

Materiais Cerâmicos

Propriedades Mecânicas

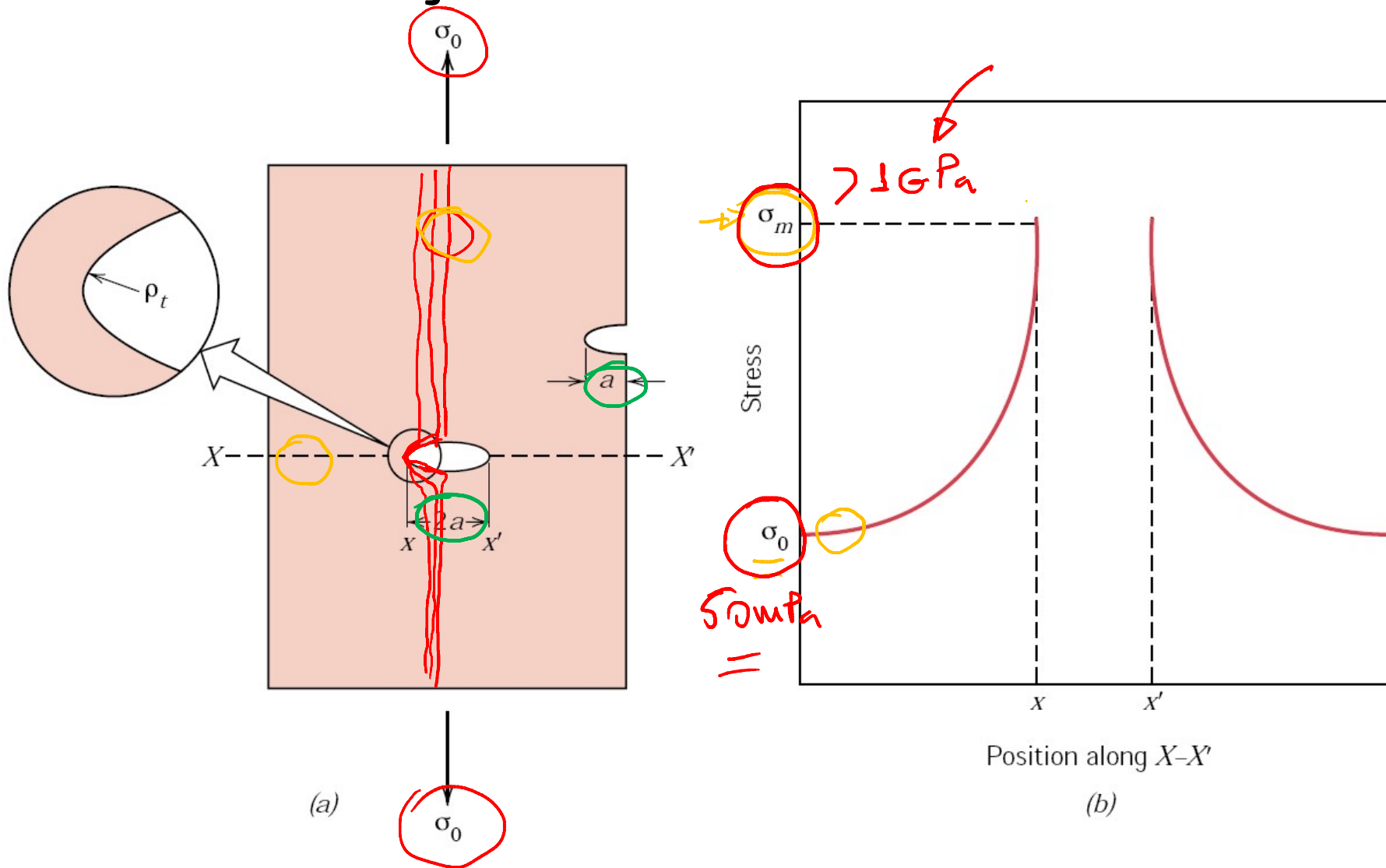
SMM0194 – Ciência e Engenharia de
Materiais II

Prof. Eduardo Bellini Ferreira

Propriedades Mecânicas das Cerâmicas

- O **processamento** e a **aplicação** dos materiais cerâmicos é **limitada por sua baixa tenacidade**.
- A principal desvantagem em relação aos metais é a propensão à **fratura frágil, catastrófica**.
- Ocorre **pouca ou nenhuma absorção de energia para deformação plástica** (baixa ou nula ductilidade).
- Toda **energia do carregamento** é **consumida na criação das superfícies da trinca** (superfícies são regiões de mais alta energia em relação à estrutura atômica do volume do cristal).

Concentração de tensão seção 8.5 do Callister



Tensão teórica

- $\sigma_{teórica} = \frac{E}{10} \text{ a } \frac{E}{5}$
- Alumina Al₂O₃ → $E = 400 \text{ GPa}$
 - $\sigma_{teórica} = 40 \text{ a } 80 \text{ GPa}$
 - $\sigma_{prática} = 200 \text{ a } 400 \text{ MPa}$
- Vidro de janela → $E = 70 - 100 \text{ GPa}$
 - $\sigma_{teórica} = 3,5 \text{ a } 20 \text{ GPa}$
 - $\sigma_{experimental} = 50 \text{ MPa}$

Concentração de tensão

- A trinca pode ser aproximada por um defeito elíptico extremamente fino que atravessa uma placa, orientado perpendicularmente à direção da aplicação da tensão.

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

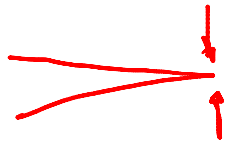
- Para trincas muito finas:

$$\left(\frac{a}{\rho_e} \right)^{1/2} \gg 1$$
$$\sigma_m \gg \sigma_0$$

- Fator de concentração de tensões:

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

- Onde
 - σ_m = tensão máxima na extremidade da trinca (ou outro defeito, como cantos de grão, poros, inclusões, riscos, etc.)
 - σ_0 = tensão aplicada externamente
 - a = comprimento (profundidade) de um defeito superficial ou metade do comprimento de um defeito no interior
 - ρ_e = raio de curvatura na extremidade da trinca
- O fator de concentração de tensões K_e é uma medida de quanto a tensão externa é amplificada na extremidade de uma trinca.
- Em metais, a concentração de tensões é atenuada pelo escoamento ou deformação plástica, que aumenta ρ_e e diminui a energia armazenada na forma de deformação elástica.



Tenacidade à fratura

- É uma **propriedade fundamental dos materiais!**
- A tensão crítica de fratura, σ_c , não é uma propriedade do material, depende dos defeitos presentes na microestrutura, mas a **tenacidade** é:

$$\sigma_c = \left(\frac{2E\gamma_s}{\pi c} \right)^{1/2}$$

$\rightarrow K_c = 2E\gamma_s$

$\therefore K_c = Y \sigma_c \sqrt{\pi c}$

E = módulo elástico
 γ_s = energia de superfície

cte material *cte geométrica*

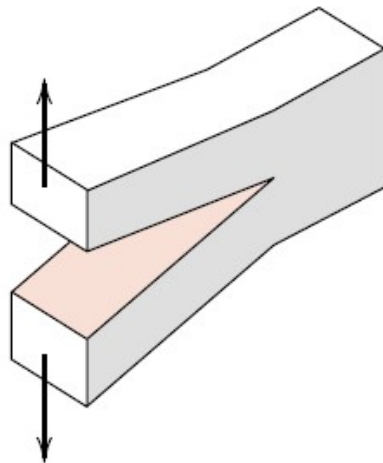
- K_c = tenacidade à fratura
- Y = fator geométrico adimensional que depende do estado de tensão e da geometria da amostra e da trinca
 - $Y = 1$ para tração pura
 - $Y = 1,12$ para flexão ou defeito superficial
- σ_c = tensão aplicada causadora da fratura, ou tensão crítica
- c = comprimento crítico do defeito ou trinca na superfície ou metade do comprimento da mesma interna, no instante da fratura!

Tenacidade à fratura em deformação plana

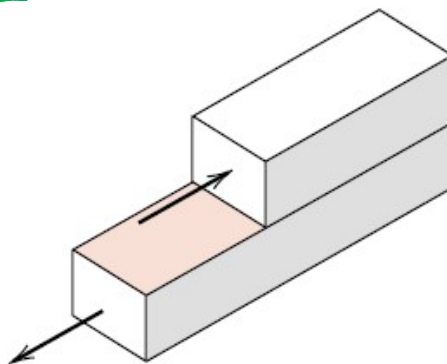
$K_{Ic} =$
tenacidade
à fratura

$$K_{Ic} = Y \sigma_c \sqrt{\pi c}$$

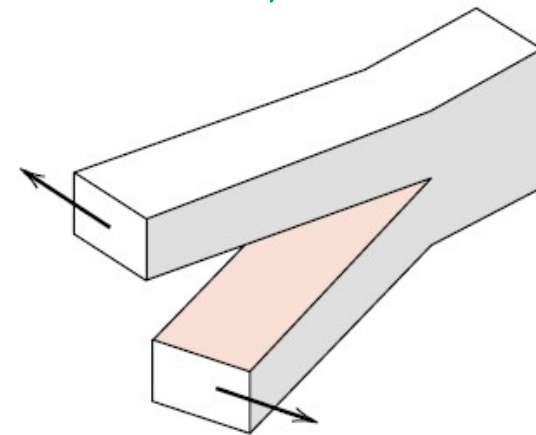
$c =$ tamanho
do
defeito
 $\sigma_c =$ tensão
crítica
no momento
da fratura
 $Y =$ fator geométrico



(a)



(b)



(c)

Os três modos de deslocamento da superfície da trinca:

- a) modo I, modo de abertura ou tração;
- b) modo II, modo deslizante ou cisalhante; e
- c) modo III, modo tesoura.

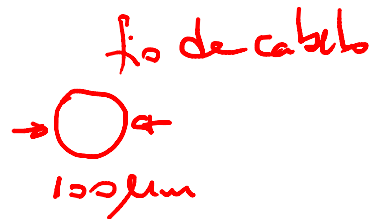
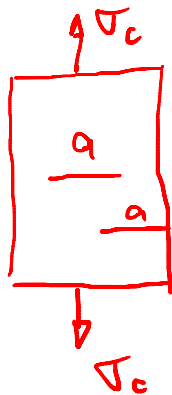
Material	Yield Strength		K_{Ic}	
	MPa	ksi	MPa \sqrt{m}	ksi $\sqrt{in.}$
Metals				
Aluminum Alloy ^a (7075-T651)	495	72	24	22
Aluminum Alloy ^a (2024-T3)	345	50	44	40
Titanium Alloy ^a (Ti-6Al-4V)	910	132	55	50
→ Alloy Steel ^a (4340 tempered @ 260°C)	1640	238	50.0	45.8
Alloy Steel ^a (4340 tempered @ 425°C)	1420	206	87.4	80.0
Ceramics				
→ Concrete	—	—	0.2–1.4	0.18–1.27
→ Soda-Lime Glass	—	—	0.7–0.8	0.64–0.73
Aluminum Oxide	—	—	2.7–5.0	2.5–4.6
Polymers				
Polystyrene (PS)	—	—	0.7–1.1	0.64–1.0
Polymethyl Methacrylate (PMMA)	53.8–73.1	7.8–10.6	0.7–1.6	0.64–1.5
Polycarbonate (PC)	62.1	9.0	2.2	2.0

0.5 MPa.m^{1/2}

vidro de janela

$$K_{Ic} = 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$$

$$\sigma_c = 50 \text{ MPa}$$



$n \perp GPa \rightarrow 50 \text{ MPa!}$

$$c = \frac{1}{2} a \text{ volume}, \gamma = 1$$

$$c = a \text{ superficie}, \gamma = 1,12$$

Considerando o defeito na superfície

$$\sigma_c = \frac{1}{\gamma} \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi \cdot c}}$$

$$50 = \frac{1}{1,12} \cdot \frac{0,5}{\sqrt{\pi \cdot c}}$$

$$\rightarrow c = ? \text{ ou } 25 \mu\text{m}$$

$$c = 25 \text{ microns}$$

tamanhos dos defeitos críticos é da ordem dos componentes ou defeitos tipicamente encontrados na microestrutura da cerâmica

Aço 4340 temperado e revenido

$$K_{Ic} = 50 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \text{ a } 260^\circ\text{C}$$

$$\sigma_c = 50 \text{ MPa} \leftarrow$$

$$c = ?$$

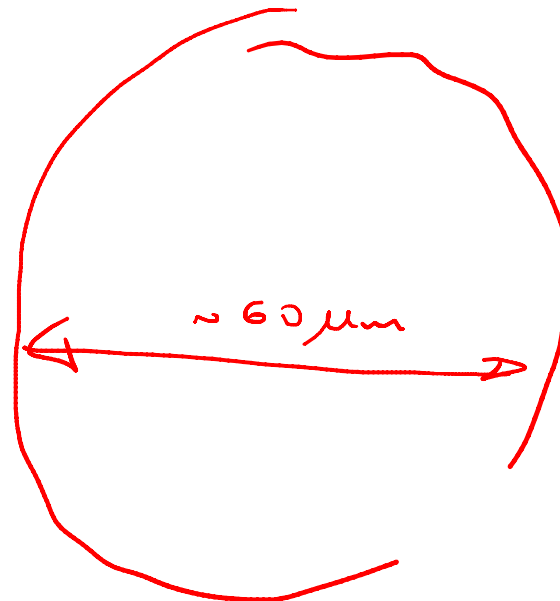
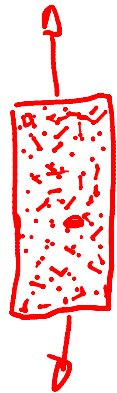
$$50 = \frac{1}{1,12} \cdot \frac{50}{\sqrt{\pi \cdot c}}$$

superfície

$$c = \frac{1}{\pi} \left(\frac{50}{1,12 \cdot 50} \right)^2$$

$$c = 0,25 \text{ m ou } \underline{\underline{25 \mu\text{m}}}$$

Microestruturas cerâmicas



O maior defeito presente é o causador da fratura



Região com grandes grãos, produzindo uma heterogeneidade microestrutural, resultado de uma impureza durante a prensagem a quente da Al_2O_3 .

Propriedades Mecânicas das Cerâmicas

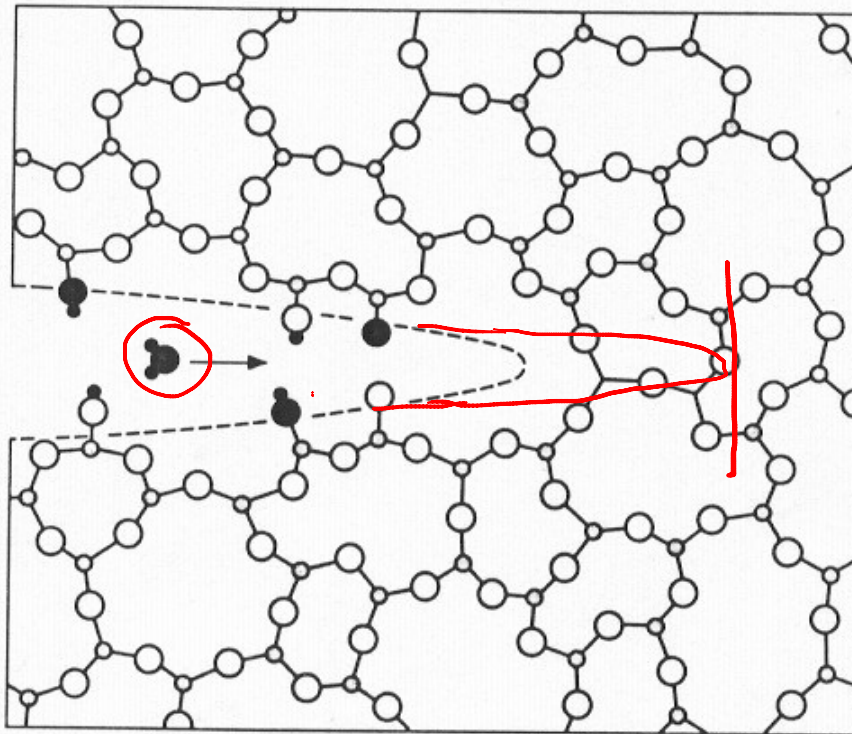
- Os defeitos que causam a fratura frágil são muito pequenos nos materiais cerâmicos, devido ao pequeno K_{Ic}
- Têm dimensões da ordem dos defeitos superficiais (riscos ou trincas), internos (poros) ou detalhes da microestrutura (grãos) – ou seja, são virtualmente impossíveis de serem eliminados

Fadiga estática

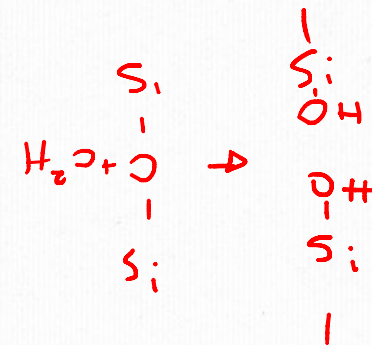
- Causada pela propagação lenta e estável de uma trinca no material até que o tamanho crítico seja alcançado para que ocorra a propagação catastrófica
- Em alguns materiais cerâmicos (porcelanas, vidros, cimento portland, cerâmicas com alto teor de Al_2O_3 , titanato de bário, nitreto de silício), o aumento do comprimento de uma trinca pode ser causado por condições ambientais comuns: temperatura e umidade!

Efeito do ambiente – Fadiga Estática

$\sigma_0 \uparrow$



$\gamma = 1.12$



$\sigma_0 \downarrow$ Fig 6.14. Two-dimensional point-mass representation of water-induced bond rupture in silica glass, as per reaction in (6.35): silicon (shaded circles), oxygen (open circles), environmental water species (filled circles). Note open structure of -Si-O-Si- network. (Dashed curve is Irwin profile (2.15) for *in-vacuo* equilibrium slit-crack.)

Efeito do ambiente – Fadiga Estática

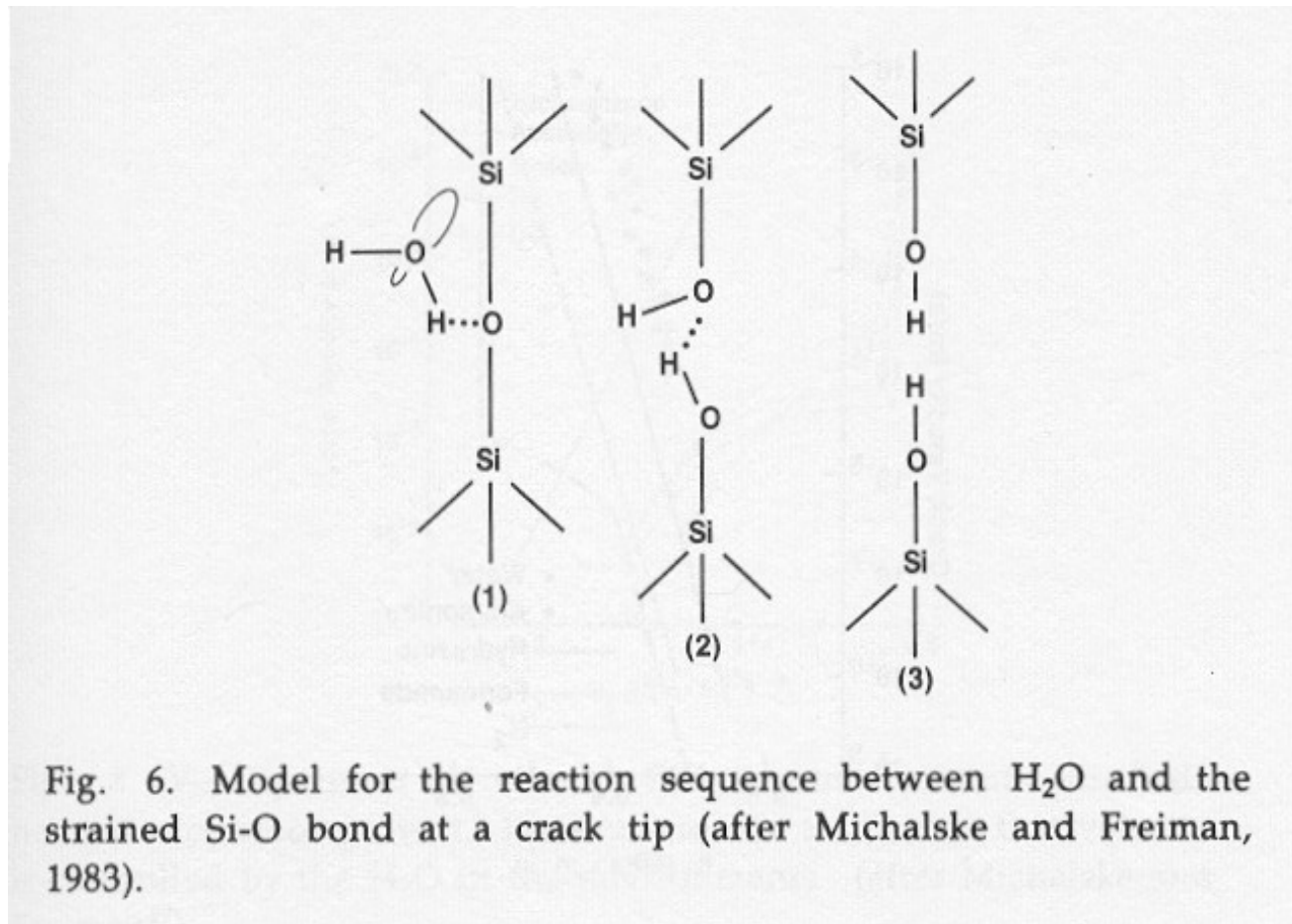
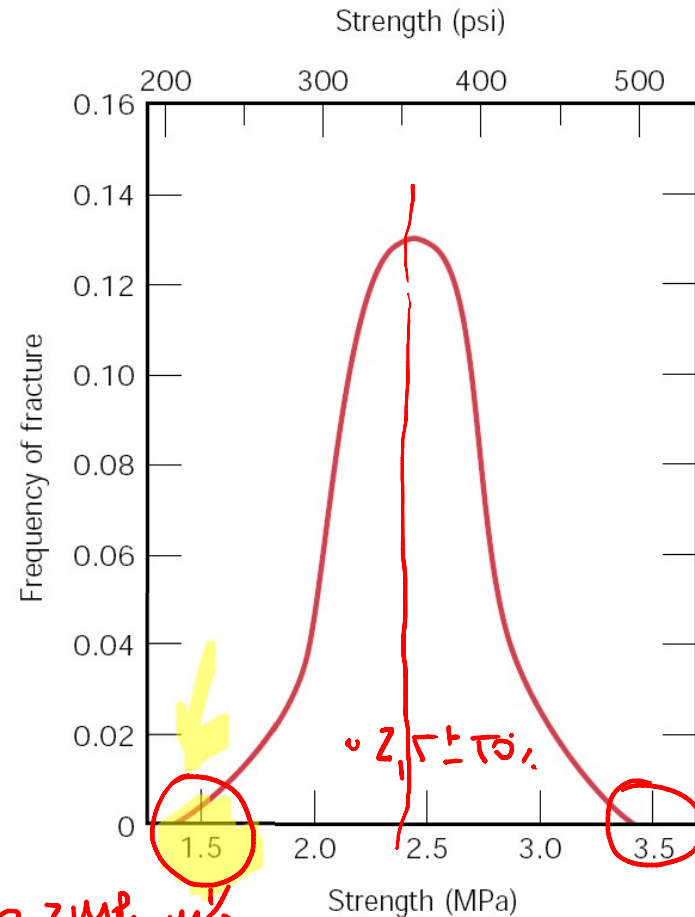


Fig. 6. Model for the reaction sequence between H₂O and the strained Si-O bond at a crack tip (after Michalske and Freiman, 1983).

Aspecto estatístico da fratura em materiais cerâmicos

- O tamanho máximo de um defeito **depende da técnica de fabricação e de tratamentos subseqüentes**, e pode variar muito de amostra para amostra
- A resistência à fratura também **depende do tamanho ou volume do material** empregado
- Quanto maior o volume, maior a probabilidade de encontrar um defeito crítico
- **Valores médios e fatores de segurança não são utilizados para projeto de materiais cerâmicos**
- Sempre que possível, materiais cerâmicos são melhor aplicados e ensaiados sob **compressão**



$$C = \frac{1}{\pi} \left(\frac{0,2}{1,12 \cdot 3,5} \right)^2 = 0,8$$

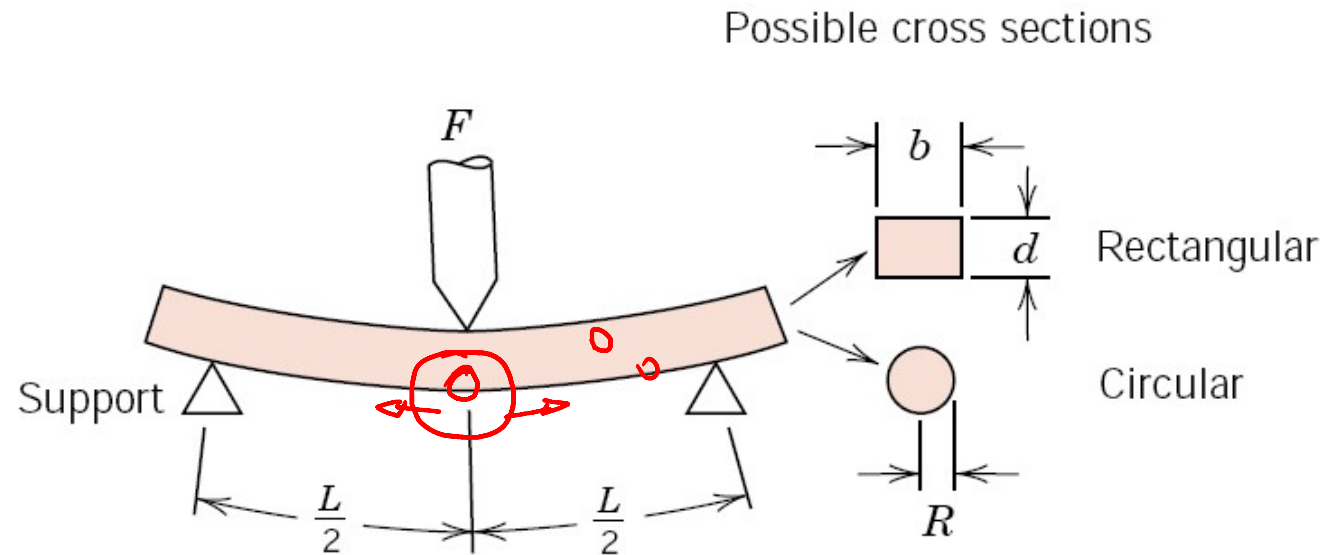
$$C = \frac{1}{\pi} \left(\frac{0,2}{1,12 \cdot 1,5} \right)^2$$

$$C = 4,5 \mu m$$

$$K_{Ic} = 0,2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$$

Distribuição de freqüência da resistência à fratura de um cimento portland

Ensaio mecânico para cerâmicas – flexão em três pontos



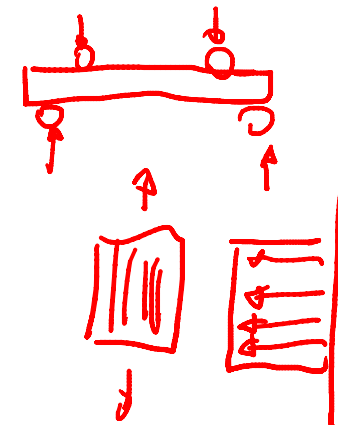
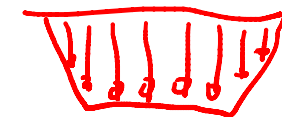
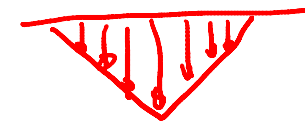
$$\sigma = \text{stress} = \frac{Mc}{I}$$

where M = maximum bending moment

c = distance from center of specimen to outer fibers

I = moment of inertia of cross section

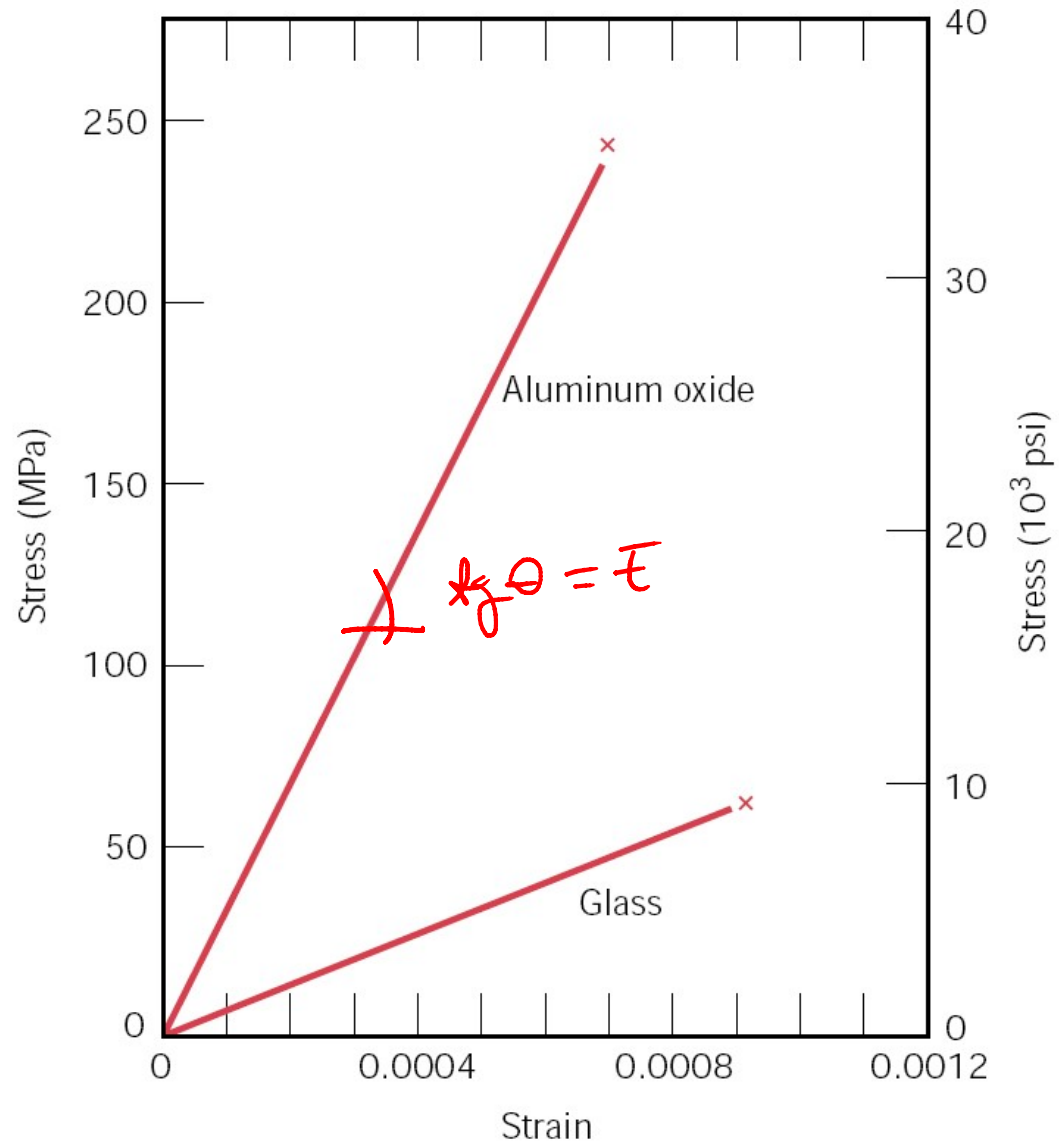
F = applied load



$$\sigma_t < \sigma_{4P} < \sigma_{3P}$$

	$\frac{M}{FL}$	$\frac{c}{d}$	$\frac{I}{bd^3}$	$\frac{\sigma}{3FL/2bd^2}$
Rectangular	$\frac{FL}{4}$	$\frac{d}{2}$	$\frac{bd^3}{12}$	$\frac{3FL}{2bd^2}$
Circular	$\frac{FL}{4}$	R	$\frac{\pi R^4}{4}$	$\frac{FL}{\pi R^3}$

Comportamento mecânico típico



Efeito da porosidade

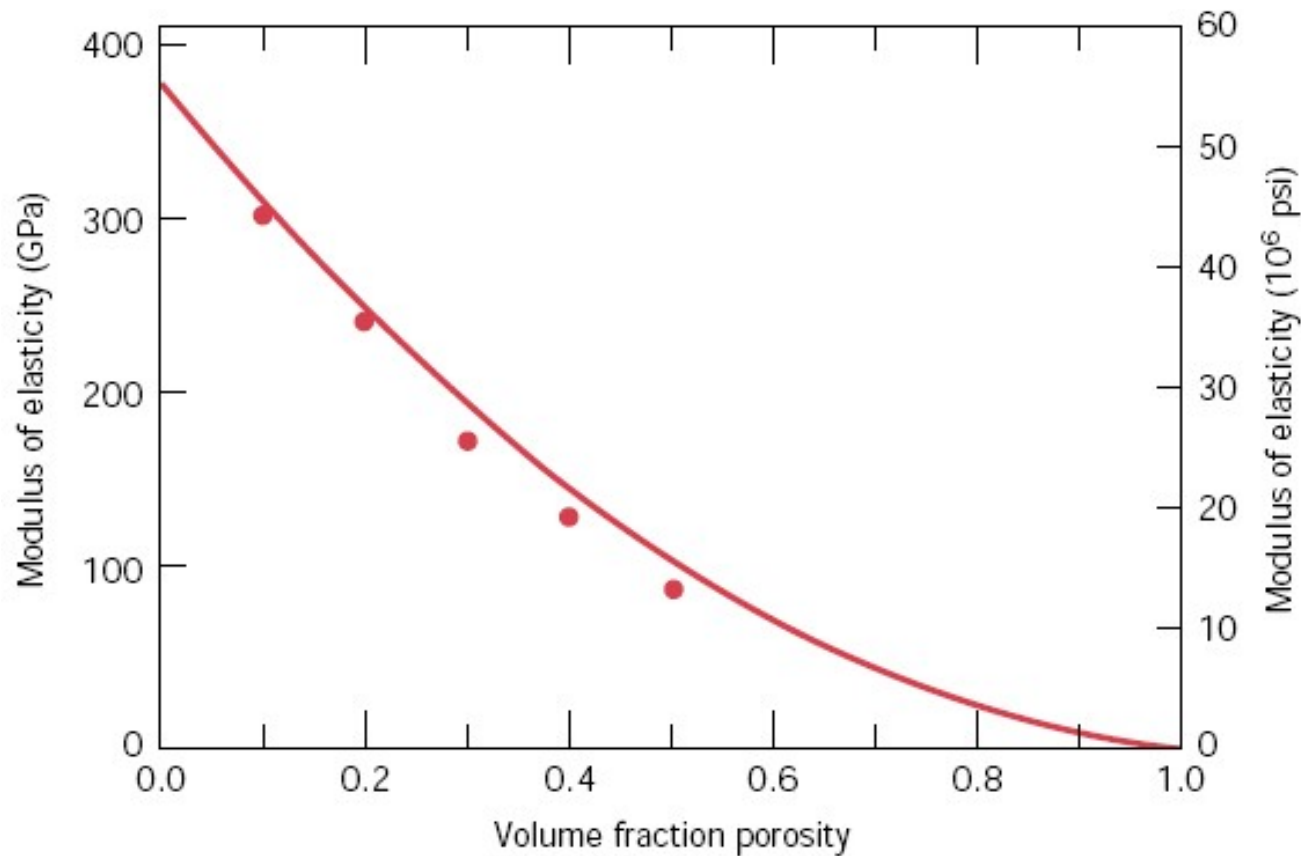


FIGURE 7.20 The influence of porosity on the modulus of elasticity for aluminum oxide at room temperature. The curve drawn is according to Equation 7.21. (From R. L. Coble and W. D. Kingery, "Effect of Porosity on Physical Properties of Sintered Alumina," *J. Am. Ceram. Soc.*, **39**, 11, Nov. 1956, p. 381. Reprinted by permission of the American Ceramic Society.)

Efeito da porosidade

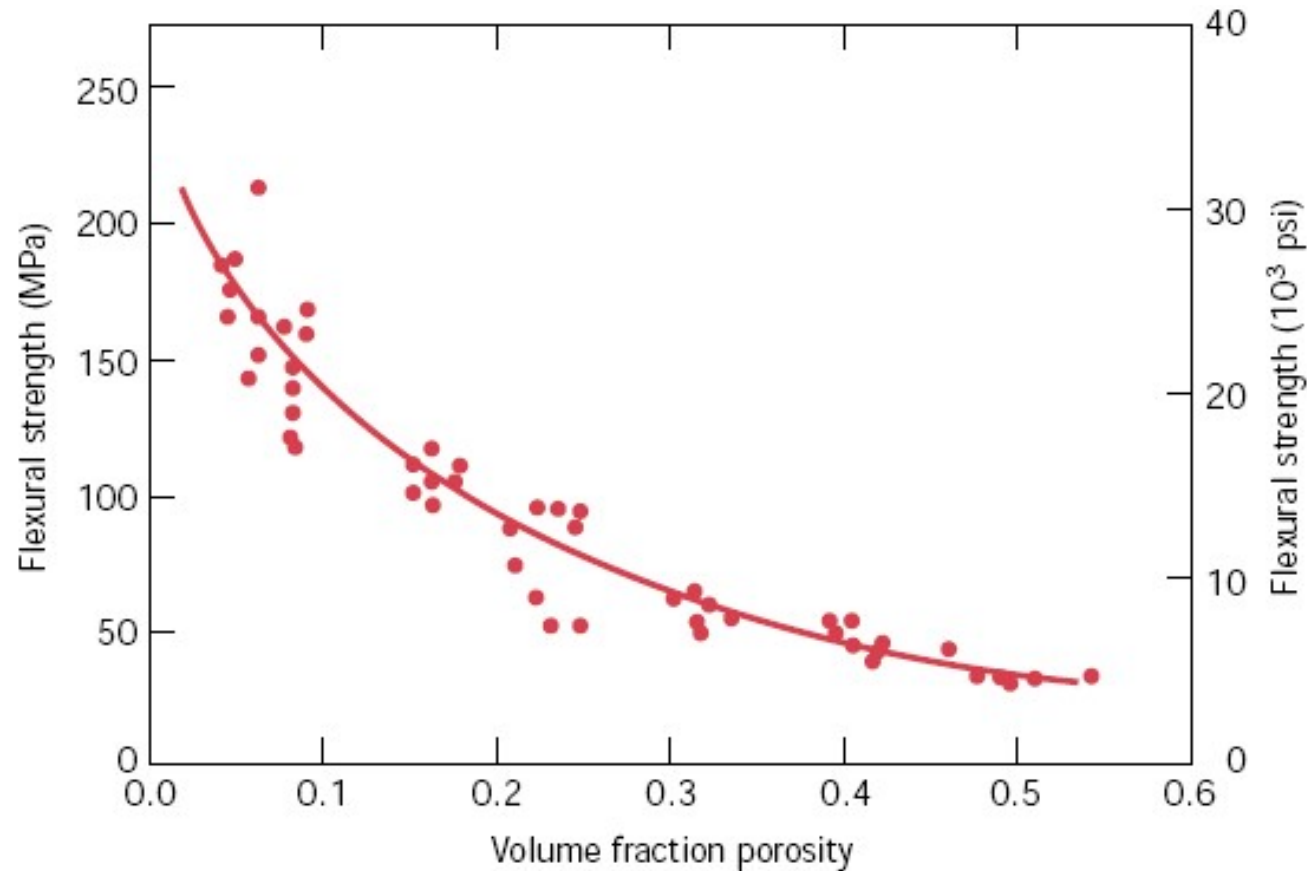


FIGURE 7.21 The influence of porosity on the flexural strength for aluminum oxide at room temperature. (From R. L. Coble and W. D. Kingery, "Effect of Porosity on Physical Properties of Sintered Alumina," *J. Am. Ceram. Soc.*, **39**, 11, Nov. 1956, p. 382. Reprinted by permission of the American Ceramic Society.)