

PCC 5726

Fratura

Antonio Figueiredo & Renata Monte



Objetivos da aula

- Entender como ocorre o processo de fratura ou ruptura 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

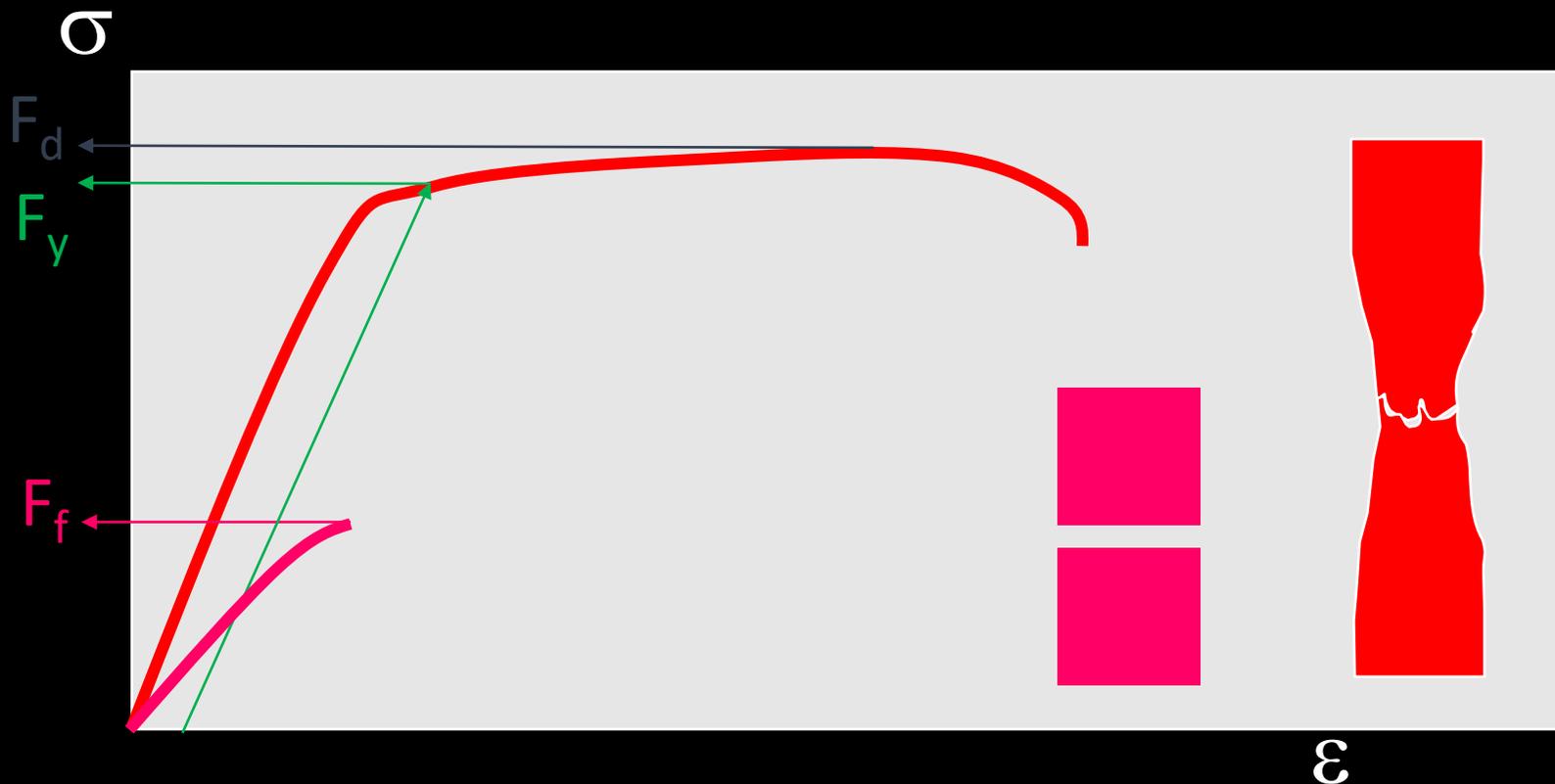
- Definição: é a tensão necessária para provocar o escoamento ou a ruptura do material.
- Comparar com definição Jastrzebski:
 - “Resistência é a habilidade de um material resistir a forças sem escoamento ou fratura”.
- Convenção de engenharia: resistência é o resultado em termos de tensão obtidos em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

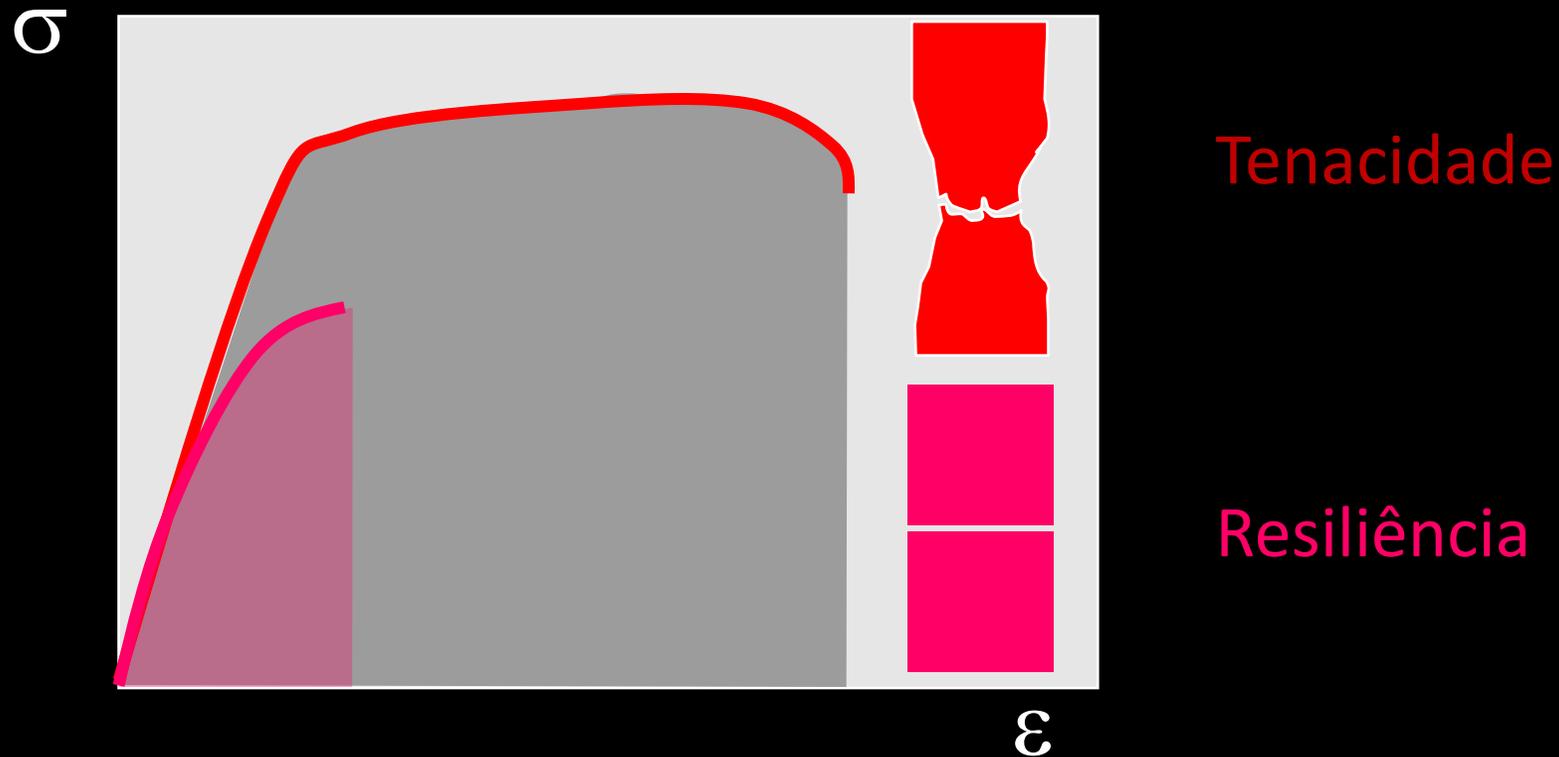
Resistências de materiais frágeis e dúcteis

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



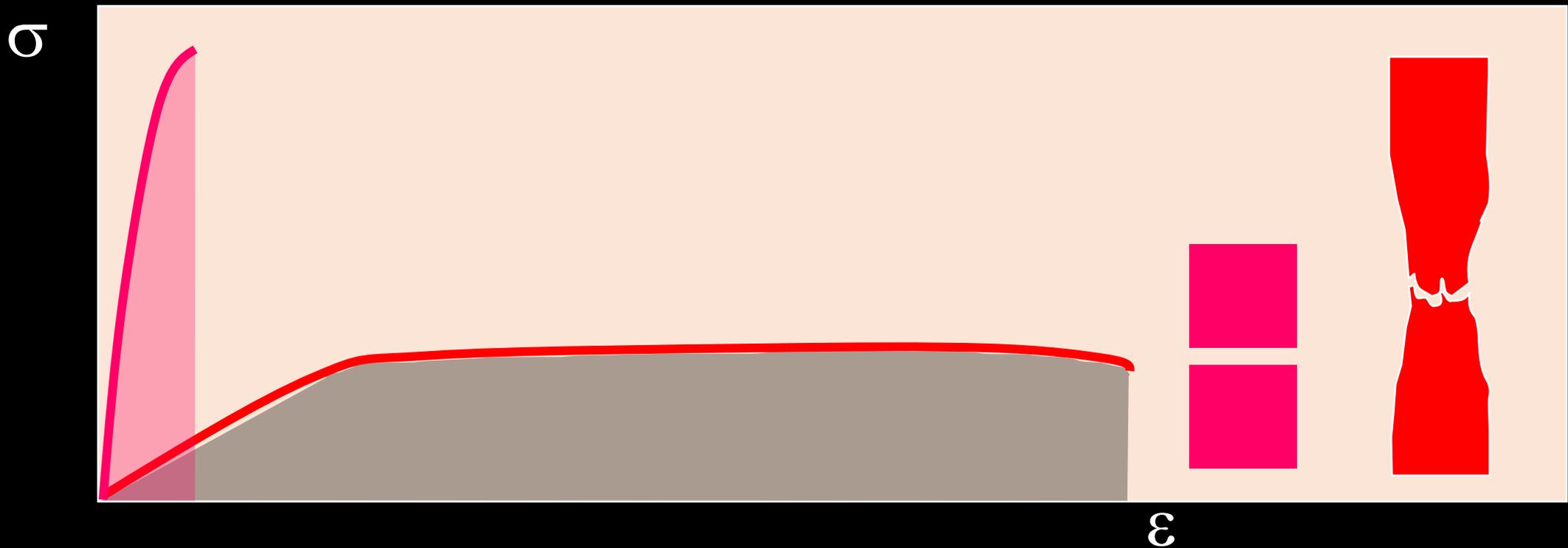
Fratura simples

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

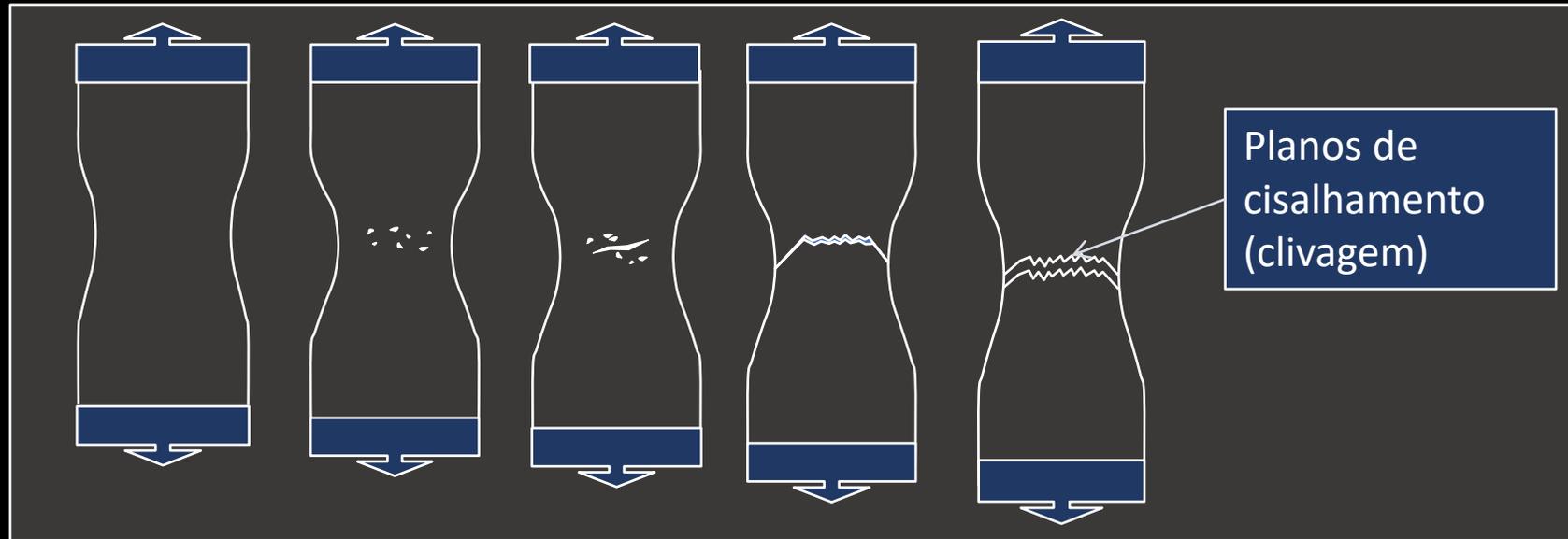


Fratura simples

- 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

Pergunta:

- Por que materiais frágeis, como o concreto, resistem menos à tração do que à compressão?

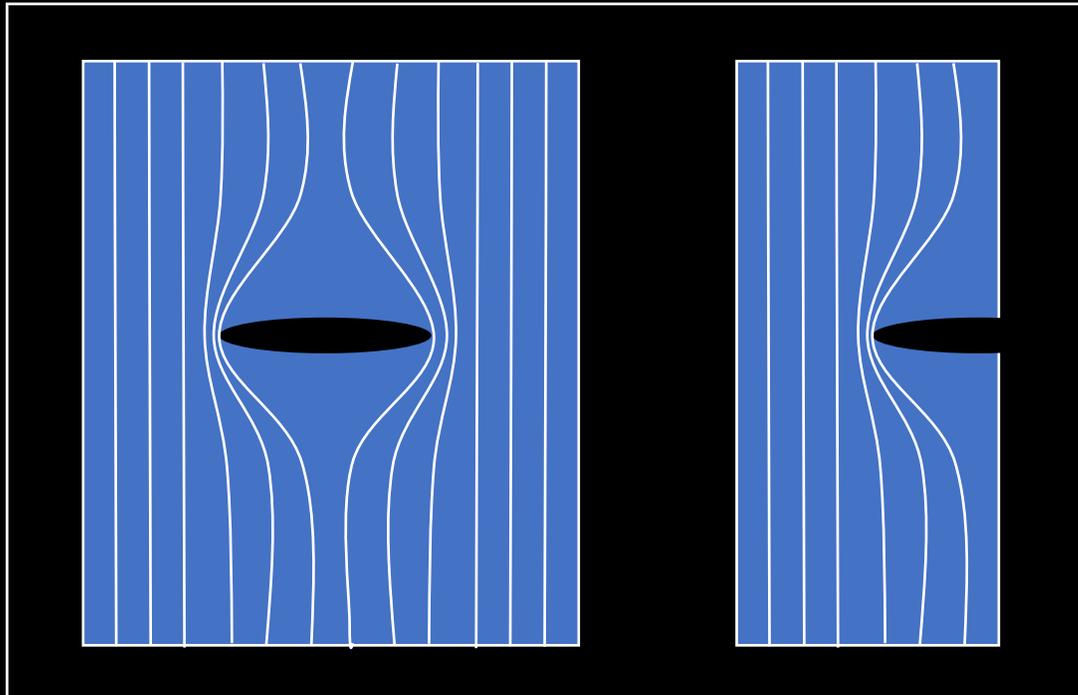


Pergunta:

- Se a argamassa não tem agregado graúdo então não tem zona de transição e ela deve ter resistência à tração igual ou próxima da 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

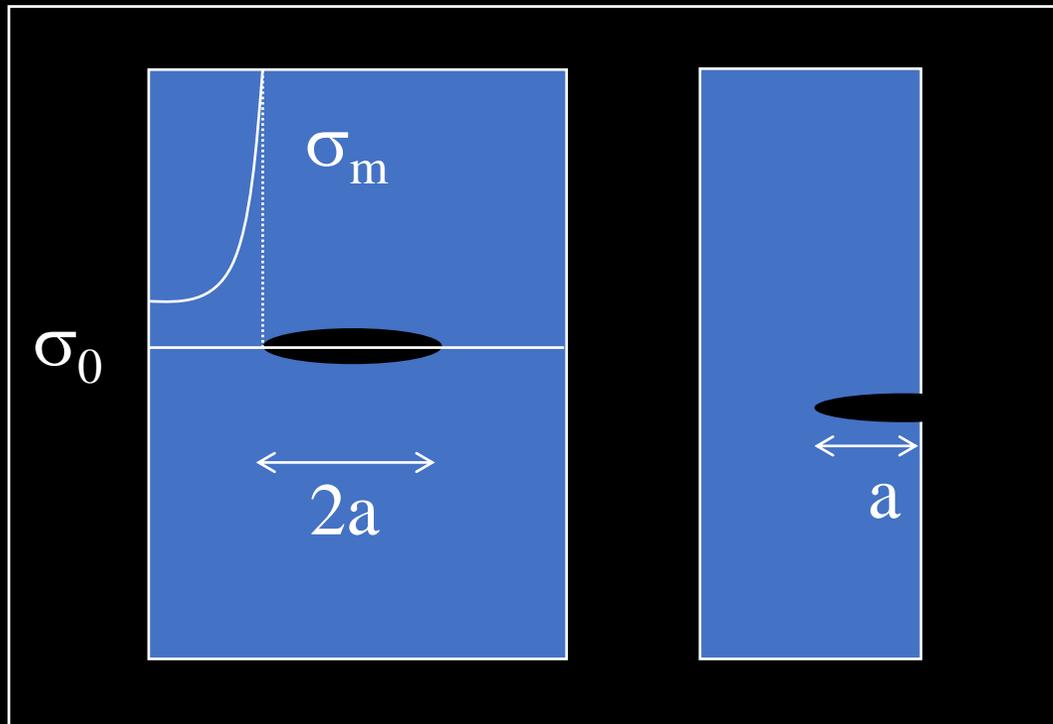
σ_0 = tensão de tração aplicada no material

a = $1/2$ 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

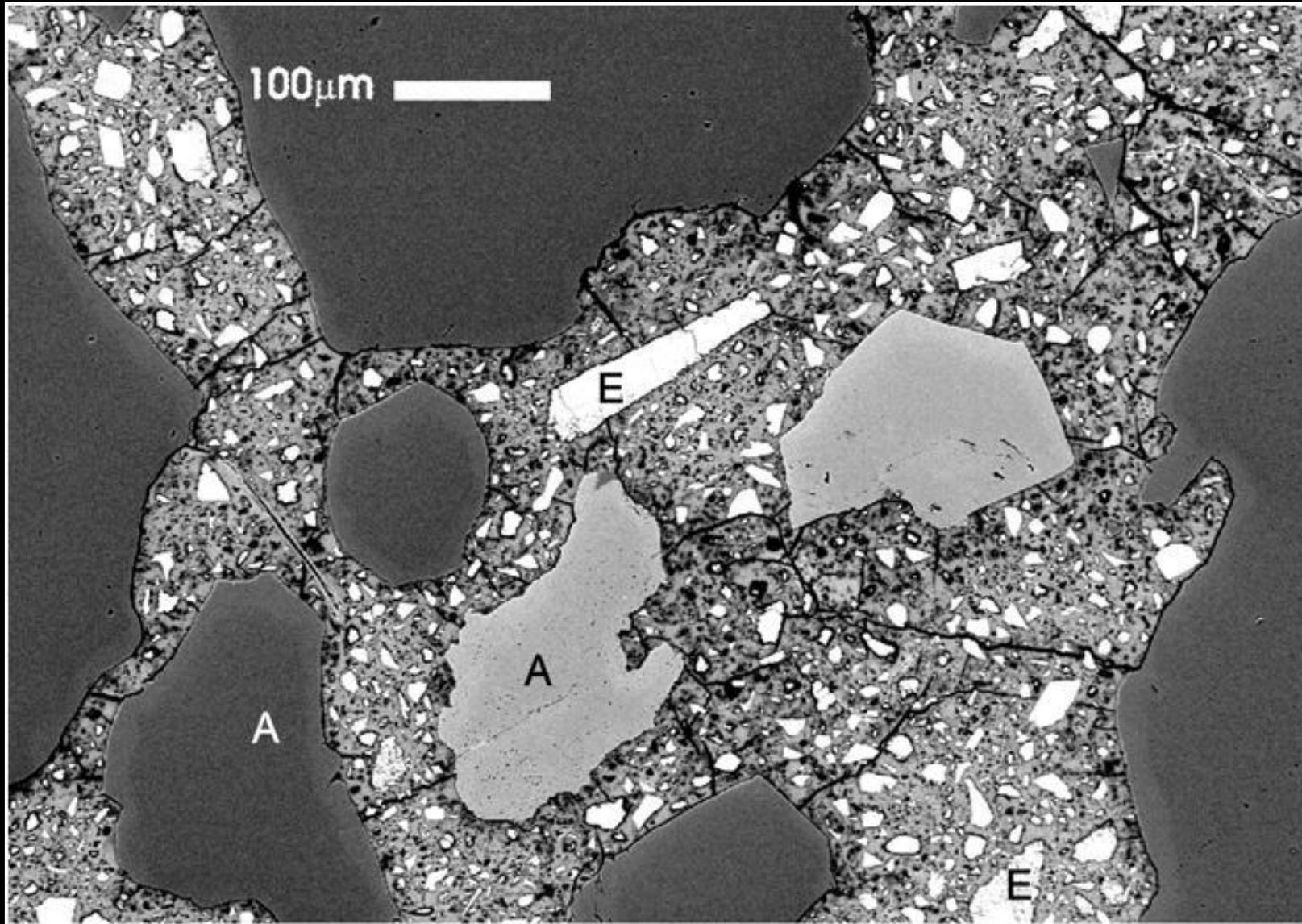
a = $1/2$ comprimento da trinca interna ou comprimento da trinca superficial

ρ_e = raio de curvatura da extremidade da fissura

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

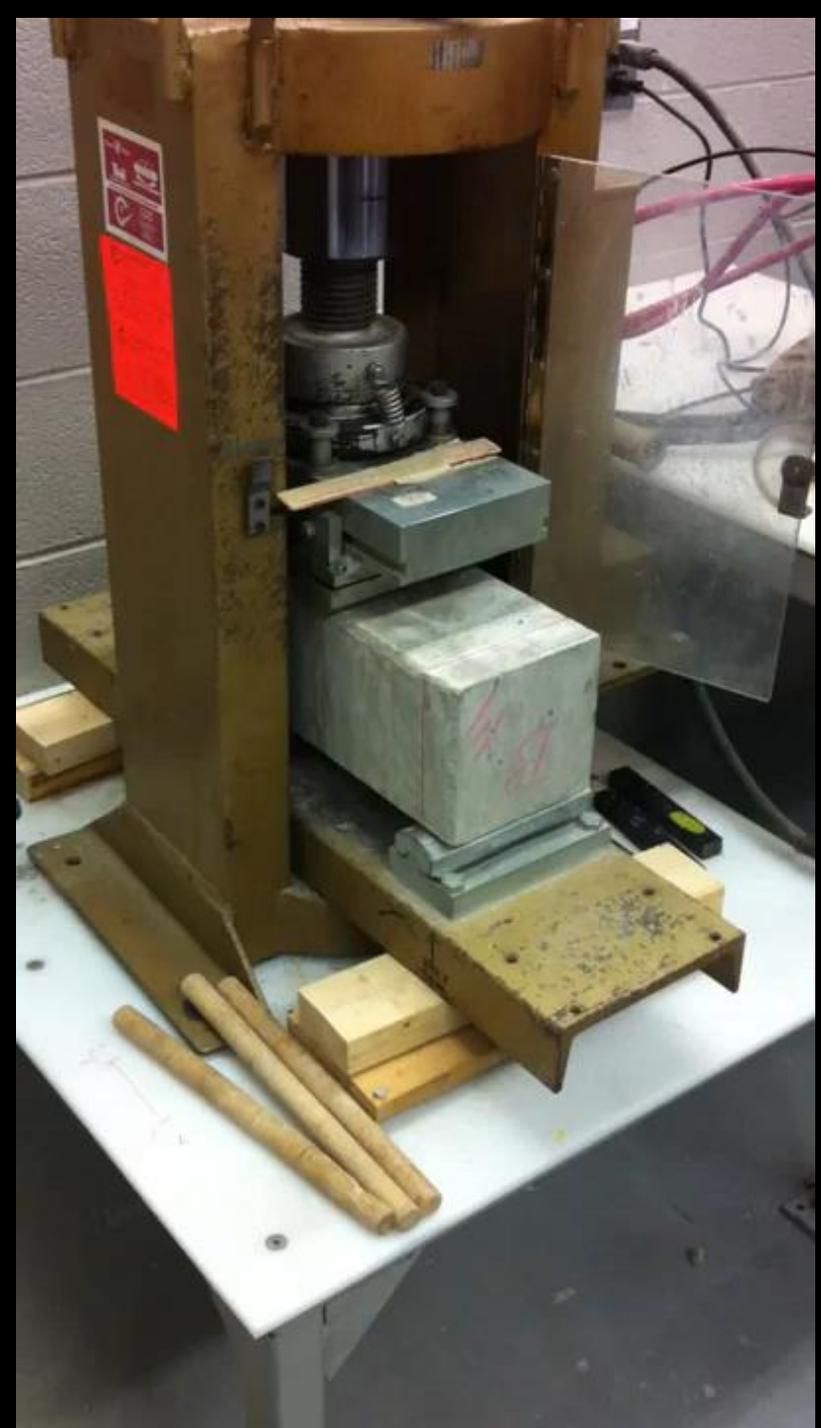
K_e = fator de concentração de tensões

O que acontece com o concreto?

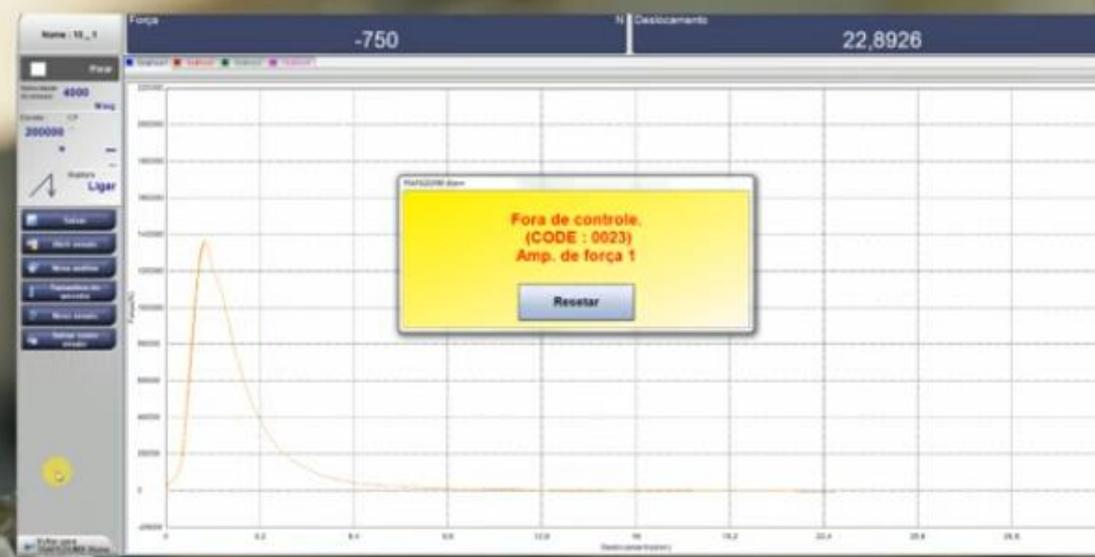


Ruptura do concreto à tração

Comportamento
marcadamente
frágil



AMOSTRA 1

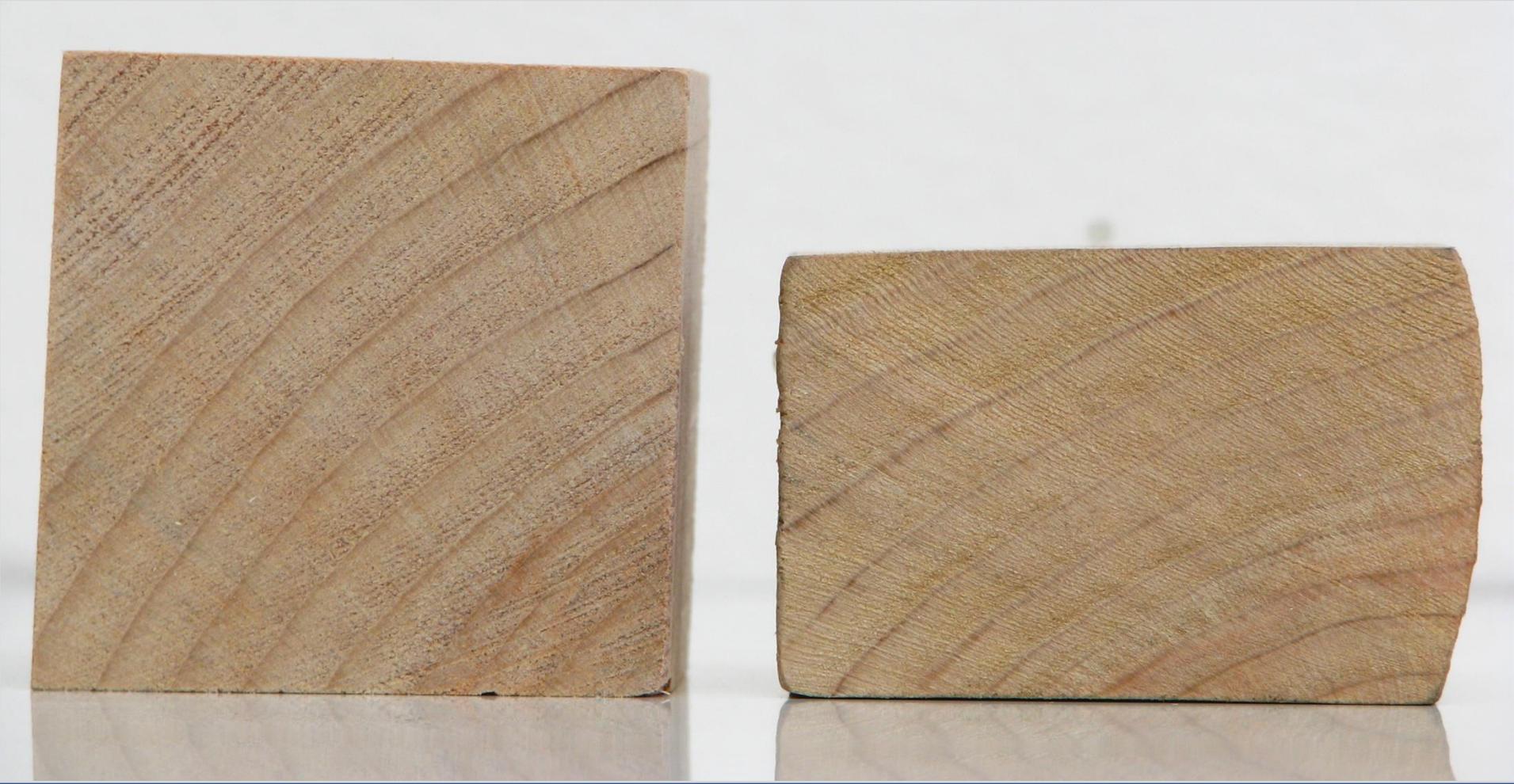


Como a umidade afeta a resistência do concreto?

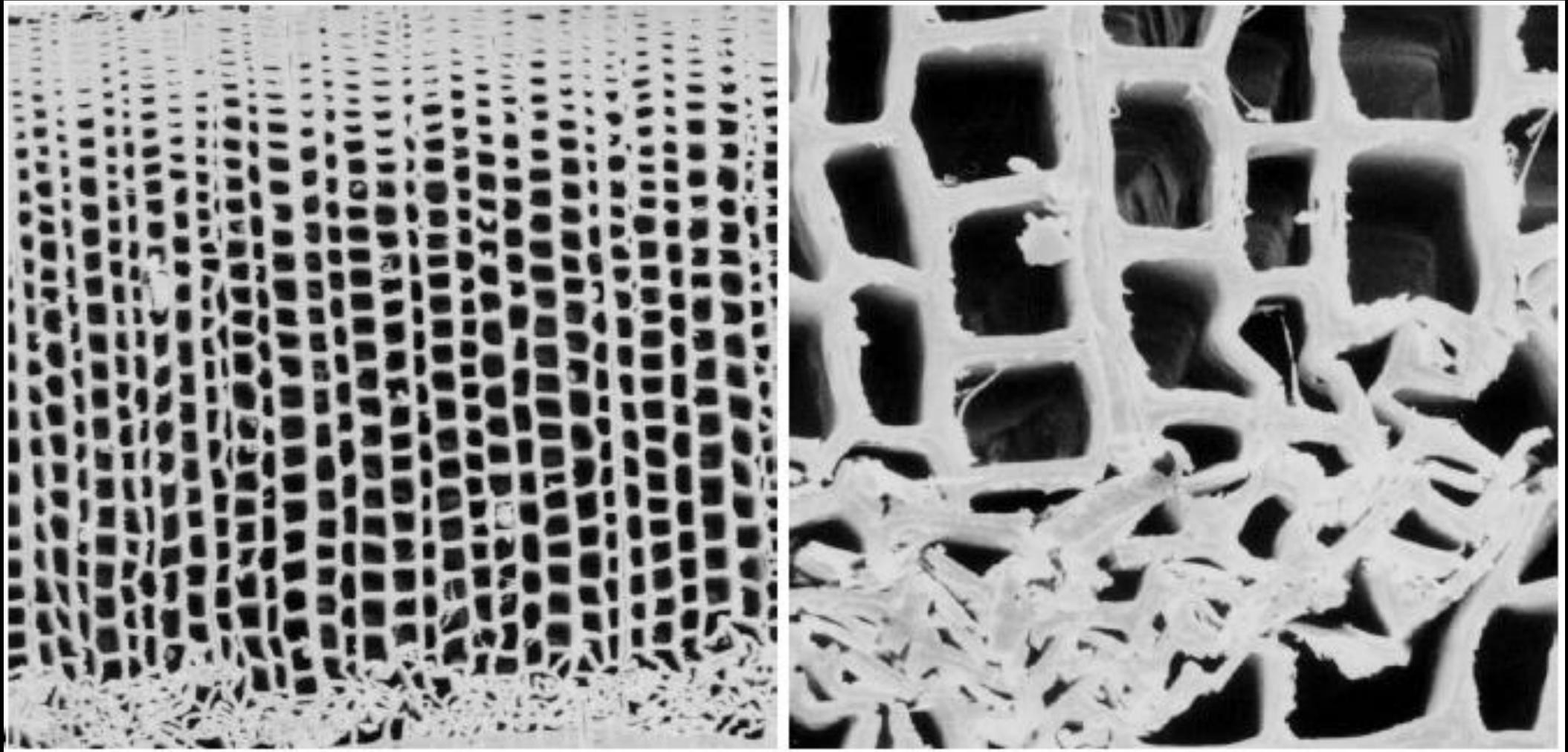
- Num ensaio de determinação da resistência à compressão
- Num ensaio de determinação da resistência à tração por flexão

Condições especiais de ruptura

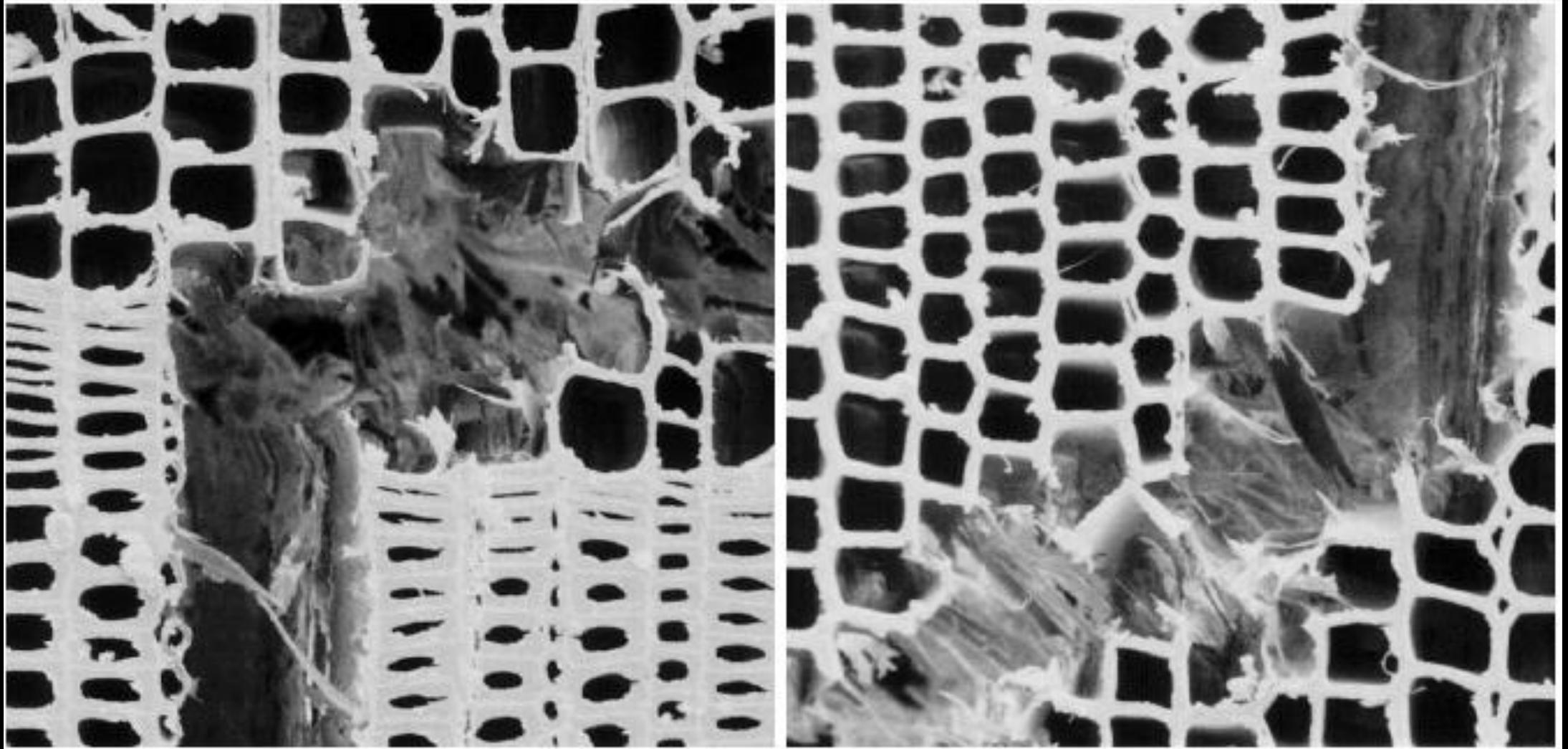
Compressão radial da madeira: o comportamento é dúctil ou frágil?



Ruptura por compressão radial



Como é a ruptura por tração radial da madeira?



Compressão axial da madeira: é dúctil ou frágil?

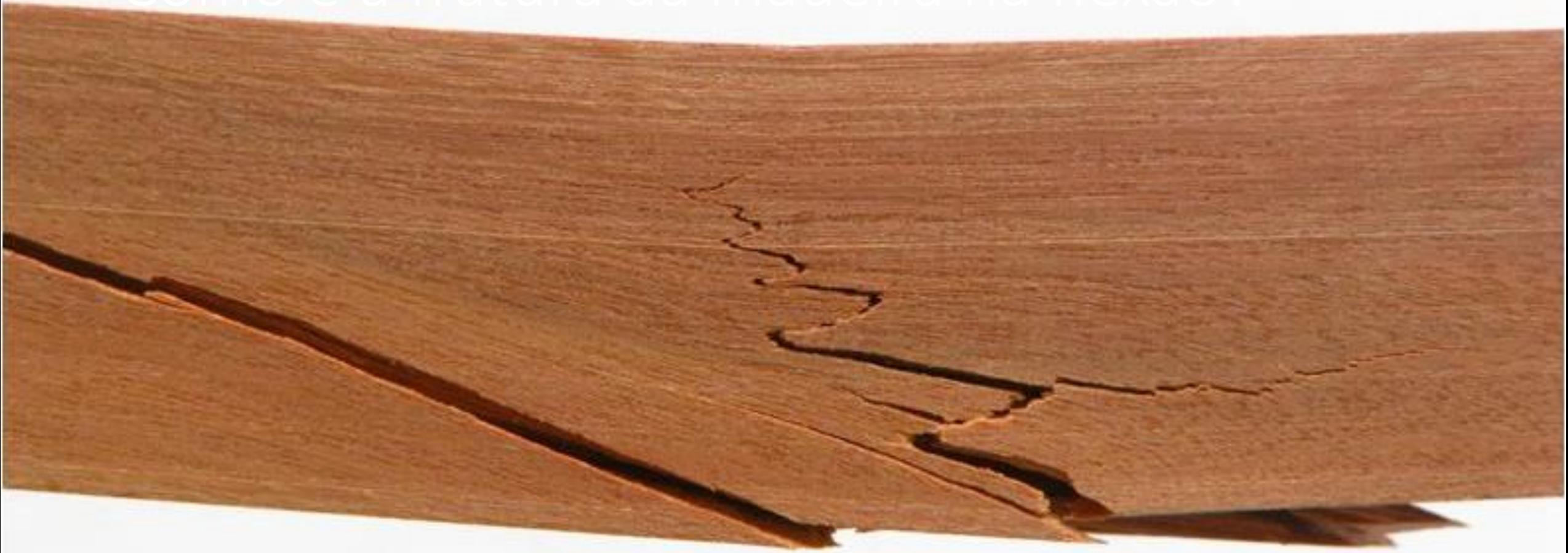


Ruptura de
escoras em
minas:



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

Como é a fratura da madeira na flexão?



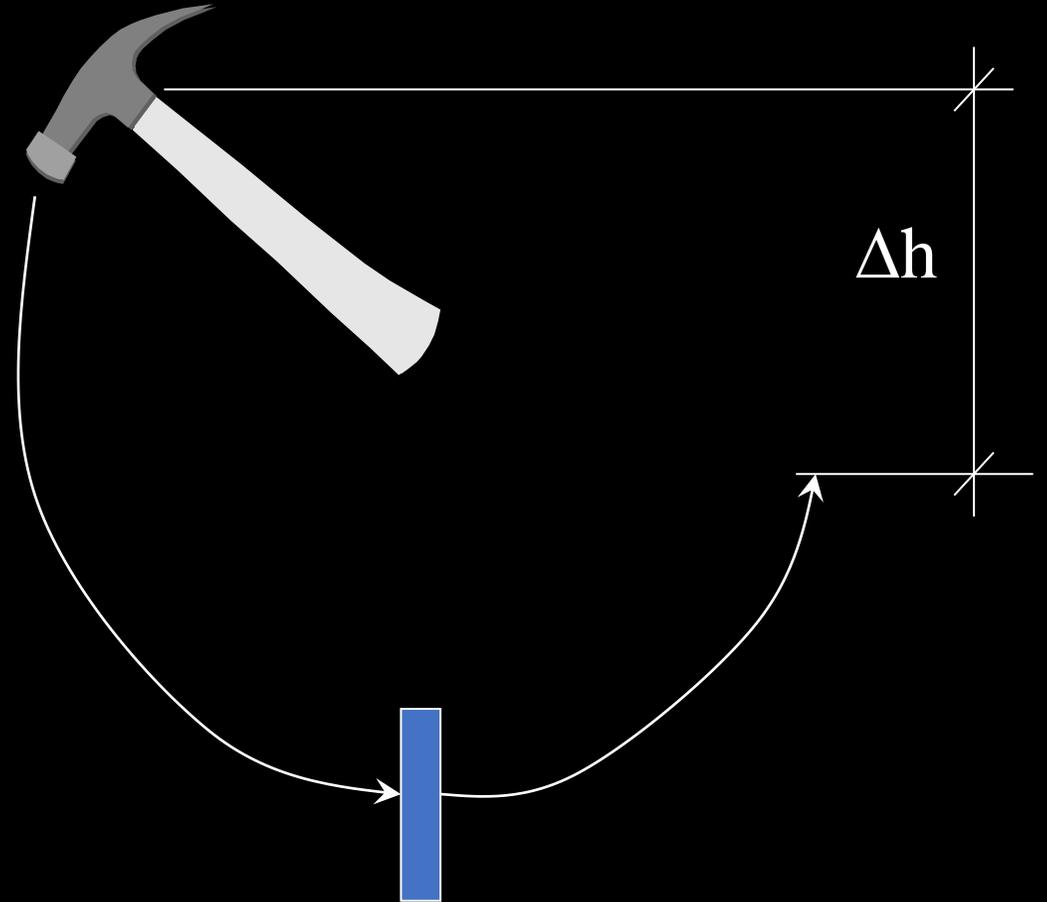
Como a umidade afeta a resistência da madeira?

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

O que é ruptura por
impacto?

Impacto

- Impacto = carga de curtíssima 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.*

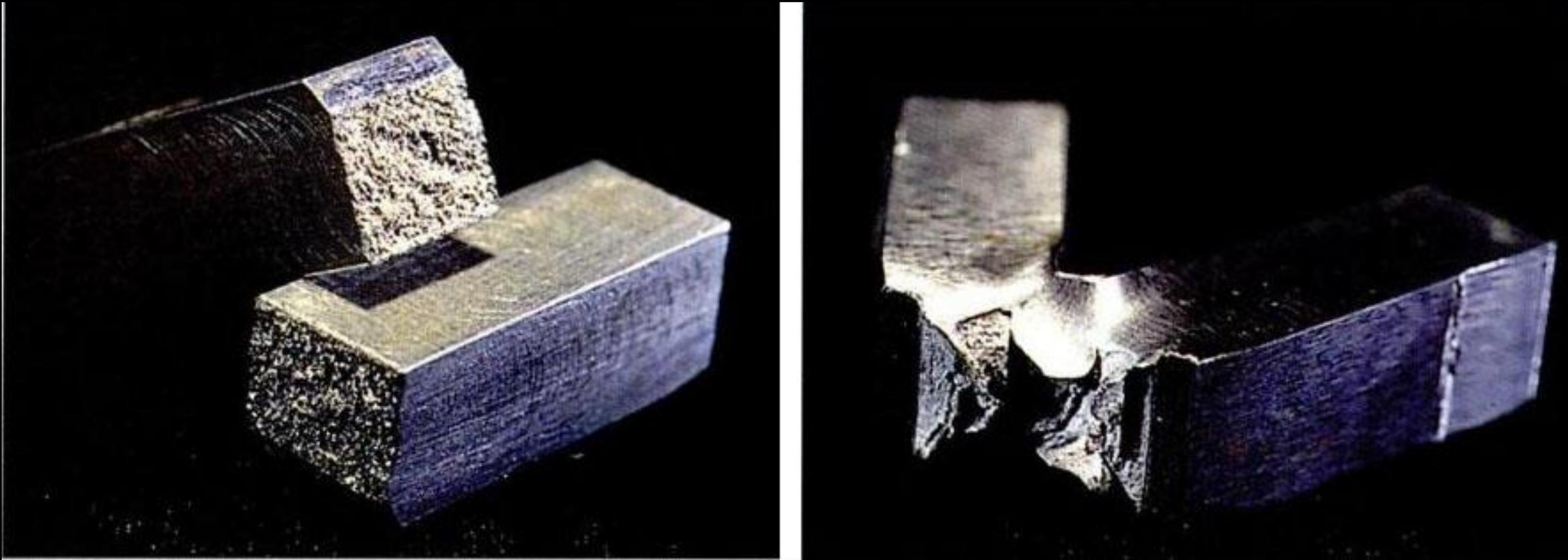
Impacto



© Woods Hole Oceanographic Institution, 1986

Impacto

Corpos de prova ensaiados no pêndulo de Charpy:



Impacto de barco em pilar de ponte Rio Moju (2019)



<https://correiodecarajas.com.br/rio-moju-militares-ainda-cogitam-existencia-de-vitimas-na-ponte/>

O World Trade Center não colapsou por impacto



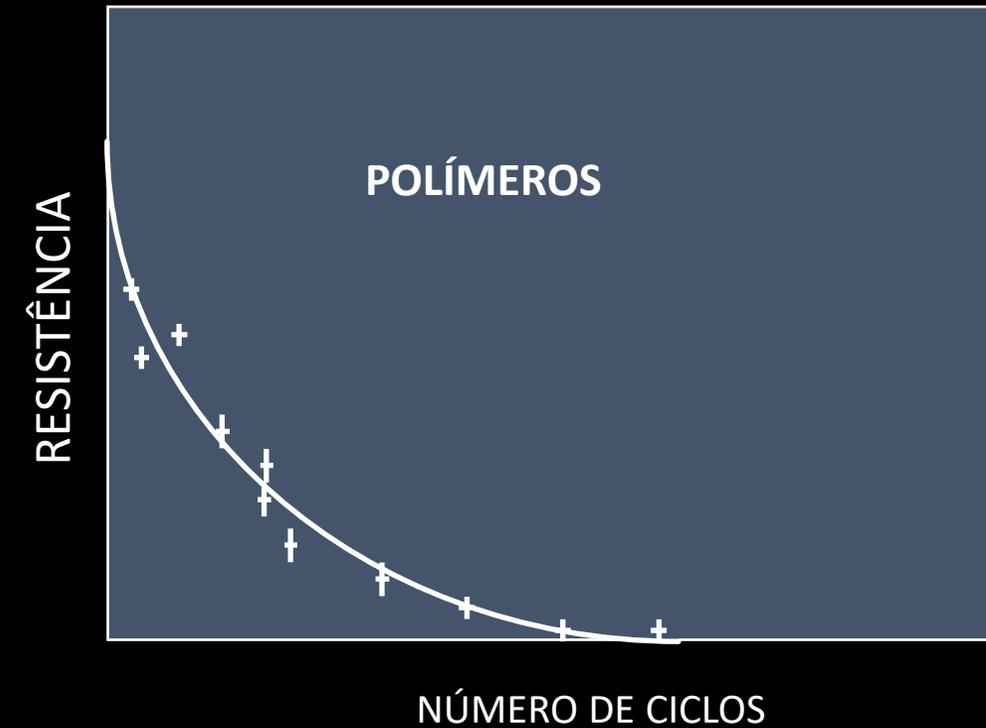
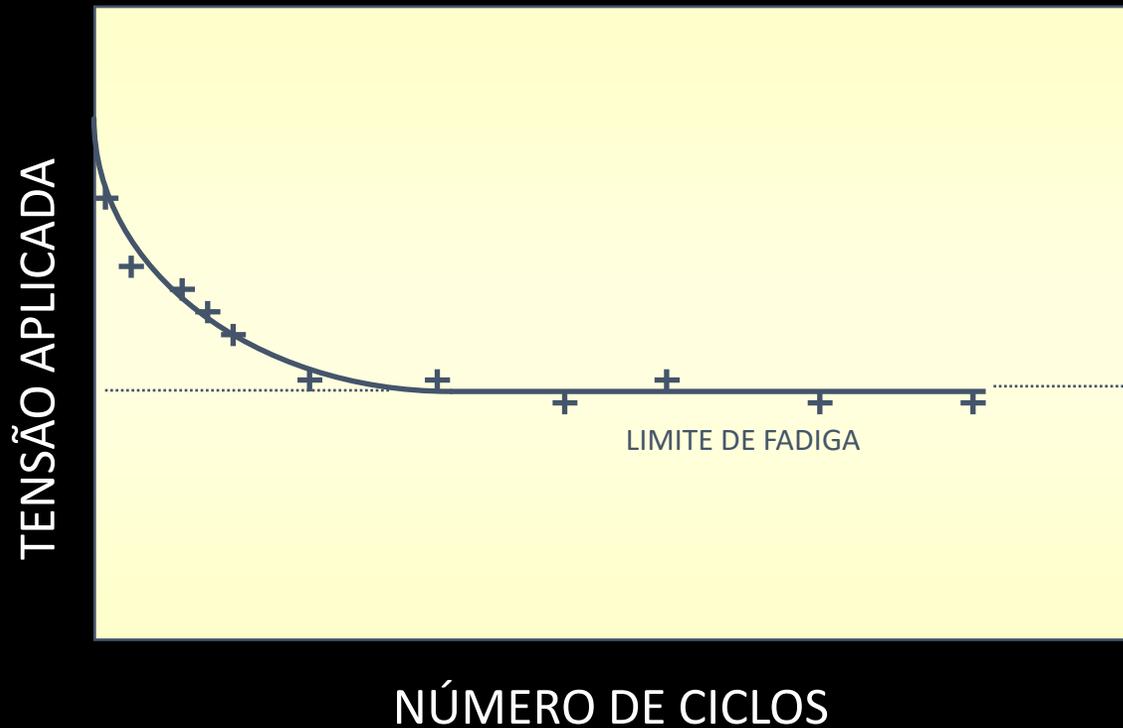
https://www.ohmymag.com/news/world-trade-center-retour-en-images-sur-les-attentats-du-11-septembre-2001_art107964.html



<https://m.folha.uol.com.br/mundo/2016/09/1812210-teses-conspiratorias-ainda-rondam-attentados-as-torres-gemeas-em-ny.shtml>

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.

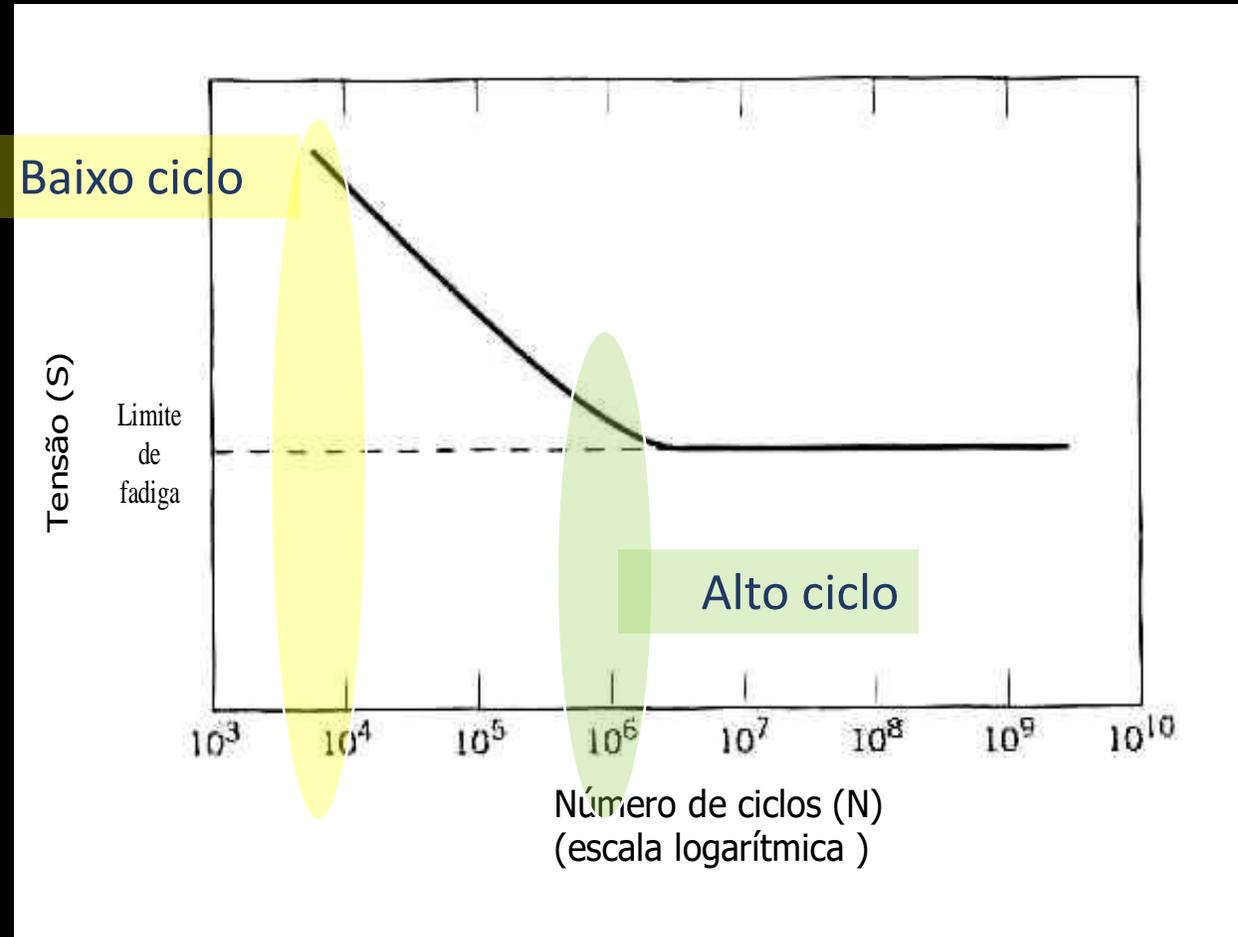
Fadiga

- **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*

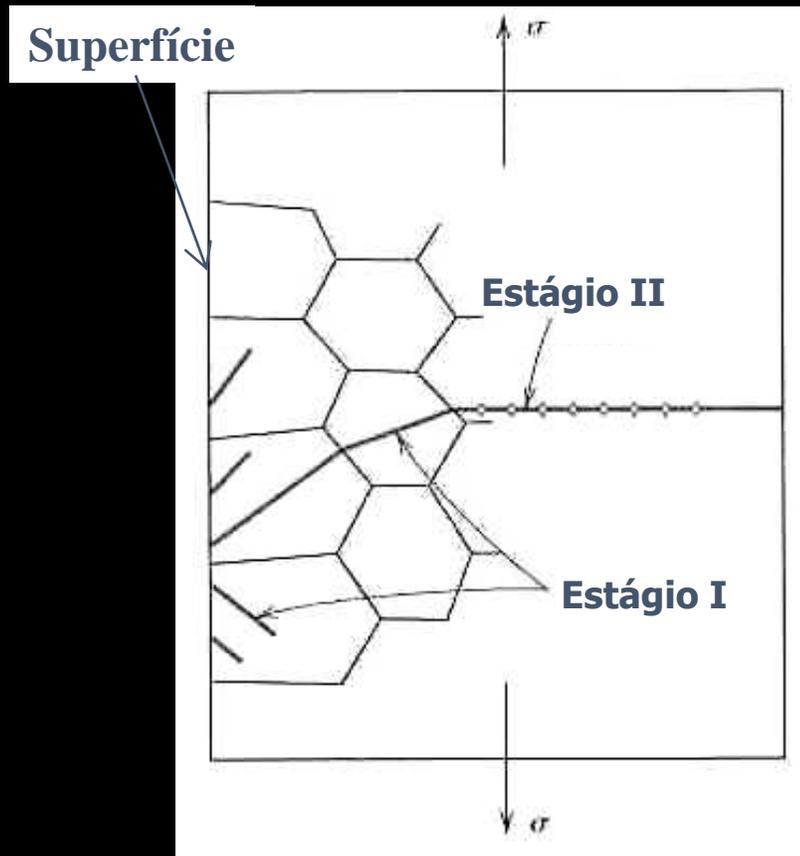
Parametrização



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

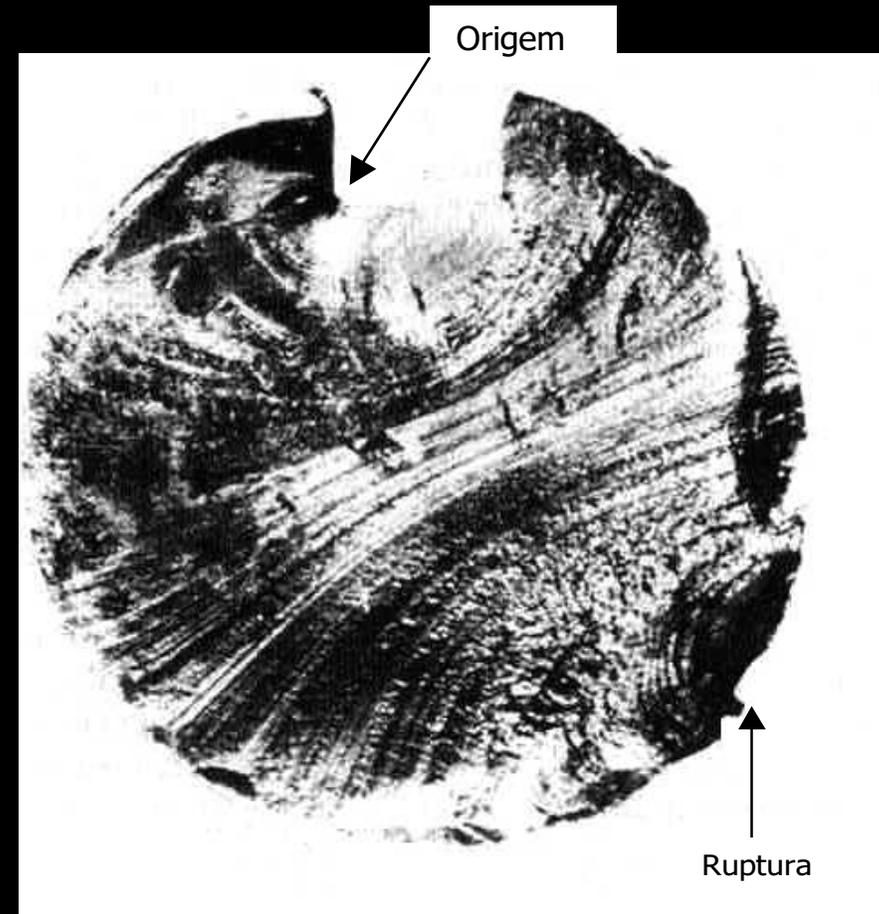
Mecanismo de fadiga



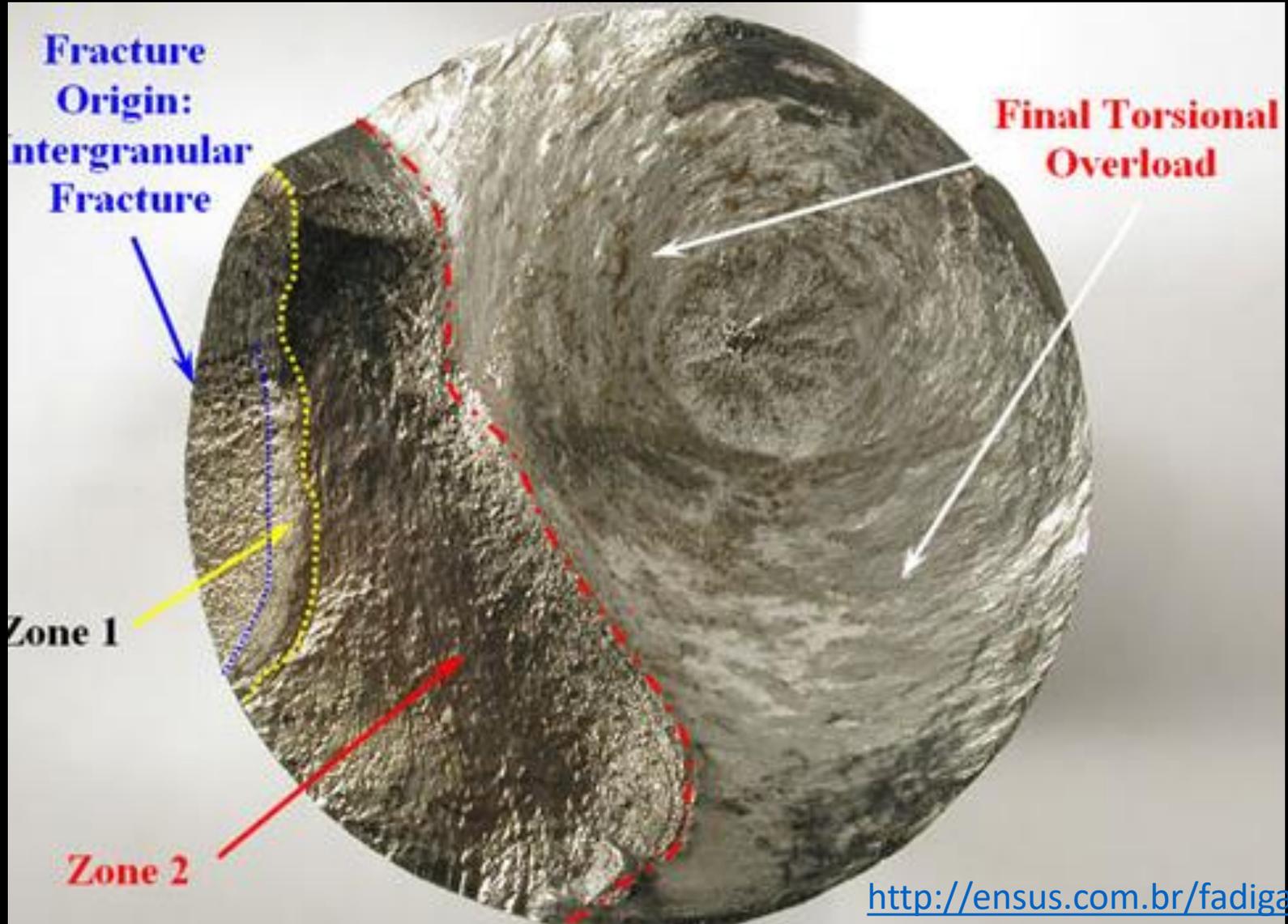
- Propagação de fissuras microscópicas
(efeito de entalhe das fissuras concentra ainda mais tensões)
- Ruptura frágil do material
- Estágio I – nucleação
- Estágio II – propagação

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

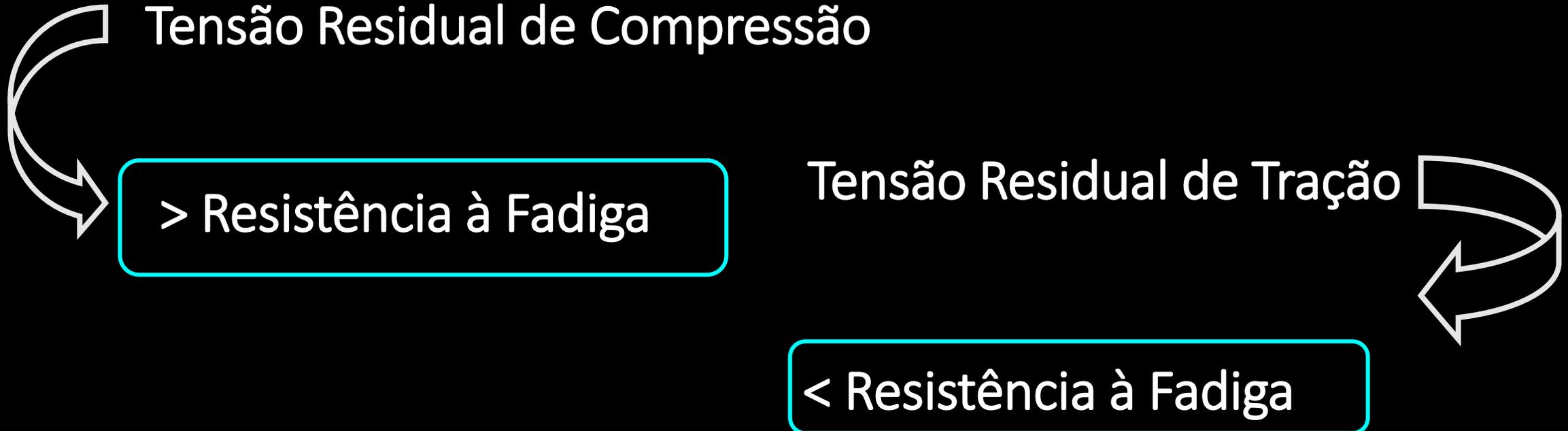
Fatores que afetam a fadiga

- **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:



Fatores que afetam a fadiga

A close-up photograph of a metal bicycle frame joint. The frame consists of several cylindrical tubes. A prominent weld joint is visible where a vertical tube meets a horizontal tube. A small, dark crack is clearly visible at the top of the weld joint. The background is a plain, light-colored wall. The image is used to illustrate factors affecting fatigue in metal structures.

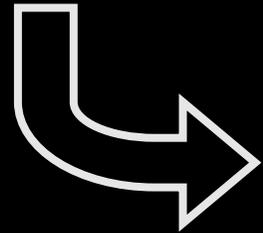
Efeito das Técnicas de fabricação

Fatores que afetam a fadiga

Efeito do meio ambiente



Temperatura



Resistência à
fadiga

Fatores que afetam a fadiga

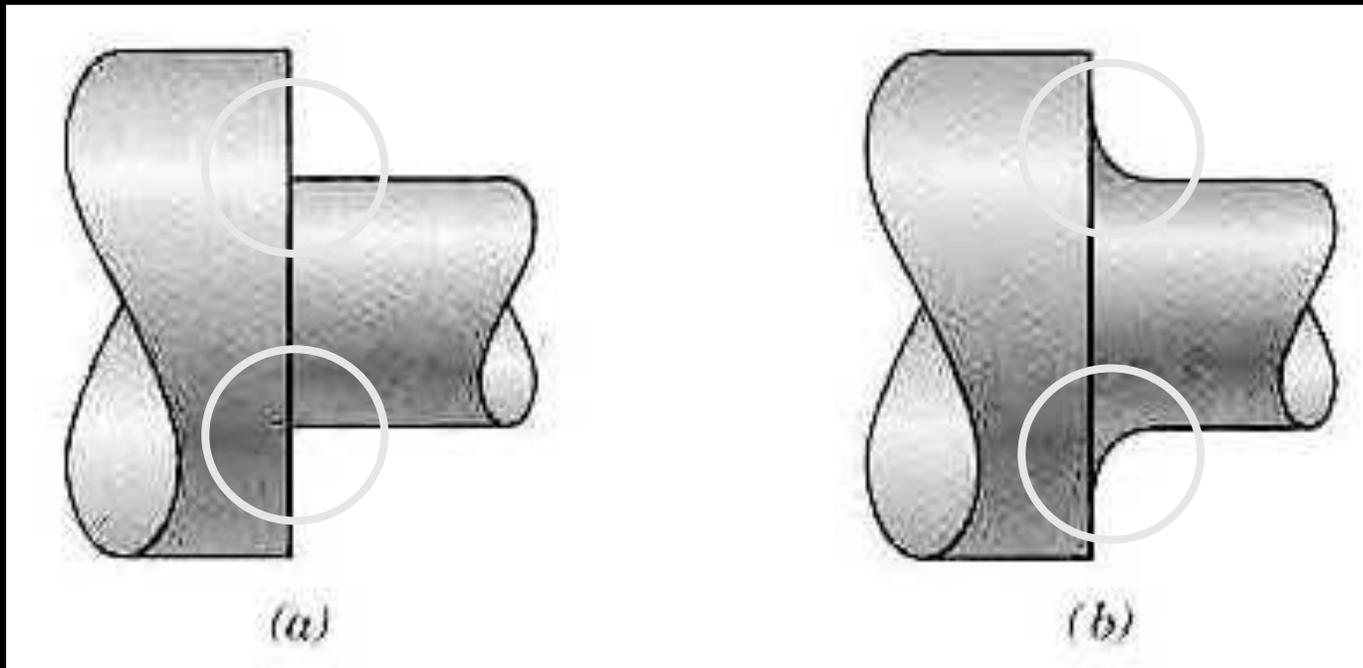
Efeito da geometria

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

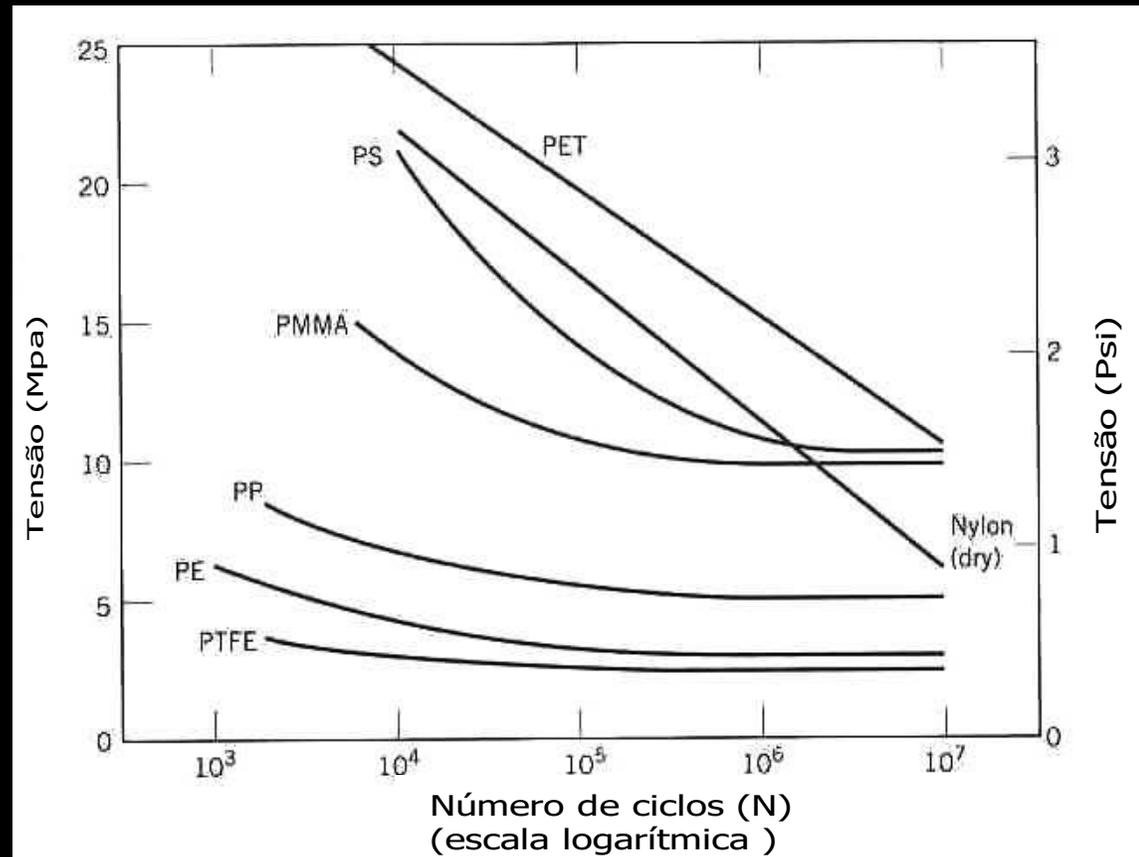


Excesso de
tensão em
fixação de
parafuso



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:

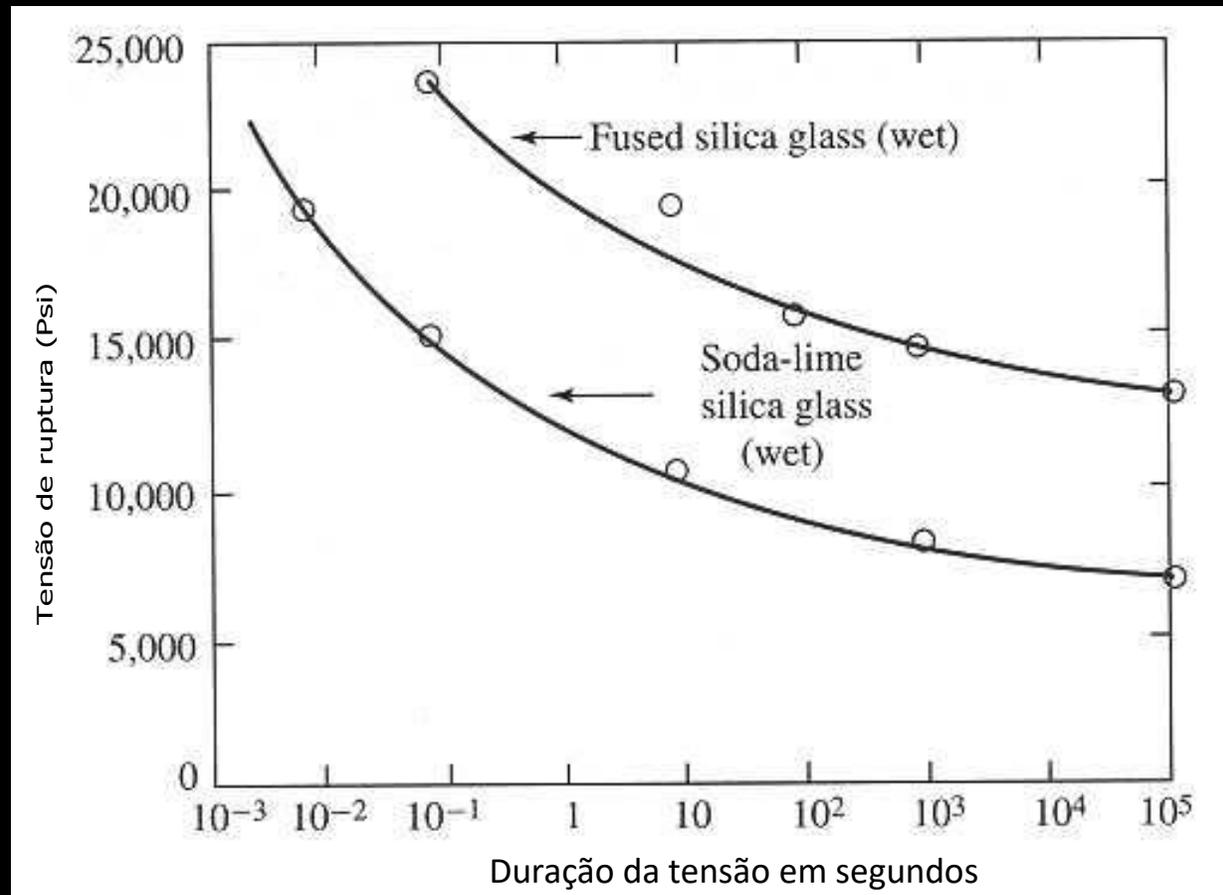
- Alguém sabe o que é fadiga estática?
- Alguém sabe o que é fratura retardada?
- Alguém sabe o que é propagação subcrítica de fratura?
- Alguém sabe o que é efeito Rüsck?

“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.
- É uma 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;

Velocidade de $0,45 \pm 0,15\text{ MPa/s}$



As condições de realização do ensaio devem ser padronizadas.

Variação da velocidade de carregamento

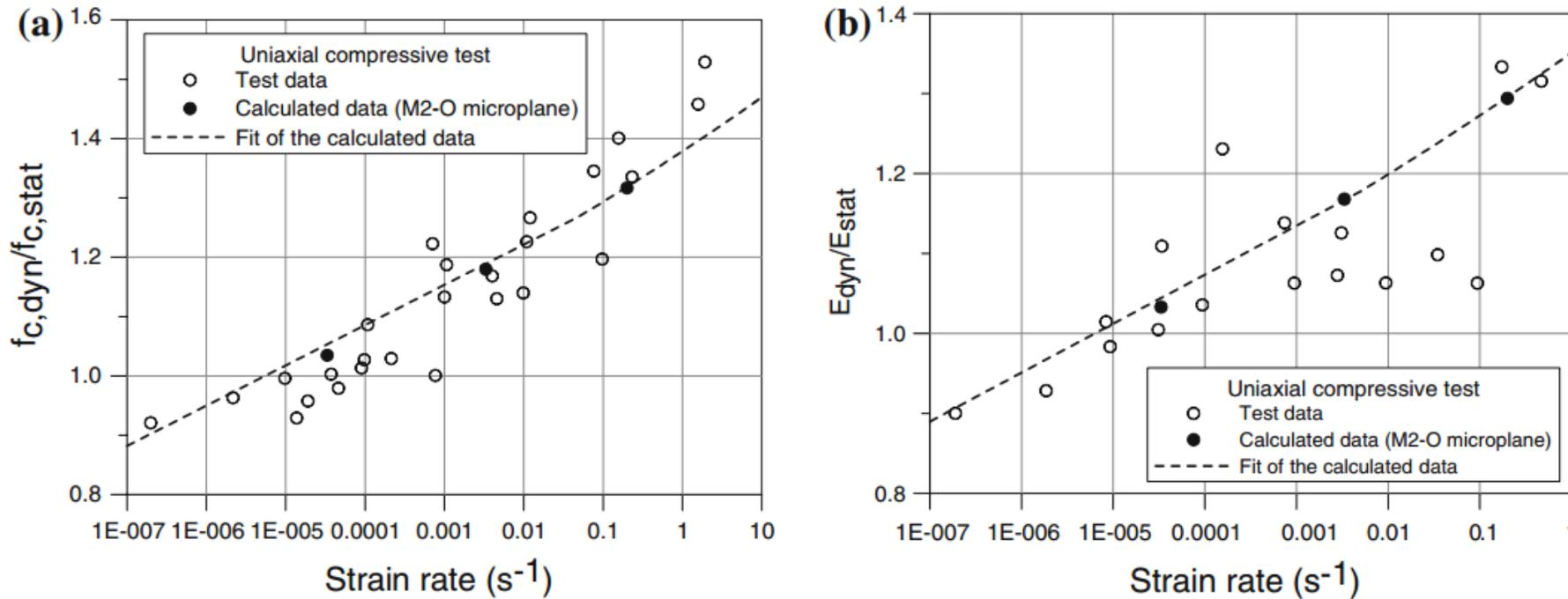
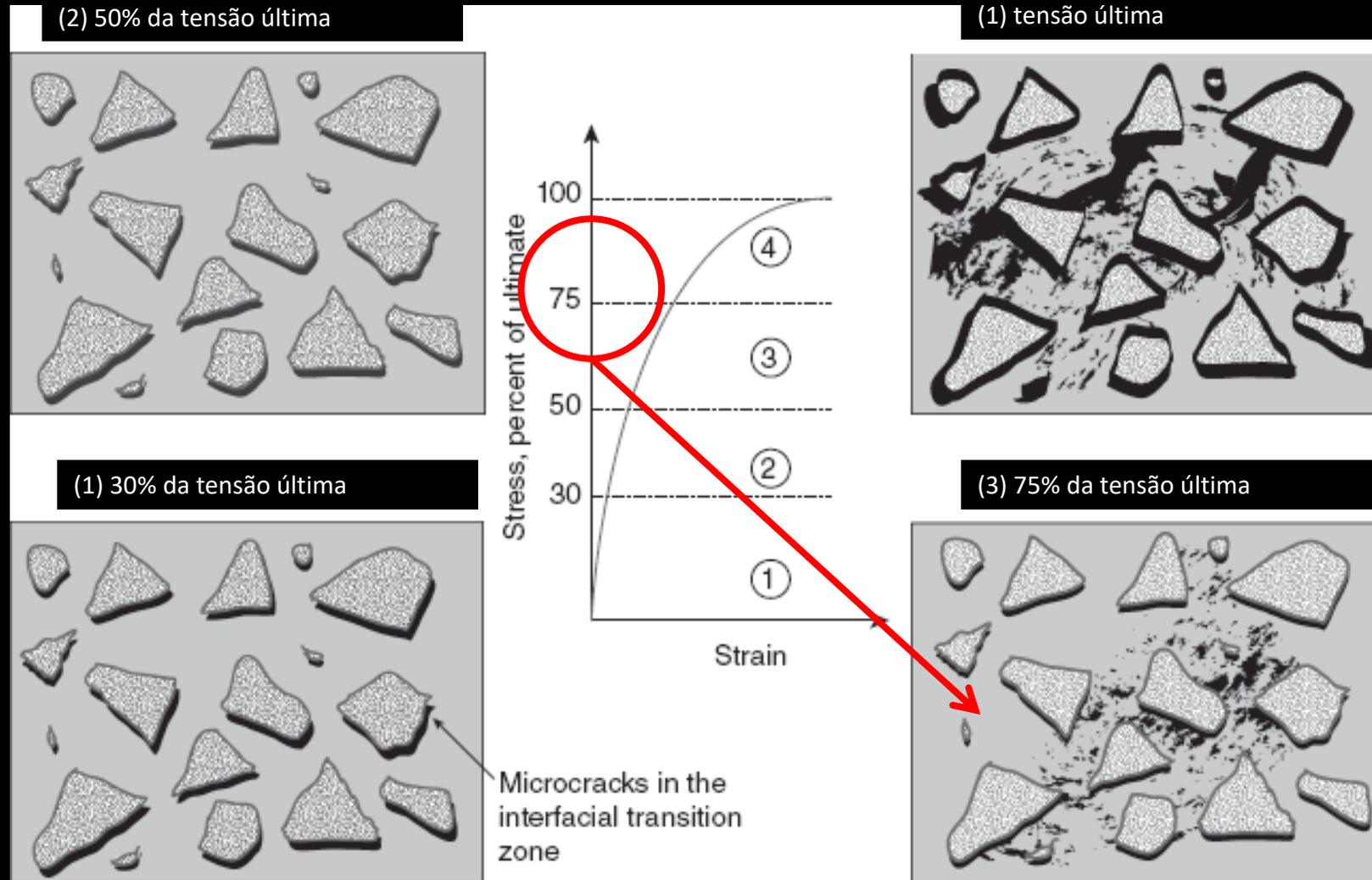


Figure 2. Uniaxial compressive test: (a) rate-dependent compressive strength – test data and model prediction and (b) rate dependent initial Young's modulus – test data and model prediction.

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)



Dinâmica do efeito Rüsçh (fadiga estática)

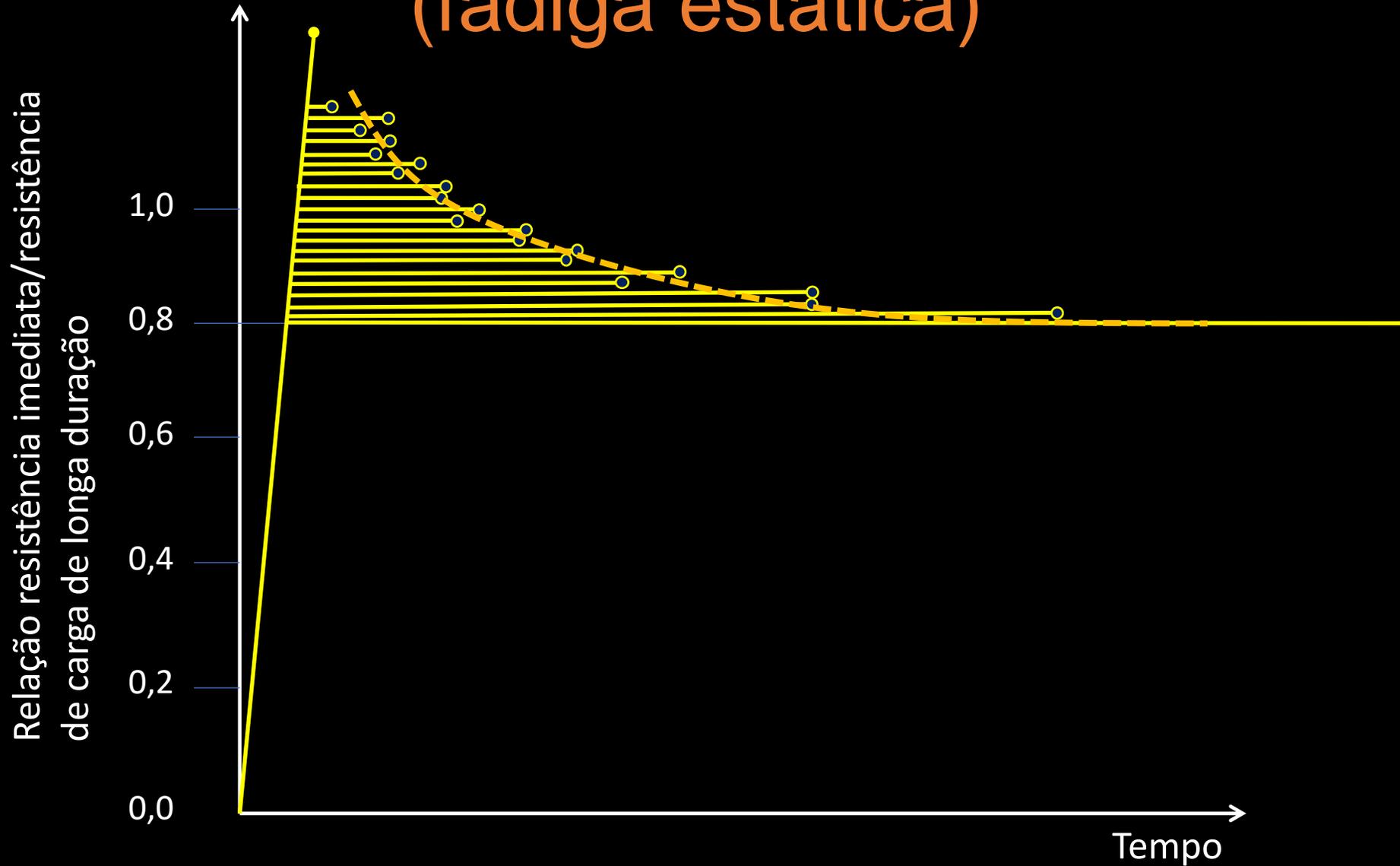


Diagrama σ - ε

Para cargas duraderas

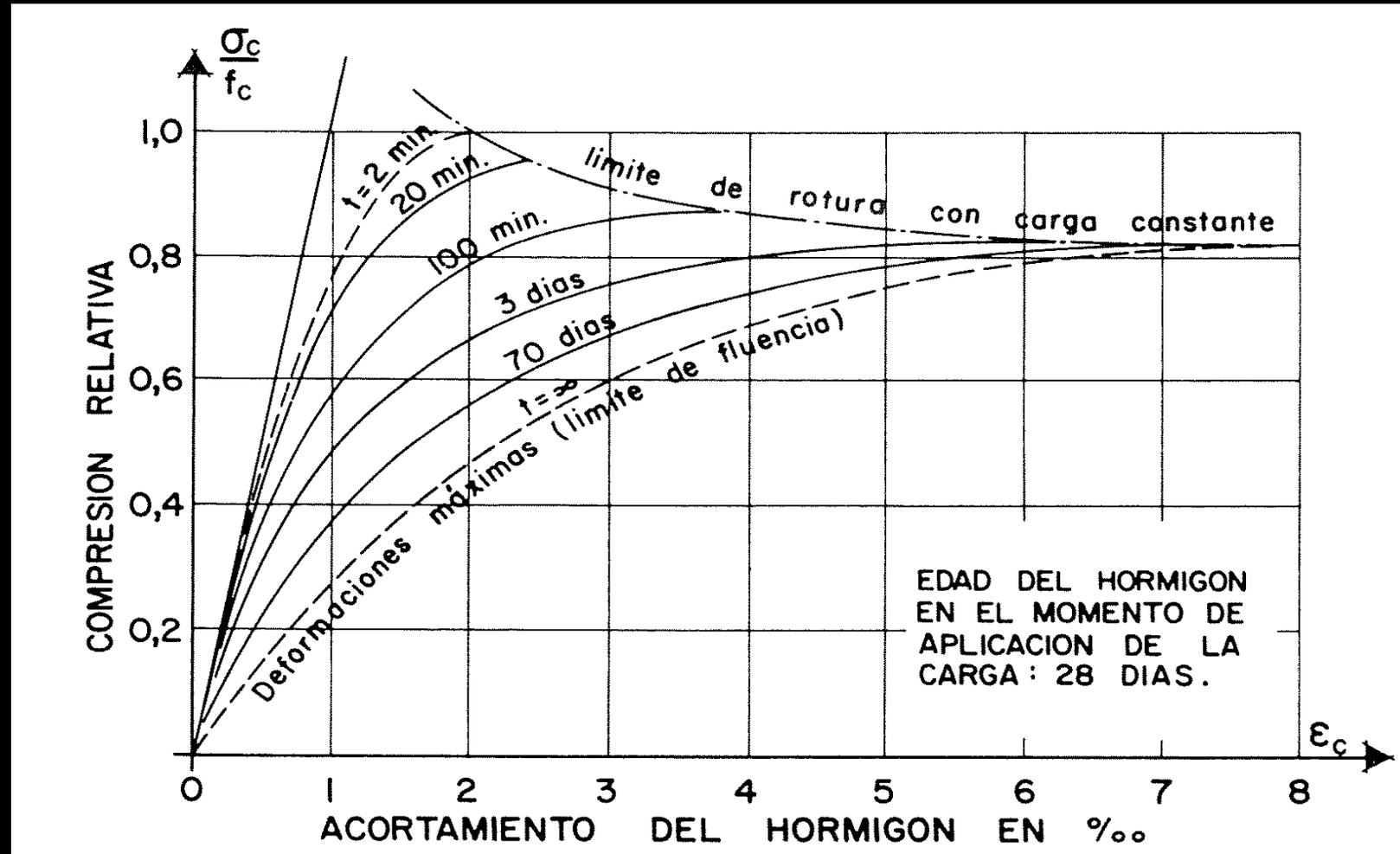
É o famoso efeito Rüsç

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

$$f_{ctd} = \alpha_{ct} \frac{f_{ctk}}{\gamma_c}$$

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.



Obrigado!