

Propriedades Mecânicas de Cerâmicas

Fratura frágil

Prof. Dr. Eduardo Bellini Ferreira
Departamento de Engenharia de
Materiais – EESC/USP

“O Homem provavelmente deve sua própria existência a uma propriedade básica da matéria inorgânica, a fragilidade de alguns compostos iônicos.”

C. S. Smith. *Science*, 148:908 (1965)



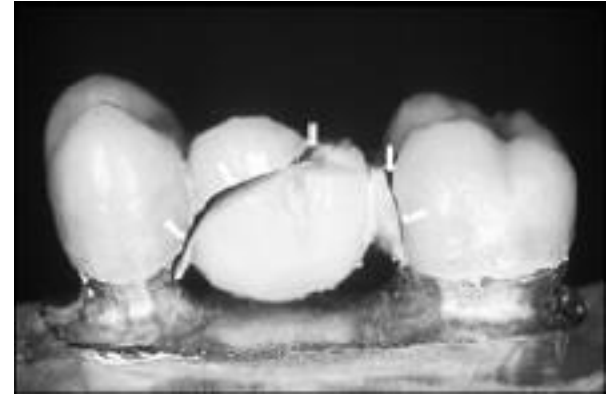
Vidros naturais – obsidianas



Idade da Pedra Lascada – até 10.000 a.C.

“Baixa **resistência mecânica** ou **rigidez elástica**, embora níveis mais altos dessas propriedades sejam desejáveis, não são a pior sina de um material de engenharia, mas sim a baixa **tenacidade**, ou seja, a **resistência à propagação de trincas**.”

J. E. Gordon, “The New Science of Engineering Materials”,
2a. edição, Princeton University Press,
Princeton, New Jersey, 1976



Propriedades Mecânicas de Cerâmicas

- O **processamento** e a **aplicação** de materiais cerâmicos são limitados ou estimulados por suas propriedades mecânicas.
- A principal **desvantagem** em relação aos metais e polímeros orgânicos é a propensão à **fratura catastrófica, fratura frágil**, com pouco ou nenhuma deformação plástica (**baixa ductilidade**).

Por que cerâmicas “quebram”?

*The careful text-books measure
(Let all who build beware!)
The load, the shock, the pressure
Material can bear.
So when the buckled girder
Lets down the grinding span.
The blame of loss, or murder.
Is laid upon the man.
Not on the stuff — the Man!*

**R. Kipling, “Hymn of the
Breaking Strain”**

***Os livros didáticos
cuidadosamente ensinam medir
(todos os que constróem,
cuidado!) a carga, o choque, a
pressão que os materiais podem
suportar.***

***Mas quando a viga enfraquecida
derruba o vão carcomido, a
culpa pelo prejuízo, ou morte,
recai sobre o homem, não sobre
as coisas – no Homem!***

R. Kipling, “Hymn of the Breaking Strain” (Hino da Tensão de Ruptura)

John Hancock Building, Boston, EUA



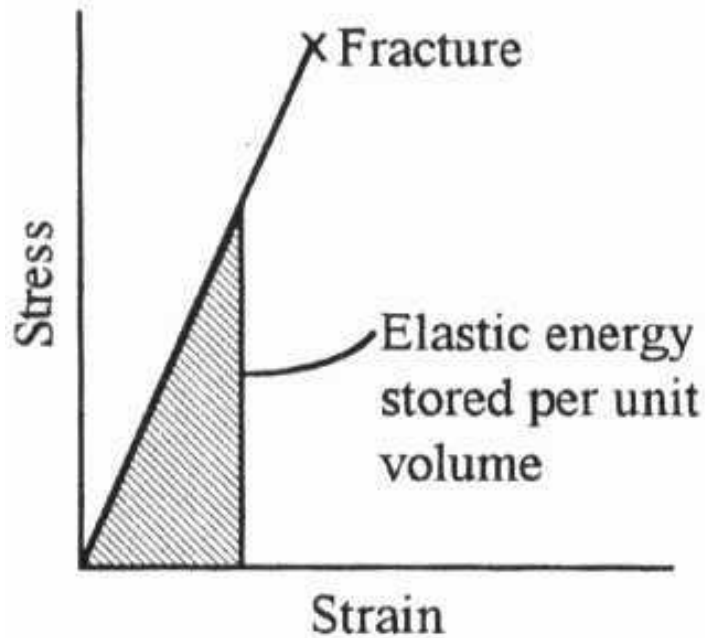
“The glass in question was from the 10,344 windows of the John Hancock Tower. They began to fail almost from the start. The crisis came in a winter gale on the night of Jan. 20, 1973, while the tower was still under construction. Gusts reached 75 miles per hour (~120 km/h) at the upper floors. Huge panels of glass, each weighing 500 pounds (~227 kg), shattered and dropped like sequins off a dress, smashing into other windows on their way down. In all, at least 65 fell.” (Robert Campbell, The Boston Globe, MARCH 3, 1995)

Por que insistimos em usar materiais cerâmicos?

- Cerâmicas possuem propriedades muito atraentes:
 - Dureza
 - Rigidez elástica
 - Resistência à oxidação
 - Resistência à fluência
 - Refratariedade
 - Eletrônicas e ópticas
 - Bioatividade
 - Leveza
 - E, por que não, *resistência mecânica!*

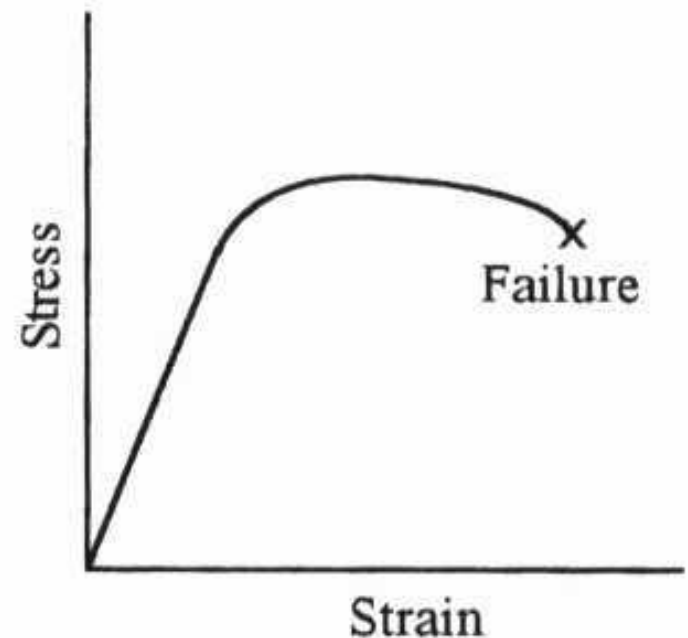


Curvas tensão-deformação típicas



(a)

Materiais frágeis
Cerâmicas
Vidros



(b)

Materiais dúcteis
Metais
Polímeros acima de T_g

Exemplos de aplicações onde a fratura frágil faz a diferença



Fratura frágil aliada à alta dureza, leveza (baixa densidade) e transparência!

- Comercialmente conhecida como **ALON**, a armadura de “alumínio” transparente na verdade é de **oxinitreto de alumínio**, uma combinação de alumínio, oxigênio e nitrogênio.
- Para a obtenção de uma **placa dura e transparente**, a fabricação começa com um **pó**!



Macor™

46% SiO_2

17% MgO

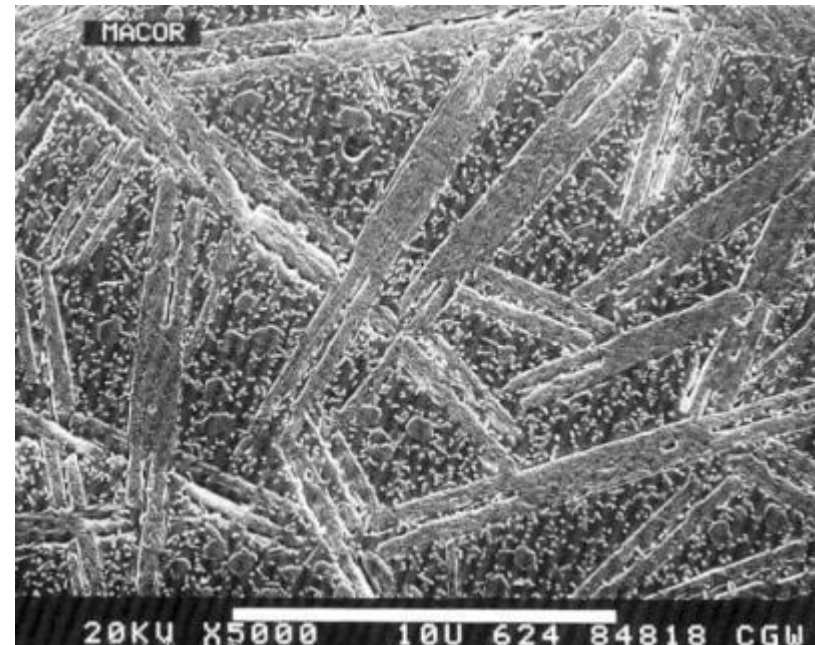
16% Al_2O_3

10% K_2O

7% B_2O_3

4% F

- Extremamente usinável, o **Macor™** permite a fabricação de formatos complicadas e tolerâncias estreitas: $\pm 0,013$ mm no comprimento, $< 0,5$ μm de acabamento superficial e até $0,013$ μm em superfícies polidas.
- Continuamente estável até 800°C , e picos de até 1000°C sem carga
- Diferente de materiais dúcteis, não apresenta fluência nem se deforma.
- Coeficiente de expansão térmica adequado à junções com a maioria dos metais e vidros de vedação.
- Excelente isolante elétrico em altas tensões e em um amplo espectro de frequências, particularmente em altas temperaturas.



Macor®



Aplicações:

- Ambientes de vácuo constantes e ultra altos
- Tecnologia laser
- Semicondutor / Eletrônico
- Aeroespacial / espaço
- Equipamento médico / laboratorial
- Luminárias
- Químico
- Automóvel
- Militares
- Nuclear

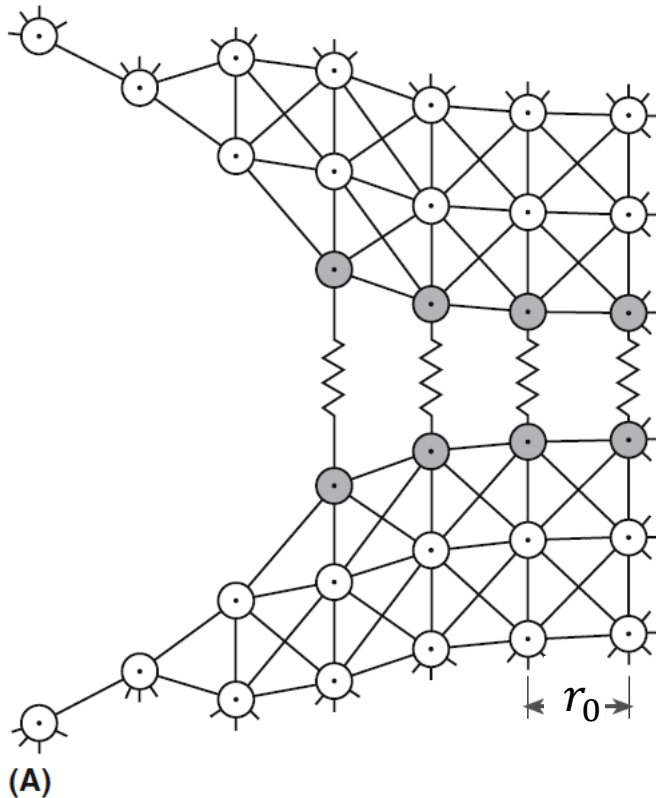
Mas em geral, na maioria das aplicações, temos que nos preocupar com a fragilidade dos materiais...



<http://www.gettyimages.pt/detail/foto/broken-ceramic-coffee-mug-imagem-royalty-free/121988299>

<http://imgarcade.com/1/broken-glass-bottle/>

Resistência mecânica teórica



Modelo da extremidade de uma trinca. O espaçamento interplanar é r_0 .

- Uma estimativa da resistência teórica de um material pode ser obtida a partir da resistência de suas ligações interatômicas.
- A resistência teórica de um corpo é a tensão necessária para romper ligações químicas e separá-lo em duas partes.
- Considerando que a maioria das ligações rompem quando esticadas em aproximadamente 25% da distância de equilíbrio no sólido:
- $r_{\text{fratura}} \approx 1,25r_0$

Resistência mecânica teórica

- *Lei de Hooke*

$$\sigma_{app} = Y \varepsilon$$

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0}$$

$$F = S_0(r - r_0)$$

S_0 é a rigidez da ligação:

$$S_0 = \left(\frac{dF}{dr} \right)_{r=r_0}$$

$$\frac{F}{r_0^2} = \frac{S_0(r - r_0)}{r_0^2} = \frac{S_0}{r_0} \frac{(r - r_0)}{r_0}$$

$$\therefore Y \approx \frac{S_0}{r_0}$$

Como $F(r) = \frac{dE(r)}{dr}$, então

$$Y \approx \frac{1}{r_0} \left(\frac{dF}{dr} \right)_{r=r_0} = \frac{1}{r_0} \left(\frac{d^2E}{dr^2} \right)_{r=r_0}$$

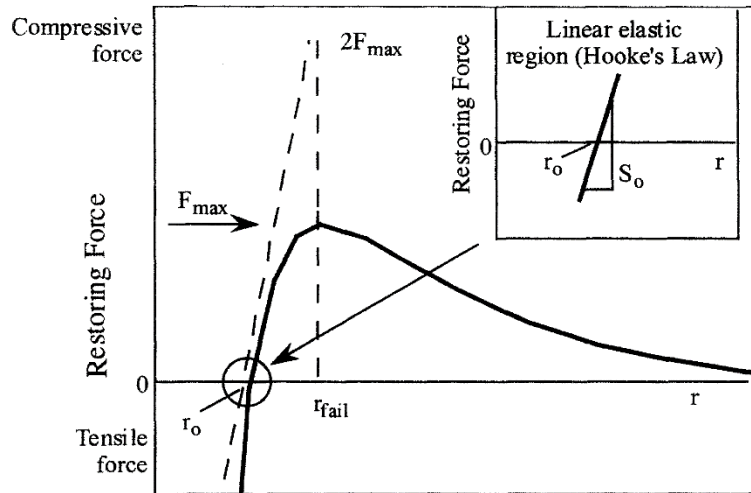


Figure 4.6 Typical force–distance curve. Slope of line going through r_0 is the stiffness of the bond S_0 . It is assumed in this construction that the maximum force is related to the stiffness as shown. This is quite approximate but serves to illustrate the relationship between stiffness and theoretical strength i.e. Eq. (4.12).

Resistência mecânica teórica

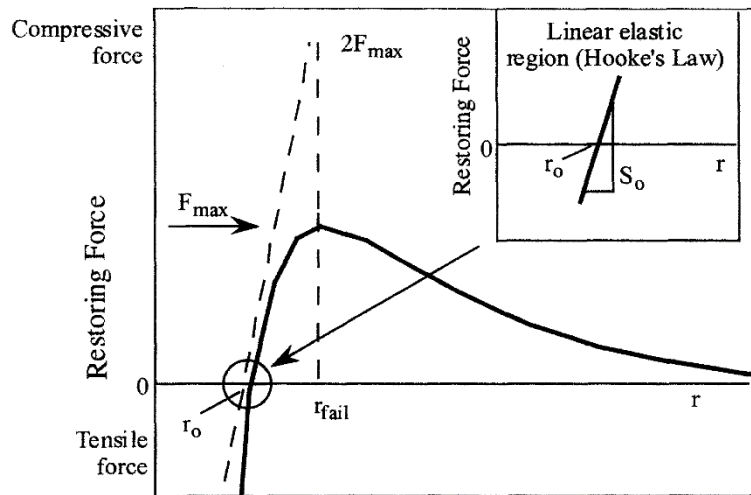


Figure 4.6 Typical force–distance curve. Slope of line going through r_0 is the stiffness of the bond S_0 . It is assumed in this construction that the maximum force is related to the stiffness as shown. This is quite approximate but serves to illustrate the relationship between stiffness and theoretical strength i.e. Eq. (4.12).

$$F = S_0(r - r_0)$$

$$S_0 \approx \frac{2F_{max}}{(r_{fratura} - r_0)}$$

$$\approx \frac{2F_{max}}{(1,25r_0 - r_0)}$$

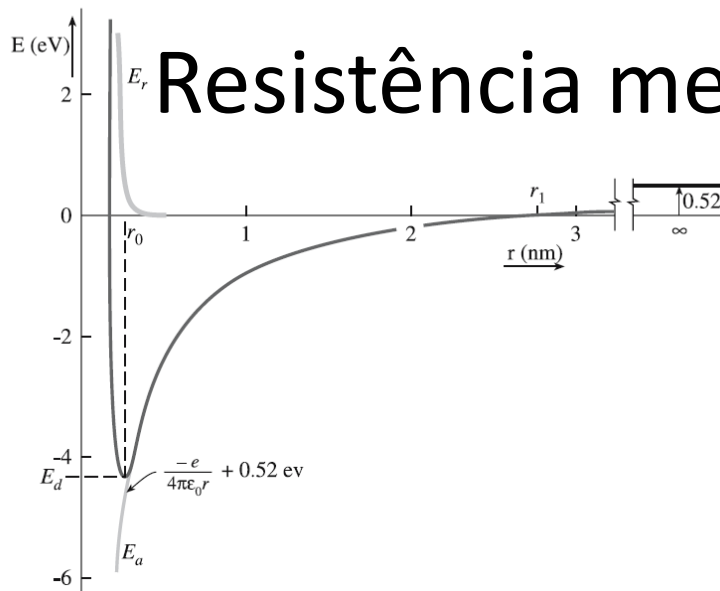
$$\frac{S_0}{r_0} \approx Y \approx \frac{1}{r_0} \frac{2F_{max}}{r_0(1,25 - 1)} = \frac{8F_{max}}{r_0^2}$$

Lembrando que $\sigma_{max} \approx \frac{F_{max}}{r_0^2}$

$$\sigma_{max} \approx \frac{Y}{8}$$

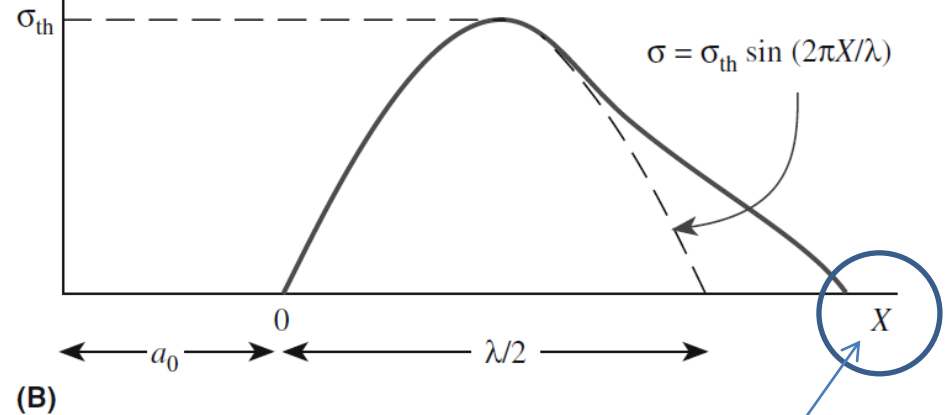
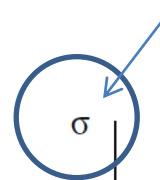
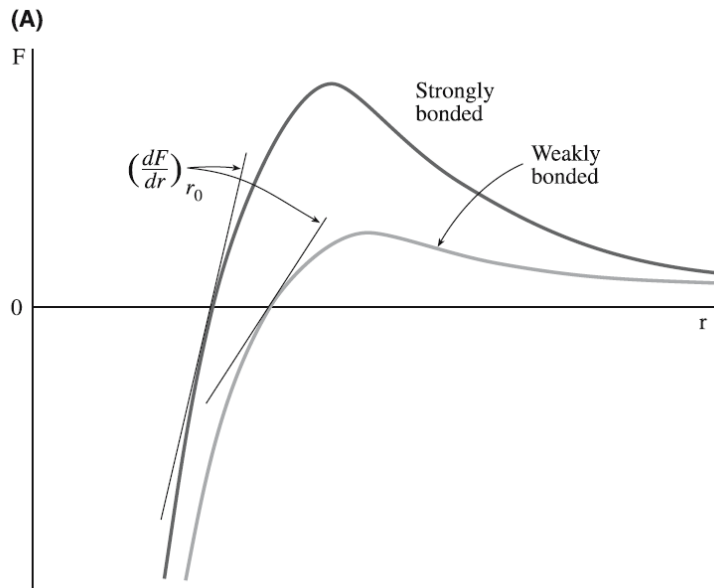
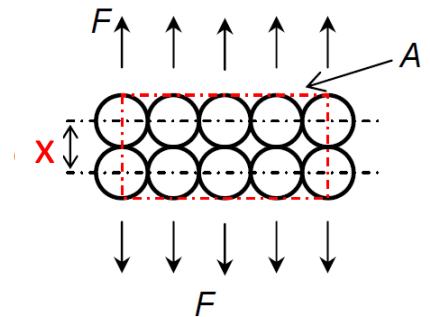
Estimativas a partir da energia de ligação indicam

$$\sigma_{max} \approx \frac{Y}{15}$$



Resistência mecânica teórica (outra)

Tensão = força necessária para afastar os planos atômicos dividida pela área da superfície planar.



Distância entre planos.

FIGURE 4.1 (a) Bond-energy curve for KCl. At infinite separation, the energy is that required to form K^+ and Cl^- from the corresponding atoms. (b) Force-distance curves for two materials: one where the bonding is strong and one where it is weak.

Resistência mecânica teórica

$$\sigma = \sigma_{th} \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right)$$

$$2\gamma = \int_0^{\lambda/2} \sigma_{th} \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) dx = \frac{\lambda \sigma_{th}}{\pi}$$

rearranjando : $\sigma_{th} = \frac{2\pi\gamma}{\lambda}$

lei de Hooke : $\sigma = E\varepsilon = E \frac{x}{a_0}$

então : $\frac{d\sigma}{dx} = \frac{E}{a_0}$

para deslocamentos pequenos : $\sin(x) \approx x$

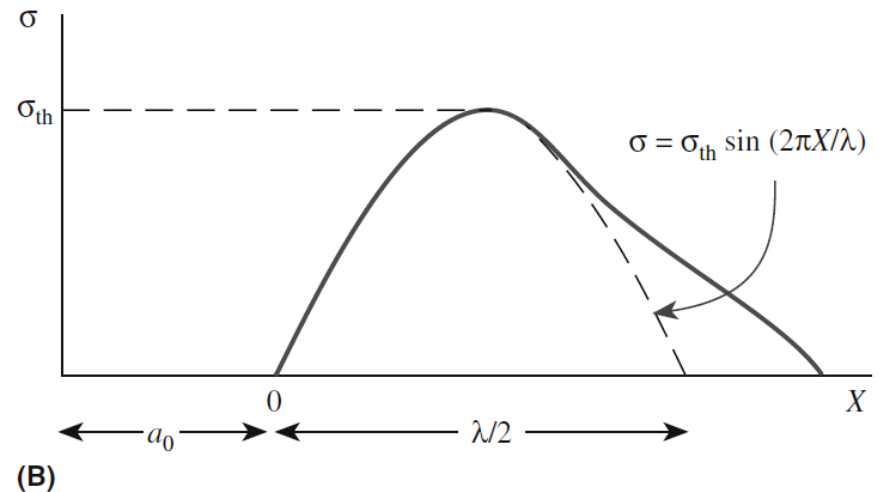
então : $\frac{d\sigma}{dx} = \frac{2\pi\sigma_{th}}{\lambda}$

$$\frac{2\pi\sigma_{th}}{\lambda} = \frac{E}{a_0}$$

$$\therefore \sigma_{th} = \sqrt{\frac{E\gamma}{a_0}}$$

Equação de Orowan

O trabalho necessário para separar dois planos de átomos até o limiar da fratura (área sob a curva) deve ser igual à energia necessária para criar duas novas superfícies no material (2γ).



A resistência teórica depende:

- Energia superficial
- Módulo de elasticidade
- Espaçamento interatômico

Resistência mecânica teórica

$$\sigma_t = \left(\frac{E \gamma}{a_o} \right)^{\frac{1}{2}}$$

E = módulo elástico
 γ = energia superficial
 a_o = distância interatômica

Para vidro de janela:

- $E = 70 \text{ GPa}$, $\gamma = 3 \text{ J/m}^2$ e $a_o = 2 \text{ \AA}$
- Fazendo as contas: $\sigma_{th} \cong 32 \text{ GPa}!!!$
- Comparado com dados experimentais: $\sigma_{exp} \cong 70 \text{ MPa}$,
- Os valores são muito, muito discrepantes: $\sigma_t \cong 500 \sigma_e!!!!$

resistência teórica :

$$\sigma_{th} \approx \frac{E}{5} a \frac{E}{10}$$

resistência experimental :

$$\sigma_{exp} \approx \frac{E}{100} a \frac{E}{1000}$$

Teoria vs. Experimento

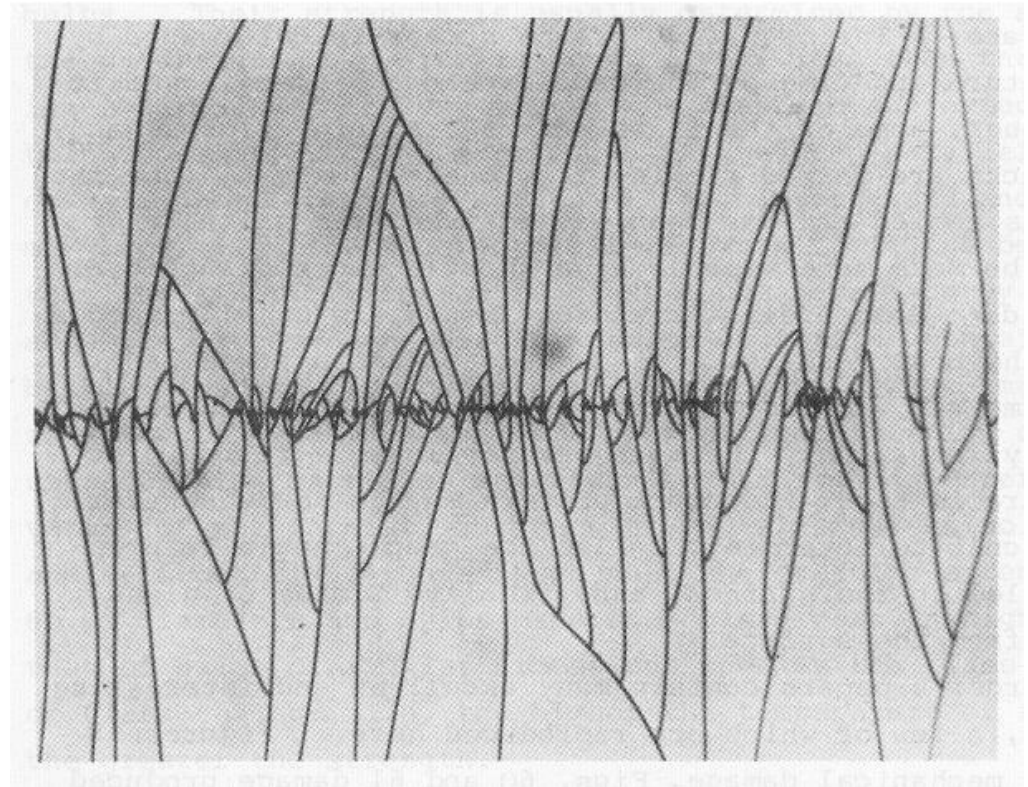
TABLE 18.2 Values of Theoretical Strength

<i>Material</i>	<i>Direction</i>	E (GPa)	γ (J/m ²)	σ_{th} (GPa)
α -Fe	<111>	132	2	30
Si	<111>	188	1.2	32
NaCl	<100>	44	0.25	6.3
MgO	<100>	245	1.2	37
Al ₂ O ₃	<0001>	460	1	46

Material	E (GPa)	σ_{max} ~ E/10 (GPa)	Resistência mecânica de grandes amostras (policristalinas, vítreas) (GPa)	Resistência mecânica de pequenas amostras (fibras , whiskers) (GPa)
Al ₂ O ₃	380	38	0,4	16
SiC	440	44	0,7	21
Vidro	50-80	5-8	0,05-0,08	4-5

Efeito de trincas e defeitos...

- Defeitos superficiais causados pelo contato acidental com partículas de poeira, outra superfície sólida ou até por corrosão pela umidade do ar podem resultar em redução significativa da resistência mecânica.
- Tais defeitos agem como concentradores de tensão (Griffith-1920).



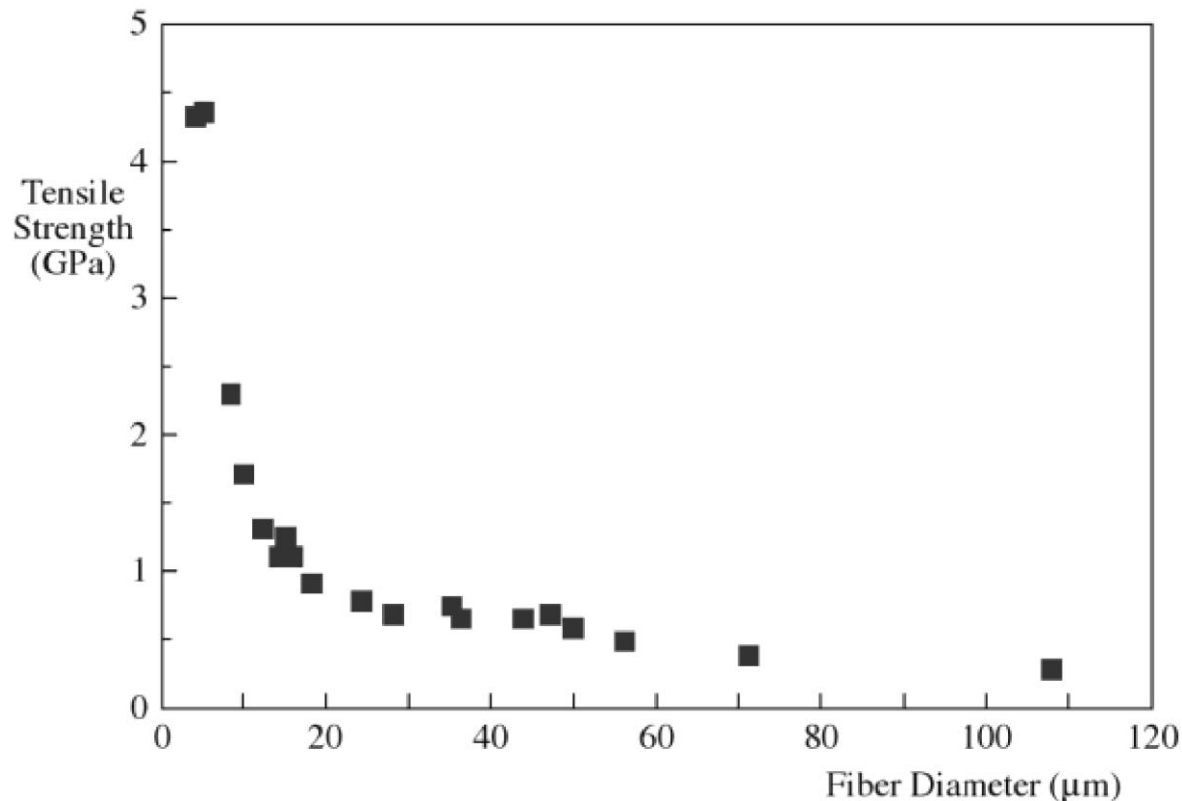
100 μm

Defeito produzido pela ponta de uma fibra de vidro passada sobre uma lâmina de microscópio.

F. M. Ernsberger, Proc. R. Soc. A257 (1960) 213-223

F. M. Ernsberger in Advances in Glass Technology (1962) 511-524, Plenum Press, New York

Mecanismo de fratura frágil em vidros: o efeito de defeitos como concentradores de tensão



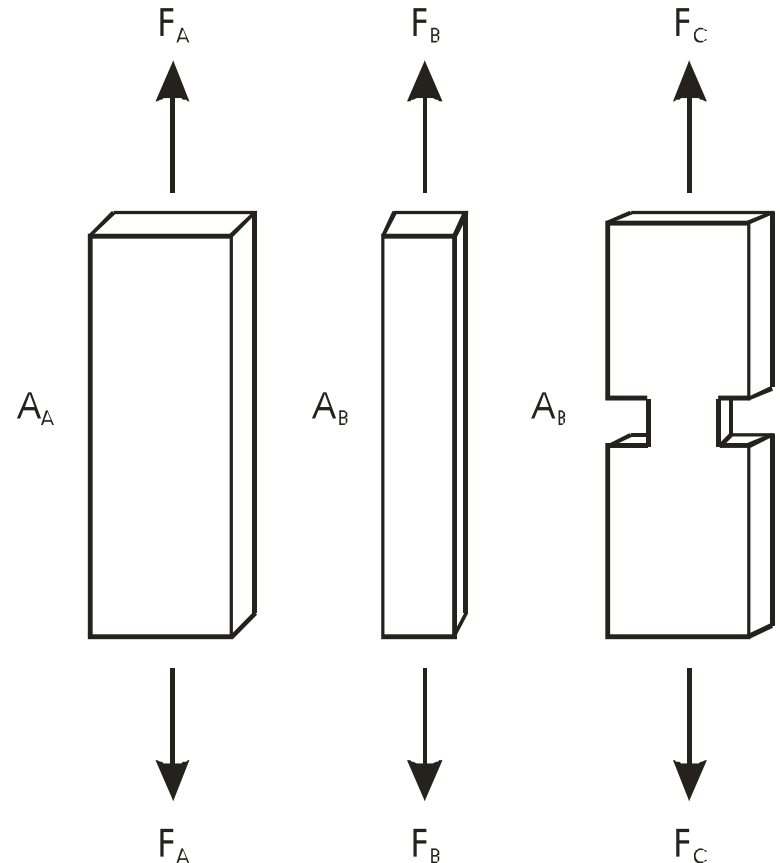
- Quanto menor a fibra:
 - menor a probabilidade de haver trincas
 - também diminui o tamanho da maior trinca
 - há uma relação direta entre a presença de trincas ou defeitos e a probabilidade do material fraturar

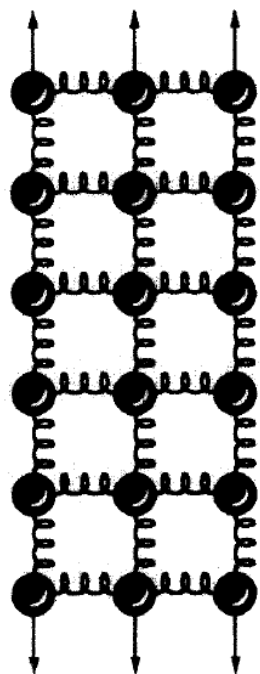
O QUE ACONTECE?

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

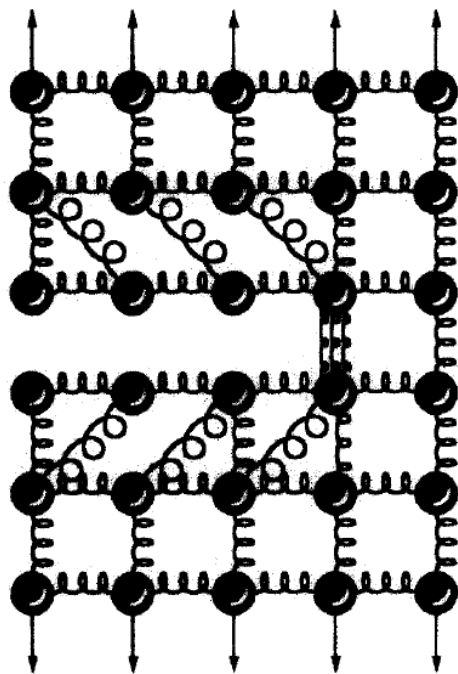
$$\sigma_A = \sigma_B < \sigma_C$$

A explicação é a presença de defeitos, principalmente os superficiais!

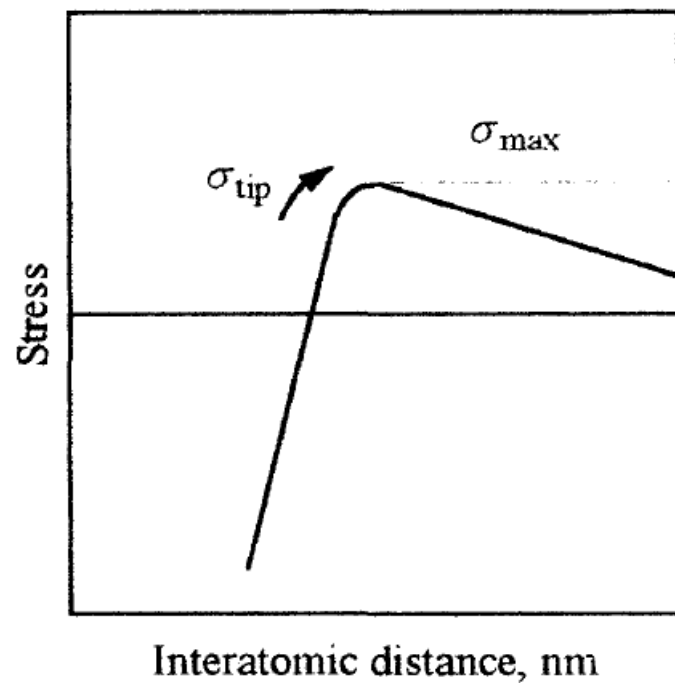




(a)



(b)



(c)

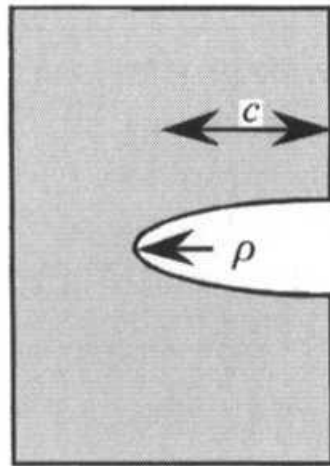
Defeitos superficiais

O fato da tensão de fratura medida em vidros ser normalmente muito menor que o valor teórico é explicado pela presença de trincas superficiais microscópicas.

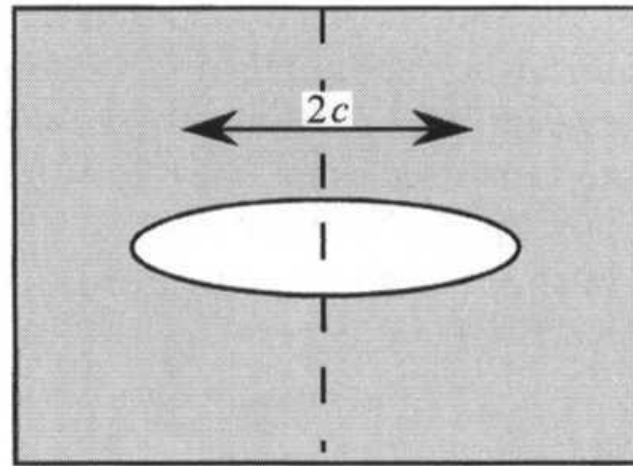
Essas trincas agem como concentradores de tensão.

A tensão na extremidade da trinca é muito maior que a tensão aplicada.

Longe da trinca a tensão tende a ser igual à tensão aplicada.



(a)



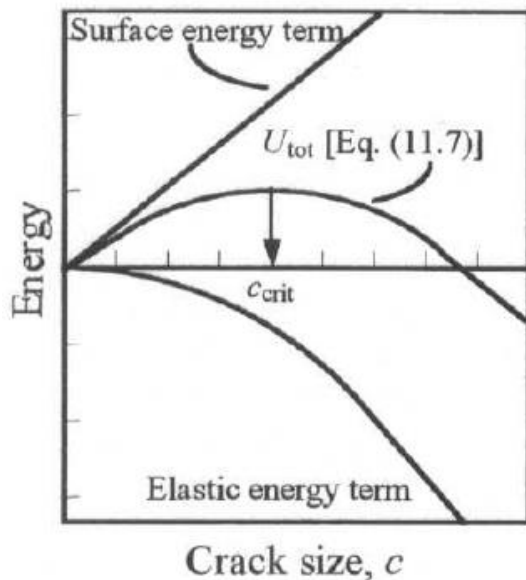
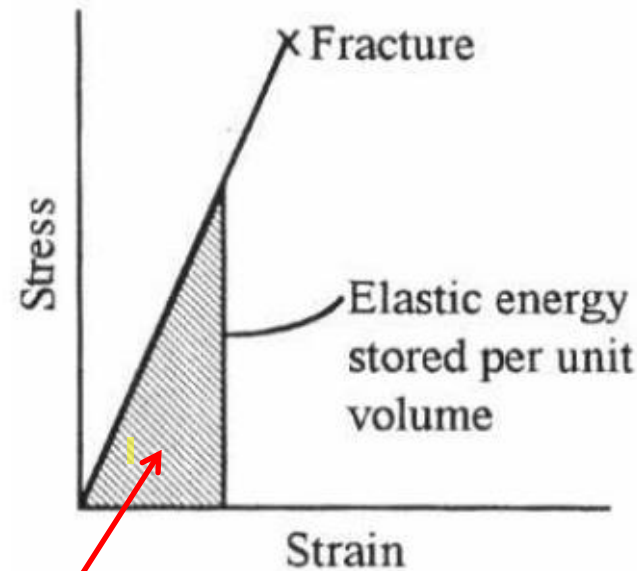
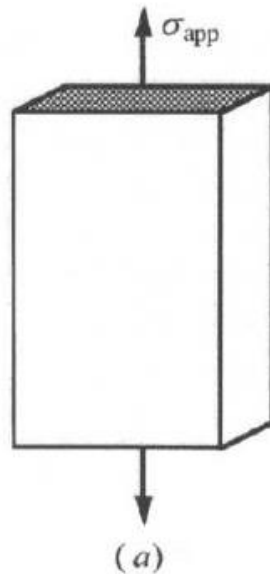
(b)

(a) Trinca superficial de comprimento c e raio de curvatura ρ . (b) trinca no interior de comprimento $2c$. Note que do ponto de vista da fratura elas são equivalentes.

Critério de Griffith para fratura

- Balanço de energia:
 - uma trinca irá propagar quando a energia adicional devido à formação das superfícies de fratura, E_s , é contrabalanceada pela diminuição da energia elástica armazenada nas ligações interatômicas esticadas (área sob a curva tensão-deformação).
- A fratura ocorre quando a taxa de dissipação da energia elástica é maior que a taxa na qual ela é consumida para formar novas superfícies.

Energia de deformação – sem defeito

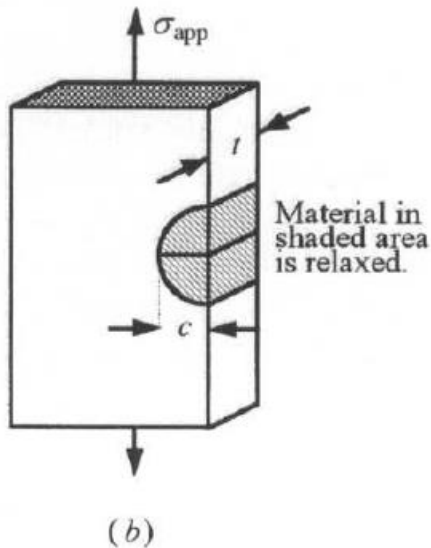


$$\boxed{E_e} = \frac{1}{2} \varepsilon \sigma_{ap} = \frac{1}{2} \frac{\sigma_{ap}^2}{E}$$

$$U = U_0 + V_0 E_e = U_0 + \frac{V_0 \sigma_{ap}^2}{2E}$$

U = energia interna do sistema

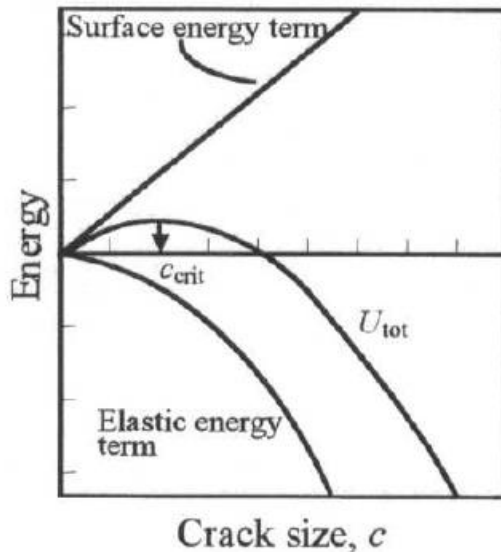
Energia de deformação – com defeito



$$U_{\text{deformado}} = U_0 + \frac{V_0 \sigma_{\text{ap}}^2}{2E} - \frac{\sigma_{\text{ap}}^2}{2E} \left[\frac{\pi c^2 t}{2} \right]$$

$$E_s = 2\gamma ct$$

$$U_{\text{total}} = U_0 + \frac{V_0 \sigma_{\text{ap}}^2}{2E} - \frac{\sigma_{\text{ap}}^2}{2E} \left[\frac{\pi c^2 t}{2} \right] + 2\gamma ct$$



Diferenciando em relação a c e igualando a zero para encontrar o ponto de máximo:

$$\sigma_f \sqrt{\pi c_{\text{crítico}}} = 2\sqrt{\gamma E}$$

Um cálculo mais exato fornece

$$\sigma_f \sqrt{\pi c_{\text{crítico}}} \geq \sqrt{2\gamma E}$$

$$K_I \geq K_{IC}$$

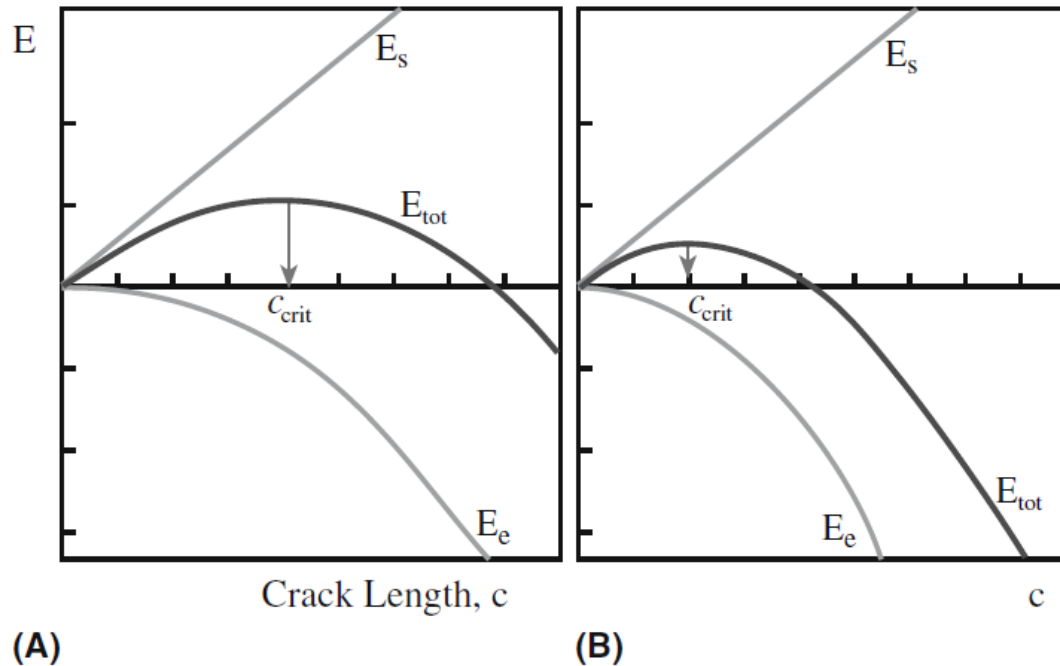


FIGURE 18.4 Plots of energy versus crack length. E_{tot} is the sum of E_s and E_e . The right plot corresponds to a greater applied stress (on this scale the stress is greater by $\sqrt{2}$ and c_{crit} is correspondingly reduced by a factor of 2).

- Uma trinca menor que $c_{crítico}$ é estável, então a energia de superfície domina e a trinca não propaga.
- Uma trinca maior que $c_{crítico}$ é instável, a liberação de energia elástica armazenada prevalece e a fratura é catastrófica.

Equação de Griffith

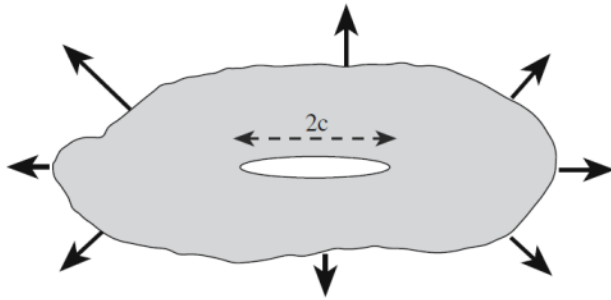


FIGURE 18.5 The "Griffith" crack of length $2c$.

A resistência mecânica (tensão de fratura) depende de:

- Módulo de Young (propriedade do material)
- Energia superficial (propriedade do material)
- Comprimento da trinca (processo!)

$$\frac{dE_e}{dc} = \frac{dE_s}{dc}$$

$$E_e = \frac{\pi \sigma^2 c^2}{E}$$

$$E_s = 4c\gamma$$

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi c}}$$

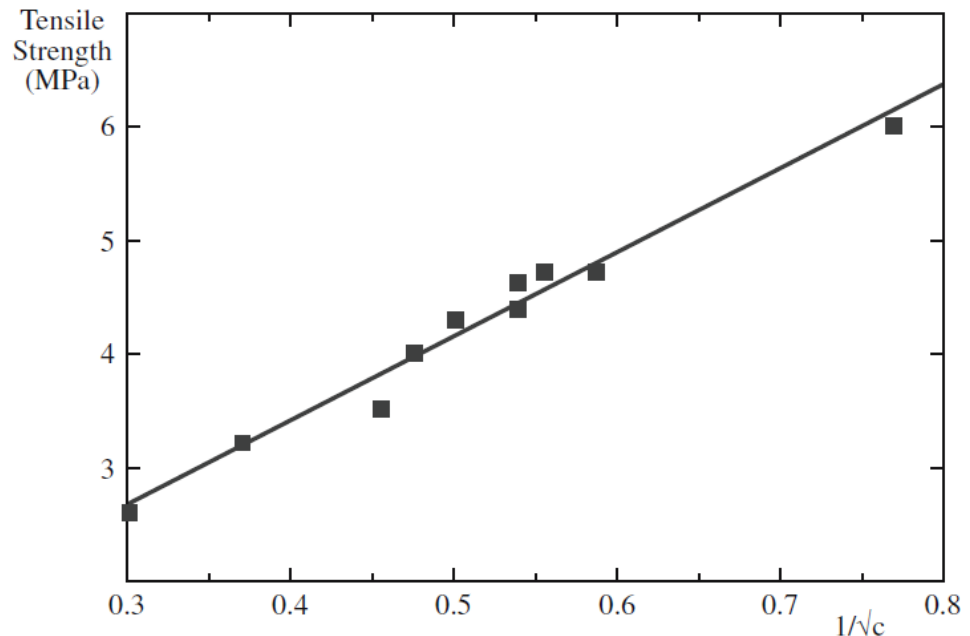
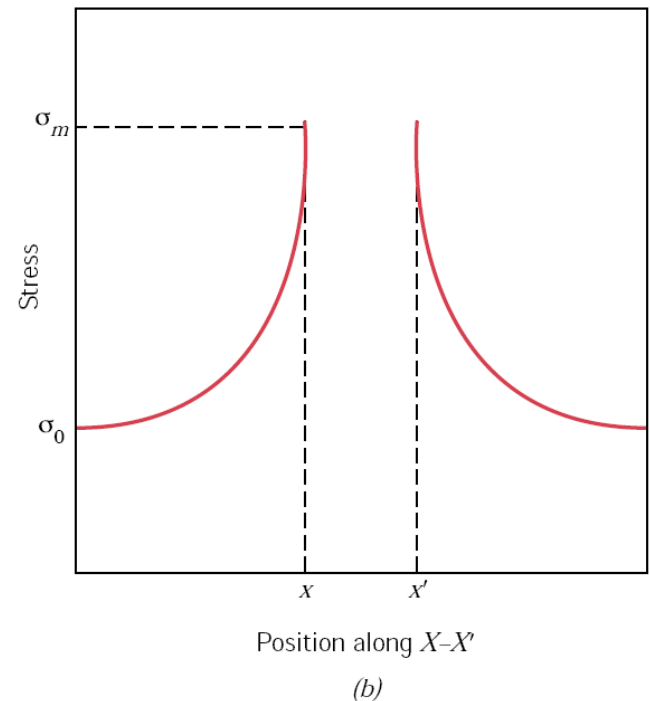
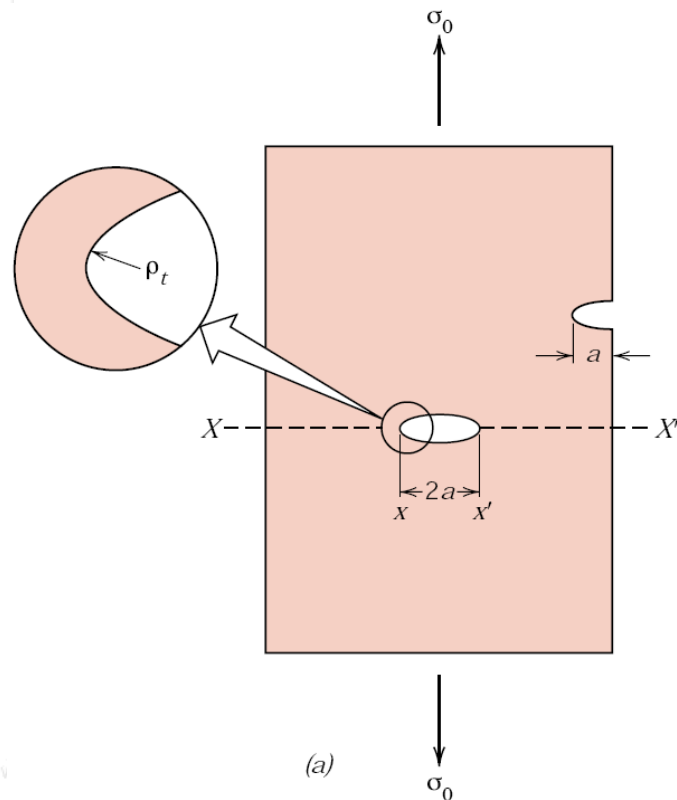
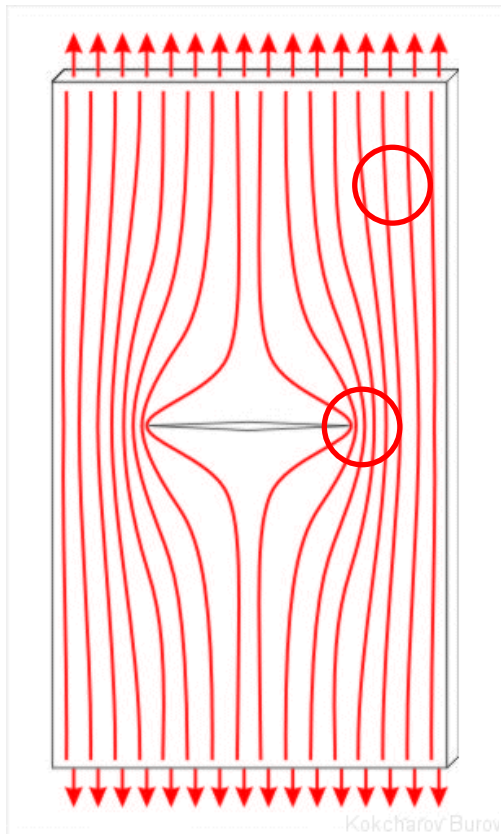


FIGURE 18.6 Verification of Eq. 18.12. The tensile strength of glass as a function of crack length.

Concentração de tensão efeito da curvatura na ponta da trinca



Efeito da curvatura na ponta da trinca

– uma outra abordagem para σ_f

$$\sigma_{yy} = \sigma_a \left[1 + \left(\frac{2c}{b} \right) \right]$$

fazendo $\rho = \frac{b^2}{c}$

$$\sigma_{yy} = \sigma_a \left[1 + 2 \left(\frac{c}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$$

considerando $c \gg \rho$

$$\sigma_{yy} = 2\sigma_a \left(\frac{c}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\sigma_f = \frac{1}{2} \left(\frac{\rho}{c} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \sigma_t = \frac{1}{2} \left(\frac{\rho}{c} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{E\gamma}{a_0} \right)^{\frac{1}{2}}$$

considerando $\rho \cong a_0$ ou $\rho \cong \frac{a_0}{2}$ teremos

$$\sigma_f = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{E\gamma}{c}} \quad \text{ou} \quad \sigma_f = \sqrt{\frac{E\gamma}{8c}}$$

Mathematical model for elliptical hole developed by Inglis

- Inglis approximated crack as an extremely flat ellipse.
- His analysis began with circular hole and then compressing it to form an ellipse.

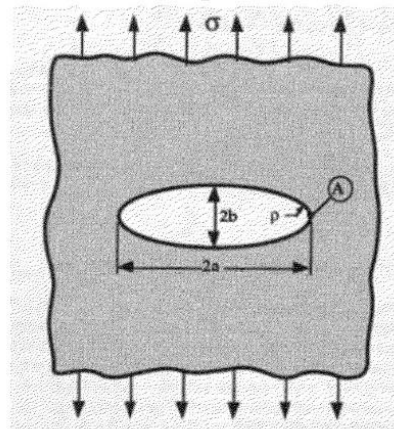


Fig. Elliptical hole in flat plate

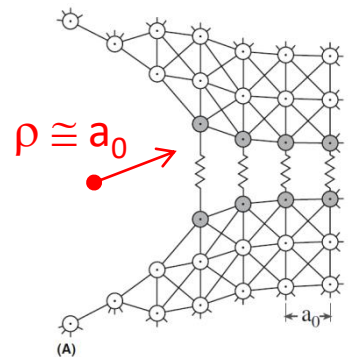
$$\sigma_A = \sigma \left(1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}} \right)$$

Where,

$$\rho = \frac{b^2}{a}$$

Stress Concentration Factor

$$k_t = \frac{\sigma_A}{\sigma}$$



Mecânica da fratura para materiais idealmente frágeis

$$\sigma_{ap} \sqrt{\pi a} \equiv K_I$$

a = tamanho do defeito antes da fratura

K = fator de intensidade de tensão

$$\sigma_f \sqrt{\pi c} = \sqrt{2\gamma E} \equiv K_{IC}$$

$$\sigma = \frac{1}{Y} \frac{K_I}{\sqrt{\pi a}} \rightarrow \sigma_f = \frac{1}{Y} \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi c}}$$

$$a \rightarrow c$$

$$\sigma \rightarrow \sigma_f$$

$$K_I \rightarrow K_{IC}$$

K_{IC} é uma propriedade do material

K_{IC} é o fator de intensidade de tensão crítico
ou a **tenacidade à fratura**

Para materiais onde a deformação plástica ou outros mecanismos de dissipação de energia são importantes:

$$K_{IC} = \sqrt{EG_c}$$

G_c é a tenacidade

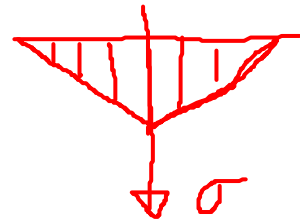
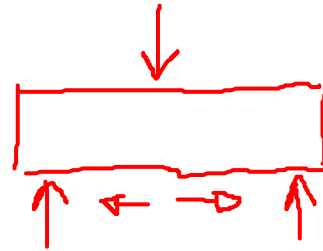
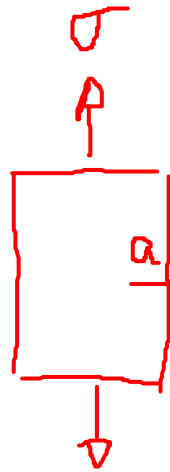
ou trabalho total para fratura

Y é uma constante adimensional (aproximadamente igual a 1 para defeitos no volume de placas e 1,12 para defeitos na superfície) que depende do formato do corpo de prova, da geometria da trinca e de seu tamanho relativo ao tamanho do corpo de prova.

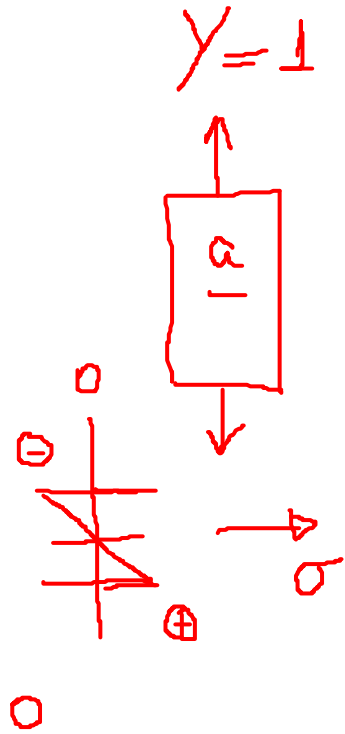


$$\begin{aligned}
 & \text{flexão} \\
 & C = a \text{ sup} \\
 \hline
 & 2C = a \text{ volume} \\
 & C = \frac{a}{2}
 \end{aligned}$$

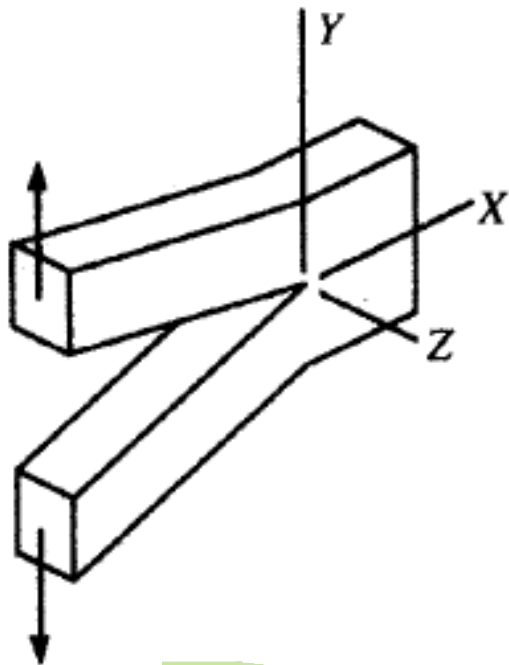
$$Y = 1,12$$



$$Y = 1,12$$

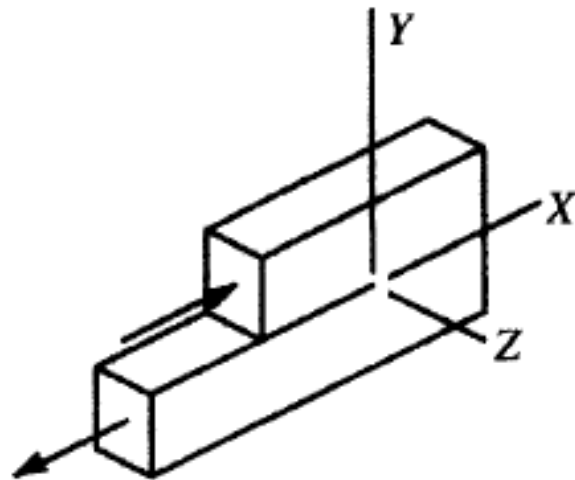


Modos de fratura



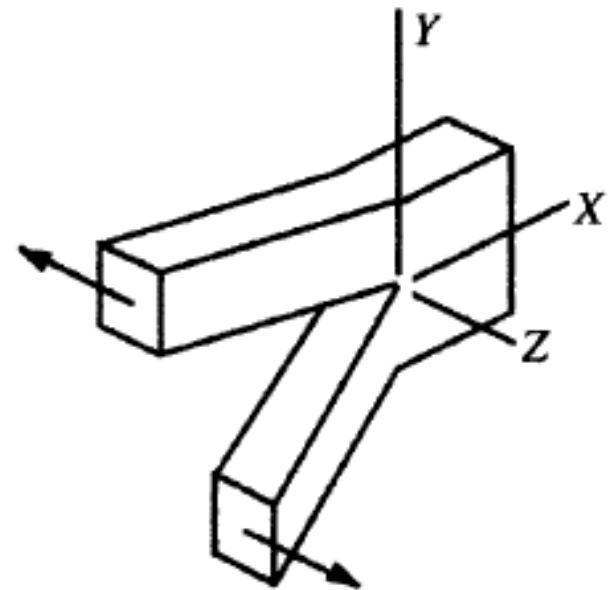
Mode I
(a)

Modo de abertura



Mode II
(b)

Modo de deslizamento



Mode III
(c)

Modo de rasgamento

TABLE 18.5 Theoretical and Measured Values of G_c for Some Materials

<i>Material</i>	<i>Theoretical $G_c = 2\gamma$ (N/m)</i>	<i>Measured G_c (N/m)</i>
Glass	3.5	14
Plexiglass	11.4	480
MgO	14.9	17.5
High-strength steel	22.8	53,000
High-strength aluminum	7.0	17,000
High-strength titanium	10.5	105,000

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

Exercício

vidro

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

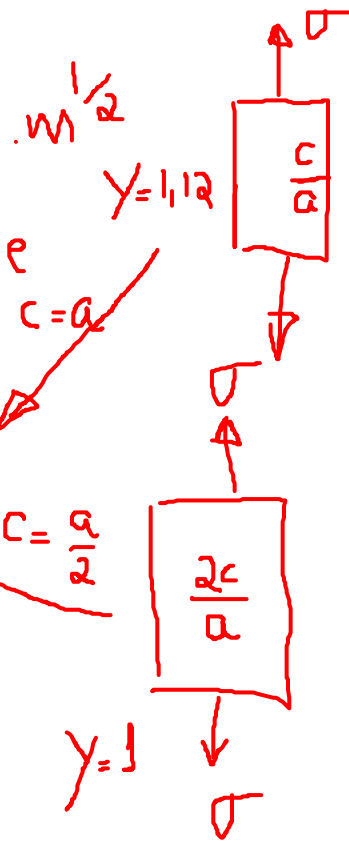
$$Y = 1,12$$

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

$c = ?$ superfície

$$\sigma_f = \frac{1}{Y} \cdot \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi c}}$$

$$c = 25 \mu\text{m}$$



Aço 4340

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

$$Y = 1,12$$

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

$c = ?$

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

σ_e

$$\sigma_f = 1640 \text{ MPa}$$

$$c = 3 \mu\text{m}$$

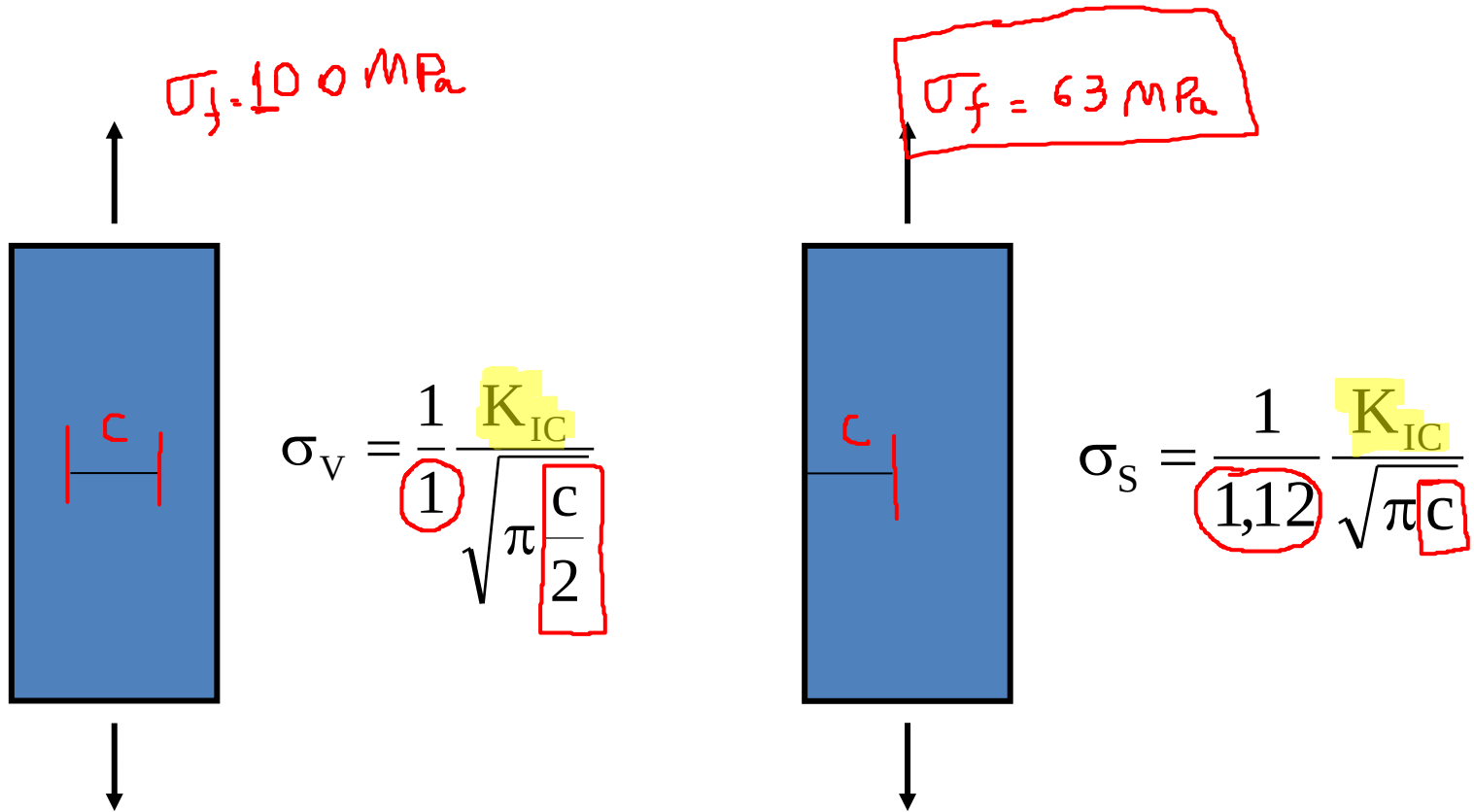
TABLE 18.4 Fracture Toughness for Several Ceramics

<i>Ceramic</i>	K_{Ic} (MPa·m ^{1/2})
Al ₂ O ₃	2.0–6.0
Al ₂ O ₃ (single crystal, 10 $\bar{1}$ 2)	2.2
Al ₂ O ₃ (single crystal, 0001)	>6.0
MgO	2.5
MgAl ₂ O ₄	1.9–2.4
Mullite (fully dense)	2.0–4.0
ThO ₂	1.6
Y ₂ O ₃	1.5
ZrO ₂ (cubic)	3.0–3.6
ZrO ₂ (partially stabilized)	3.0–15.0
SiC (hot pressed)	3.0–6.0
SiC (single crystal)	3.7
Si ₃ N ₄ (hot pressed)	3.0–10.0
TiC	3.0–5.0
WC	6.0–20.0
CaF ₂	0.80
KCl (single crystal)	~0.35
MgF ₂	1.00
SrF ₂	1.00
Aluminosilicate glass (Corning 1720)	0.96
Borosilicate glass (Corning 7740)	0.75
LAS (glass-ceramic)	2.00
Silica (fused)	0.80
Silica (96%)	0.70
Soda-lime silica glass	0.82

Table 1: Stress intensity factors for several common geometries.

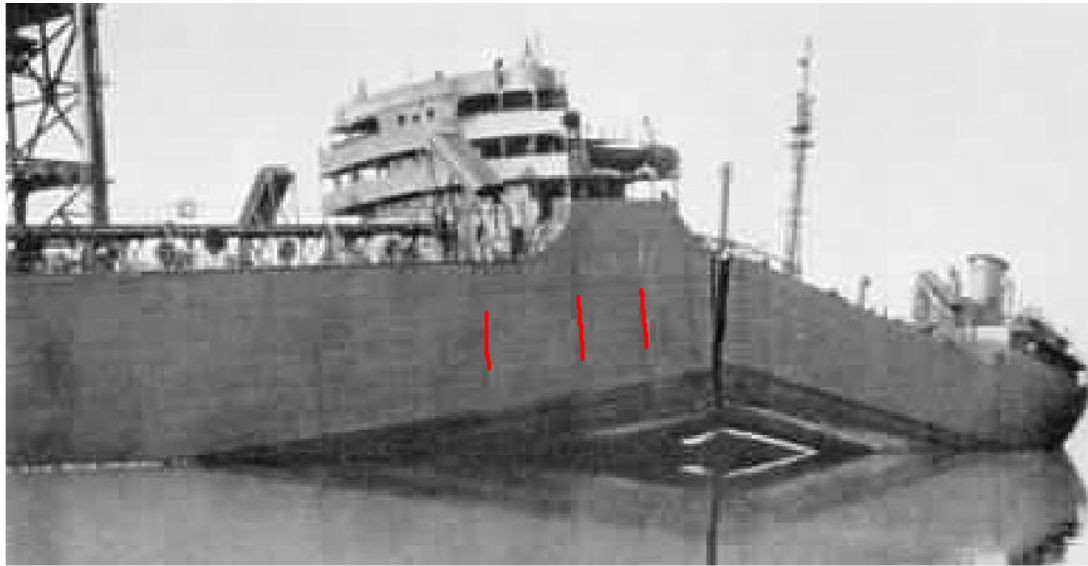
Type of Crack	Stress Intensity Factor, K_I
Center crack, length $2a$, in an infinite plate	$\sigma_\infty \sqrt{\pi a}$
Edge crack, length a , in a semi-infinite plate	$1.12 \sigma_\infty \sqrt{\pi a}$
Central penny-shaped crack, radius a , in infinite body	$2 \sigma_\infty \sqrt{\frac{a}{\pi}}$
Center crack, length $2a$ in plate of width W	$\sigma_\infty \sqrt{W \tan\left(\frac{\pi a}{W}\right)}$
2 symmetrical edge cracks, each length a , in plate of total width W	$\sigma_\infty \sqrt{W \left[\tan\left(\frac{\pi a}{W}\right) + 0.1 \sin\left(\frac{2\pi a}{W}\right) \right]}$

Trinca superficial vs. volumétrica



Exercício

Fratura frágil em metais



Tanker S.S. Schenectady fractured a day after its launch in January 1941³.

Ocorre, desde que a trinca ou defeito inicial tenha tamanho suficiente; o tamanho do defeito crítico pode chegar a dezenas de centímetros!

Por cerâmicas são tão sensíveis a defeitos e os metais não?

- A resposta está relacionada à possibilidade de deformação plástica na ponta da trinca
- Plasticidade é o resultado da geração e do movimento de linhas de discordâncias
- Linhas de discordância se movem como resultado de tensões cisalhantes
- Existem 2 casos limites possíveis:
 - 1) A resistência à tração das ligações químicas é menor que a resistência ao cisalhamento – então o modelo de Griffith é válido.
 - 2) A resistência à tração das ligações é maior que a resistência ao cisalhamento – nesse caso linhas de discordância se afastarão da ponta da trinca, absorvendo a energia para fratura e diminuindo a severidade da trinca.

**A razão resistência ao cisalhamento/resistência à tração:
ligação covalente > ligação iônica > ligação metálica**

Resistência à tração versus resistência ao cisalhamento das ligações

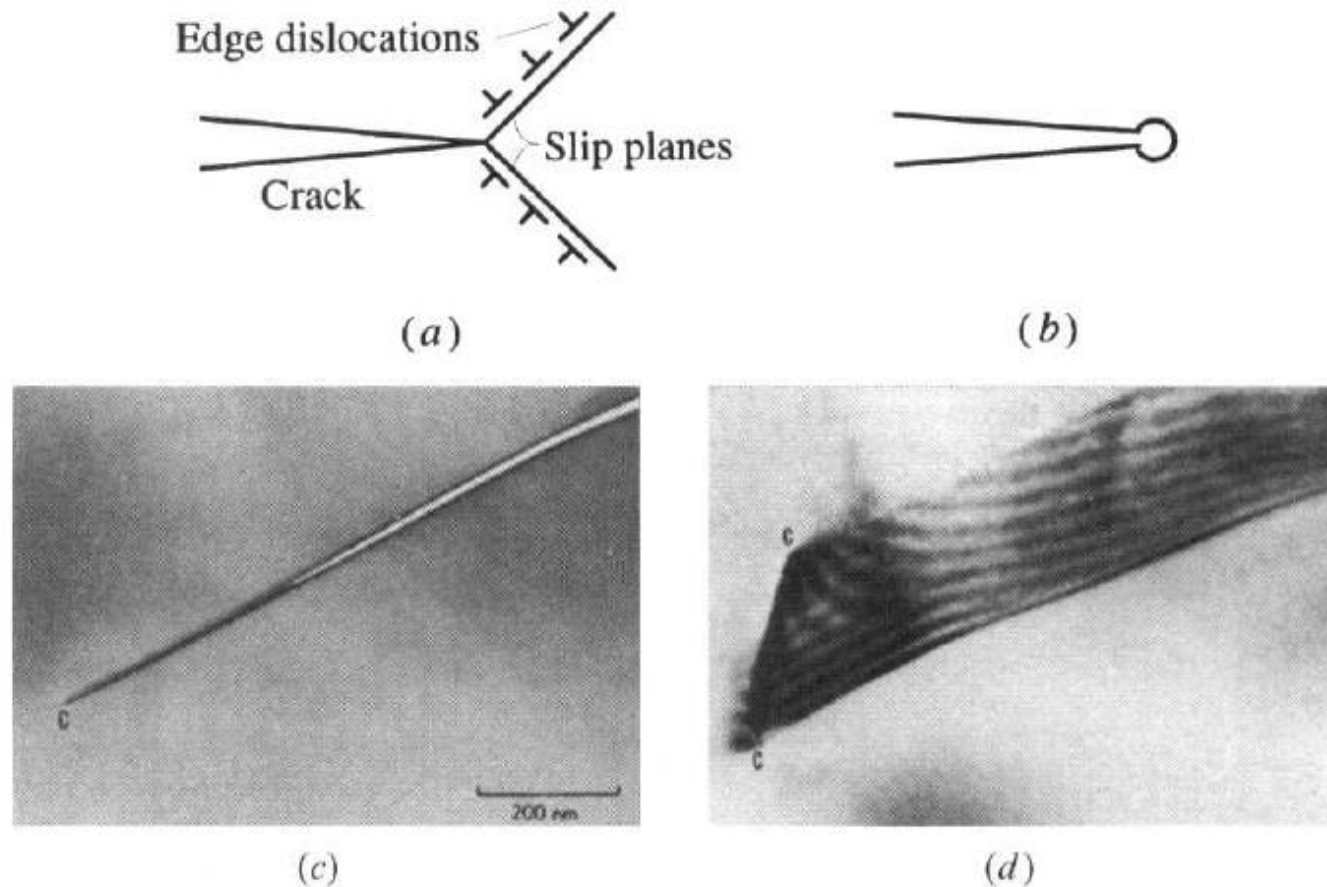


Figure 11.10 (a) Emission of dislocations from crack tip. (b) Blunting of crack tip due to dislocation motion. (c) Transmission electron micrograph of cracks in Si at 25°C. (d) Another crack in Si formed at 500°C, where dislocation activity in vicinity of crack tip is evident.¹⁹²

Efeito da temperatura

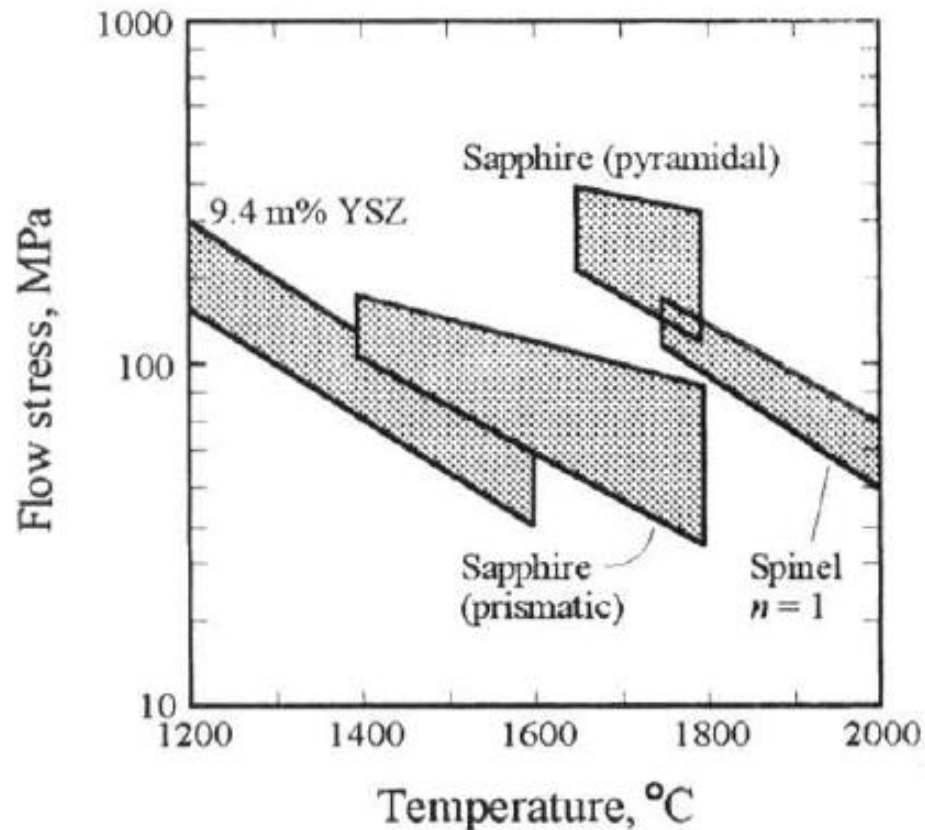


Figure 11.11 Temperature dependence of flow stress for yttria-stabilized zirconia (YSZ), sapphire, and equimolar spinel.¹⁹³

Efeito da temperatura

Diferentes regiões do efeito da temperatura na resistência de cerâmicas.

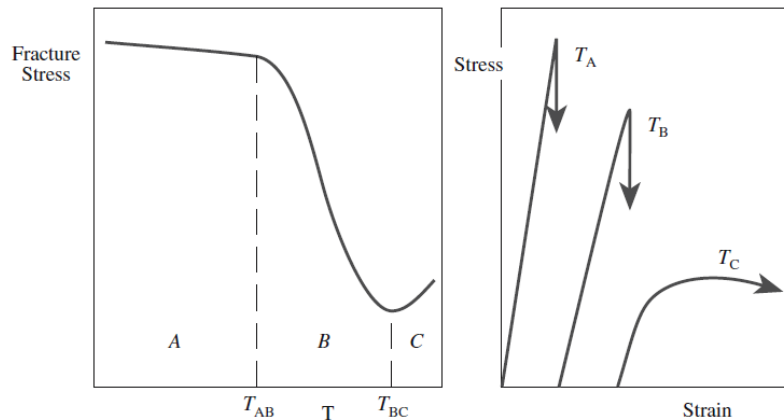


FIGURE 16.8 Illustration of the effect of temperature on fracture stress for a ceramic. The key temperatures are T_{AB} and T_{BC} .

Presença de fase líquida no contorno de grãos.

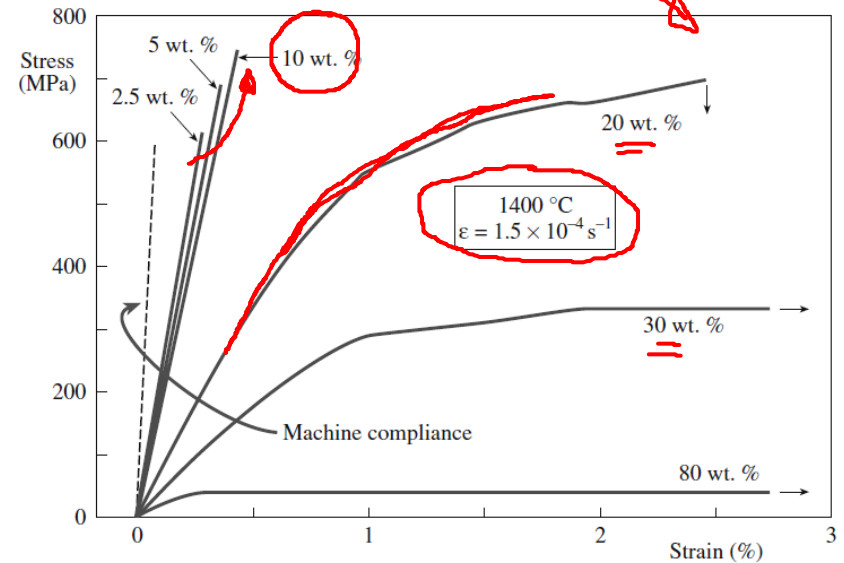


FIGURE 16.9 Stress–strain curve for Si_3N_4 at 1400°C for various amounts of silica. The machine compliance is the inherent displacement within the instrument.