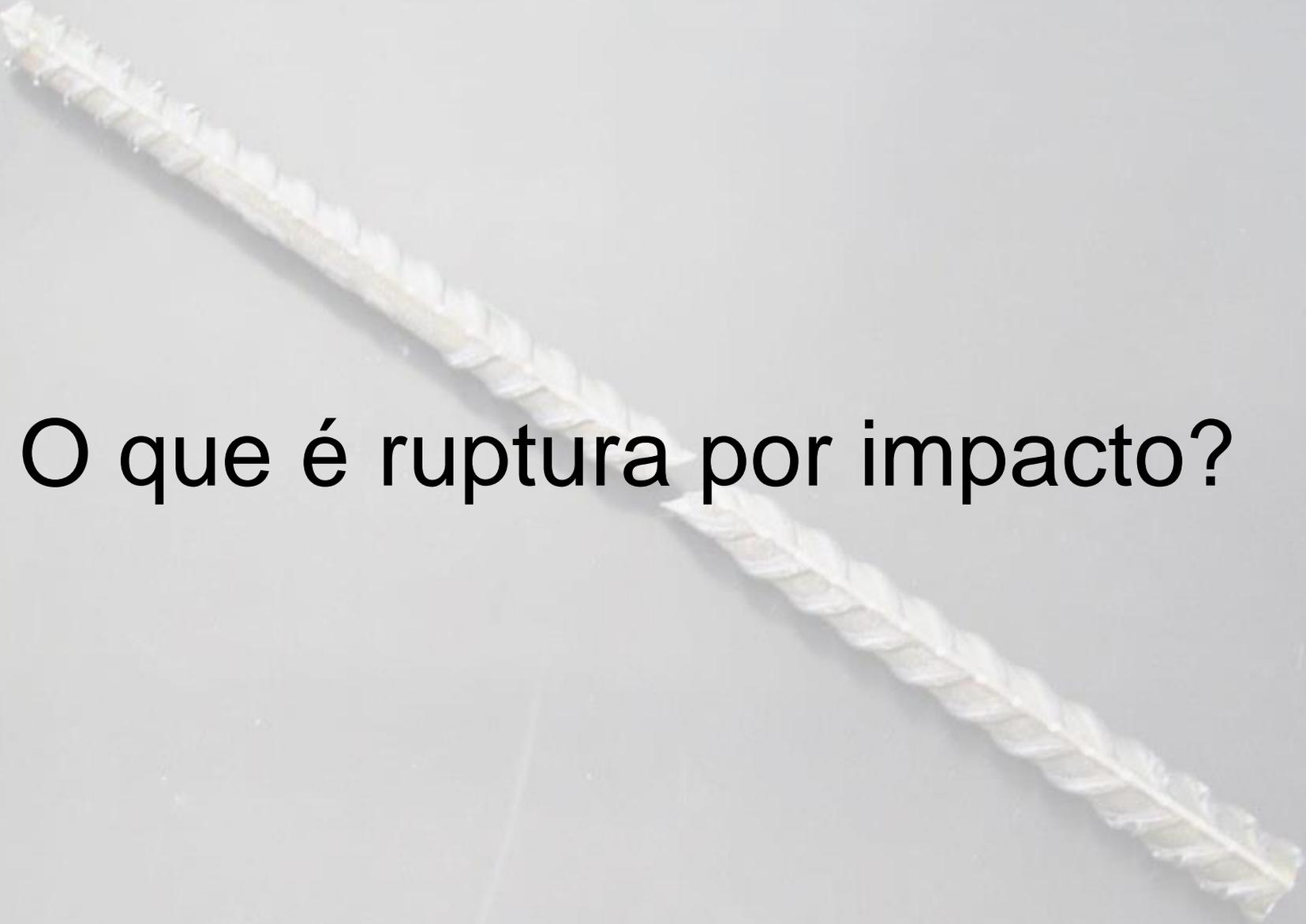
# Ruptura de escoras em minas:



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

Como é a fratura da madeira na flexão?

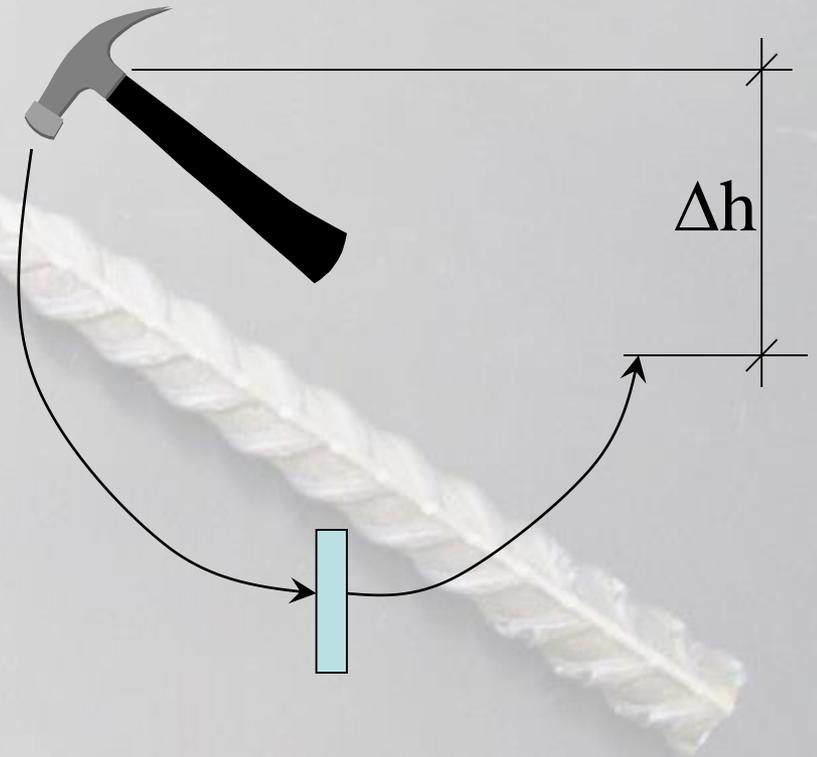




O que é ruptura por impacto?

# 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.

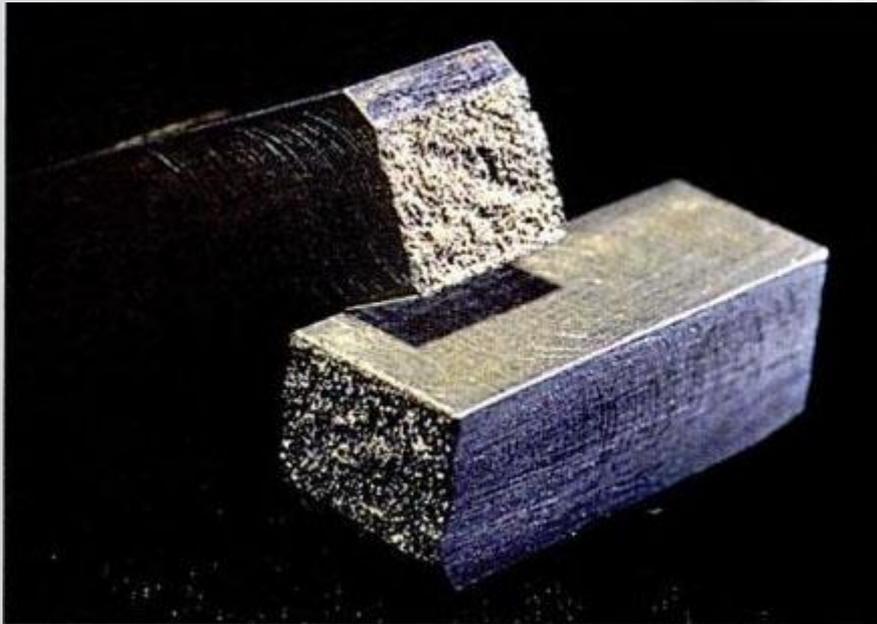
# Impacto



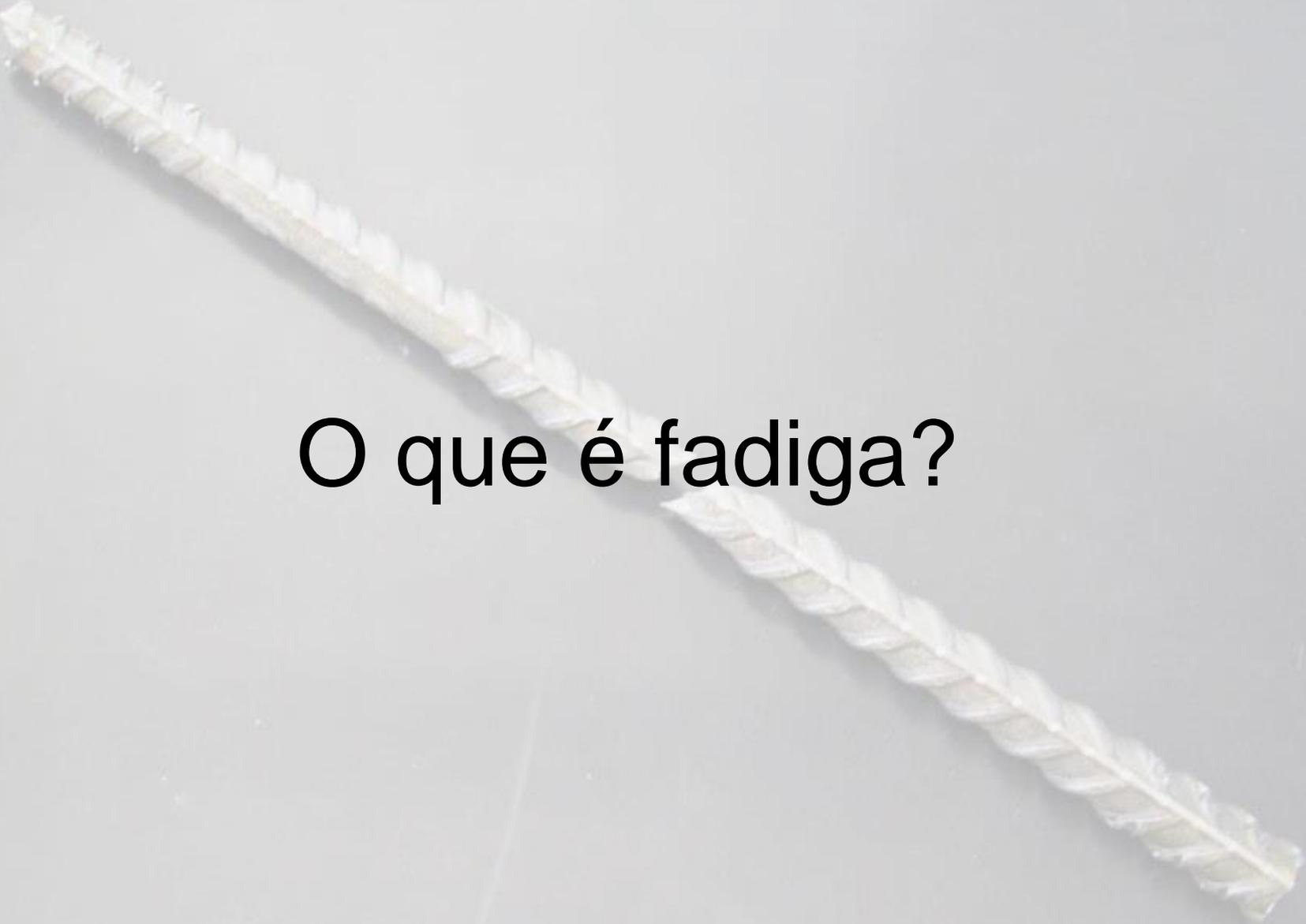
© Woods Hole Oceanographic Institution, 1986

# Impacto

Corpos de prova ensaiados no pêndulo de Charpy:



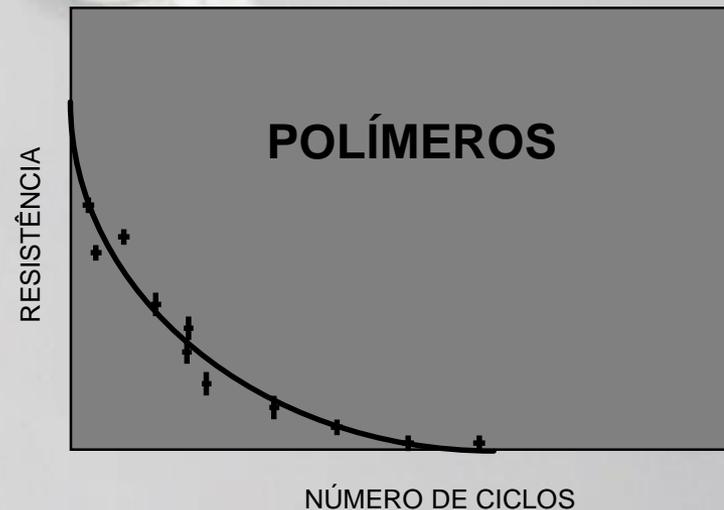
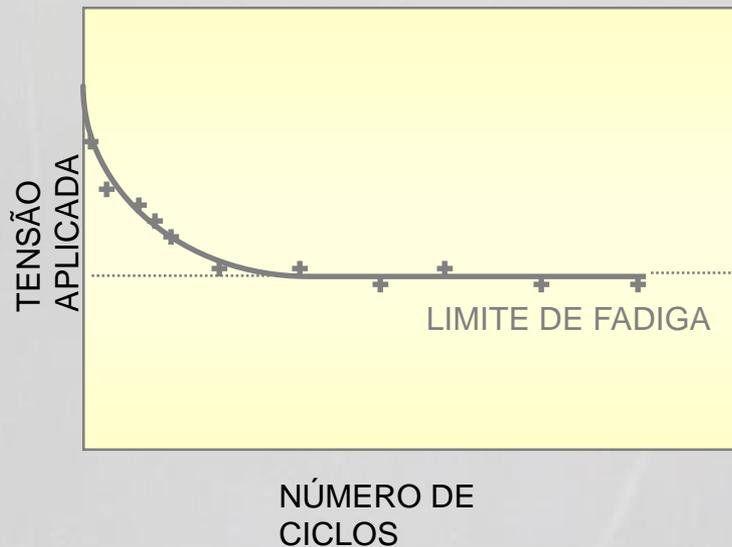
<https://bsclarified.files.wordpress.com/2012/04/titanic-fractured-hull.jpg>



O que é fadiga?

# Fadiga

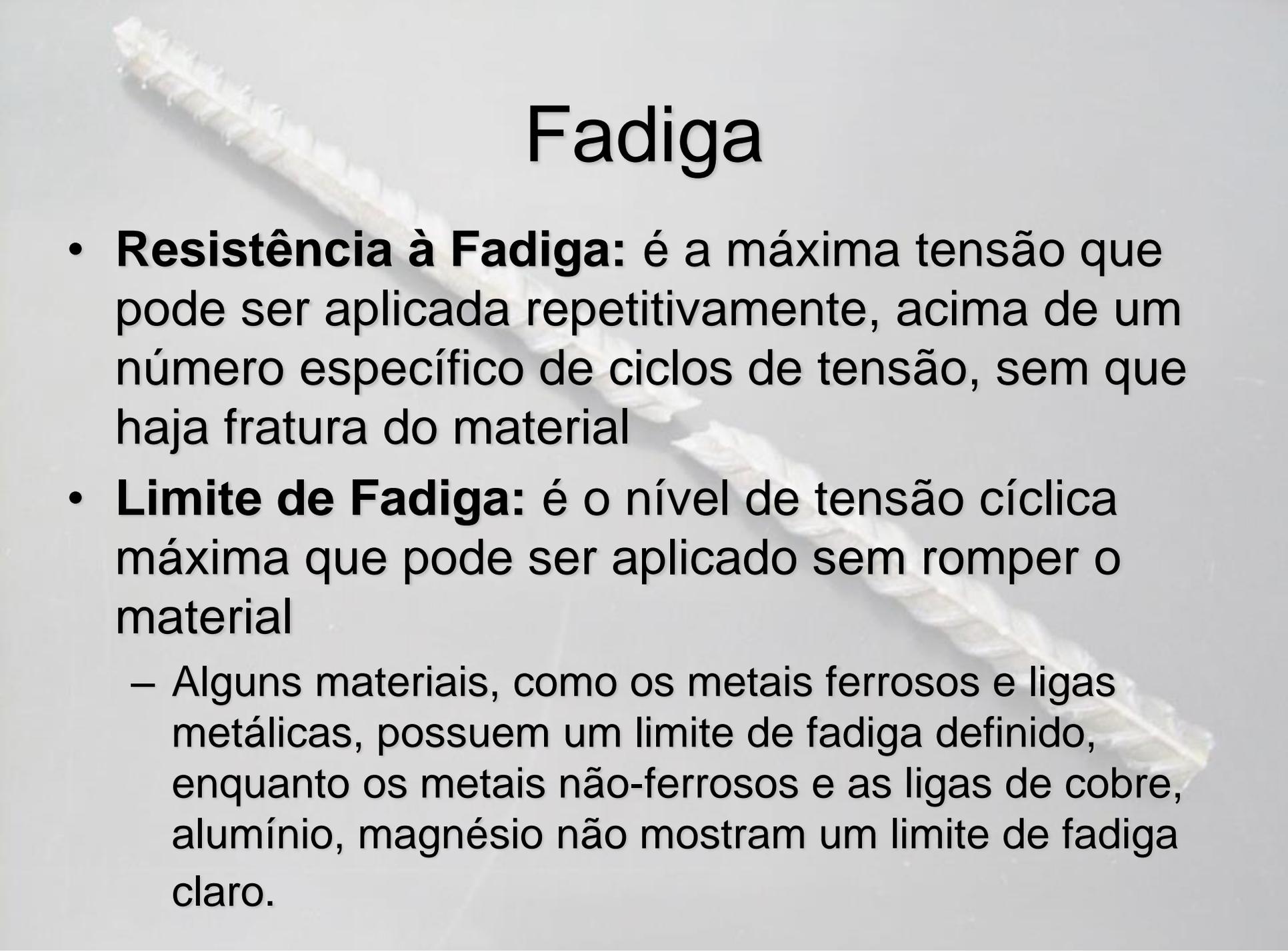
- esforço cíclico → rompe em tensão <  $R_{mec}$
- função do **nível de tensão**



# 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

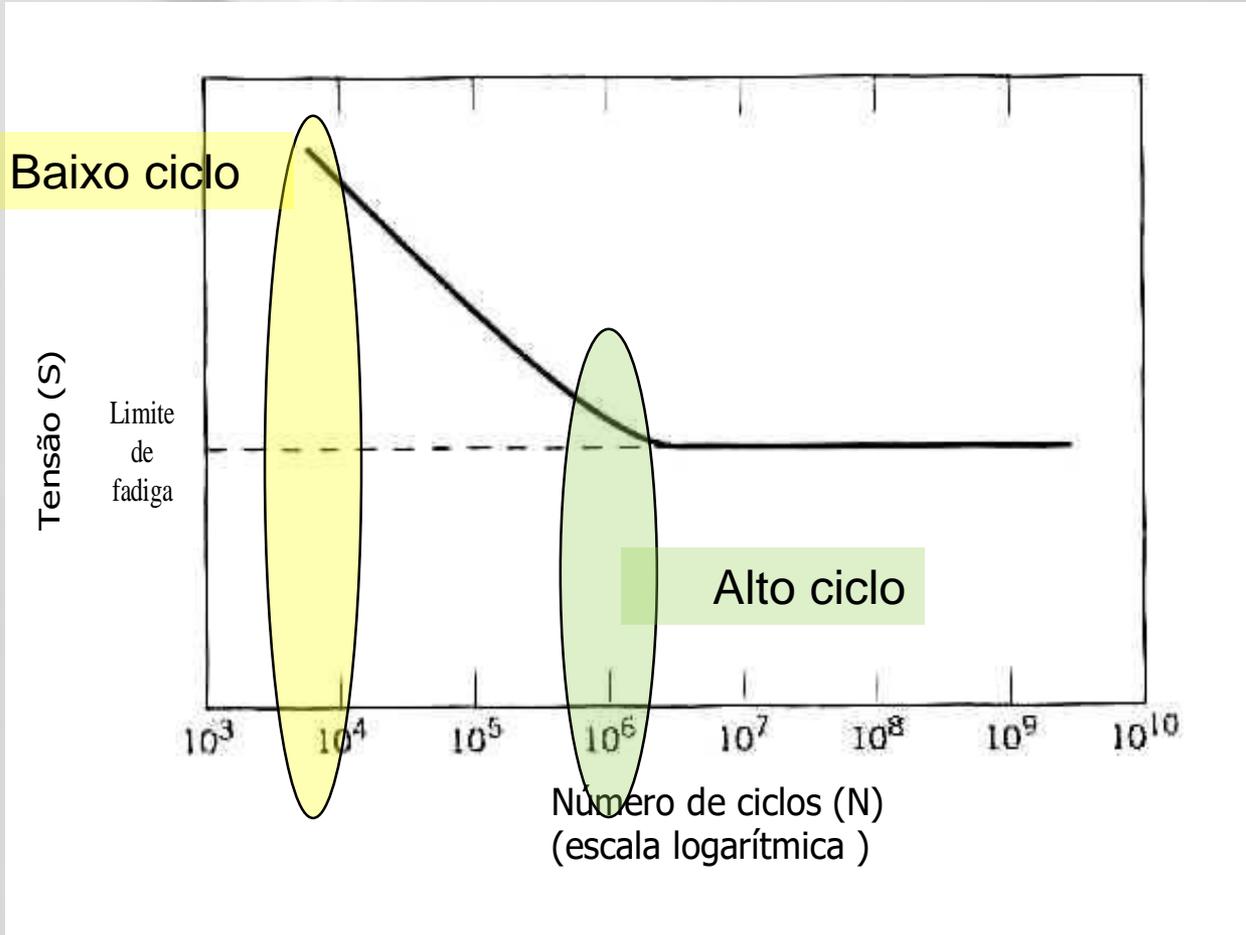


- **Resistência à Fadiga:** é a máxima tensão que pode ser aplicada repetitivamente, acima de um número específico de ciclos de tensão, sem que haja fratura do material
- **Limite de Fadiga:** é o nível de tensão cíclica máxima que pode ser aplicado sem romper o material
  - Alguns materiais, como os 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

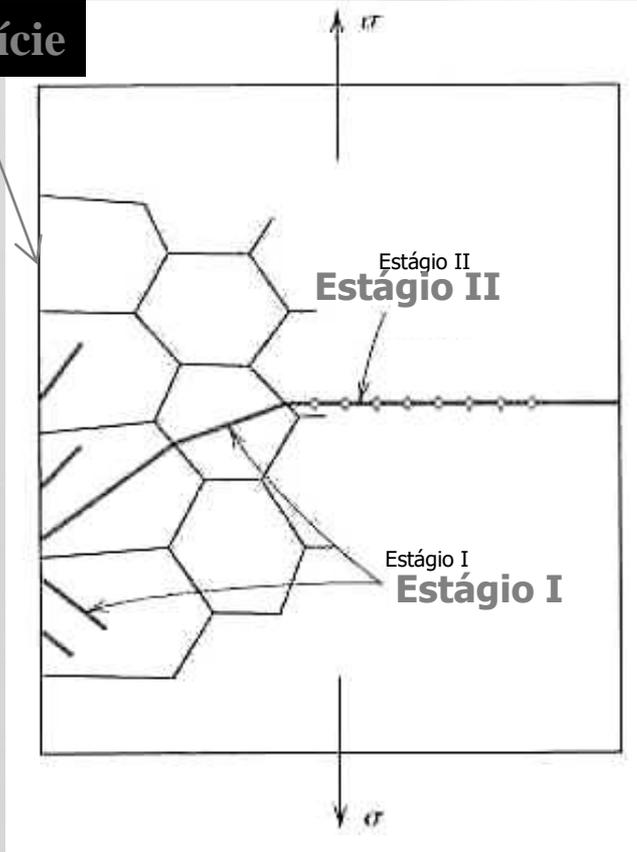
- **Altos ciclos**: *carregamentos de baixo nível de tensão em à resistência estática e alto número de ciclos*, por consequência: ruptura por fadiga com ciclos de *carregamento* totalmente *incluídos no trecho elástico*
- **Baixos ciclos**: ciclos de *carregamento* de nível relativamente *alto de tensão (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

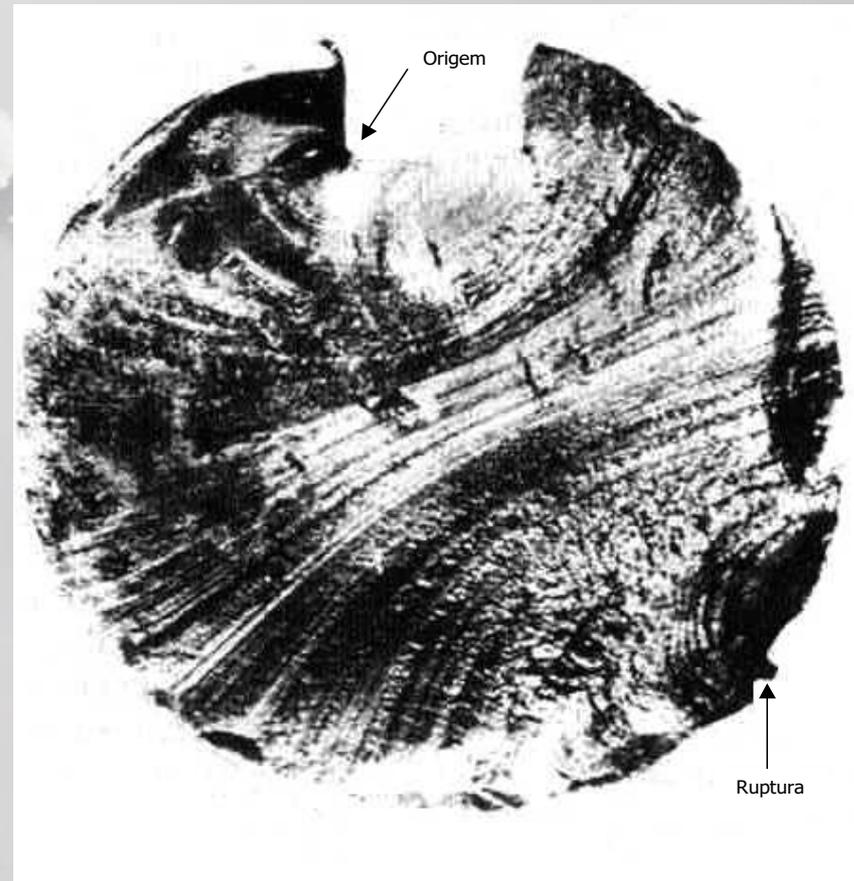
Superfície

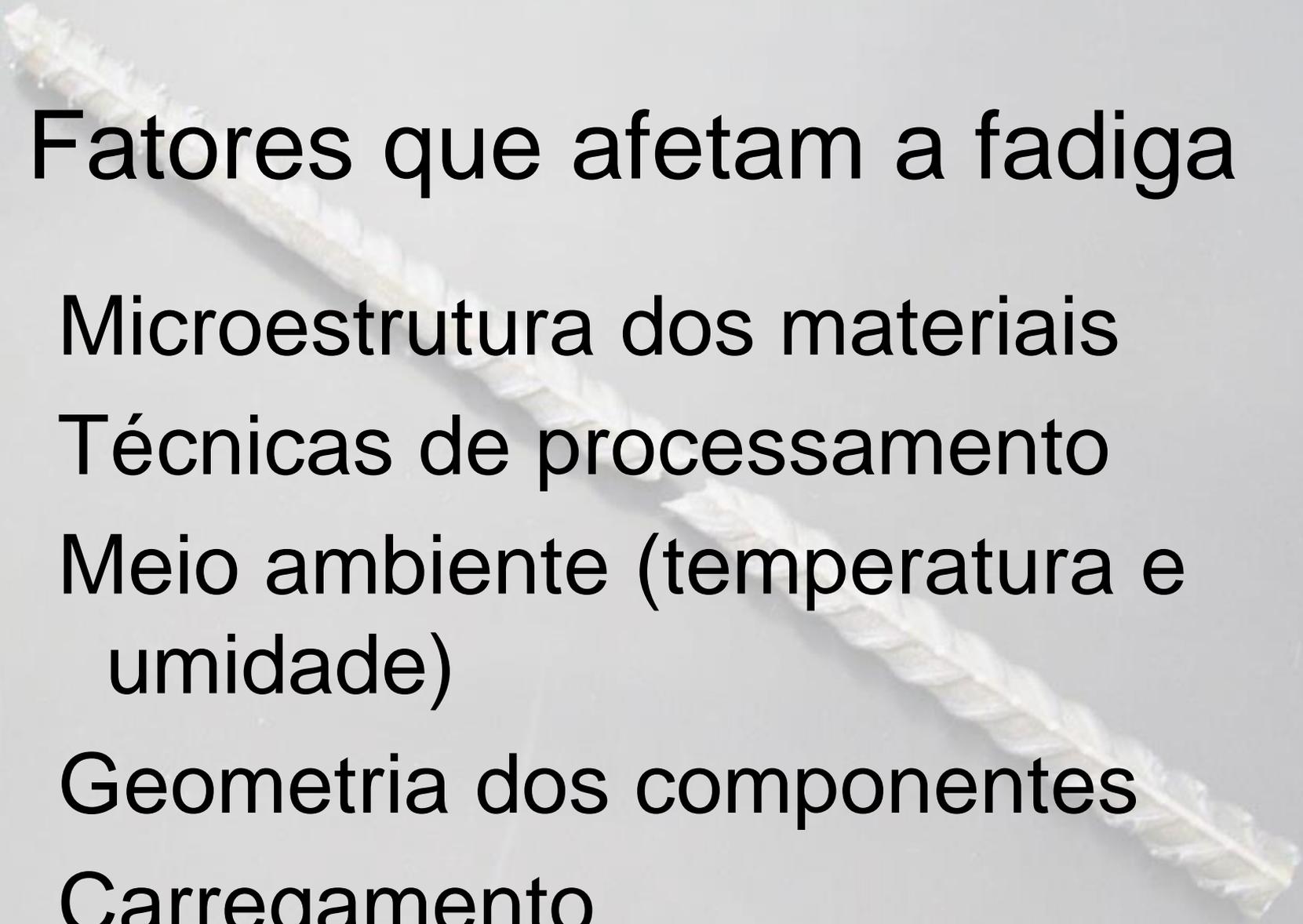


- Propagação de fissuras macroscópicas (efeito de entalhe das fissuras concentra ainda mais tensões)
- Ruptura frágil do material
- Estágio I – nucleação
- Estágio II – propagação

# Ruptura por fadiga (macroscópico)

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





# 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:

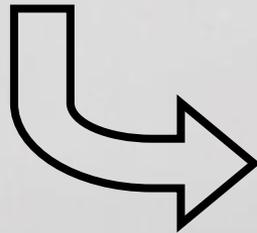


# Fatores que afetam a fadiga

## Efeito do meio ambiente



**Temperatura**



**Resistência à fadiga**

**Como a umidade afeta o comportamento à fadiga?**

# Fatores que afetam a fadiga

## Efeito da geometria

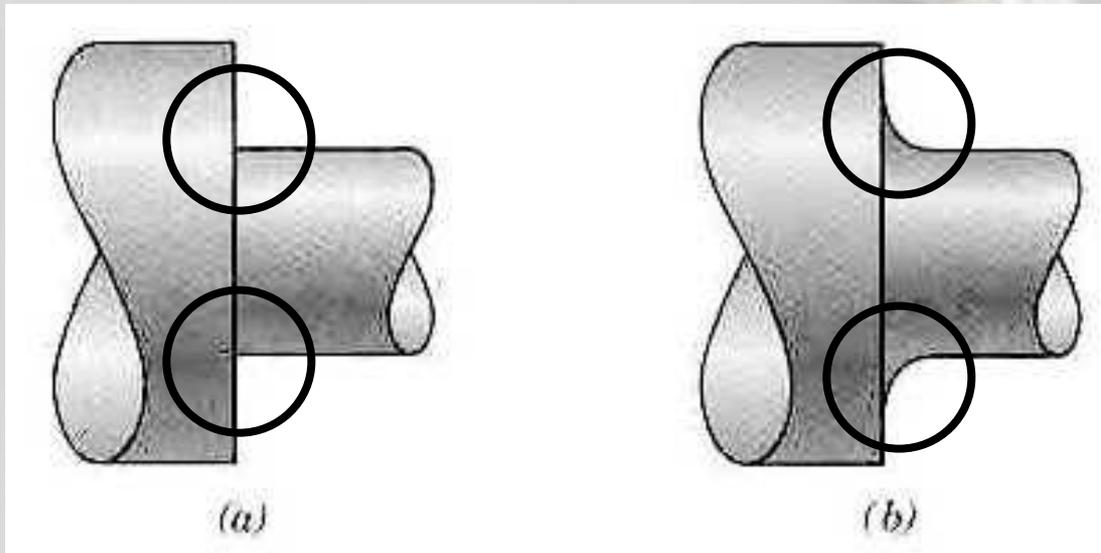
Roscas, entalhes, furos, arranhões, riscos, juntas

Concentrações de Tensões

Fissuração

Redução de irregularidades

superficiais → aumenta a resistência à fadiga



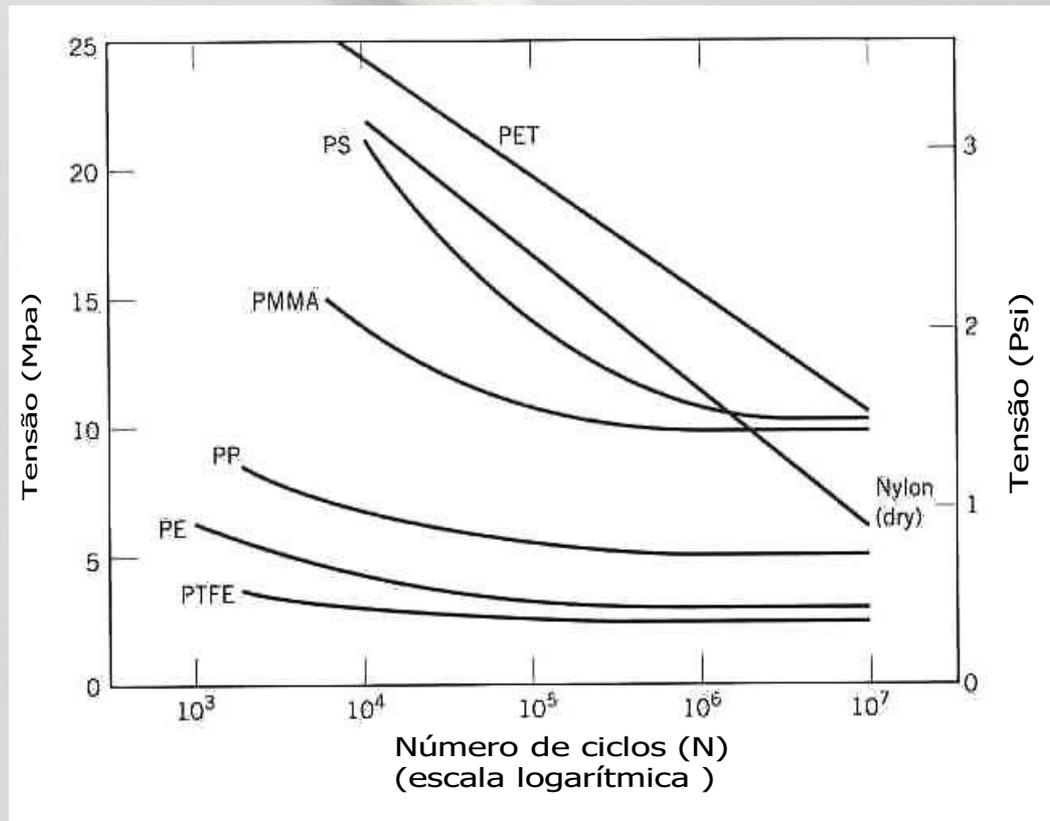
# Fatores que afetam a fadiga

- Geometria



# 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:

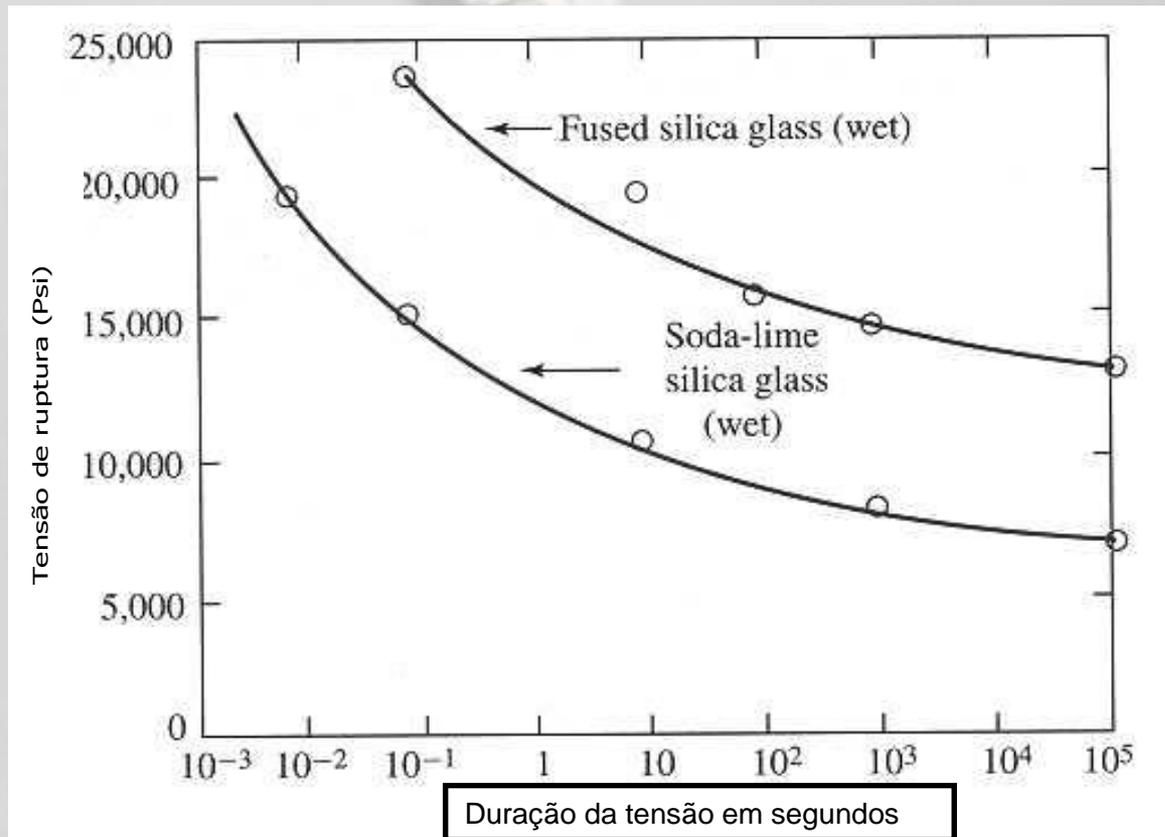
- Alguém sabe o que é fadiga estática?
- Alguém sabe o que é fratura retardada?
- Alguém sabe o que é propagação sub-crítica de fratura?

# “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

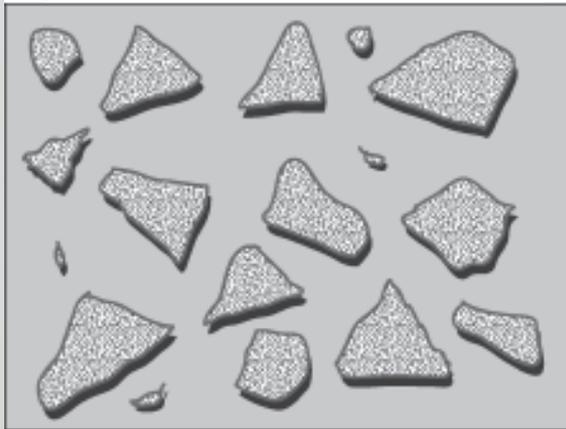
# Fratura retardada

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

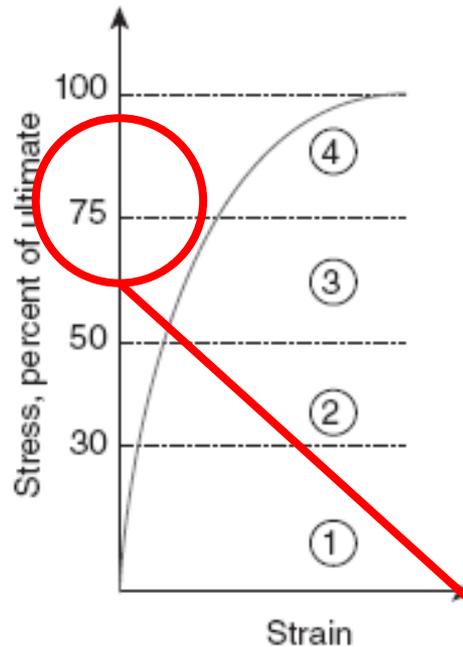
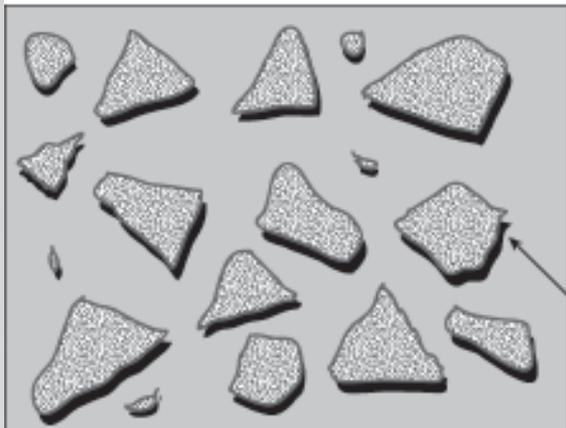


# Processo de propagação das fissuras (Mehta e Monteiro, 2008)

(2) 50% da tensão última



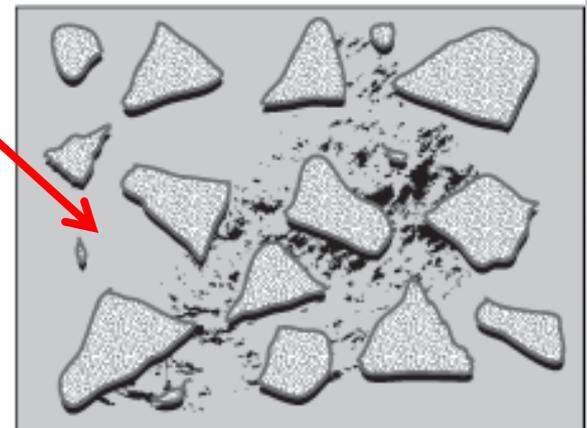
(1) 30% da tensão última



(1) tensão última

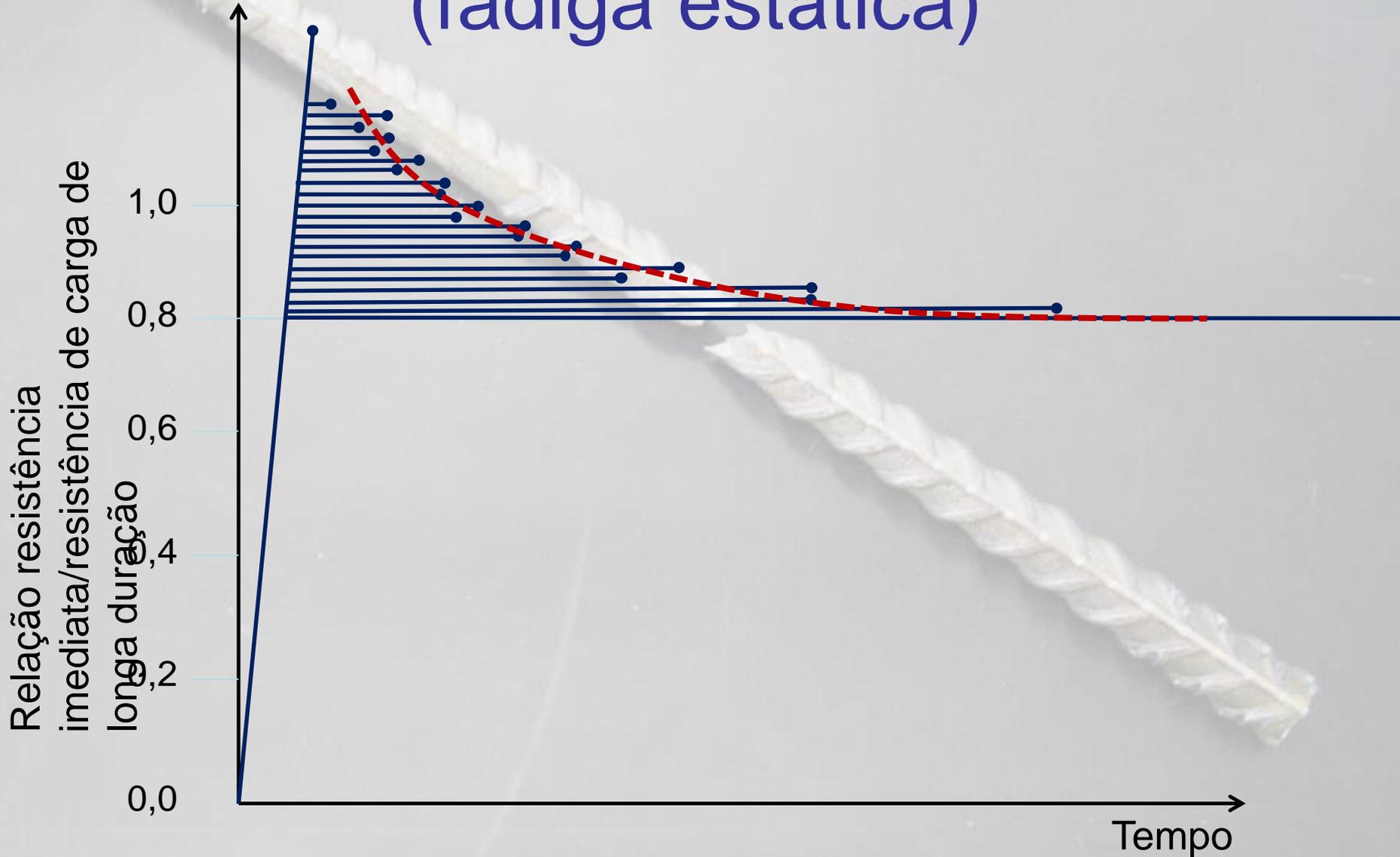


(3) 75% da tensão última



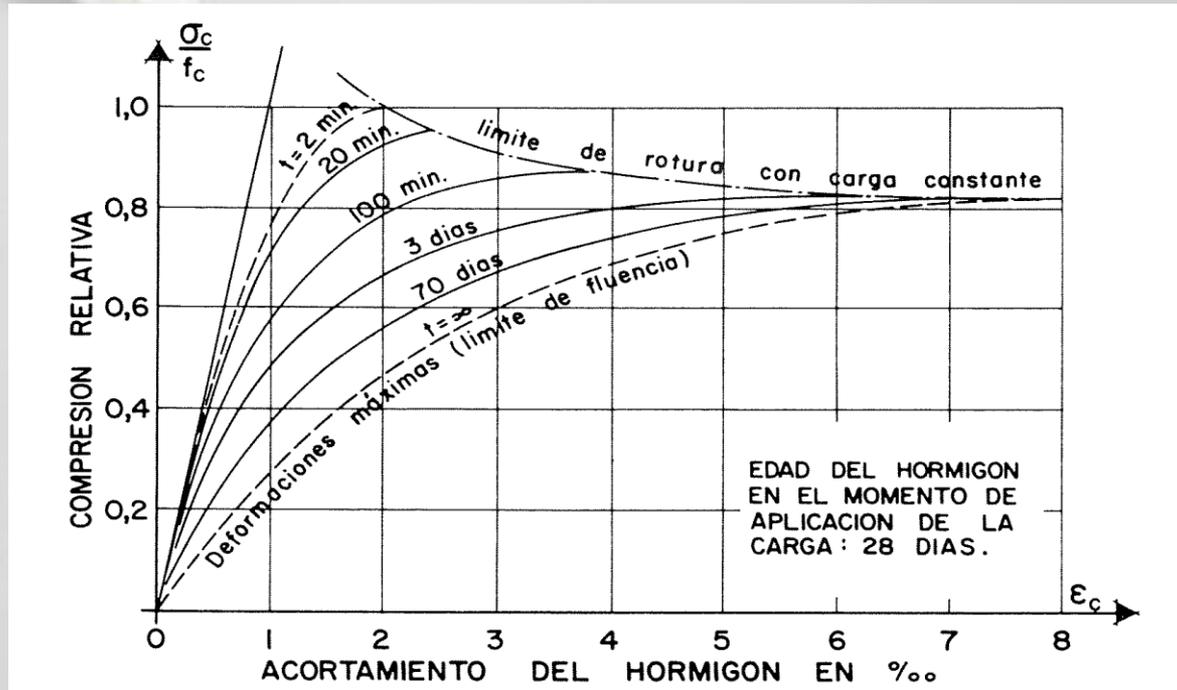
Microcracks in the interfacial transition zone

# Dinâmica do efeito Rüsçh (fadiga estática)



# Diagrama $\sigma$ - $\varepsilon$

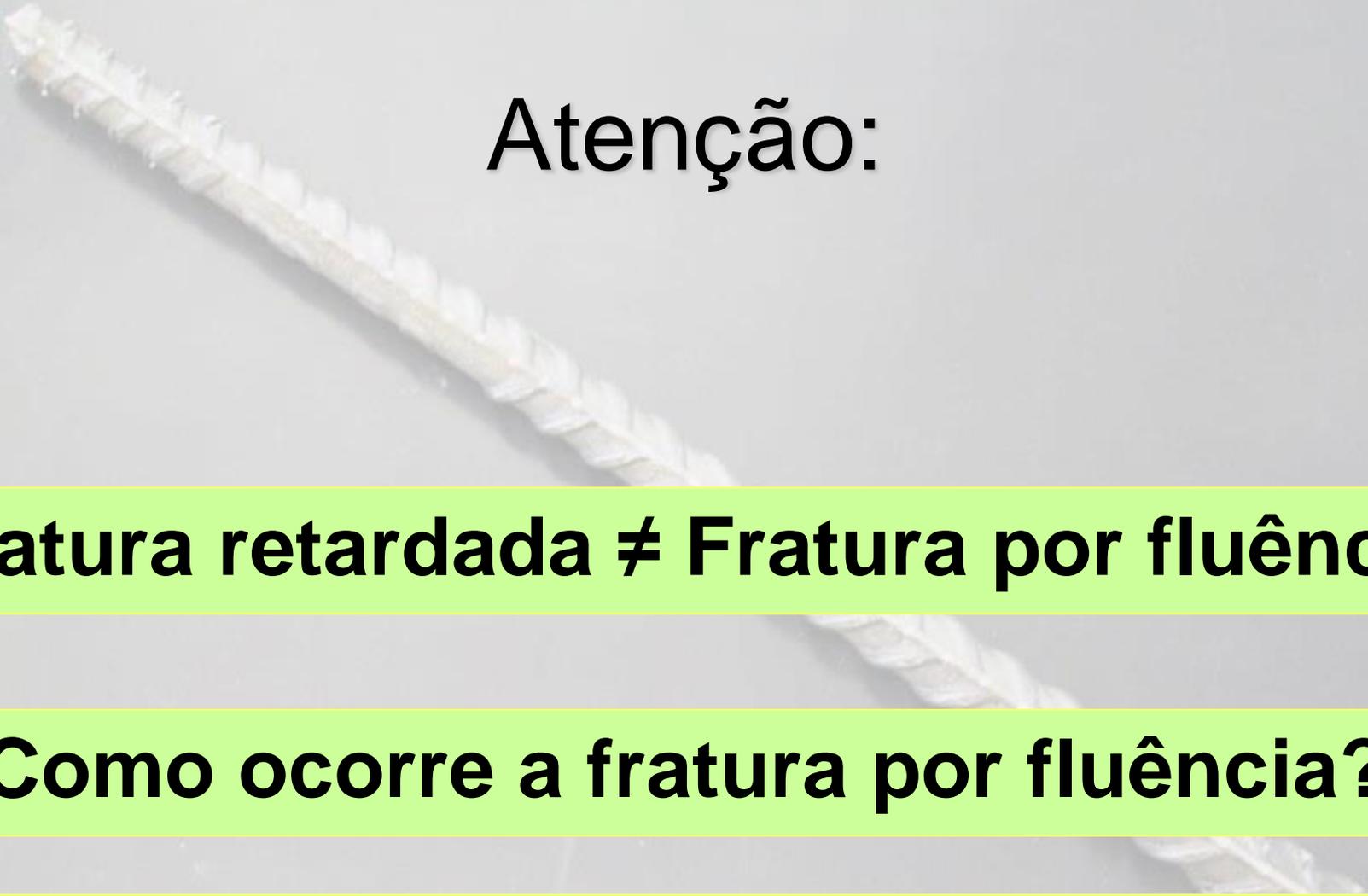
Para cargas duraderas



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

$\alpha_{ct}$ : 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?**