

Propriedades Mecânicas de Cerâmicas

Fratura frágil & Crescimento subcrítico de trinca

Prof. Dr. Eduardo Bellini Ferreira

Departamento de Engenharia de
Materiais – EESC/USP



Vidros naturais - obsidianas



“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)

- Por que cerâmicas “quebram”?

- Por que insistimos em usá-las?

“A pior sina de um material de engenharia não é a falta de resistência ou rigidez mecânica, sejam elas quão desejáveis forem, mas a falta de tenacidade, que é a falta de resistência à propagação de trincas”

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

*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 a
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)*

http://www.kiplingsociety.co.uk/poems_strain.htm

John Hancock Building, Boston, EUA

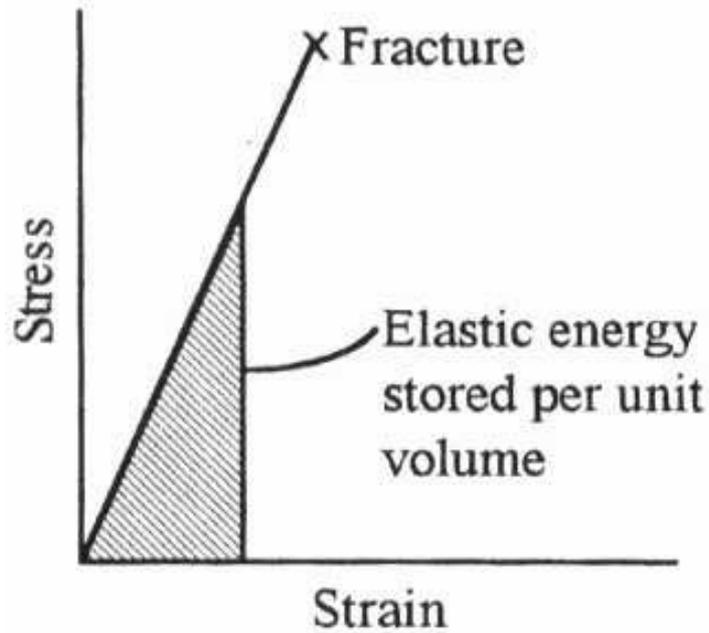


“The glass in question was from the 10,344 windows of the John Hancock Tower. They began to fail almost from the start. The crisis came in a winter gale on the night of Jan. 20, 1973, while the tower was still under construction. Gusts reached 75 miles per hour (~120 km/h) at the upper floors. Huge panels 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)

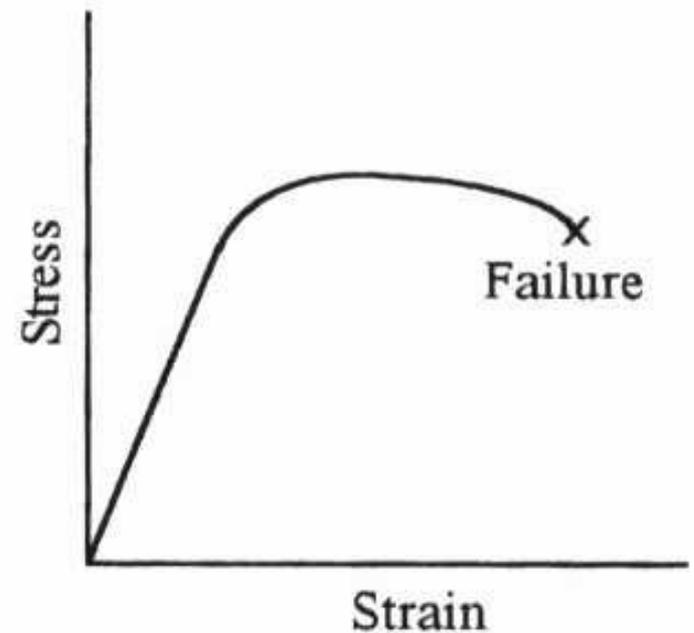
Propriedades Mecânicas de Cerâmicas

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

Curvas tensão-deformação típicas



(a)



(b)

- (a) Materiais frágeis
- (b) Materiais dúcteis

Exemplos de aplicações onde a fratura frágil faz a diferença



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

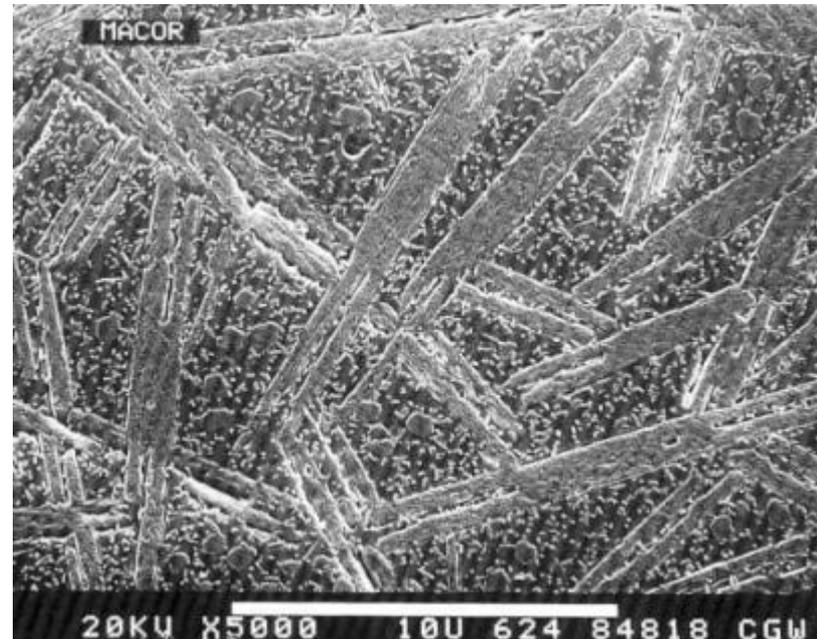
- Comercialmente conhecida como **ALON**, a armadura de “alumínio” transparente na verdade é de **oxinitreto de alumínio**, uma combinação de alumínio, oxigênio e nitrogênio.
- Para a obtenção de uma **placa dura e transparente**, a fabricação começa com um **pó**!



Macor™

46% SiO₂
17% MgO
16% Al₂O₃
10% K₂O
7% B₂O₃
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

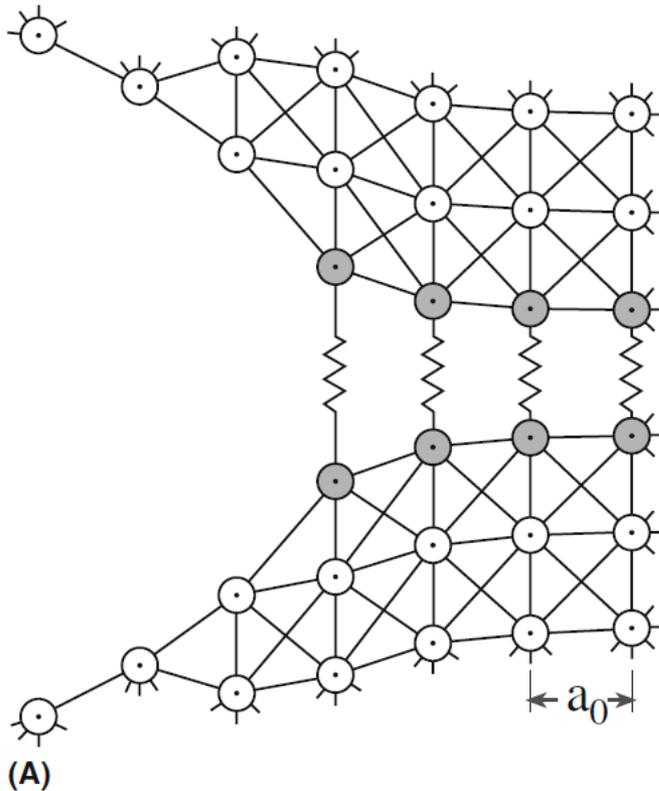
Mas em geral, na maioria das aplicações, temos que nos preocupar com a fragilidade dos materiais...



<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 a_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.

Resistência mecânica teórica

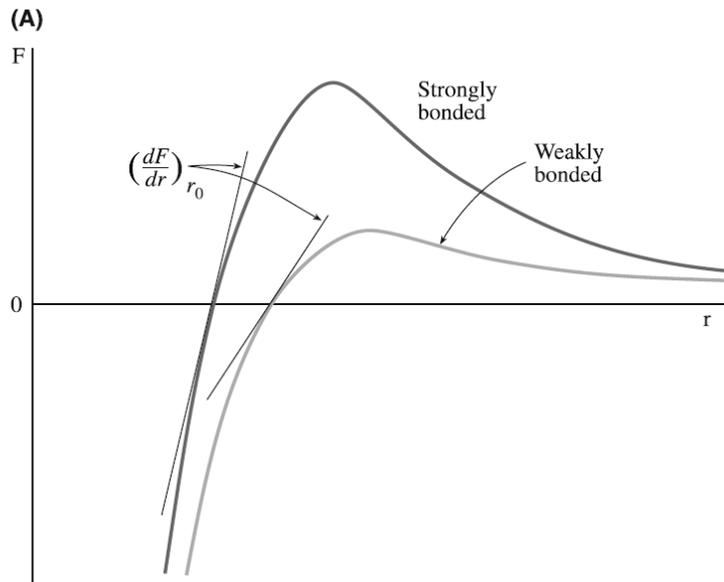
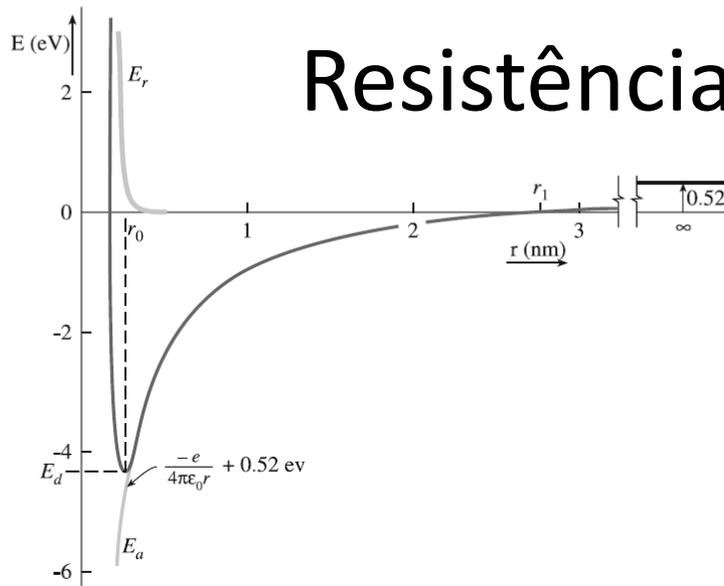
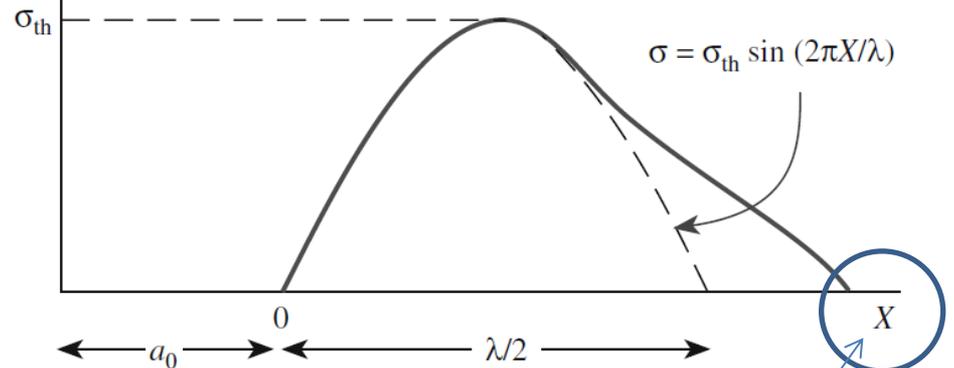
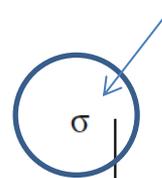
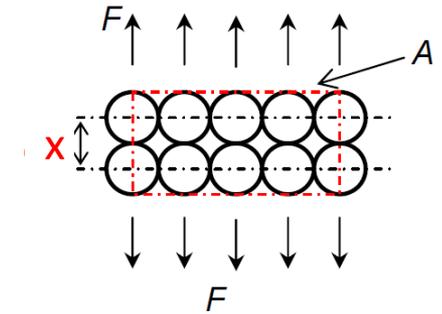


FIGURE 4.1 (a) Bond-energy curve for KCl. At infinite separation, the energy is that required to form K^+ and Cl^- from the corresponding atoms. (b) Force-distance curves for two materials: one where the bonding is strong and one where it is weak.

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



(B)

Distância entre planos.

Resistência mecânica teórica

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).

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

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

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

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

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

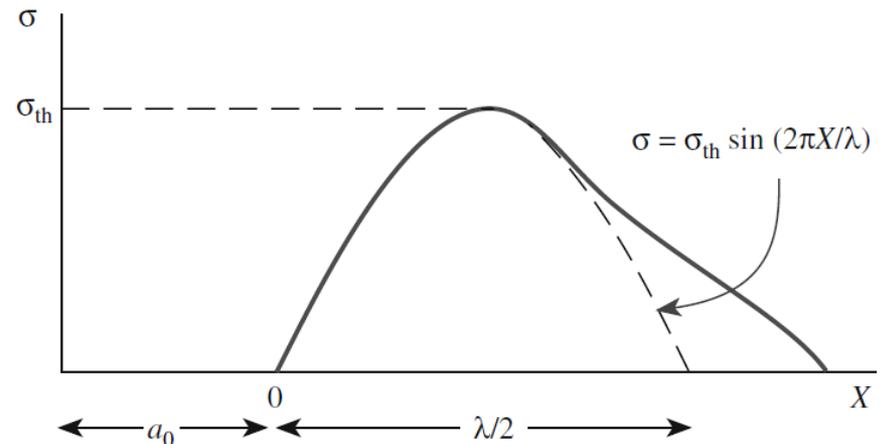
para deslocamentos pequenos: $\sin(x) \approx x$

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

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

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

Equação de Orowan



(B)

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

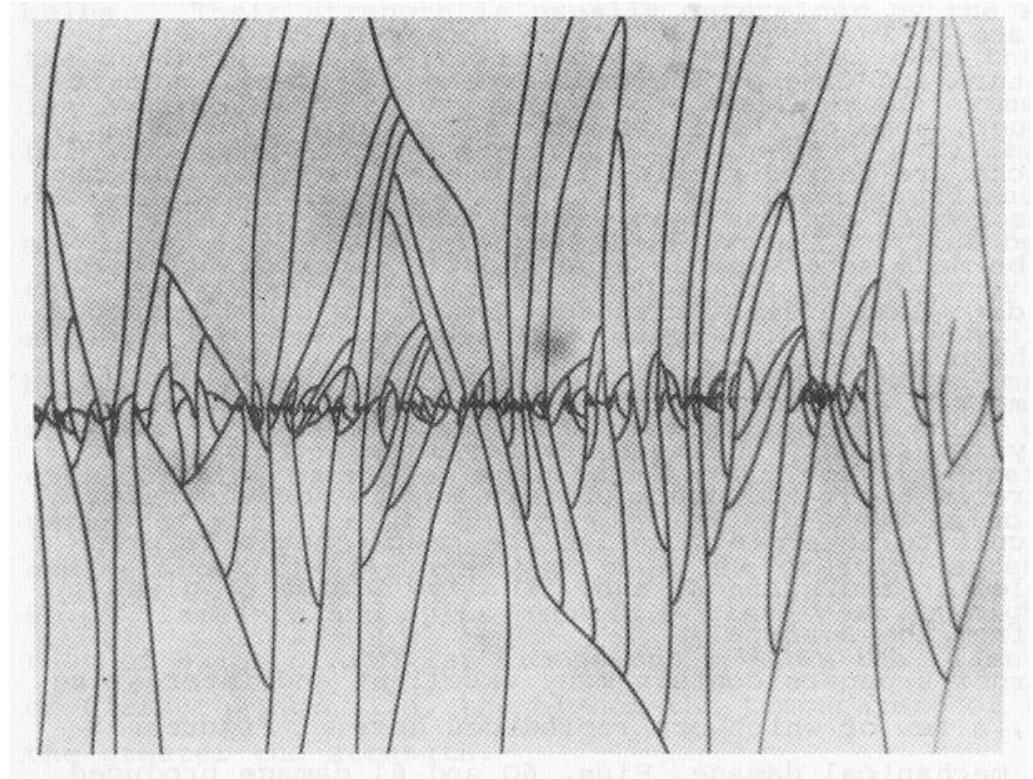
TABLE 18.2 Values of Theoretical Strength

<i>Material</i>	<i>Direction</i>	\mathcal{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).



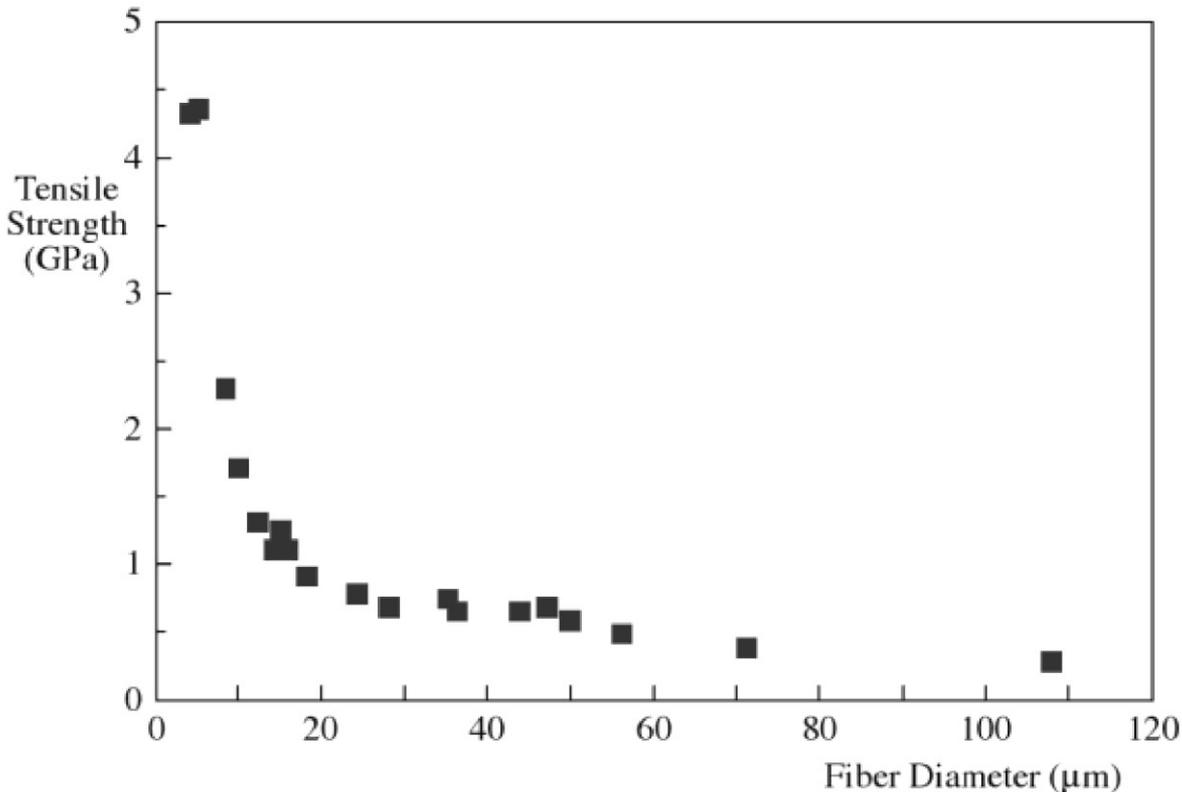
100 μm

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



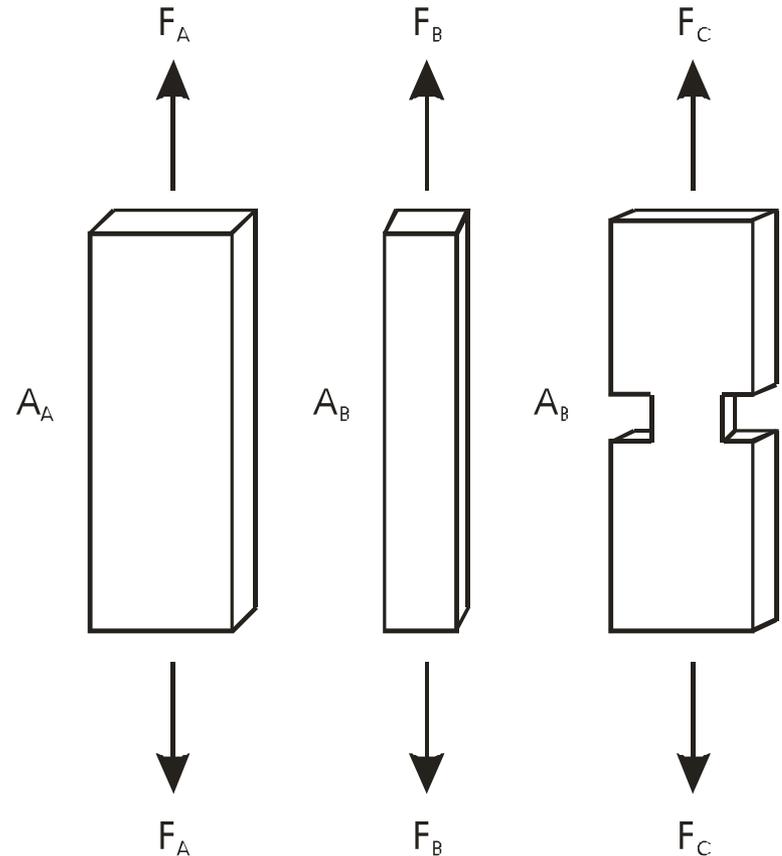
- Quanto menor a fibra:
 - menor a probabilidade de haver trincas
 - também diminui o tamanho da maior trinca
 - há uma relação direta entre a presença de trincas ou defeitos e a probabilidade do material fraturar

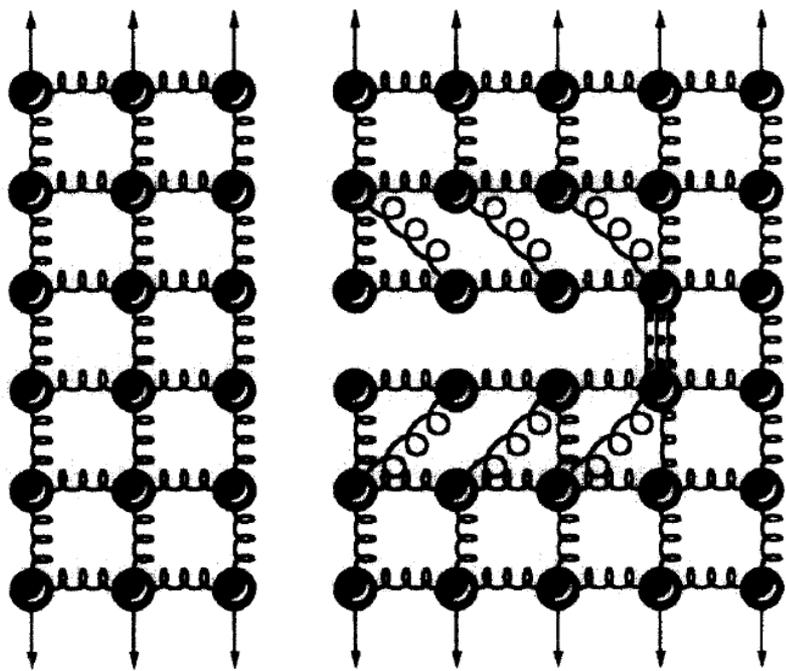
O QUE ACONTECE?

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

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

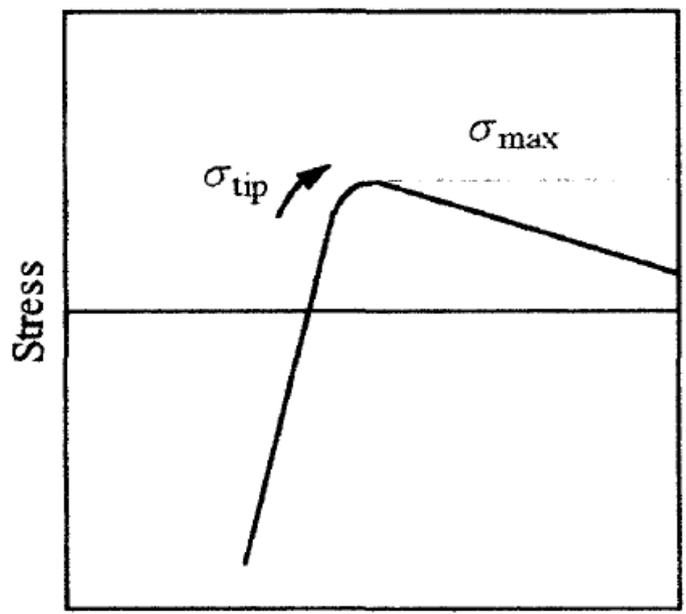
A explicação é a presença de defeitos, principalmente os superficiais!





(a)

(b)



Interatomic distance, nm

(c)

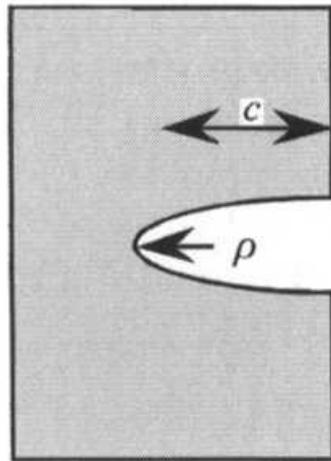
Defeitos superficiais

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.

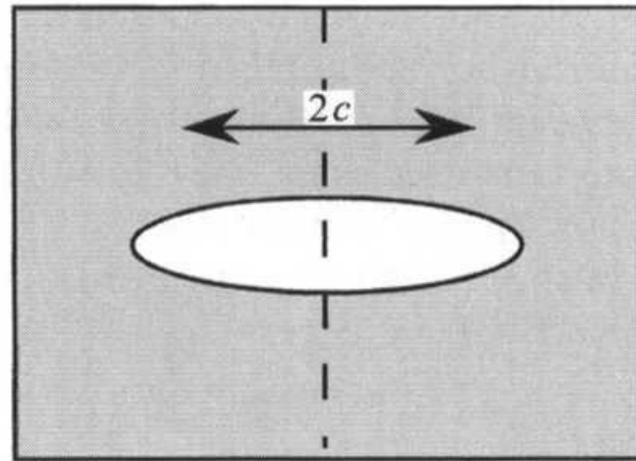
Essas trincas agem como concentradores de tensão.

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)



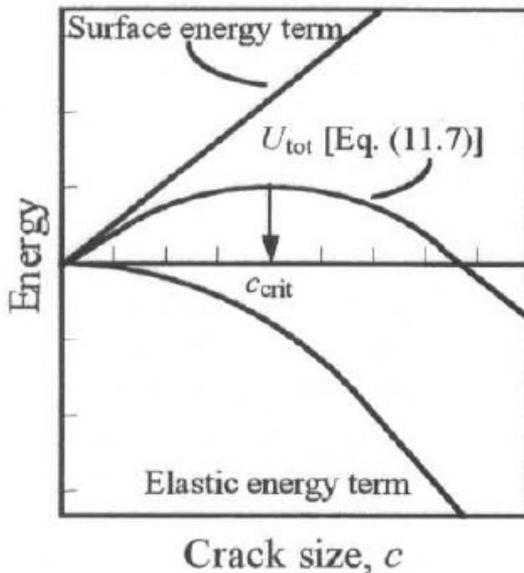
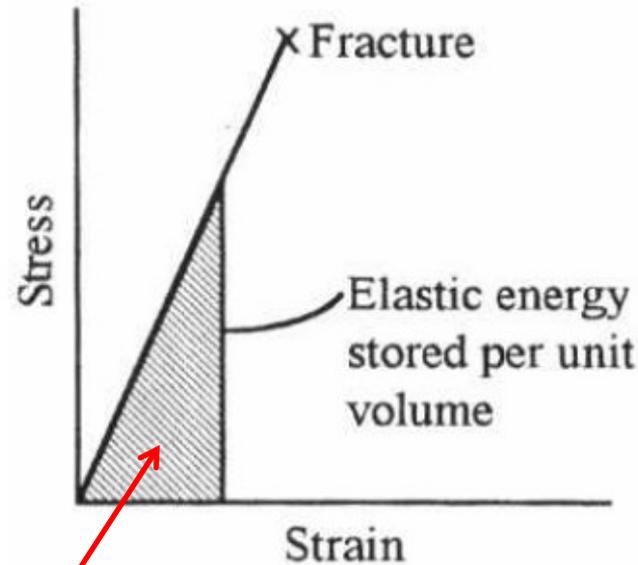
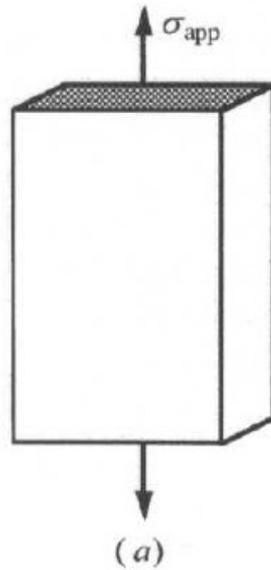
(b)

(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

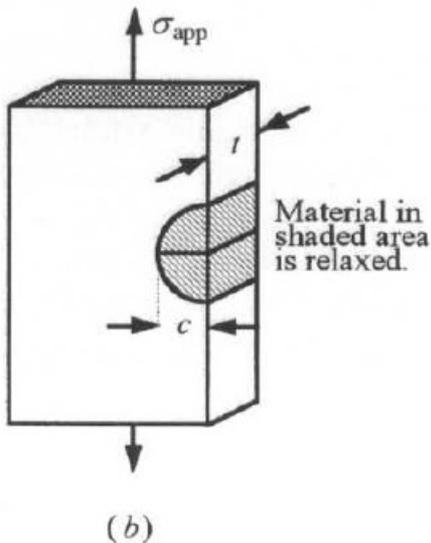


$$E_e = \frac{1}{2} \varepsilon \sigma_{ap} = \frac{1}{2} \frac{\sigma_{ap}^2}{E}$$

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

U = energia interna do sistema

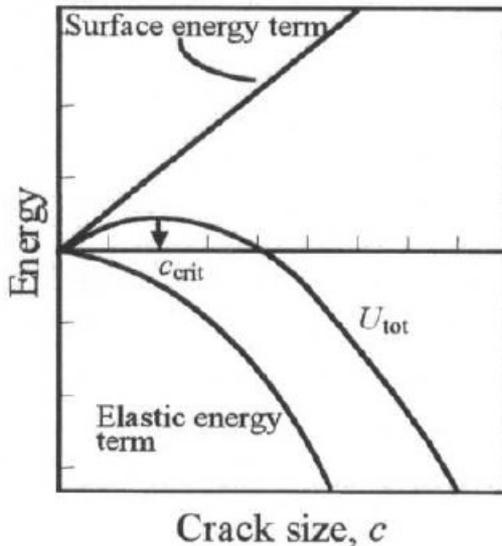
Energia de deformação – com defeito



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

$$E_s = 2\gamma ct$$

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



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

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

$$K_I \geq K_{IC}$$

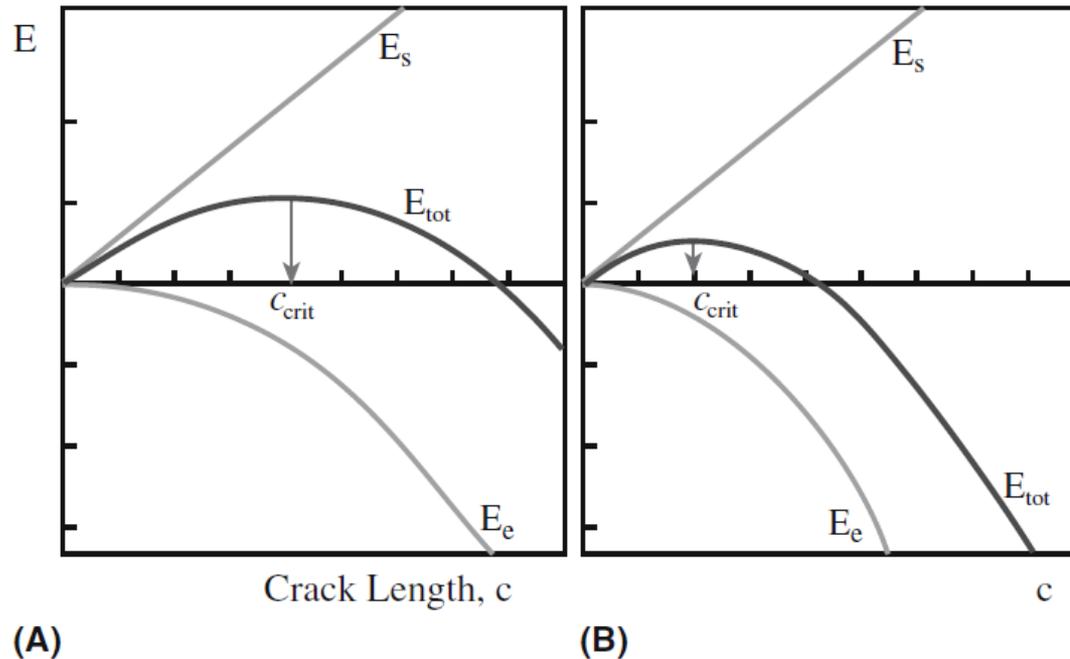


FIGURE 18.4 Plots of energy versus crack length. E_{tot} is the sum of E_s and E_e . The right plot corresponds to a greater applied stress (on this scale the stress is greater by $\sqrt{2}$ and c_{crit} is correspondingly reduced by a factor of 2).

- 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

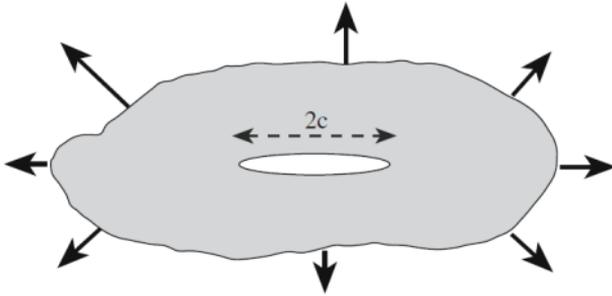


FIGURE 18.5 The "Griffith" crack of length $2c$.

A resistência mecânica (tensão de fratura) depende de:

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

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

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

$$E_s = 4c\gamma$$

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

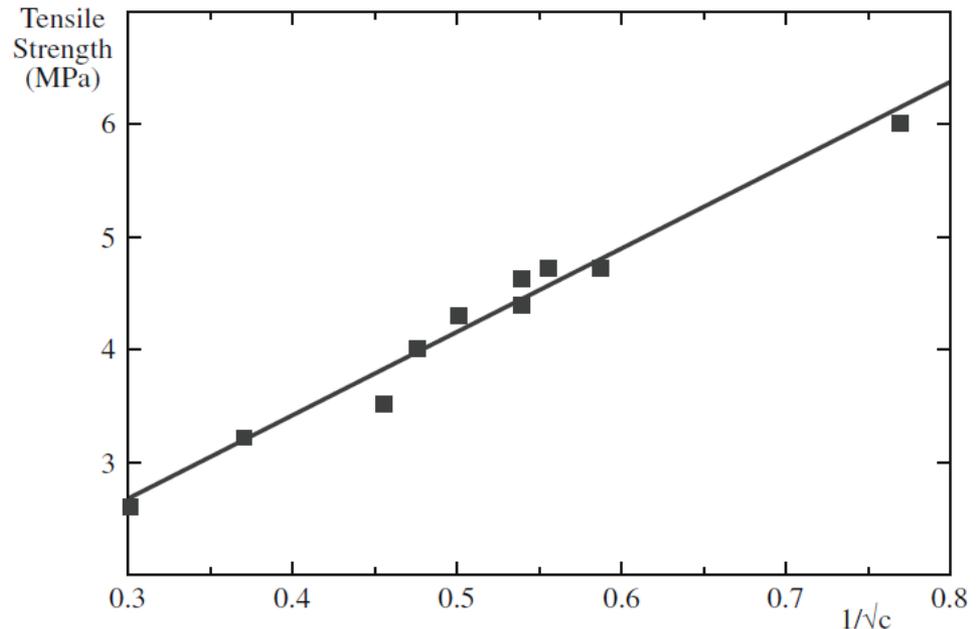
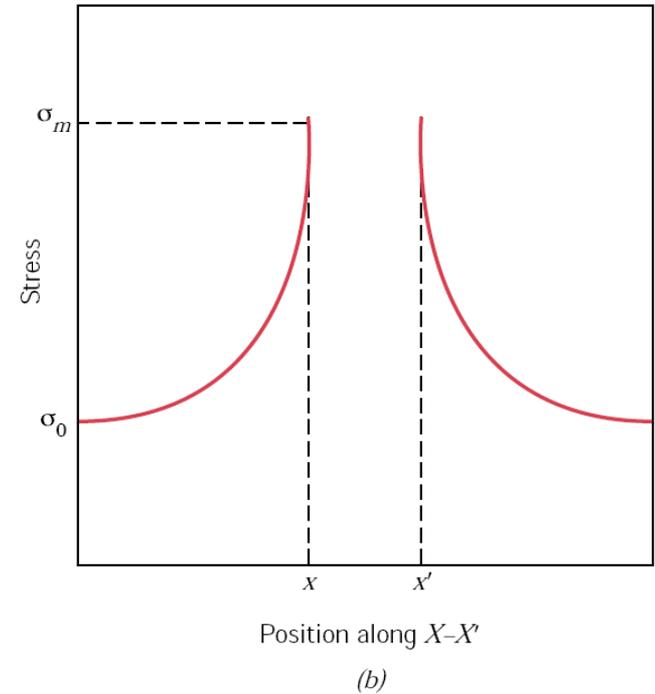
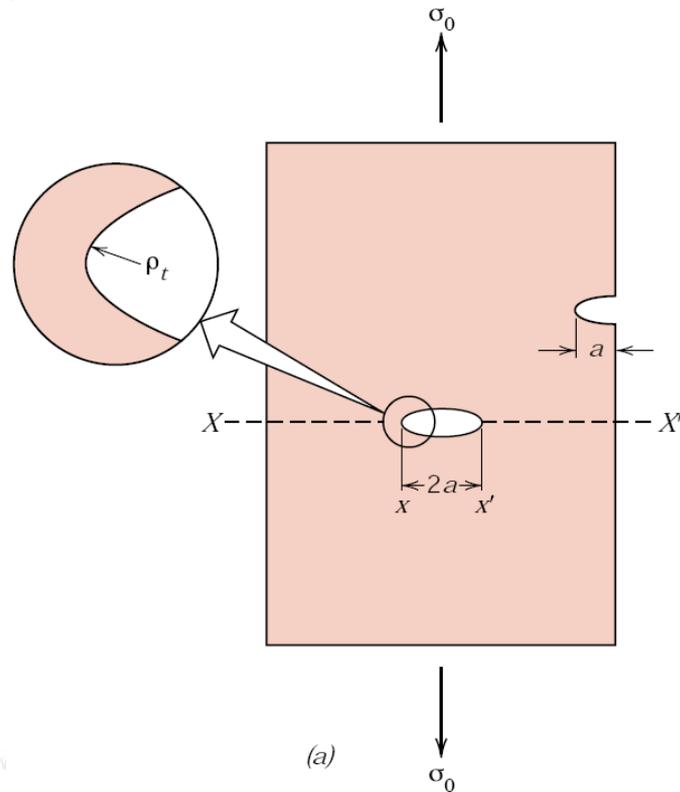
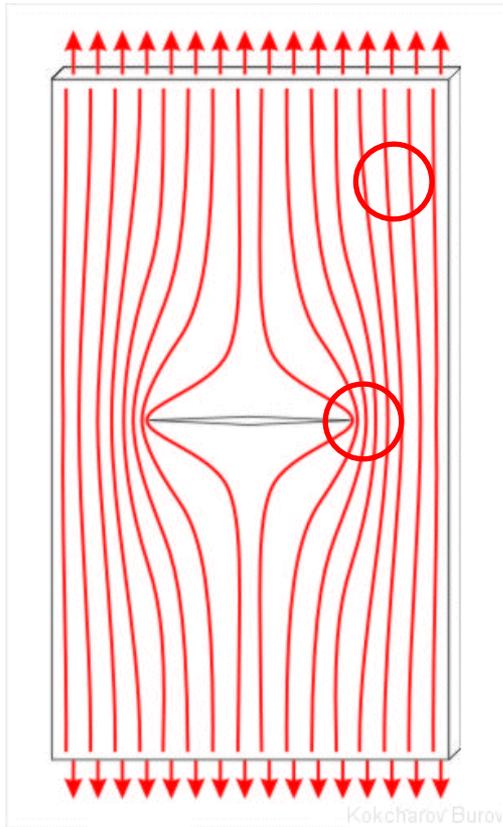


FIGURE 18.6 Verification of Eq. 18.12. The tensile strength of glass as a function of crack length.

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.

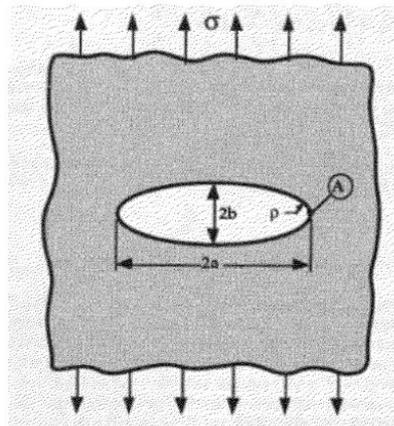


Fig. Elliptical hole in flat plate

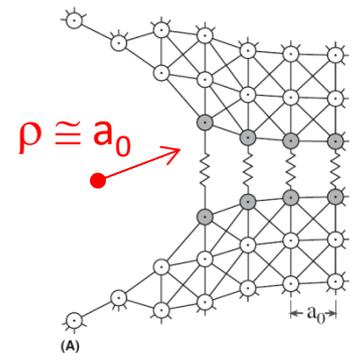
$$\sigma_A = \sigma \left(1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}} \right)$$

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:

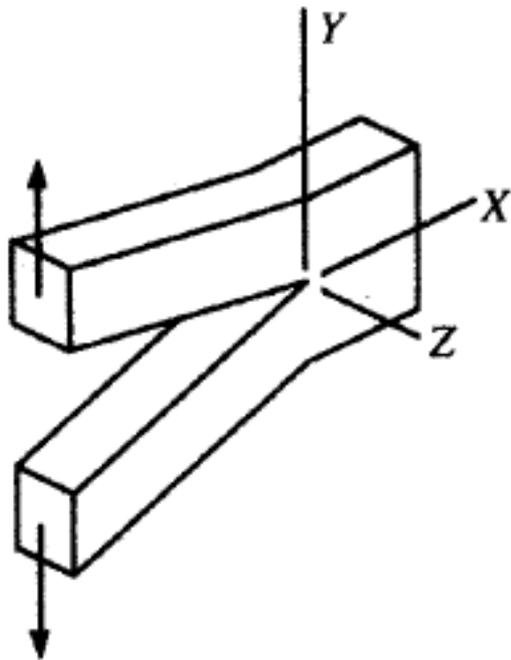
$$K_{IC} = \sqrt{EG_c}$$

G_c é a tenacidade

ou trabalho total para fratura

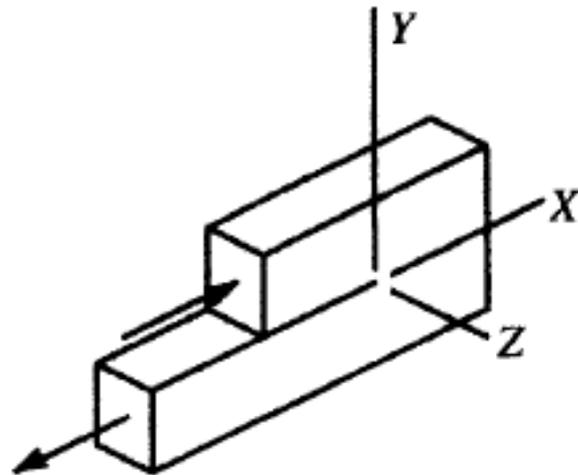
Y é uma constante adimensional (aproximadamente igual a 1 para defeitos no volume de placas e 1,12 para defeitos na superfície) que depende do formato do corpo de prova, da geometria da trinca e de seu tamanho relativo ao tamanho do corpo de prova.

Modos de fratura



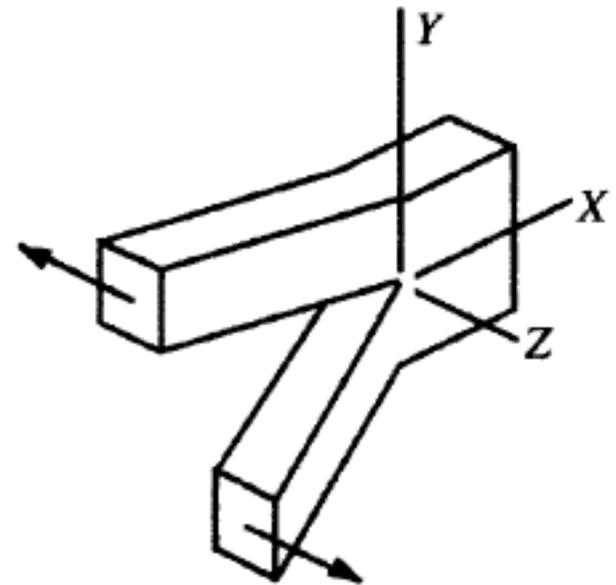
Mode I
(a)

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

<i>Material</i>	<i>Yield Strength</i>		K_{Ic}	
	<i>MPa</i>	<i>ksi</i>	<i>MPa√m</i>	<i>ksi√in.</i>
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

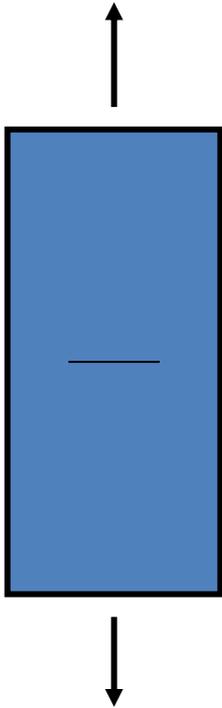
TABLE 18.4 Fracture Toughness for Several Ceramics

<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

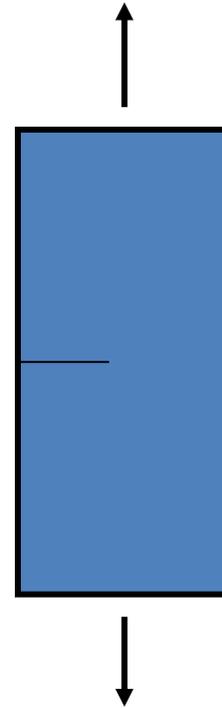
Table 1: Stress intensity factors for several common geometries.

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



$$\sigma_V = \frac{1}{1} \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi \frac{c}{2}}}$$



$$\sigma_S = \frac{1}{1,12} \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi c}}$$

$$\sigma_S = 0,63 \cdot \sigma_V$$

Exercício: metal versus cerâmica.

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!

Curva R – mecanismos de tenacificação

Para placas finas sob tração :

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

(estado plano de tensão)

Para blocos :

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{EG_c}{(1-\nu^2)}}$$

(estado plano de deformação)

G_c é a tenacidade

ou o trabalho total para fratura

$$G_c = \frac{dE_s}{dc} = R$$

R = resistência à propagação de trinca

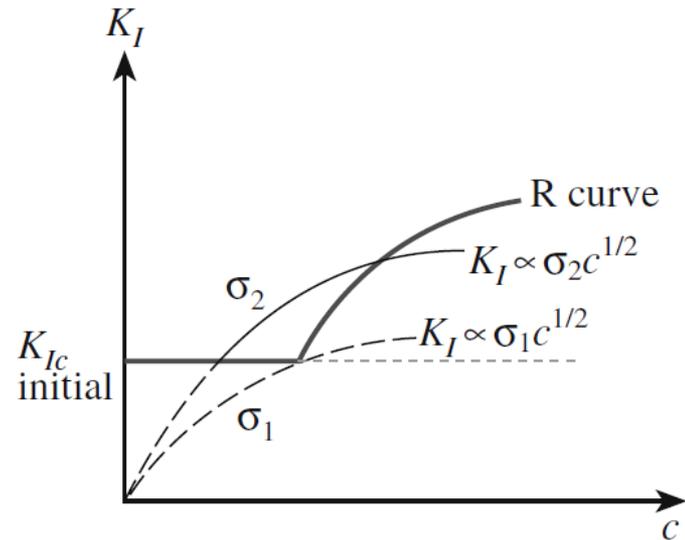


FIGURE 18.7 A material showing *R* curve behavior (bold curve) exhibits a region of stable crack growth and flaw tolerant behavior. The lighter curves σ_1 and σ_2 represent typical Griffith behavior.

Curva R – mecanismos de tenacificação

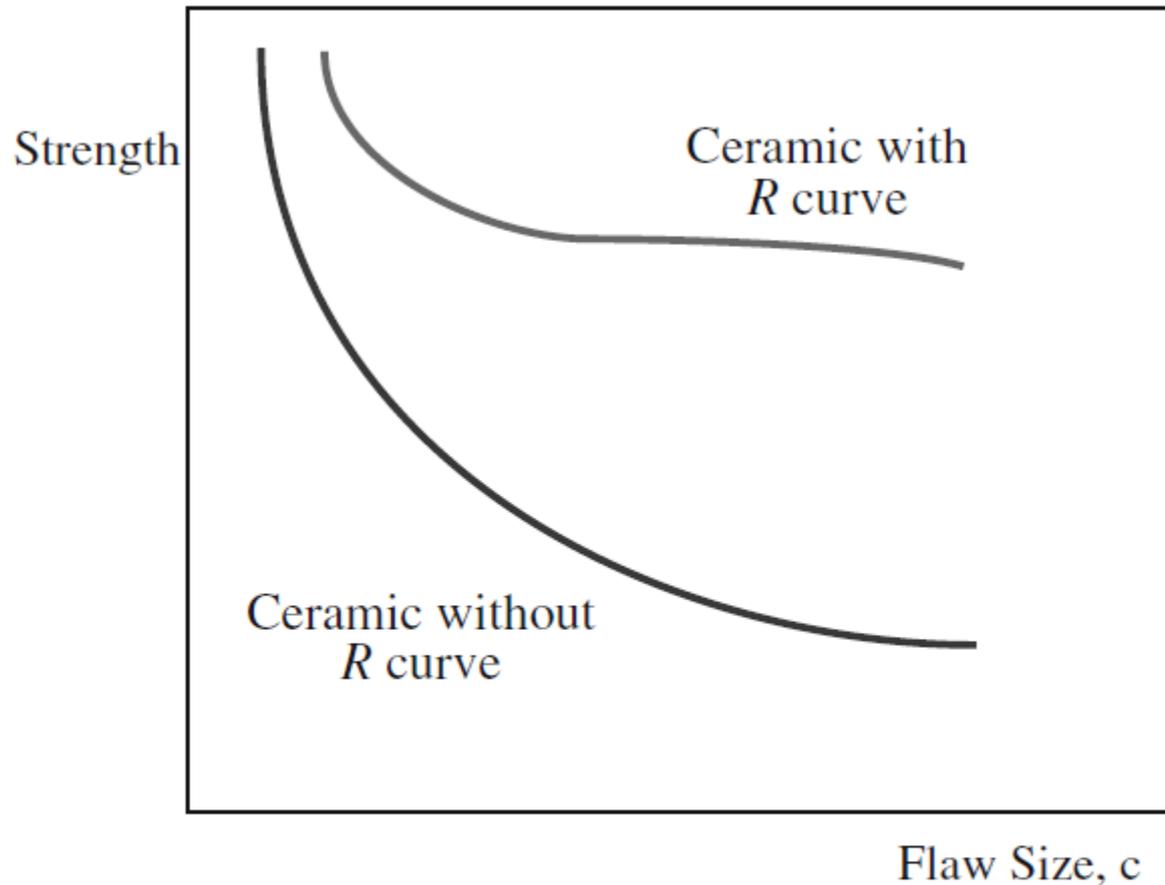


FIGURE 18.8 Effect of R curve behavior on strength. There is a region in which the strength is insensitive to flaw size.

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

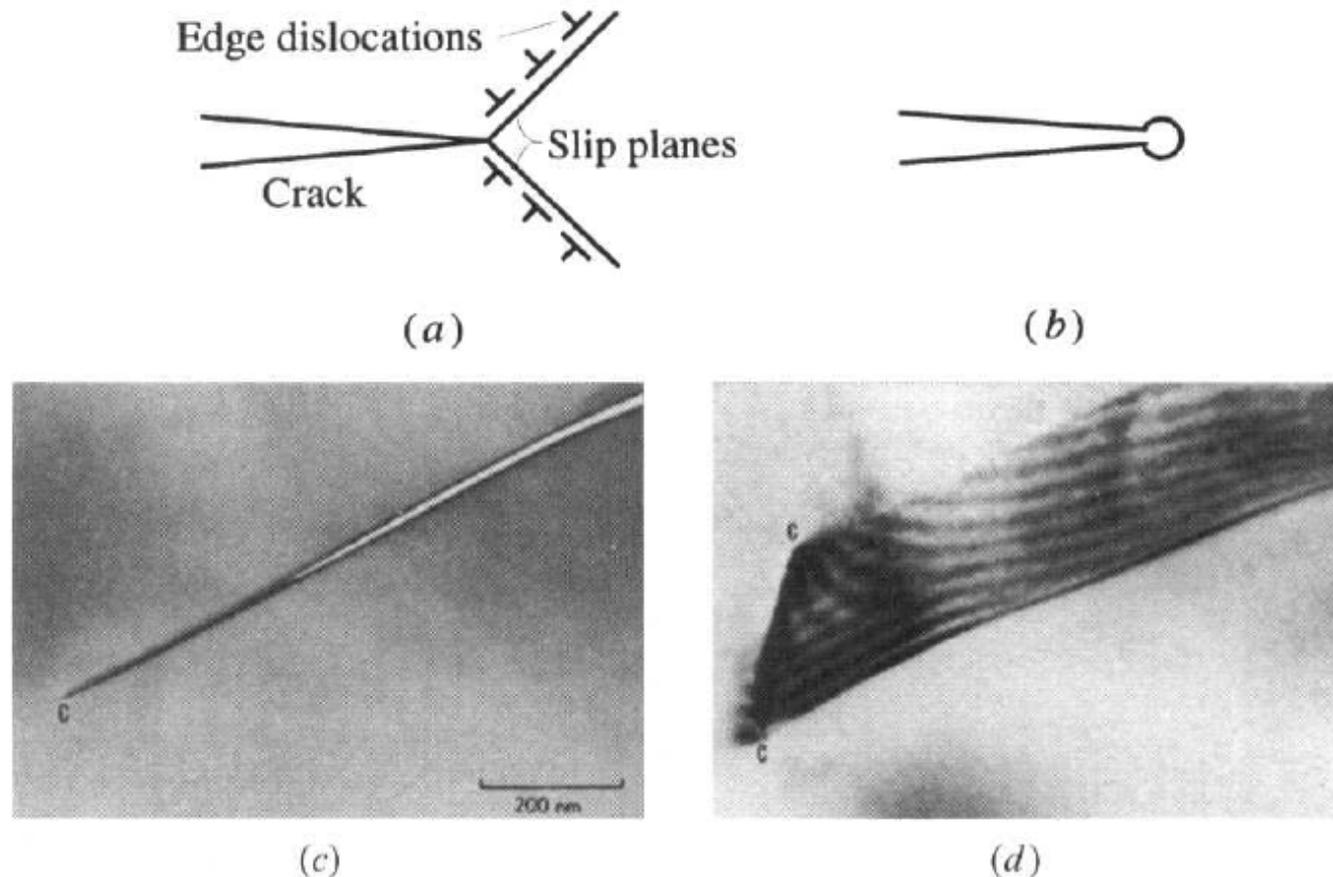


Figure 11.10 (a) Emission of dislocations from crack tip. (b) Blunting of crack tip due to dislocation motion. (c) Transmission electron micrograph of cracks in Si at 25°C. (d) Another crack in Si formed at 500°C, where dislocation activity in vicinity of crack tip is evident.¹⁹²

Efeito da temperatura

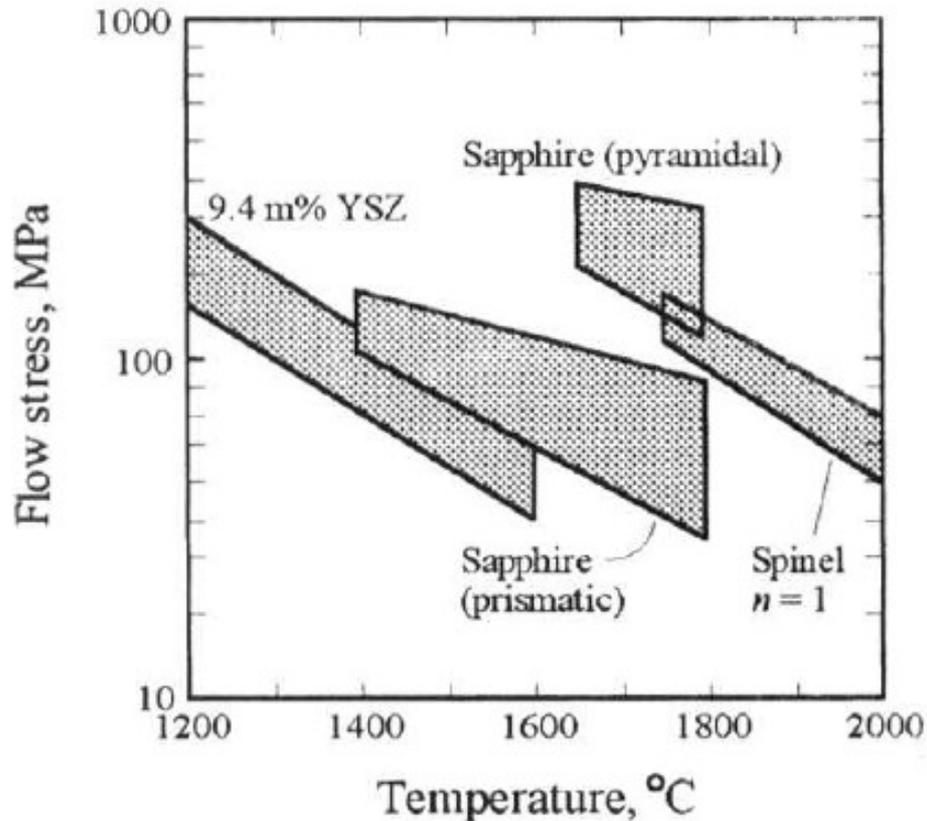


Figure 11.11 Temperature dependence of flow stress for yttria-stabilized zirconia (YSZ), sapphire, and equimolar spinel.¹⁹³

Efeito da temperatura

Diferentes regiões do efeito da temperatura na resistência de cerâmicas.

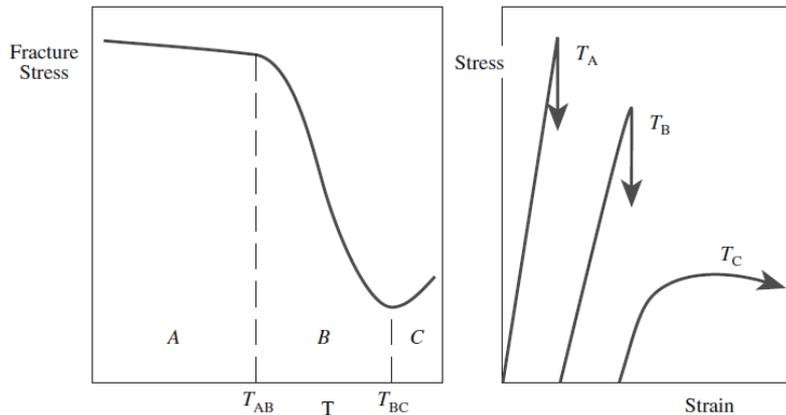


FIGURE 16.8 Illustration of the effect of temperature on fracture stress for a ceramic. The key temperatures are T_{AB} and T_{BC} .

Presença de fase líquida no contorno de grãos.

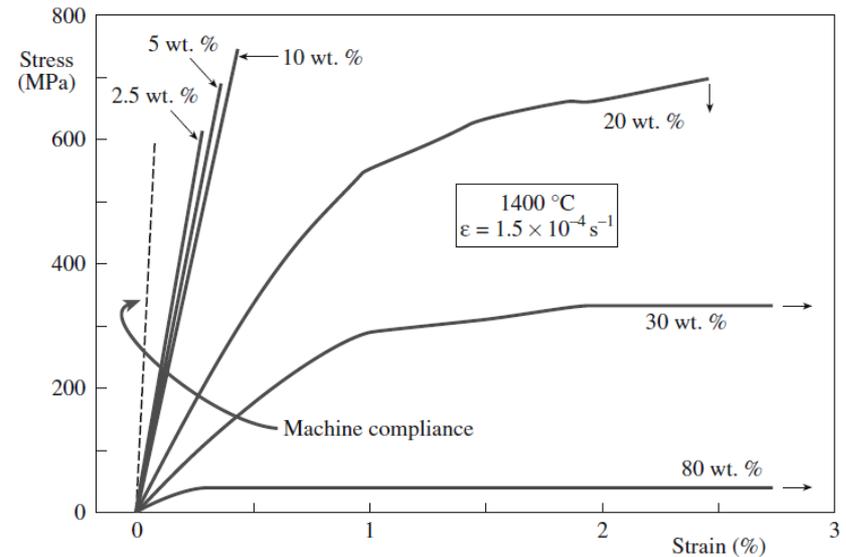


FIGURE 16.9 Stress–strain curve for Si_3N_4 at 1400°C for various amounts of silica. The machine compliance is the inherent displacement within the instrument.

Ensaio mecânico de cerâmicas tração versus compressão

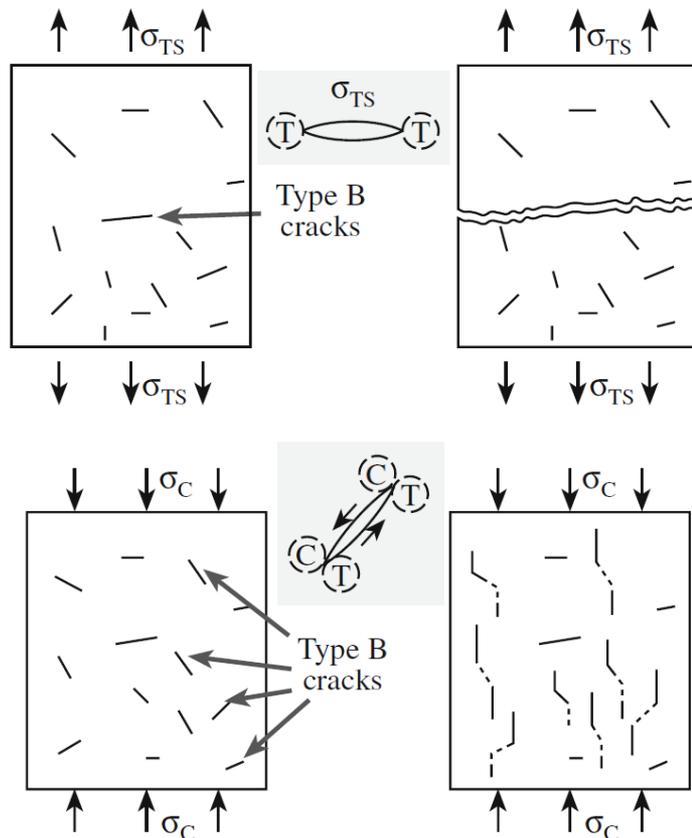


FIGURE 16.10 Illustration of unstable and stable crack propagation for a brittle material in tension (T) and compression (C), respectively. Stable crack propagation will lead to crushing.

TABLE 16.6 Ratio of Compressive Strength σ_{cc} to Bending Strength, σ_c

Ceramic	Grain size (μm)	σ_{cc}/σ_c
TiB ₂	20–50	4–6
ZrB ₂	20–50	4–6
B ₄ C	1	7
WC	1–6	4–6
Al ₂ O ₃	1–100	4–30
MgAl ₂ O ₄	1	7
ThO ₂	4–60	13–17
UO ₂	20–50	5–18

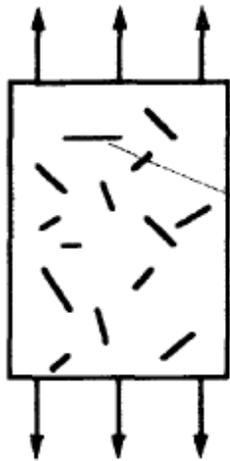
Estimativa da resistência à compressão :

$$\sigma_{\text{compressão}} = x \left(\frac{1}{Y} \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi c_{av}}} \right)$$

c_{av} = comprimento médio de trincas

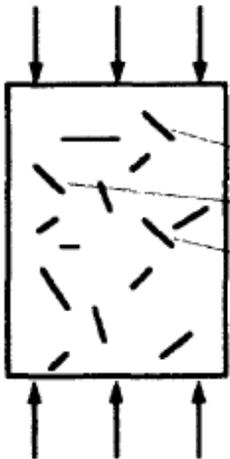
$x = 10$ a 15

Fratura por compressão



This crack propagates unstably

(a)



These cracks propagate stably

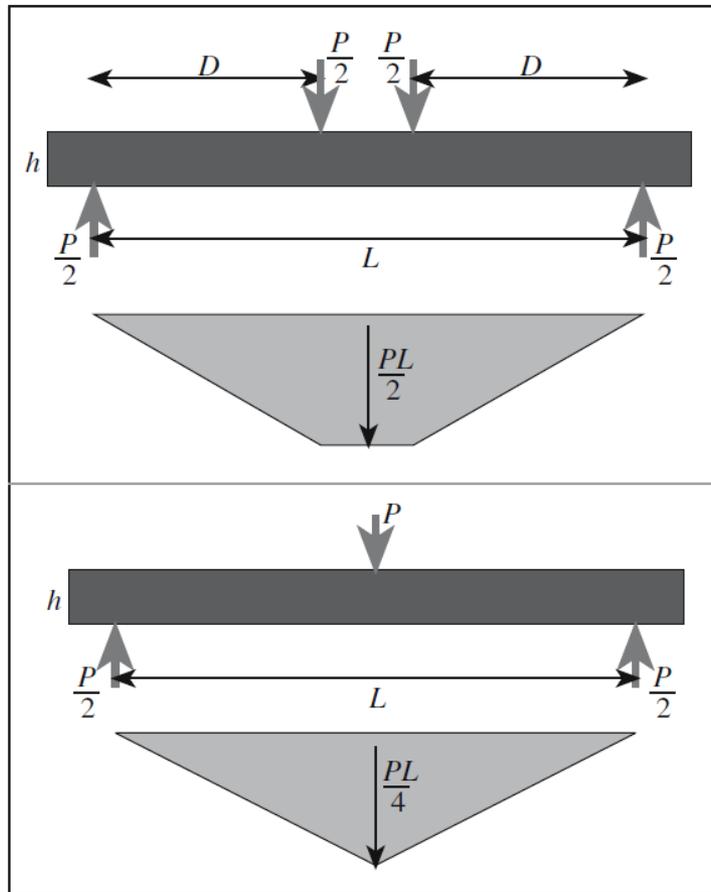
(b)



a) fratura em cerâmicas devido à trincas pré-existentes sob tração. A fratura ocorre pela propagação instável do maior defeito e o mais favoravelmente orientado em relação à direção da aplicação da carga.

b) em compressão, várias trincas propagam-se de forma estável, vão se unindo e formando uma zona de esmagamento.

Ensaio mecânico de flexão 3 ou 4 pontos de materiais cerâmicos



- Esquemas de carregamento em 3 e 4 pontos para determinação do comportamento de tensão-deformação e da resistência à flexão de cerâmicas frágeis.
- Mais fácil (corpos de prova de geometria simples) e barato.

MODULUS OF RUPTURE EQUATIONS

$$\text{Three-point bend: } \sigma_r = \frac{3PL}{2BW^2}$$

$$\text{Four-point bend: } \sigma_r = \frac{3PD}{BW^2}$$

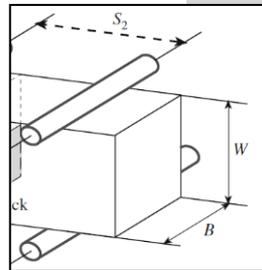
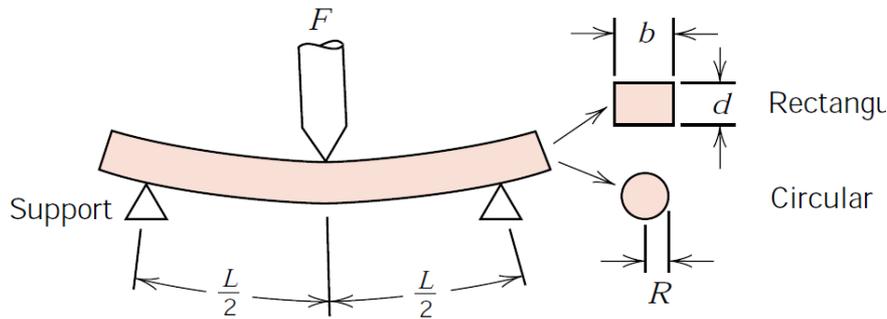


FIGURE 16.11 The geometries for three- and four-point bending.

Flexão em 3 pontos

Possible cross sections



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

where M = maximum bending moment

c = distance from center of specimen to outer fibers

I = moment of inertia of cross section

F = applied load

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

$$\text{MOR} = \sigma_r = \frac{6M_r}{bd^2}$$

Circular	$\frac{FL}{4}$	R	$\frac{\pi R^4}{4}$	$\frac{FL}{\pi R^3}$
----------	----------------	-----	---------------------	----------------------

Grande variação de resultados!

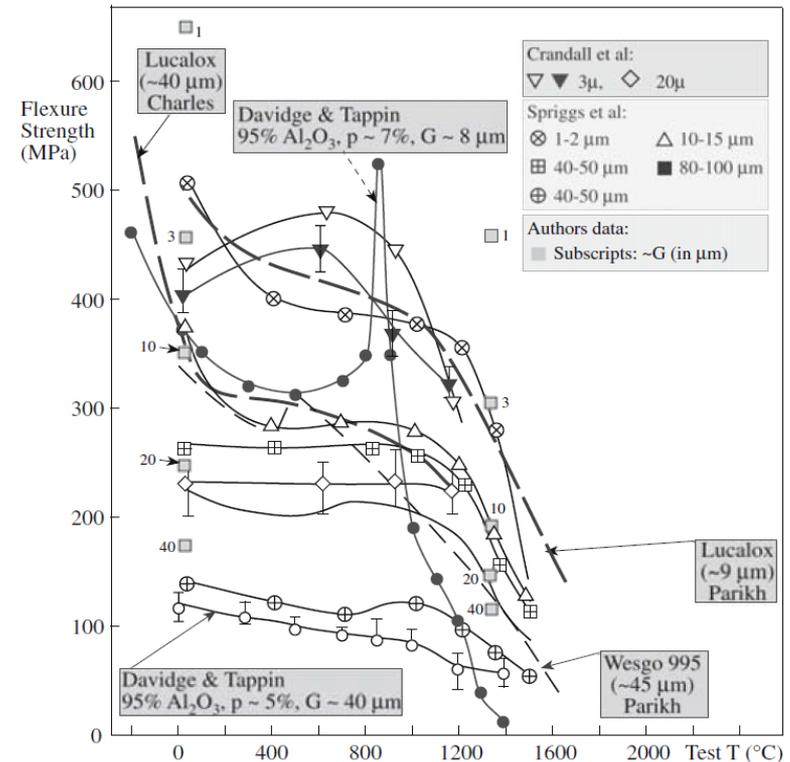


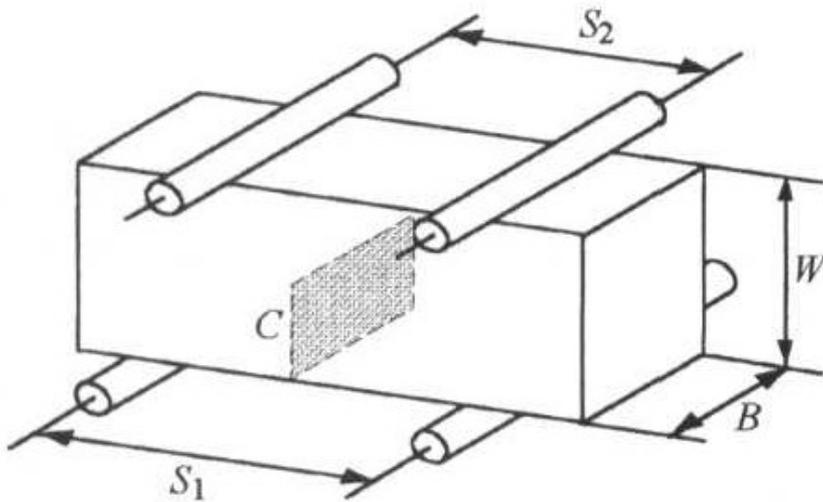
FIGURE 16.12 Flexural strength of polycrystalline Al_2O_3 as a function of test temperature.

Os valores em geral são mais altos que os resultantes de ensaios de tração pura!
Esse ensaio superestima a resistência dos materiais cerâmicos.

Medida experimental de K_{Ic}

Substituindo σ_r por σ_f

$$\sigma_r = \frac{3P(S_1 - S_2)}{2BW^2} \text{ em } \sigma_f = Y \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi C}}$$



Assume-se que o entalhe tem espessura da ordem da distância interatômica, o que é muito difícil na realidade, e K_{Ic} acaba sendo superestimado por esse método. Funciona melhor para microestruturas grosseiras.

- Ensaio de flexão 4 pontos com entalhe simples – Single-Edge Notched Beam (SENB).

$$K_{Ic} = \frac{3\sqrt{c}(S_1 - S_2)\xi F_f}{2BW^2}$$

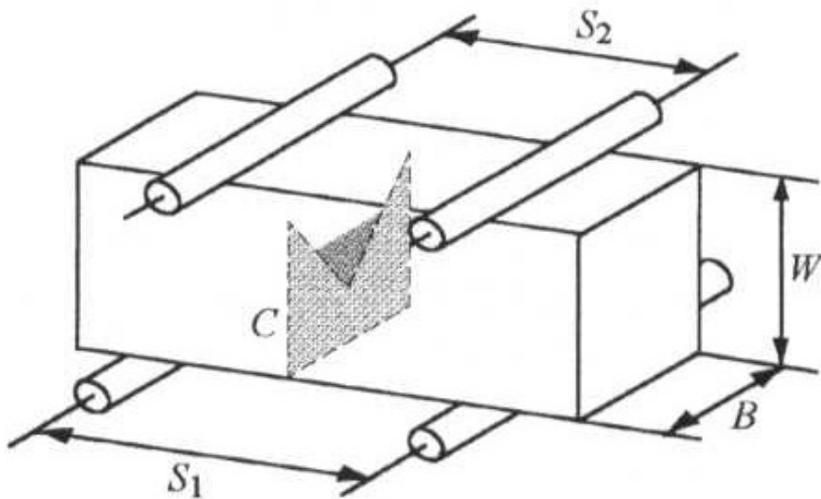
F_f é a carga aplicada

no momento da fratura

ξ é um fator de calibração

Medida experimental de K_{Ic}

- Ensaio de flexão com entalhe Chevron – Chevron Notch (CN)



No início ocorre a abertura estável da trinca, possibilitando a formação de uma trinca de espessura da ordem da distância interatômica, antes da fratura final.

Não é preciso conhecer as propriedades do material!

$$K_{Ic} = \frac{(S_1 - S_2) \xi^* F_{\text{máx}}}{BW^{3/2}}$$

ξ^* = mínimo da função
"compliance" ou
de flexibilidade

Pode ser resumido em :

$$K_{Ic} = \frac{F_{\text{máx}}}{B\sqrt{W}} Y^*$$

Y^* = função da geometria

Medida experimental de K_{IC}

- Muito cuidado é necessário para medir K_{IC} de forma confiável e reprodutível.
- Variação nos resultados (proveniente de diferentes autores, ou diferentes ensaios) pode resultar de, por exemplo:
 1. corpos de prova de dimensões muito pequenas, comparadas à zona de processo (zona afetada pela trinca)
 2. tensões interna geradas durante a usinagem do corpo de prova não foram eliminadas antes do ensaio
 3. trinca inicial com espessura maior que a da dimensão interatômica

Medida experimental de K_{IC}

- Método da indentação Vickers

$$K_{IC} = \Phi \sqrt{a} H \left(\frac{E}{H} \right)^{0,4} f \left(\frac{c}{a} \right)$$

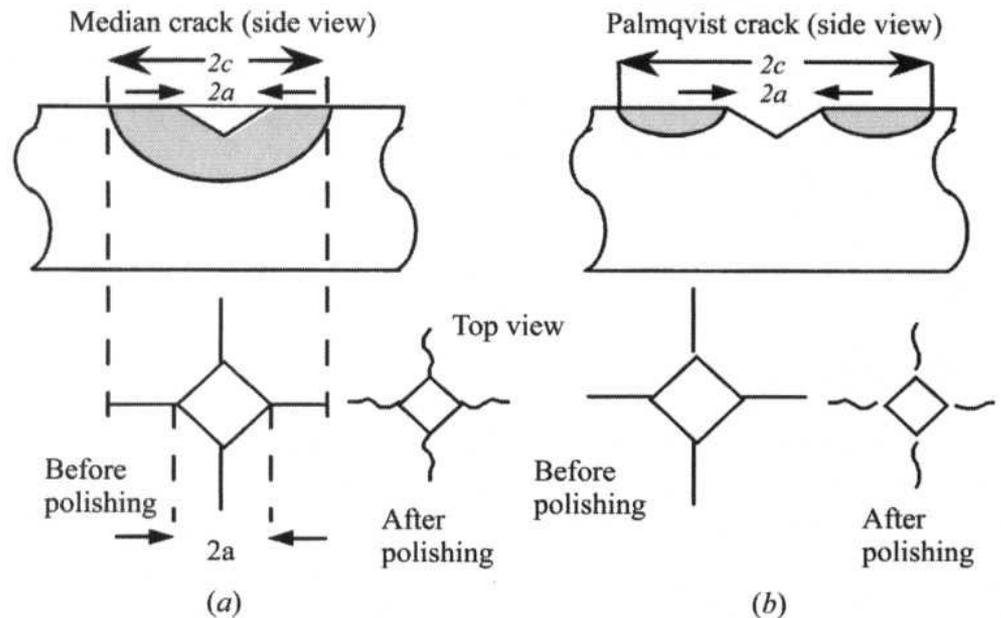
Φ é um fator geométrico

H é a dureza Vickers

E é o módulo elástico

$f \left(\frac{c}{a} \right)$ é uma função que

depende do tipo de trinca



Esse método fornece resultados semiquantitativos, que podem ser usados para prospecção de materiais e métodos para produzir alta tenacidade, mas os valores da tenacidade obtidos não se comparam com os anteriores.

Defeitos de Griffith

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

γ_s = energia de superfície

E = rigidez elástica

c = tamanho do maior defeito

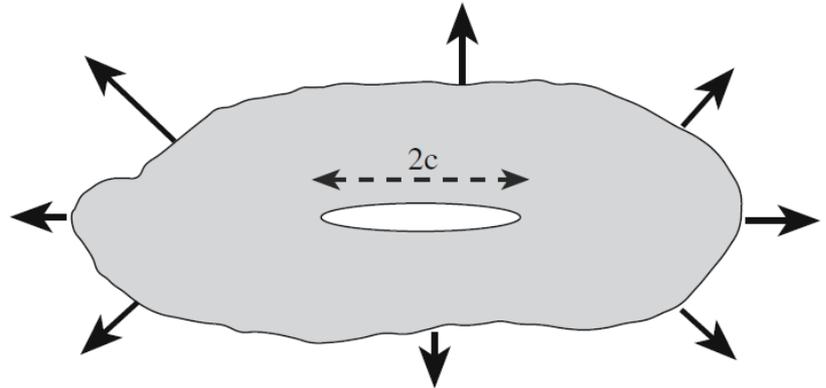


FIGURE 18.5 The “Griffith” crack of length $2c$.

- A fratura depende de uma combinação de tensão aplicada e tamanho de defeito.
- O maior defeito será o causador da fratura.
- Natureza estatística da fratura em cerâmicas e vidros.
- Quanto maior o volume, maior a probabilidade de existir um defeito grande.

http://en.wikipedia.org/wiki/Force_lines

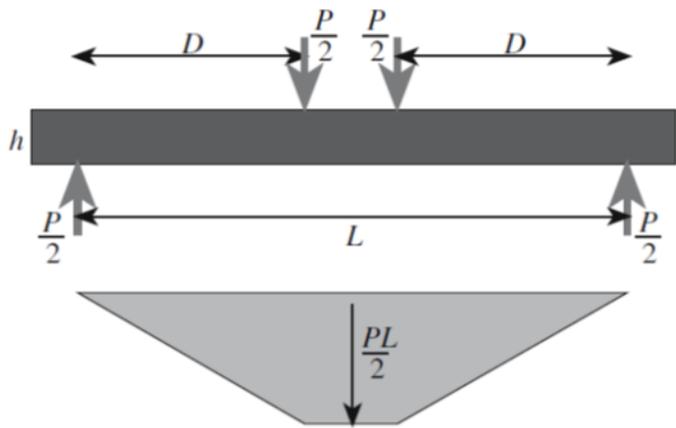
A. A. Griffith, *Phil. Trans. Roy. Soc. A221* (1920) p. 163-198

O que Griffith não explica

- O **efeito do tempo**: um material cerâmico sob tração pode não fraturar imediatamente, ou seja, nesse caso o tamanho máximo de defeito é menor que o crítico para a tensão em questão, mas um dia ele acaba fraturando...
- Sob uma carga constante, o tempo para a fratura varia inversamente com a intensidade da carga aplicada.
- Fibras de vidro tracionadas imediatamente após a fabricação (superfície pristina) apresentam resistência maior que fibras semelhantes ensaiadas após algum tempo.
- Quanto maior a taxa de aplicação da carga, maior a resistência mecânica observada.

Crescimento subcrítico de trinca

Flexão em 4 pontos

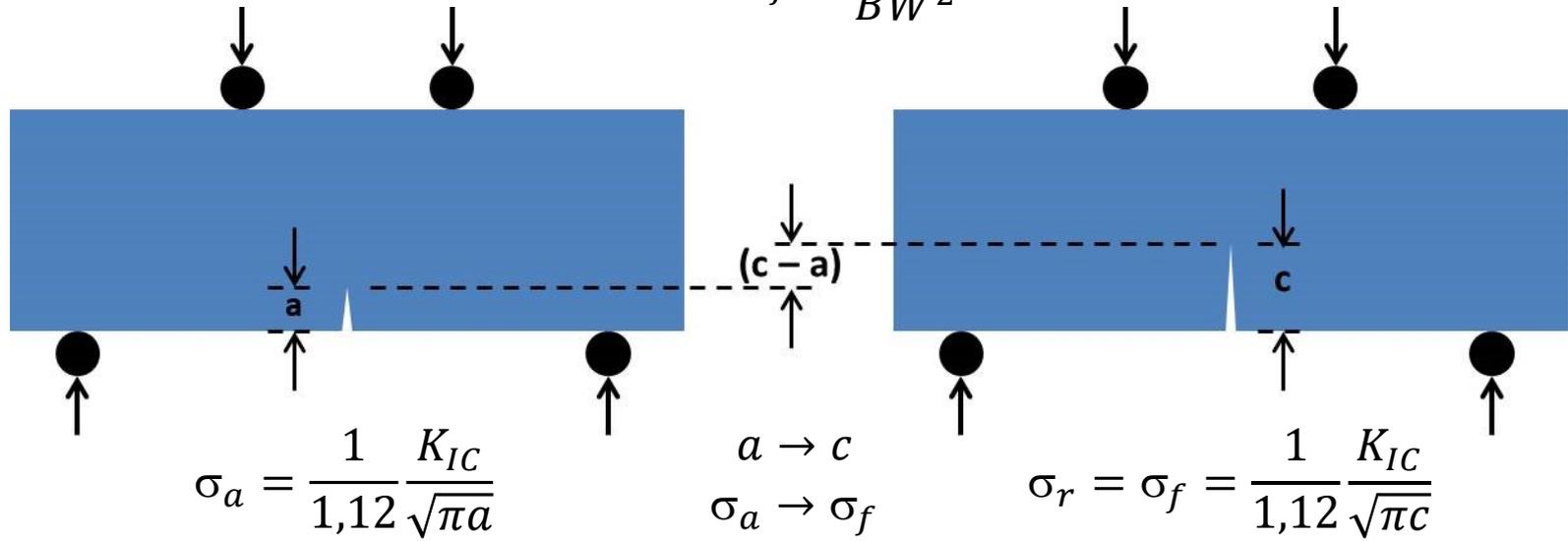
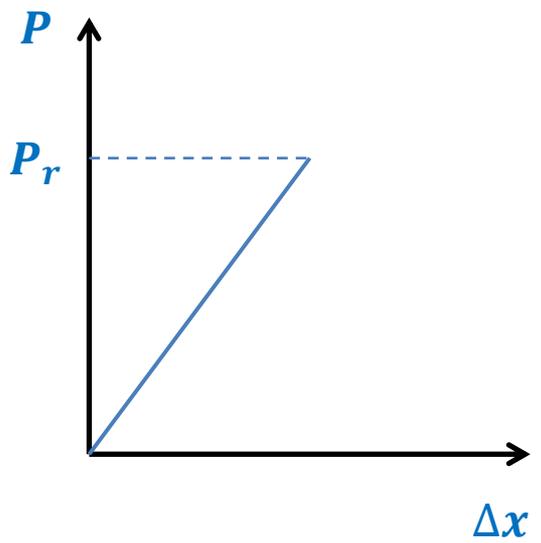


σ_a = tensão aplicada

$$\sigma_a = \frac{3PD}{BW^2}$$

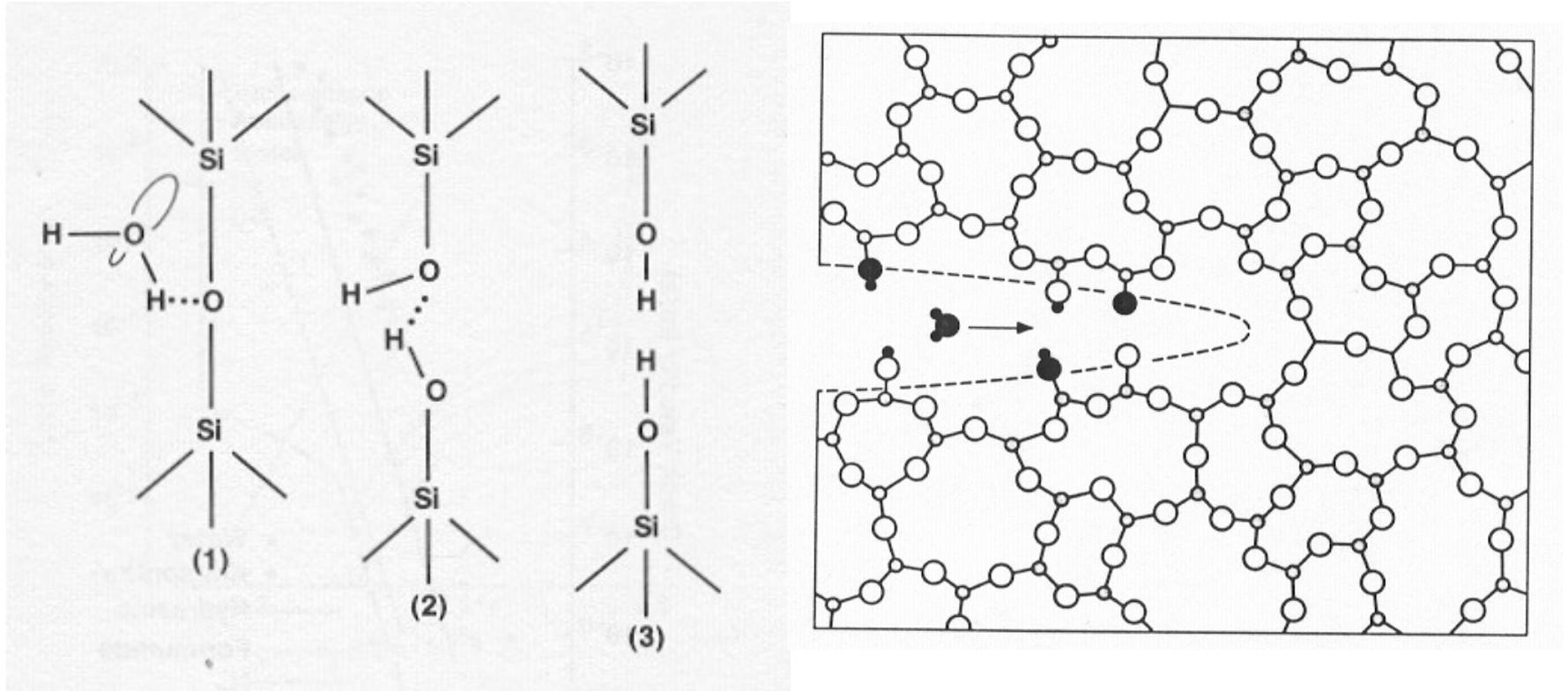
Na carga de ruptura, P_r , calculamos a tensão de ruptura, σ_r (ou tensão de fratura, σ_f , é a mesma coisa):

$$\sigma_r = \sigma_f = \frac{3P_r D}{BW^2}$$

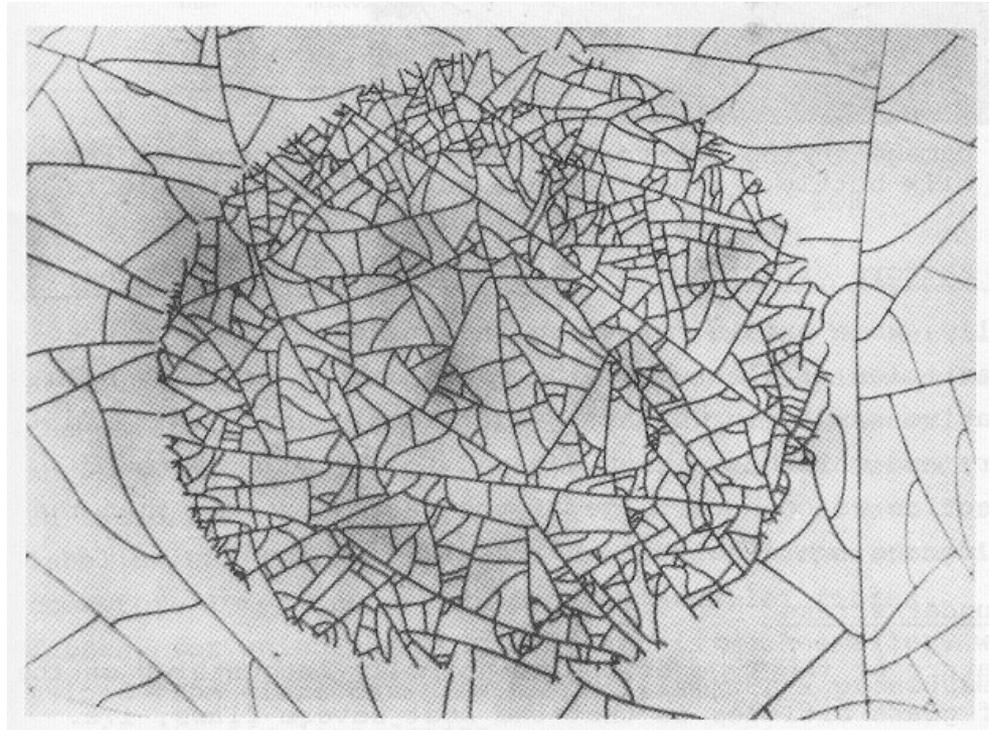


Quando o defeito cresce estavelmente (sem propagação catastrófica), em algum momento ele alcançará o tamanho crítico para fratura, e a fratura ocorrerá instavelmente (catastroficamente).

Mecanismo de corrosão sob tensão em silicatos: “fadiga estática”



O efeito do ambiente – água

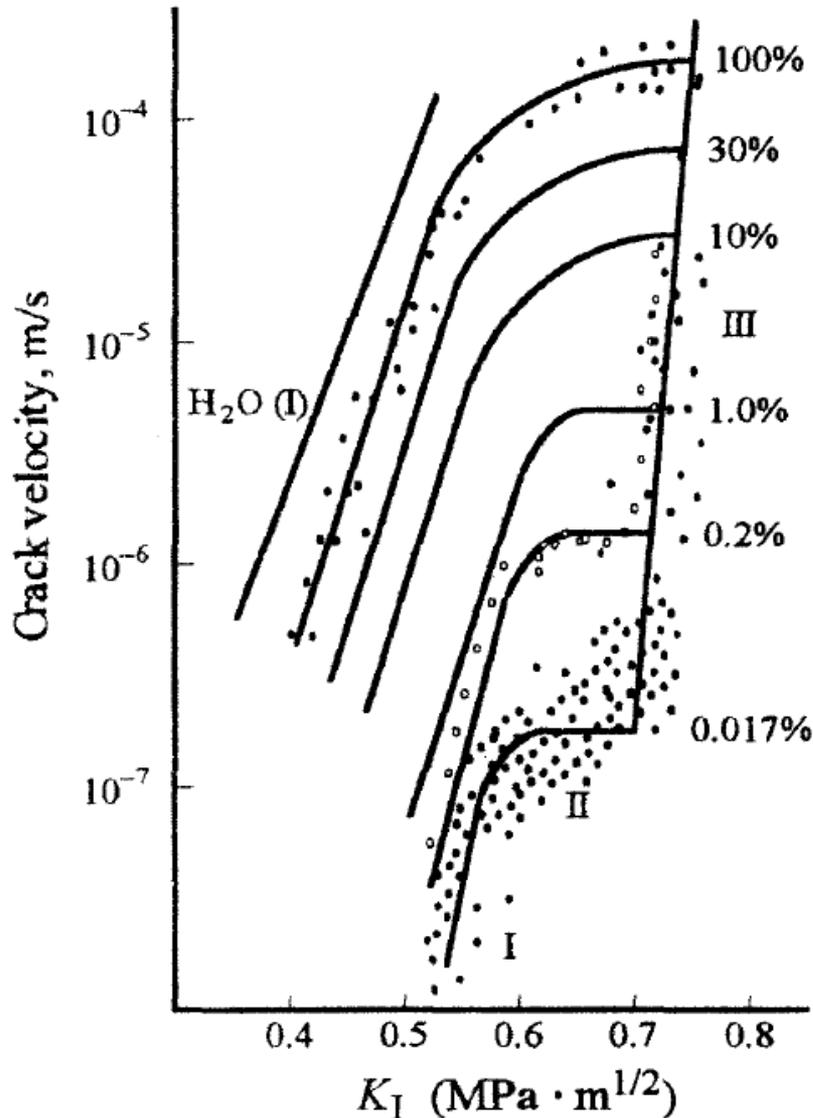


100 μm

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

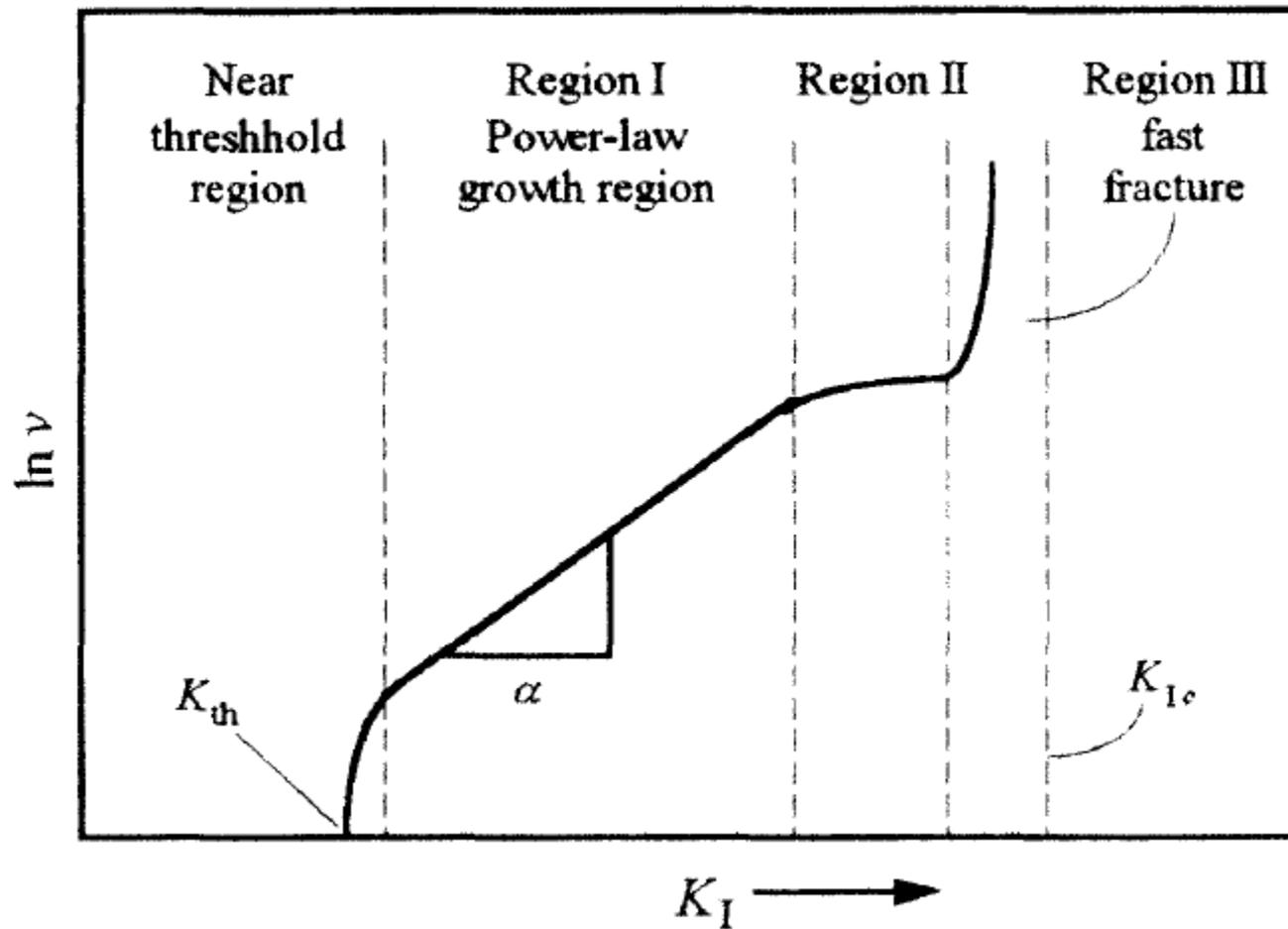
F. M. Ernsberger in *Advances in Glass Technology* (1962) 511-524, Plenum Press, New York

Crescimento Subcrítico de Trinca



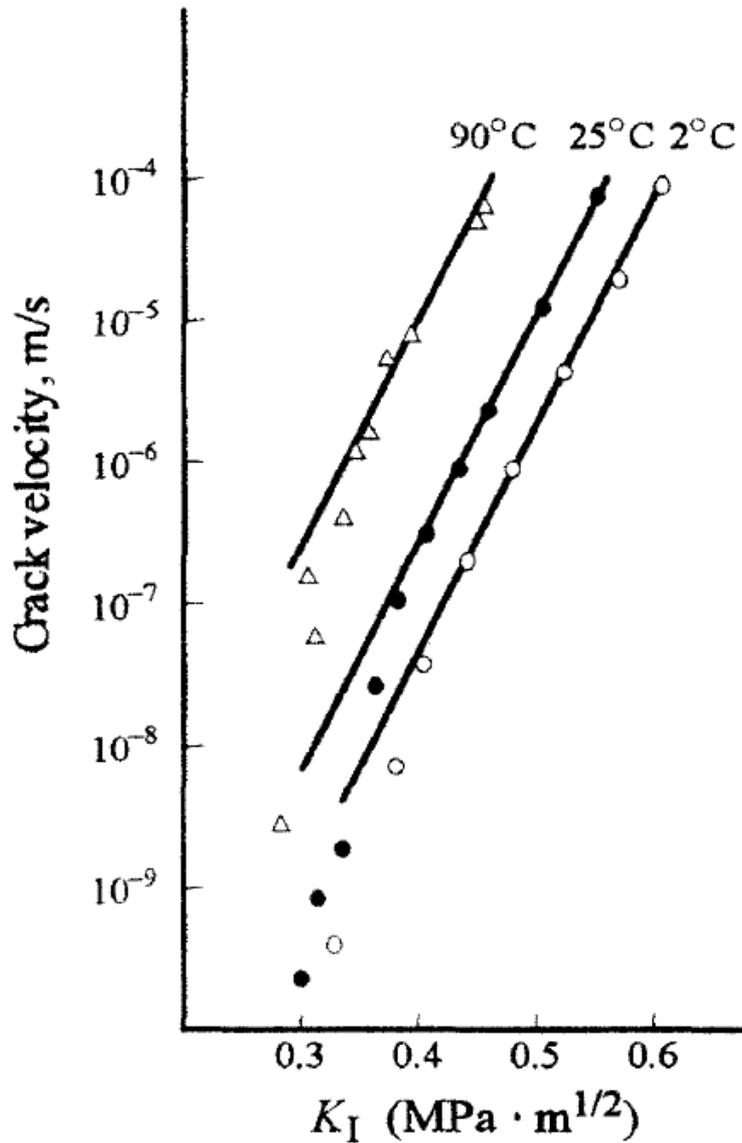
Dados reais para um vidro de janela (soda-cal) testado em atmosfera de N_2 com diferentes umidades relativas.

Velocidade de crescimento subcrítico de trinca



$$v = A^* \exp \alpha K_I$$

Crescimento Subcrítico de Trinca



A velocidade de propagação de trincas depende da temperatura: mesmo vidro da figura anterior imerso em água.

O efeito do ambiente na medida da resistência mecânica de cerâmicas

- Biocerâmicas a base de alumina, por exemplo, precisam ter resistência à flexão maior que 450 MPa quando ensaiadas em fluido corpóreo artificial (Body Fluid Analog – BFA; *solução de Ringer*).

RINGER'S SOLUTION (PARTS BY VOLUME)

NaCl solution 0.9%	94
KCl solution 1.15%	4
CaCl ₂ solution 1.22%	3
KH ₂ PO ₄ solution 2.11%	1
MgSO ₄ solution 3.82%	1
NaHCO ₃ solution 1.3%	14
NaHPO ₄ solution 1 M	13

Mecanismos de tenacificação

TABLE 18.6 Classification of Toughening Mechanisms in Ceramics

<i>General mechanism</i>	<i>Detailed mechanisms</i>
Crack deflection	Tilt and twist out of the crack plane around grains and second-phase additions
Crack bowing	Bowing in the crack plane between second-phase crack-pinning points
Crack branching	Crack may subdivide into two or more roughly parallel cracks
Crack tip shielding by process zone activity	Microcracking Transformation toughening Ductile yielding in process zone
Crack tip shielding by crack bridging	Second-phase brittle fibers with partial debonding Frictional and ligamentary grain bridges Second-phase ductile ligament bridging

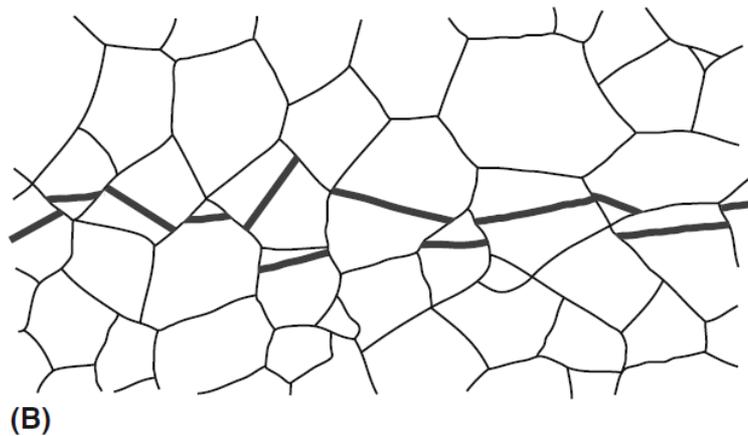
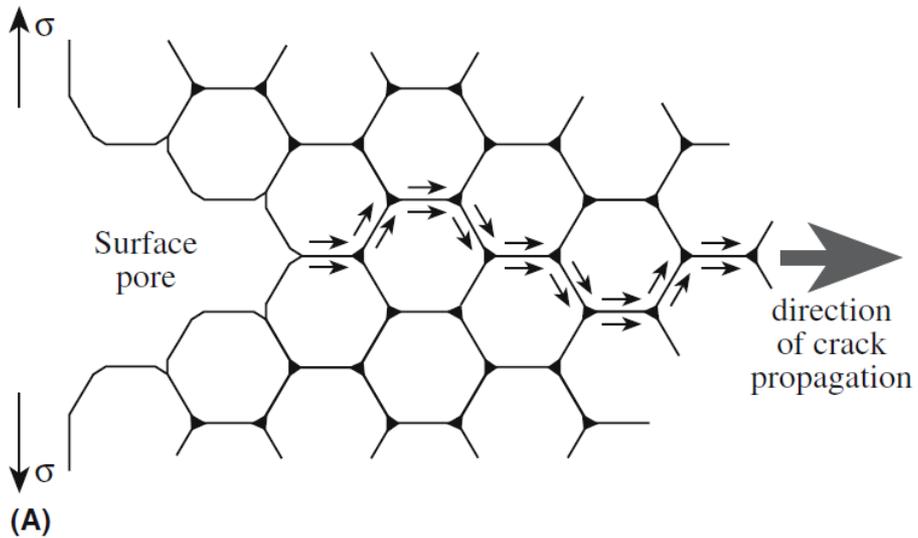


FIGURE 18.12 (a) Illustration of intergranular cracking. (b) Illustration of transgranular cracking.

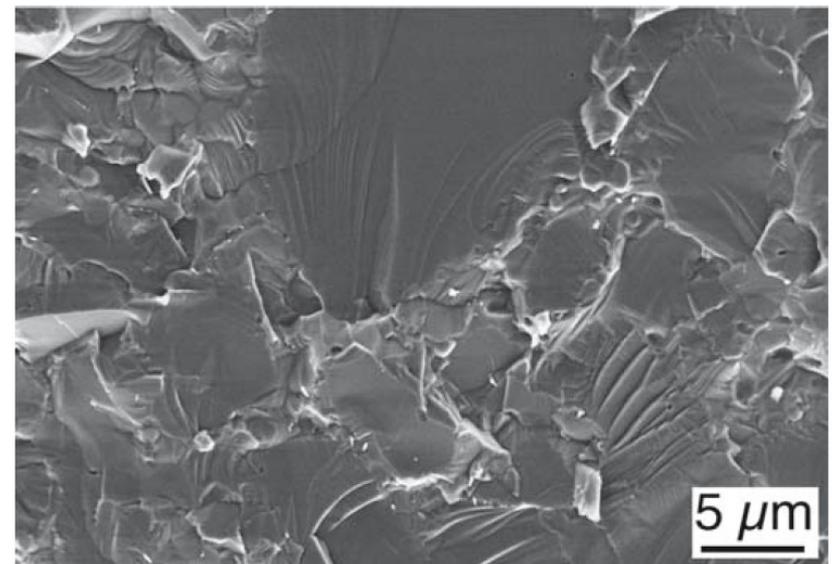
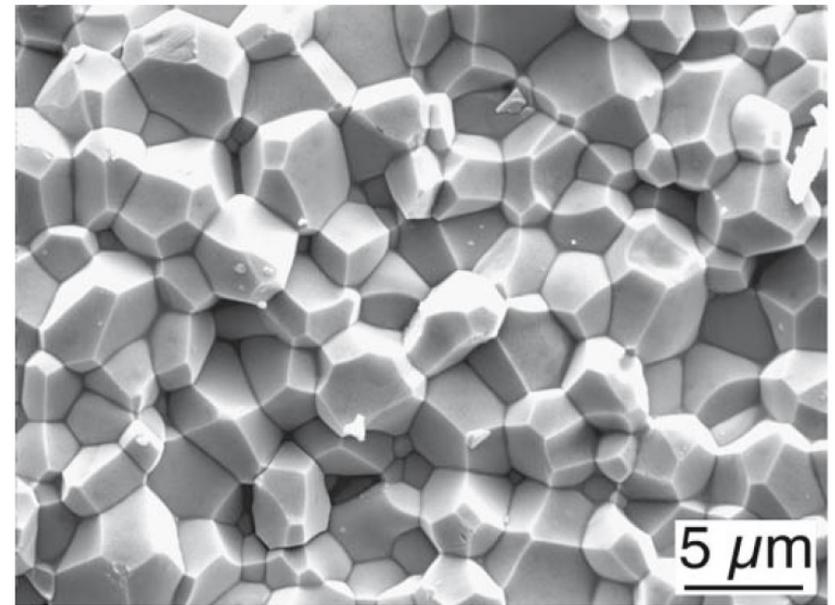


FIGURE 18.13 (a) The fracture surface of polycrystalline AlN. (b) The fracture surface of polycrystalline SiC.

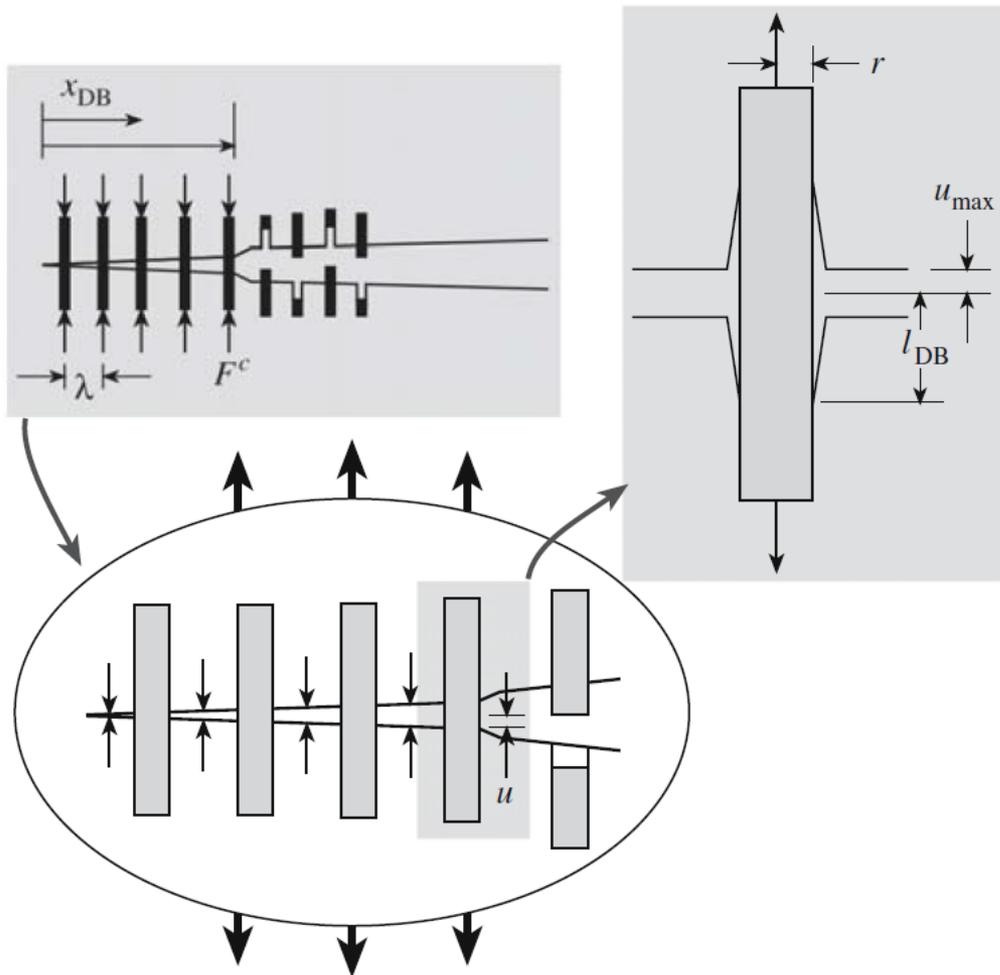


FIGURE 18.19 Illustration of a crack bridging mechanism with debonding and fiber pullout.

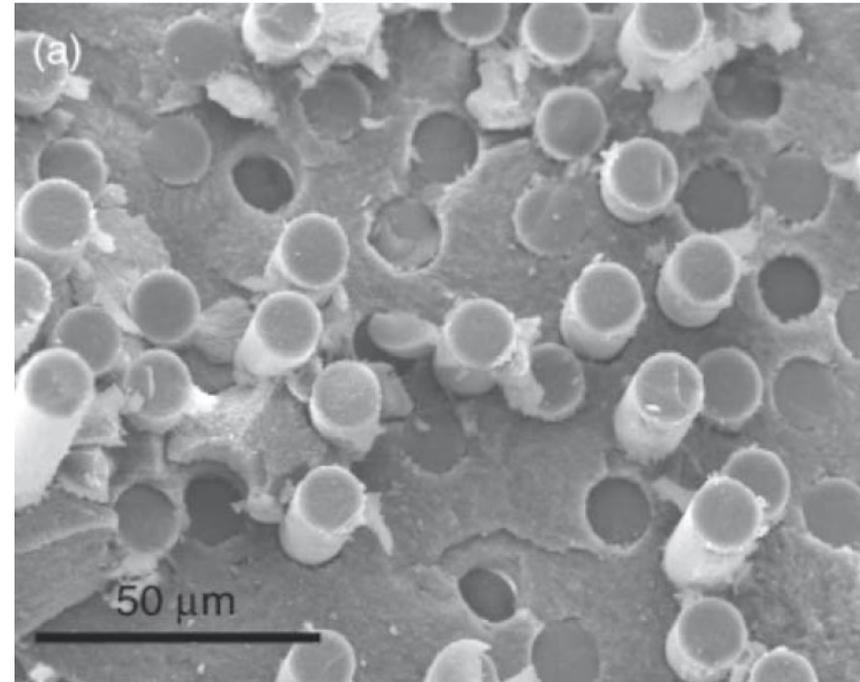


FIGURE 18.18 SEM image showing fiber pullout on the fracture surface of AlPO_4 -coated alumina/mullite fiber/ Al_2O_3 CMC, hot pressed at 1250°C for 1 h.

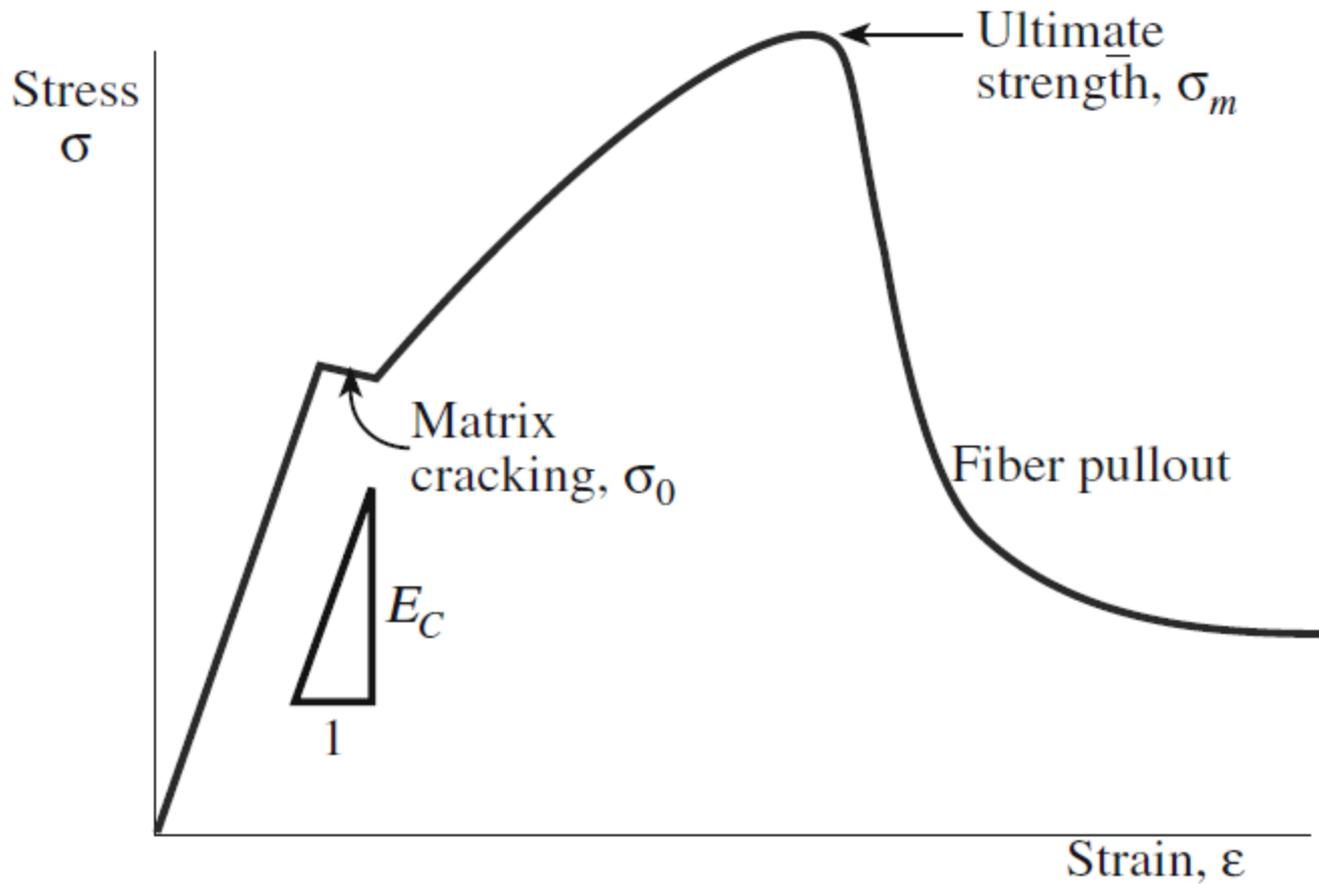


FIGURE 18.17 Schematic stress–strain curve for a tough fiber-reinforced ceramic matrix composite.

Compósitos de fibras cerâmicas em matriz cerâmica

- K_{Ic} para o caso específico em que a tenacificação é devida à deformação elástica de uma fase de reforço (fibras) parcialmente descolada da matriz, sem fricção intersticial:

$$K_{Ic} = \sqrt{\{E_c G_m + \sigma_f^2 [(rV_f E_c \gamma_f)/(12E_f \gamma_i)]\}} \quad (18.23)$$

- Os subscritos **c**, **m** e **f** se referem a compósito, matriz e fibra de reforço, respectivamente.
- A tenacidade à fratura aumenta com o:
 - aumento da fração volumétrica de fibras V_f
 - aumento da razão entre os módulos elásticos E_c/E_f
 - aumento da razão entre as energias de superfície da fibra e da interface γ_f/γ_i (quando a energia da de superfície da interface (γ_i) é menor, a trinca passa ao redor da fibra (Fig. 18.21 no slide a seguir)).

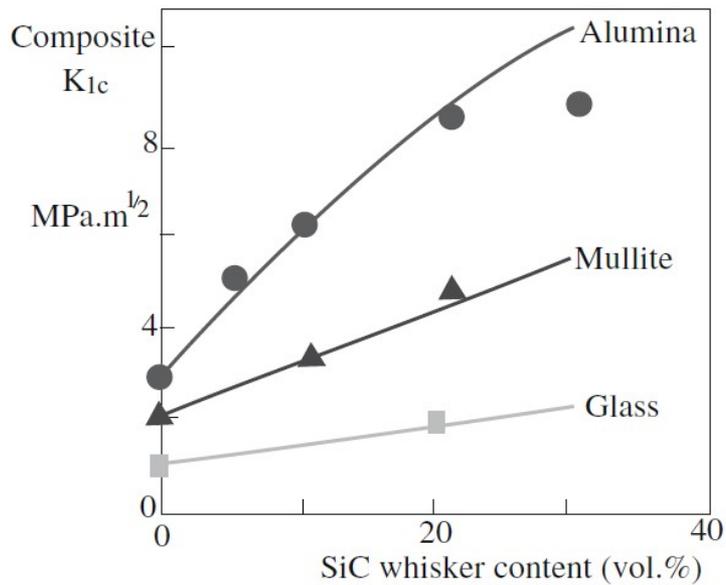


FIGURE 18.20 The effect of SiC whisker content on toughness enhancement in different matrices.

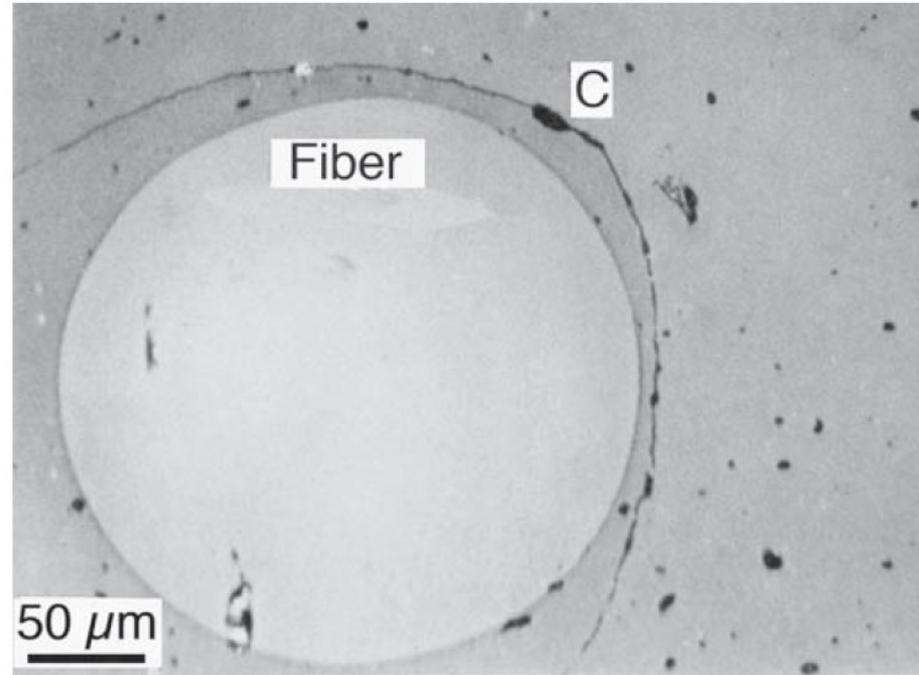


FIGURE 18.21 SEM image showing crack propagation around a saphikon (Al_2O_3) fiber in a calcium aluminosilicate (CAS) glass-ceramic.

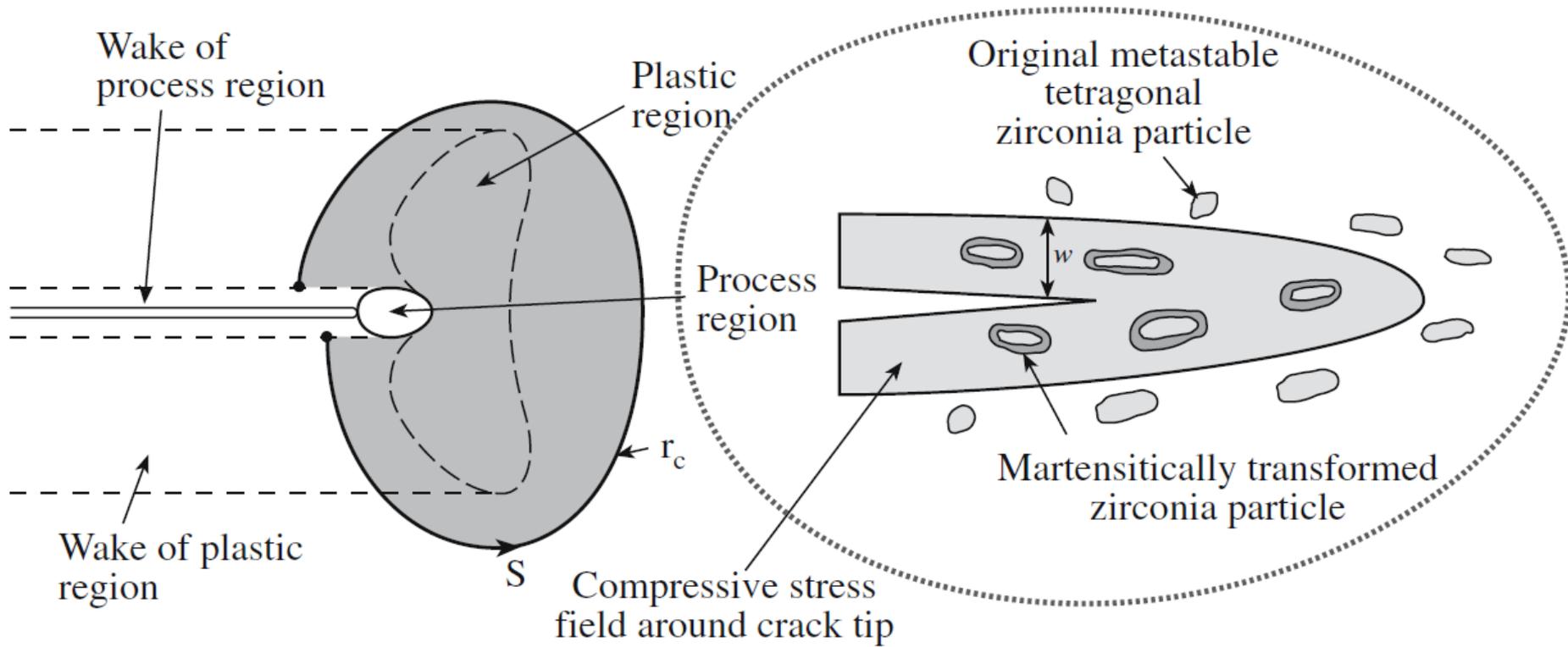


FIGURE 18.22 Illustration of transformation toughening in a ceramic matrix containing ZrO_2 particles.

TABLE 18.7 The Effect of Different Toughening Mechanisms

<i>Mechanism</i>	<i>Highest value achieved (MPa·m^{1/2})</i>	<i>Exemplary systems</i>
Continuous fiber reinforced	>30	SiC–SiC; glass–SiC
	>25	Glass-ceramics–SiC
	~16	Si ₃ N ₄ –SiC
Metal dispersed Transformation	~25	Al ₂ O ₃ –Al; Al ₂ O ₃ –Ni
	~20	ZrO ₂ (MgO)
Platelet	~14	Si ₃ N ₄ –SiC
Whisker	~11	Si ₃ N ₄ –SiC
	~8.5	Al ₂ O ₃ –SiC
Particle Microcracking	~8	Si ₃ N ₄ –SiC
	~10	Al ₂ O ₃ –ZrO ₂

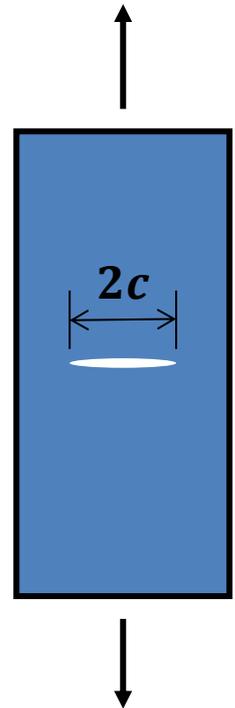
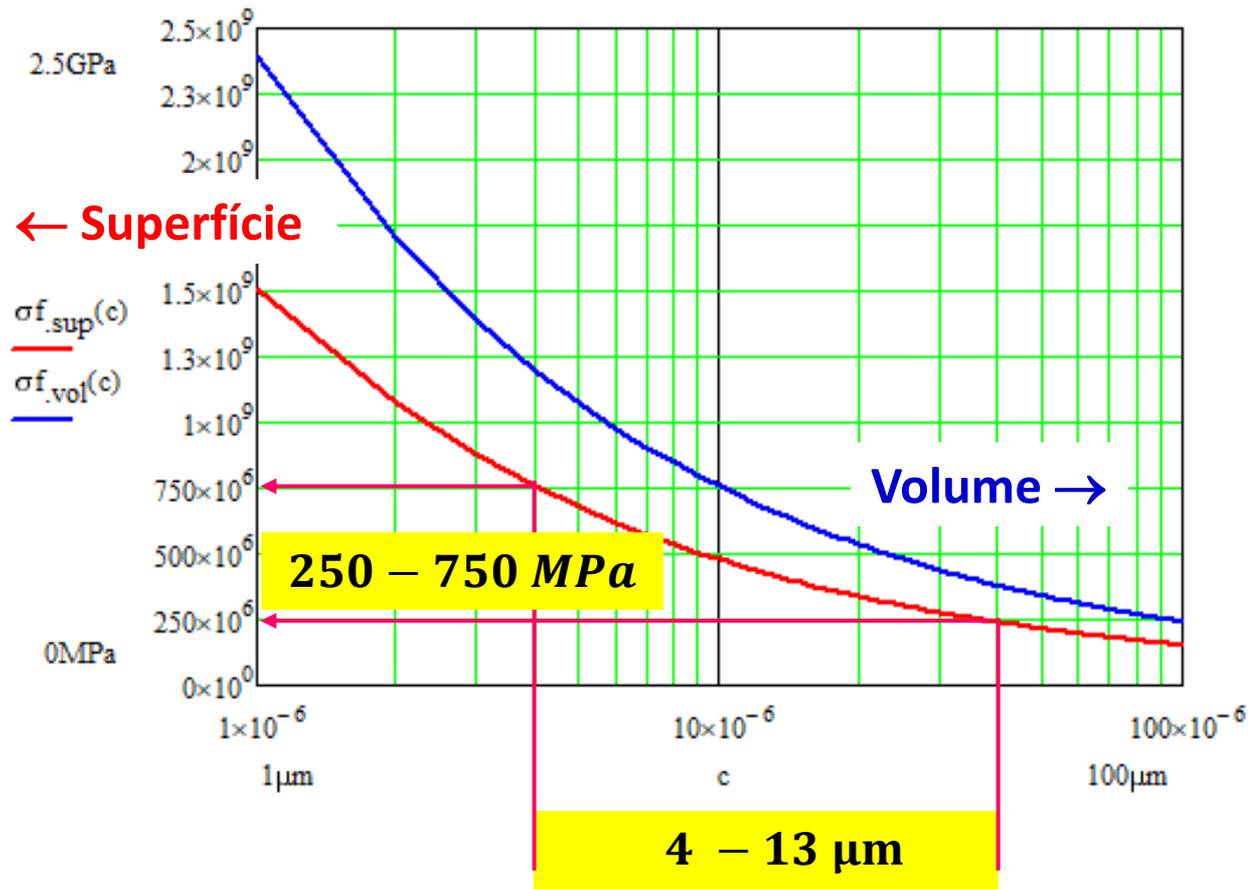
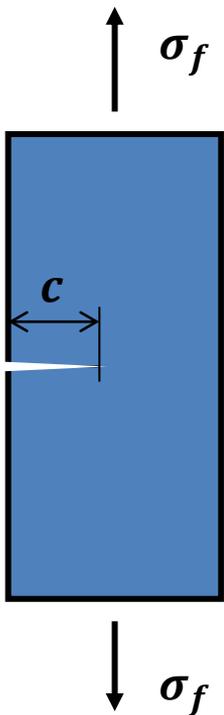
Variação da **tensão de fratura** para a **alumina** em função do tamanho crítico de trinca na superfície

$$\sigma_f(c) = \frac{1}{Y} \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi c}}$$

$$K_{IC} = 3 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$$

$$Y_{sup} = 1,12$$

$$Y_{vol} = 1$$



Variação dos resultados de resistência mecânica de materiais cerâmicos

- Quando ensaiamos um série de corpos de prova cerâmicos, observamos **grande variação dos resultados.**
- Mesmo se os CPs forem provenientes de um mesmo lote de fabricação.
- Isso é devido à
 - **distribuição de defeitos** geradores de trincas nos CPs
 - **grande sensibilidade** das cerâmicas a pequenas variações nas dimensões e orientações desses defeitos (consequência do baixo K_{Ic})

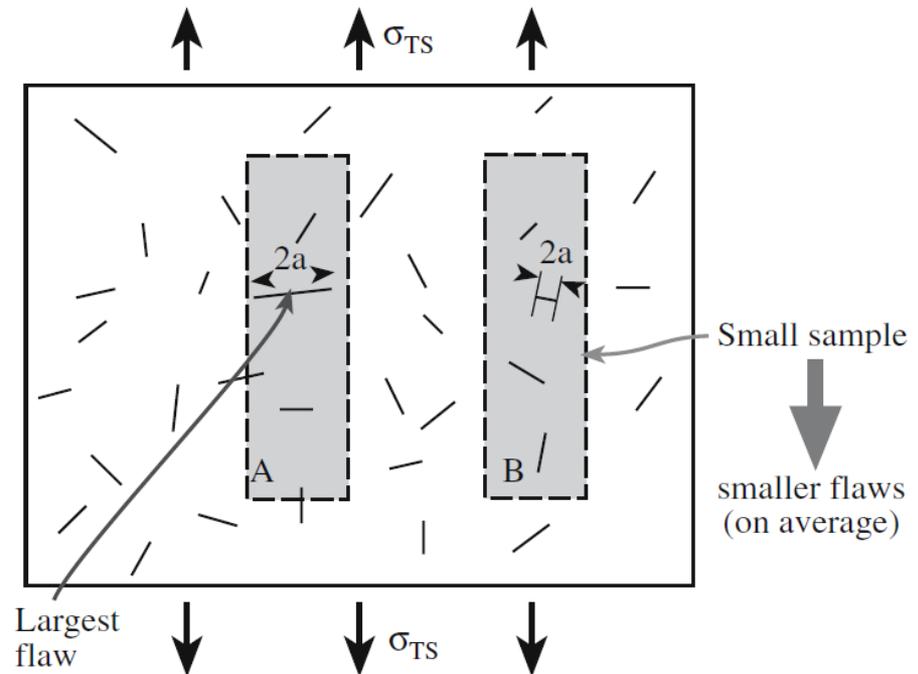


FIGURE 16.22 The largest flaw will be the weakest link and the source of failure. Smaller samples have smaller flaws.

Estatística da fratura

- A estatística da fratura é baseada no critério do ***elo mais fraco***.
- Se aplica muito bem a materiais cerâmicos frágeis, ou seja, que falham pela **propagação instável de trinca a partir do maior defeito** (o elo mais fraco neste caso)
- Existem várias funções (equações) de distribuição estatística são baseadas no critério do elo mais fraco:
 - Distribuição de Weibull
 - Distribuições de densidade de falha
 - Distribuições do valor extremo
- A **distribuição de Weibull** é a mais popular, pela simplicidade matemática e maior concordância com os dados experimentais.

Distribuição de Weibull

- A probabilidade de ruptura de uma **corrente com N elos** semelhantes é controlada pela **probabilidade de ruptura ou falha do elo mais fraco, P_f** .
- Sendo **P_s a probabilidade de sobrevivência de um elo**, a **probabilidade de sobrevivência de uma corrente de N elos, P_{sN}** , pode ser escrita como a multiplicação das probabilidades dos N elos individuais:

$$P_{sN} = P_s^N = (1 - P_f)^N$$

$$P_{sN} = (1 - P_{fN}) = (1 - P_f)^N$$

$$P_{fN} = 1 - (1 - P_f)^N$$

- Essa última expressão pode ser escrita de forma aproximada como:

$$P_{fN} = 1 - \exp(-Nf(\sigma))$$

considerando $f(\sigma)$ uma função do parâmetro σ , positiva, crescente, que vai para zero quando $\sigma = \sigma_{min}$. A função mais simples que satisfaz essas condições (segundo Weibull) é :

$$f(\sigma) = \left(\frac{\sigma - \sigma_{min}}{\sigma_0} \right)^m$$

Distribuição de Weibull

- A aplicação para materiais é feita aproximando-se o comportamento do material ao de uma corrente, cujo número de elos é dado pelo volume (ou superfície) em questão:

$$P_F = 1 - \exp \left[- \iiint \left(\frac{\sigma - \sigma_{min}}{\sigma_0} \right)^m dV \right]$$

onde

V é o volume

σ é a tensão sobre um elemento de volume dV

σ_{min} é a tensão mínima para a qual existe uma expectativa de falha

σ_0 é um parâmetro de normalização de tensão, e

m é o chamado de módulo de Weibull

- Observe que $Nf(\sigma)$ é substituído por uma integral de volume, pois o material não é mais um conjunto discreto de componentes, mas é um meio contínuo.
- σ_{min} é frequentemente igualado a zero, sem muito erro, o que significa assumir que sempre há uma probabilidade de falha por menor que seja a tensão. Isso dá uma análise pessimista ao sistema, o que é mais seguro.

Distribuição de Weibull

- Reescrevendo a expressão para a probabilidade acumulada de falha com $\sigma_{min} = 0$:

$$P_F = 1 - \exp \left[- \iiint \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m dV \right]$$

- Que também pode ser expressa da seguinte forma, introduzindo o termo P_S , a probabilidade de sobrevivência:

$$P_S = 1 - P_F = \exp \left[- \iiint \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m dV \right]$$

- Para ensaios de tração pura e uniforme (todo volume do corpo de prova fica sob tração constante), considerando **volume unitário**:

$$1 - P_F = \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right]$$

Distribuição de Weibull

$$P_F = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right]$$

- Rearranjando e aplicando logaritmo nos dois lados da expressão acima:

$$\ln \frac{1}{(1 - P_F)} = \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m$$

- E aplicando logaritmo de novo:

$$\ln \left[\ln \frac{1}{(1 - P_F)} \right] = m \ln \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right) = \ln \left(\frac{1}{\sigma_0^m} \right) + m \ln \sigma$$

Distribuição de Weibull

- Para determinação de σ_0 , consideramos:

$$\ln \left[\ln \frac{1}{(1 - P_F)} \right] = 0$$

$$\left[\ln \frac{1}{(1 - P_F)} \right] = 1$$

$$\frac{1}{(1 - P_F)} = e^1$$

$$P_F = 1 - \frac{1}{e} = 0,63 \text{ ou } 63\%$$

- Nesse caso,

$$m \ln \sigma = - \ln \left(\frac{1}{\sigma_0^m} \right)$$

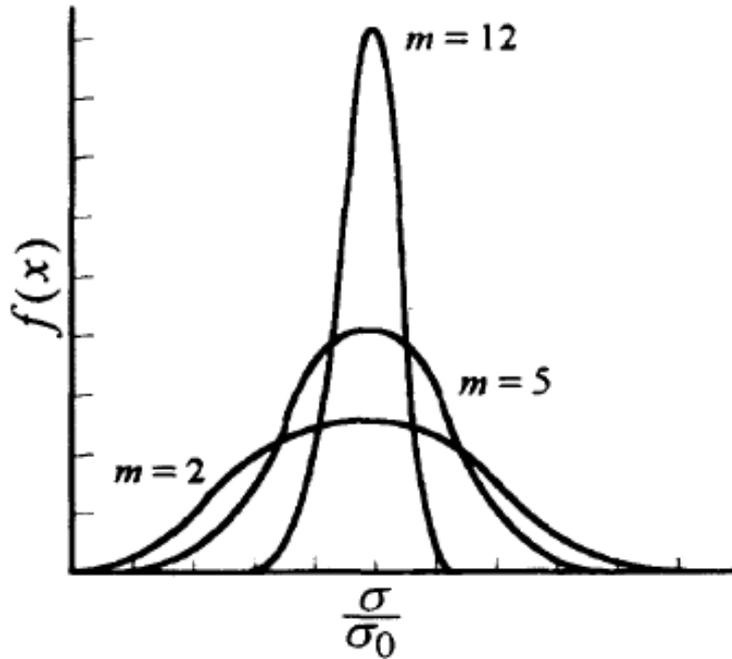
$$\ln \sigma^m = \ln(\sigma_0^m)$$

$$\sigma = \sigma_0$$

Assim, σ_0 = tensão característica é a tensão para a qual a probabilidade de falha é 0,63 ou 63%; ou a probabilidade de sobrevivência é 0,37 ou 37% (1/e).

Projeto determinístico vs. abordagem estatística

Função de distribuição de Weibull –
a resistência do elo mais fraco.



$$f(x) = m(x)^{m-1} \exp(-x^m)$$

$$f\left(\frac{\sigma - \sigma_{\min}}{\sigma_0}\right) = m \left(\frac{\sigma - \sigma_{\min}}{\sigma_0}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{\sigma - \sigma_{\min}}{\sigma_0}\right)^m\right]$$

- m = módulo de Weibull
- σ_0 = resistência característica, para a qual a probabilidade de sobrevivência é 0,37 ($1/e$)
- σ_{\min} = nível de tensão abaixo do qual a probabilidade de fratura é zero

Projeto determinístico vs. abordagem estatística

Forma acumulada da distribuição de Weibull

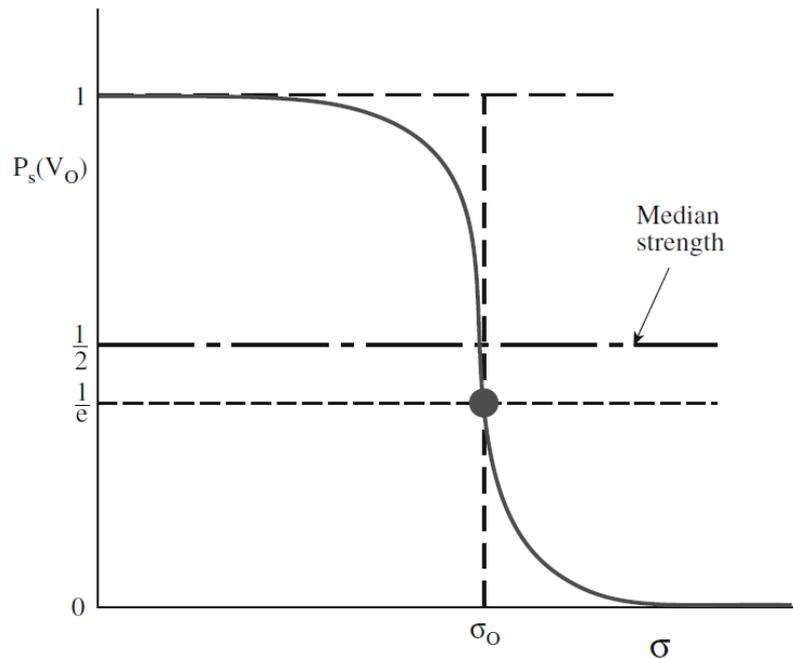
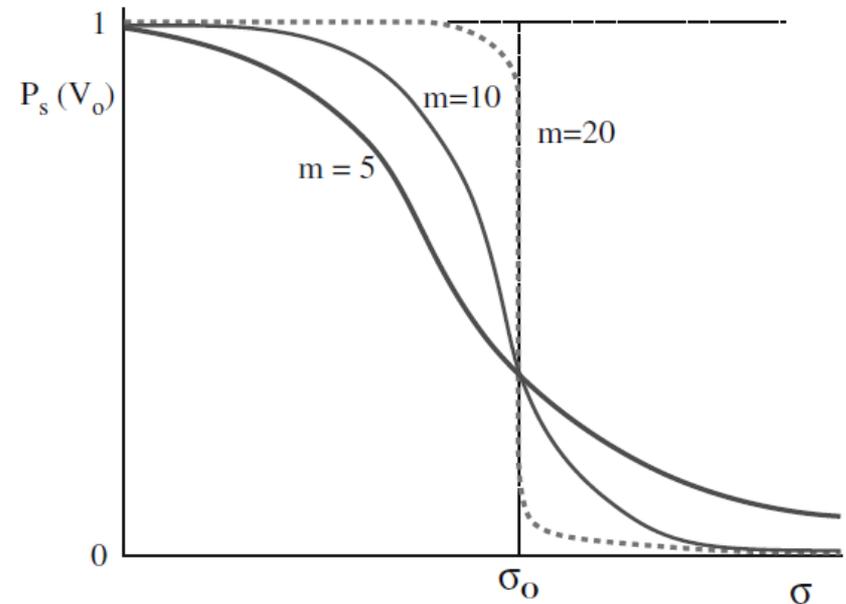


FIGURE 16.19 The Weibull distribution function.



Efeito do módulo de Weibull (m)
na probabilidade de sobrevivência.

Aços tem m da ordem de 100!

$$P_S = 1 - P_F = \exp \left[- \int_V \left(\frac{\sigma - \sigma_{\min}}{\sigma_0} \right)^m dV \right] \quad (16.18)$$

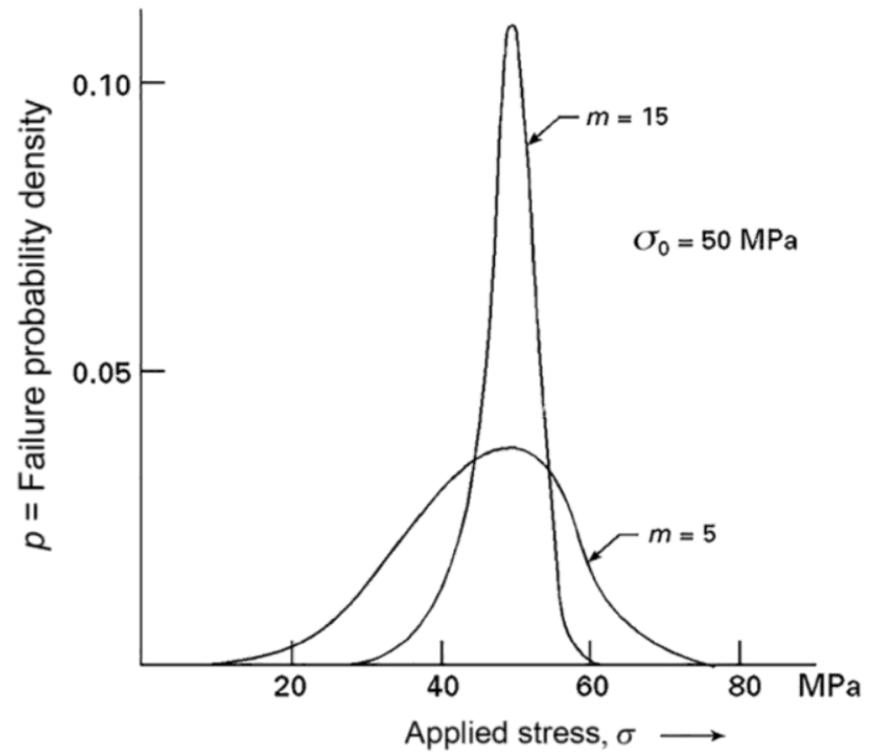
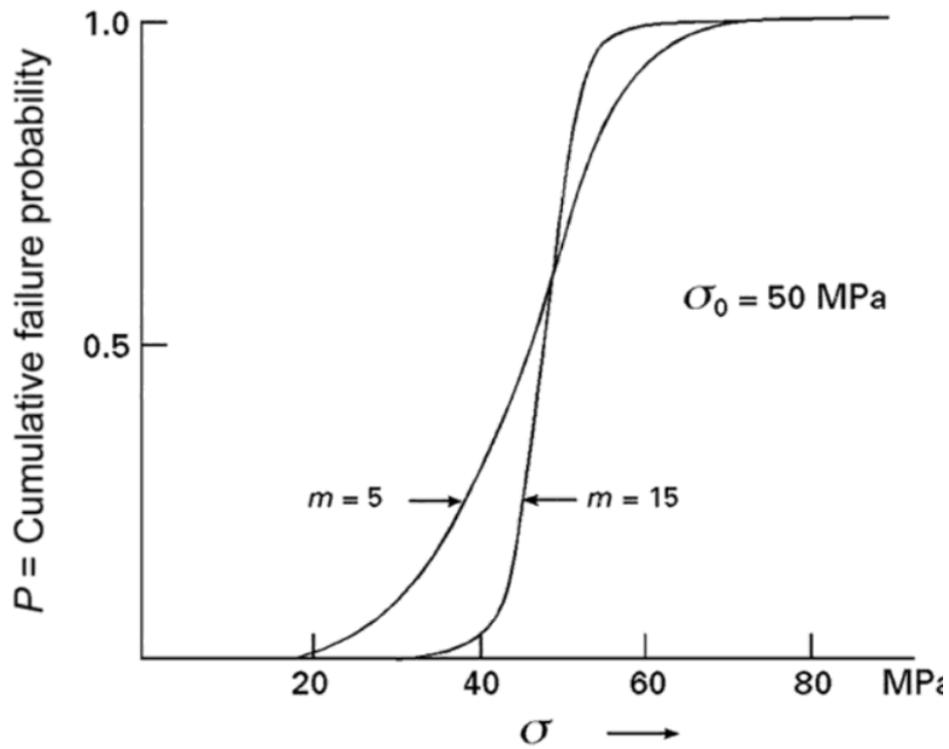


Gráfico de Weibull

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{P_s} \right) \right] = m \ln \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m = m \ln \sigma - m \ln \sigma_0$$

- Equação de uma reta **$y = bx + cte.$**
- Quanto maior a inclinação, maior o módulo de Weibull m e menor é a variabilidade dos resultados.
- Cerâmicas têm valores de m entre 5 e 20 (aços $m = 100$).
- É preciso um grande número de corpos de prova para determinação de m :
 - 30 cps resultam m com 20% de erro
 - ~100 cps são necessários para m com +90% confiança

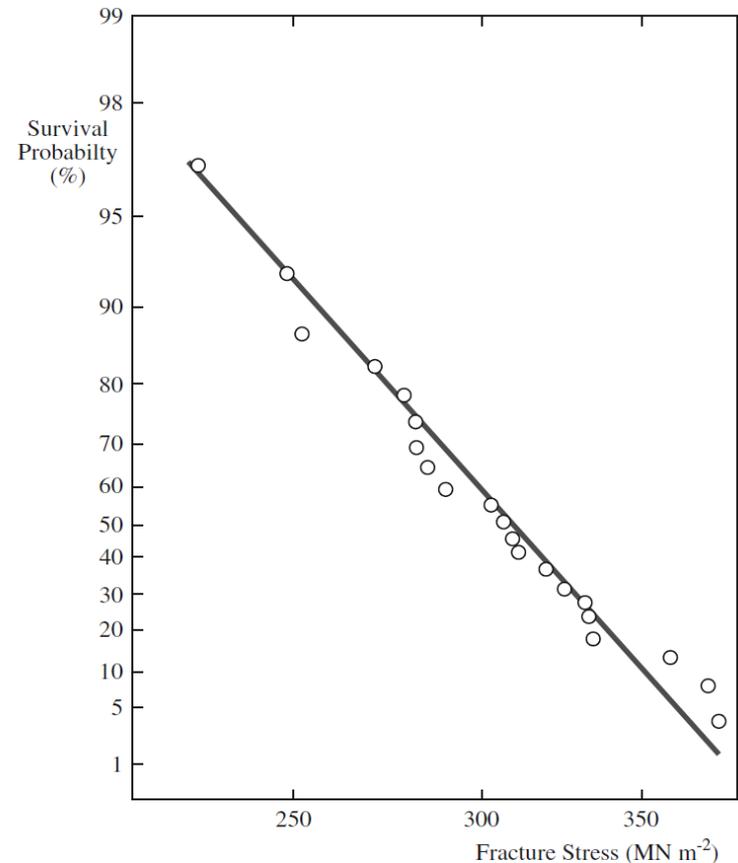


FIGURE 16.20 Weibull plot showing probability of failure as a function of fracture stress.

Procedimento para estatística de Weibull

1. Organizar os dados em ordem crescente de resistência mecânica

2. Determine P_S para cada resultado:

$$P_S = 1 - \frac{j}{N+1}, \text{ onde } j \text{ é a posição do resultado}$$

$$\text{ou } P_S = 1 - \frac{j-0,3}{N+0,4}, \text{ que é mais preciso}$$

3. Calcule $\ln \sigma$ e $-\ln \left(\ln \frac{1}{P_S} \right)$

4. Faça um gráfico de $-\ln \left(\ln \frac{1}{P_S} \right)$ versus $\ln \sigma$

5. Por regressão linear, obtenha a equação da reta. O coeficiente angular é o módulo de Weibull m .

Gráfico de Weibull

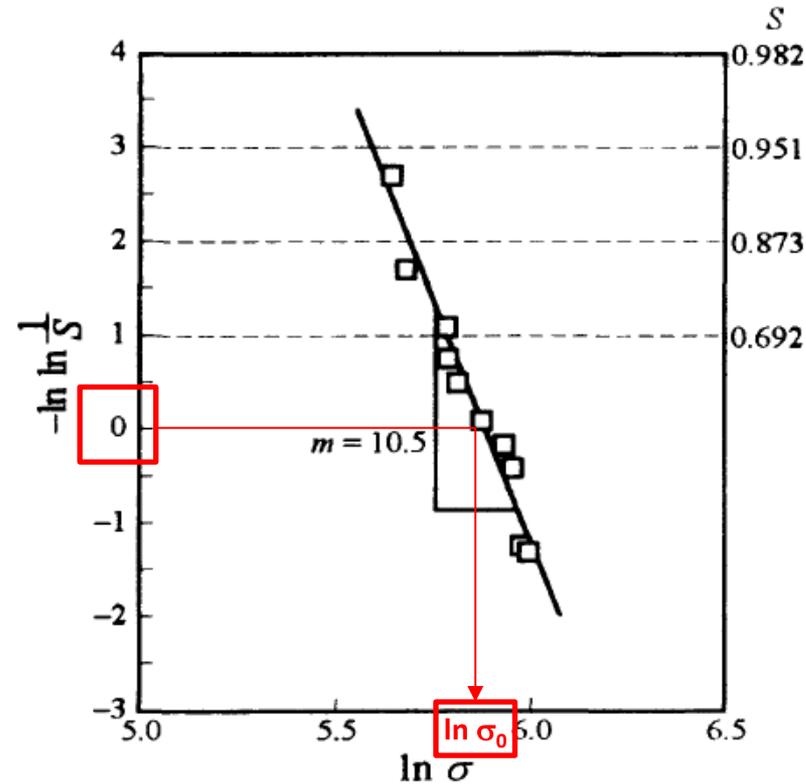


Figure 11.21 Weibull plot of data shown in Table 11.2. Slope of the line is the Weibull modulus m . The actual survival probability is shown on the right-hand side. At low stresses, S is large (left-hand corner of figure).²⁰⁴

²⁰⁴ The reason that $-\ln \ln(1/S)$ is plotted rather than $\ln \ln(1/S)$ is aesthetic, such that the high survival probabilities appear on the upper left-hand sides of the plots.

Efeito do volume

$$P_S = \exp \left[- \left(\frac{V}{V_0} \right) \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right]$$

onde $V = nV_0$

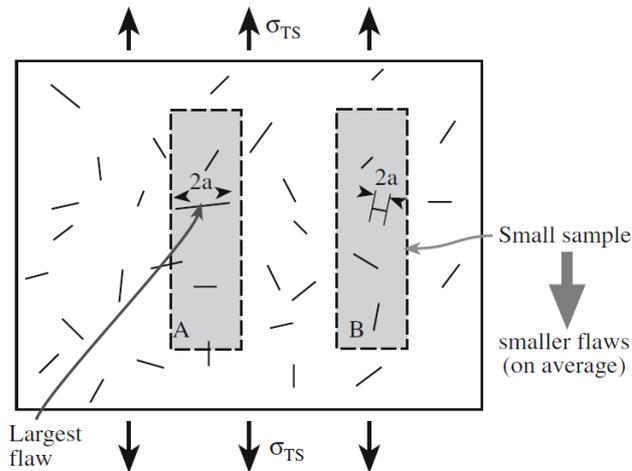


FIGURE 16.22 The largest flaw will be the weakest link and the source of failure. Smaller samples have smaller flaws.

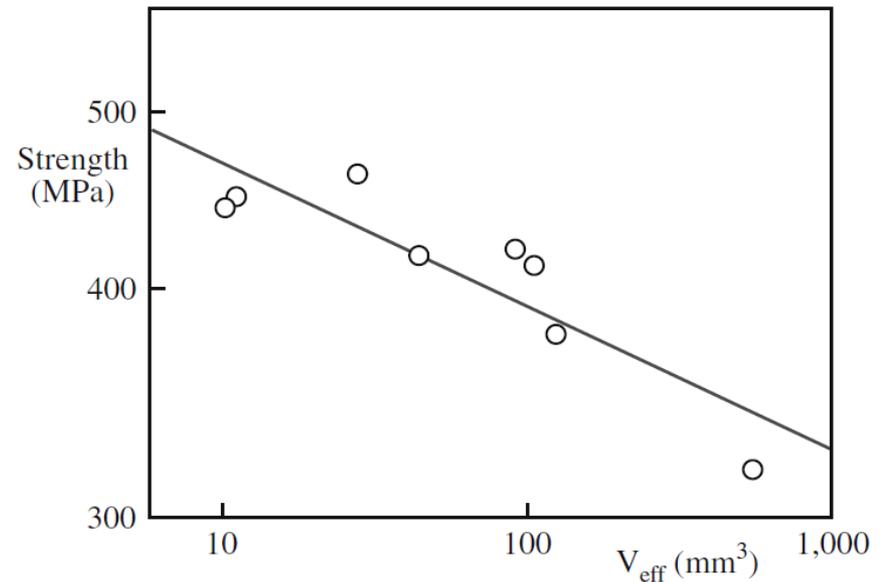


FIGURE 16.23 Fracture stress as a function of volume for Si_3N_4 springs.

Efeito do volume

- Para outros tipos de ensaio mecânico que não o de tração pura, consideramos um volume efetivo $V_{ef} = L_F V$, onde L_F é um fator de carregamento que depende do ensaio:

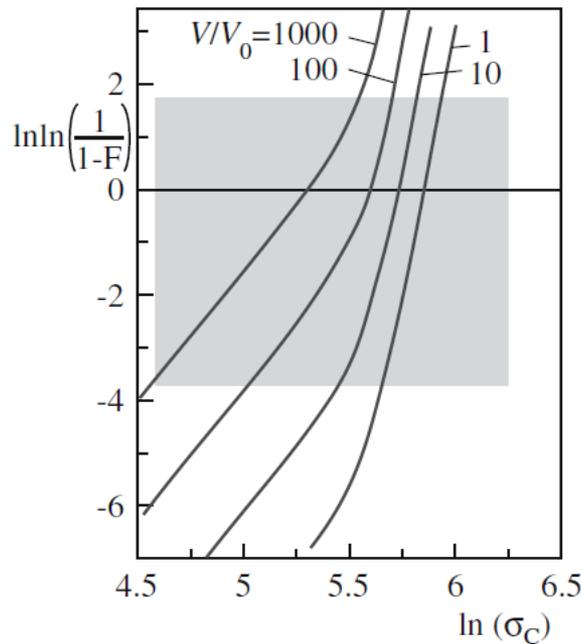
TABLE 16.9 Examples of Loading Factors^a

<i>Geometry</i>	<i>Loading factor, L_F</i>
Uniaxial tension	1
Pure bending	$1/[2(m + 1)]$
Three-point bending	$1/[2(m + 1)^2]$
Four-point bending	$(mL_i + L_o)/[2L_o(m + 1)^2]$

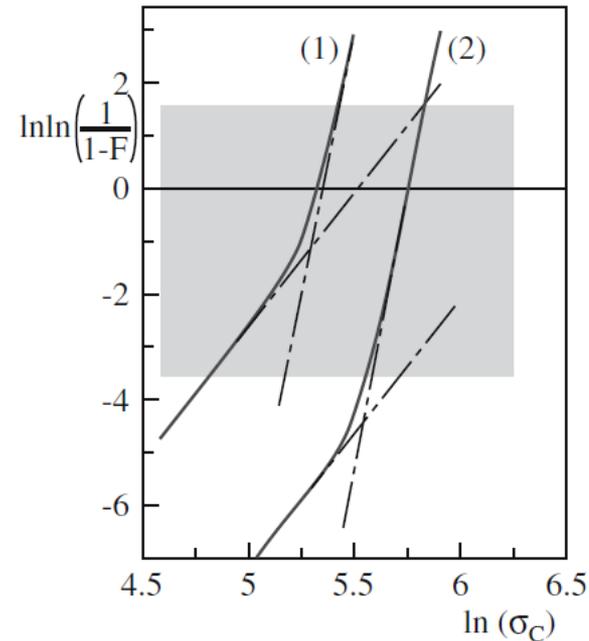
^a L_i , inner span; L_o , outer span.

Efeito de duas populações de defeitos

$$P_S = \exp \left[- \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_1} \right)^{m_1} - \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_2} \right)^{m_2} \right] \quad P_S = \exp \left[- \frac{V_{\text{eff1}}}{V_0} \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_{v1}} \right)^{m_1} - \frac{V_{\text{eff2}}}{V_0} \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_{v2}} \right)^{m_2} \right]$$



(A)



(B)

FIGURE 16.24 (a) Different flaws lead to different values of m . (b) Weibull plot for a sample having both surface and volume flaws.

Probabilidade de falha para alguns níveis de responsabilidade

TABLE 16.10 Suggested Failure Probabilities

P_F	<i>Possible consequences of failure</i>	<i>Example</i>
0.3	Slight inconvenience	Sticks of chalk
10^{-2}	Inconvenience and small expense	Ceramic cutting tool
10^{-6}	Injury	Window on a vacuum system
10^{-8}	Loss of life and significant expense	Ceramic protective tile on space shuttle

Proof testing: 100% dos componentes ensaiados em uma tensão máxima σ_{PT}

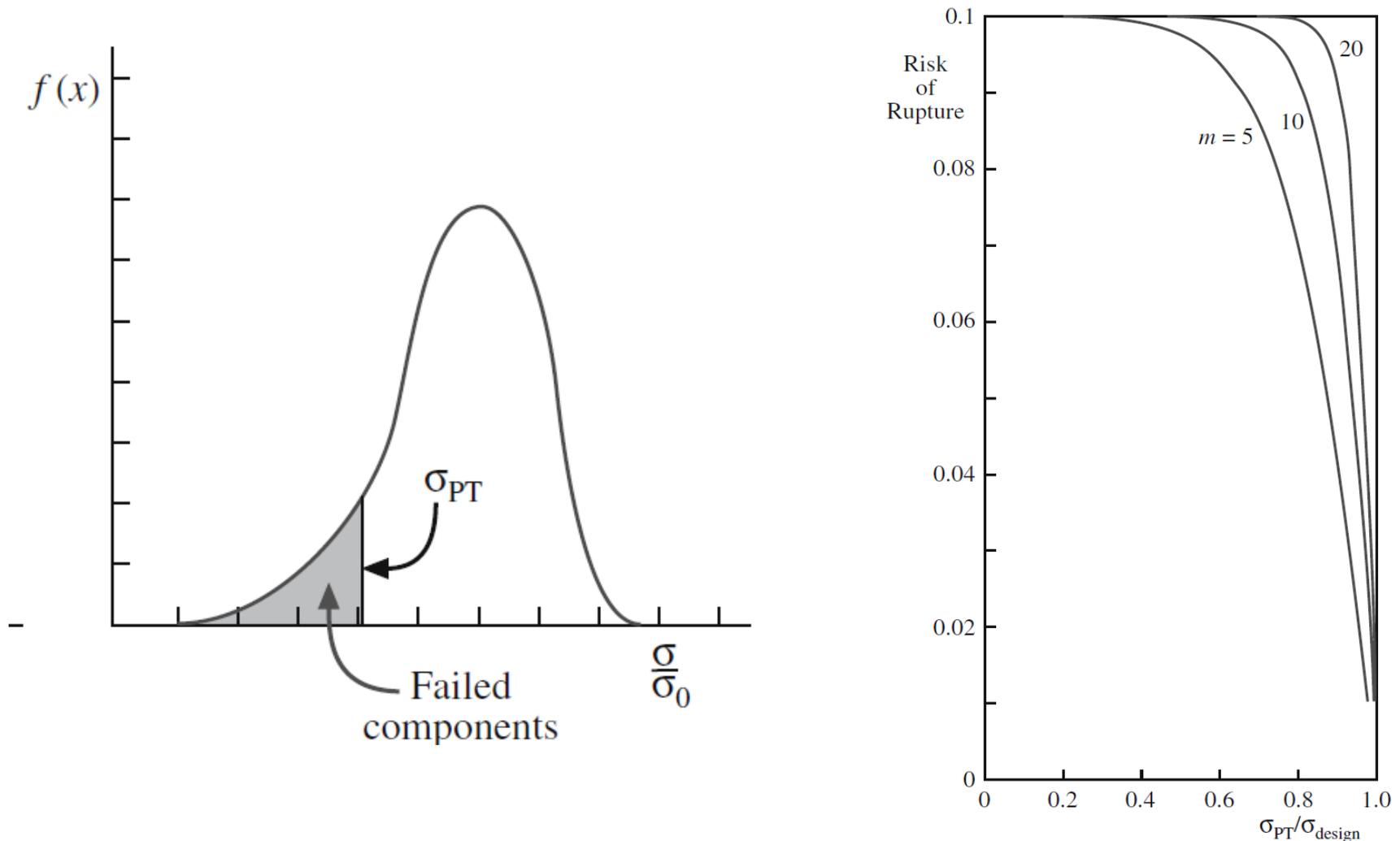


FIGURE 16.26 Plot showing the risk of rupture after proof testing to the ratio of proof-test stress to design stress.

Efeito do tempo

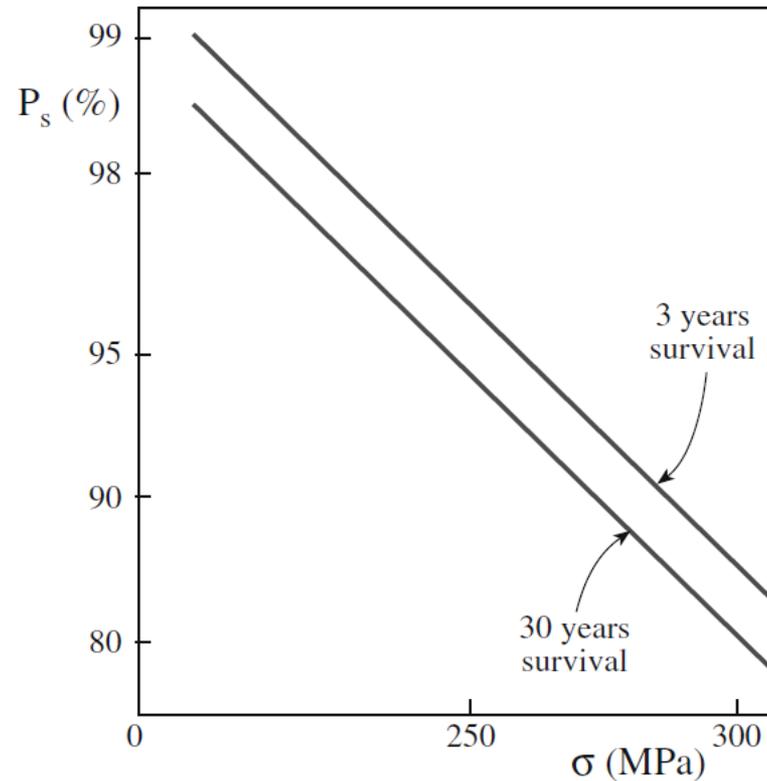


FIGURE 16.27 SPT diagram for medical grade Al_2O_3 . The survival probability decreases with increasing stress and longer times.

Aumento da resistência em vidros

- Reduzir a severidade das trincas ($\downarrow K_I$)
 - polimento a fogo
 - ataque 2-6% HF
 - autoclave c/ vapor
- Proteger do ambiente ao redor da trinca ($\uparrow K_{IC}$) e
- Reduzir possibilidade de danos superficiais ($\downarrow c$)
 - recobrimento com polímeros (silanos, etc)
 - recobrimento com $\text{SnCl}_4/\text{TiCl}_4$ antes do recozimento: SnO_2 e TiO_2
 - lixiviação de álcalis e formação de SiO_2 na superfície
 - aplicação de lubrificantes (saída do recozimento)
 - cristalização superficial
- Barrar a propagação de trincas ($\uparrow K_{IC}$)
 - compósitos

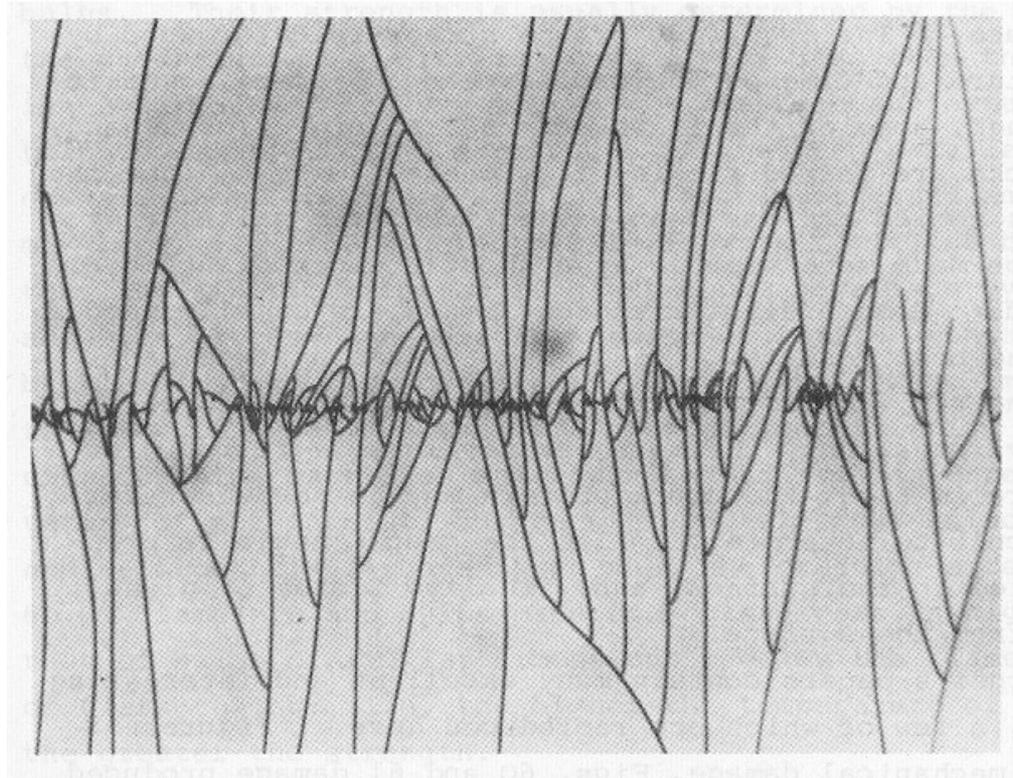
Aumento da resistência em vidros

- Compressão superficial ($\downarrow\sigma_a$)
 - têmpera térmica (próxima aula, depois da prova)
 - têmpera química

Acabamento e proteção superficial

- ***“Essencialmente qualquer coisa, incluindo metais, cerâmicas, vidros, partículas de poeira, e até a mão, em contato com o vidro, tem potencial de causar dano superficial, resultando em redução da resistência mecânica.”***

Defeitos superficiais

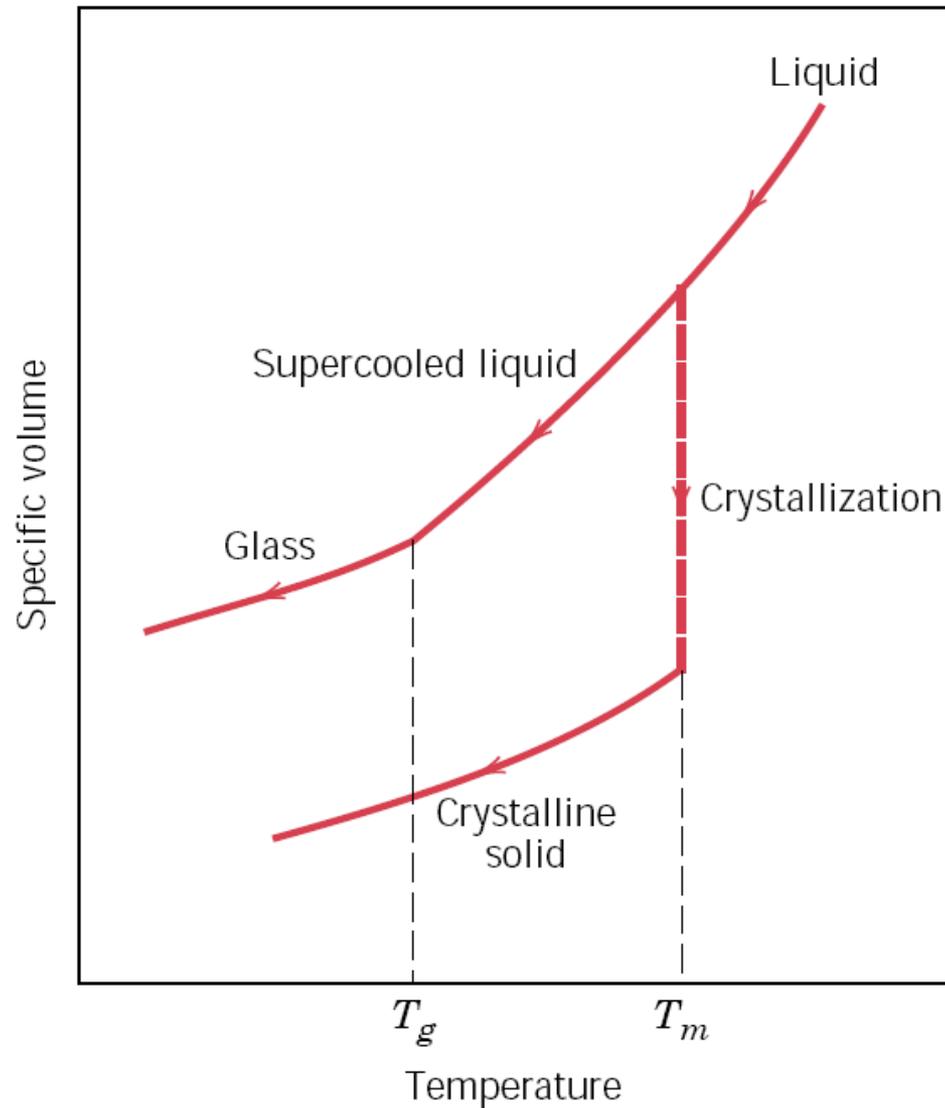


100 μm

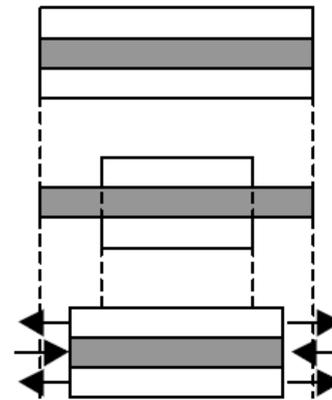
F. M. Ernsberger, Proc. R. Soc. A257 (1960) 213-223

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

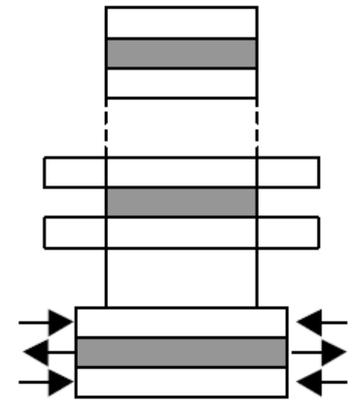
Técnicas de fabricação – vidros



Tensões residuais vs. Recozimento

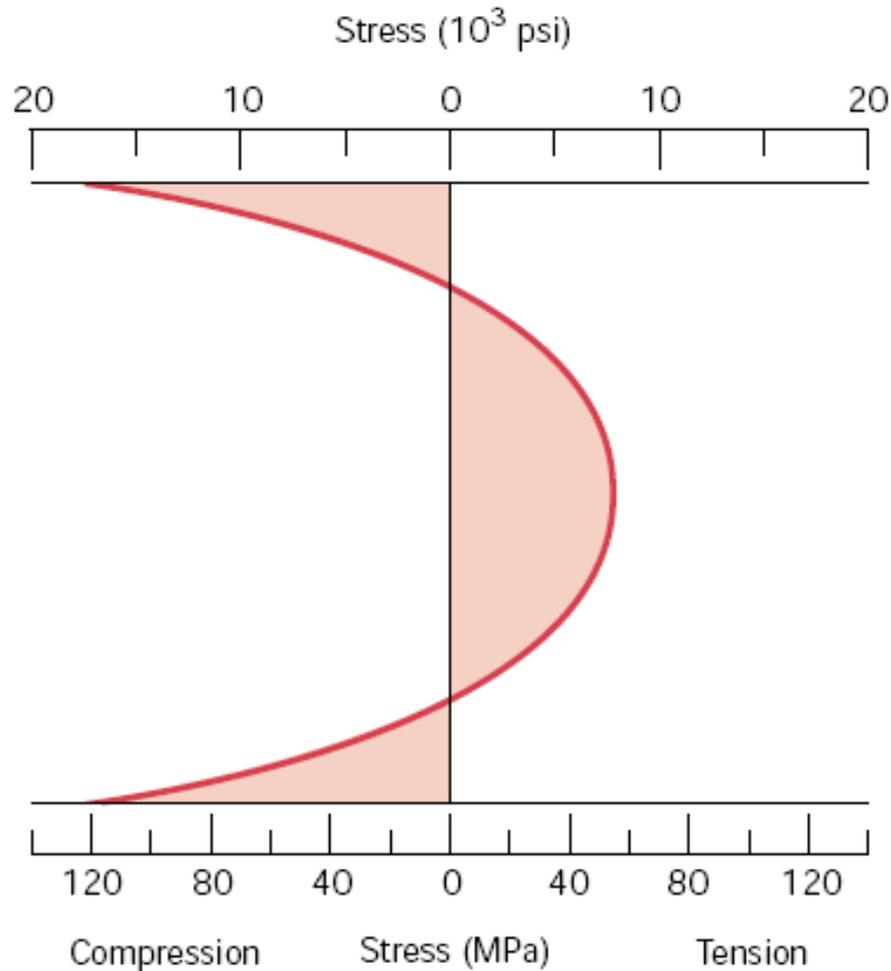


resfriamento



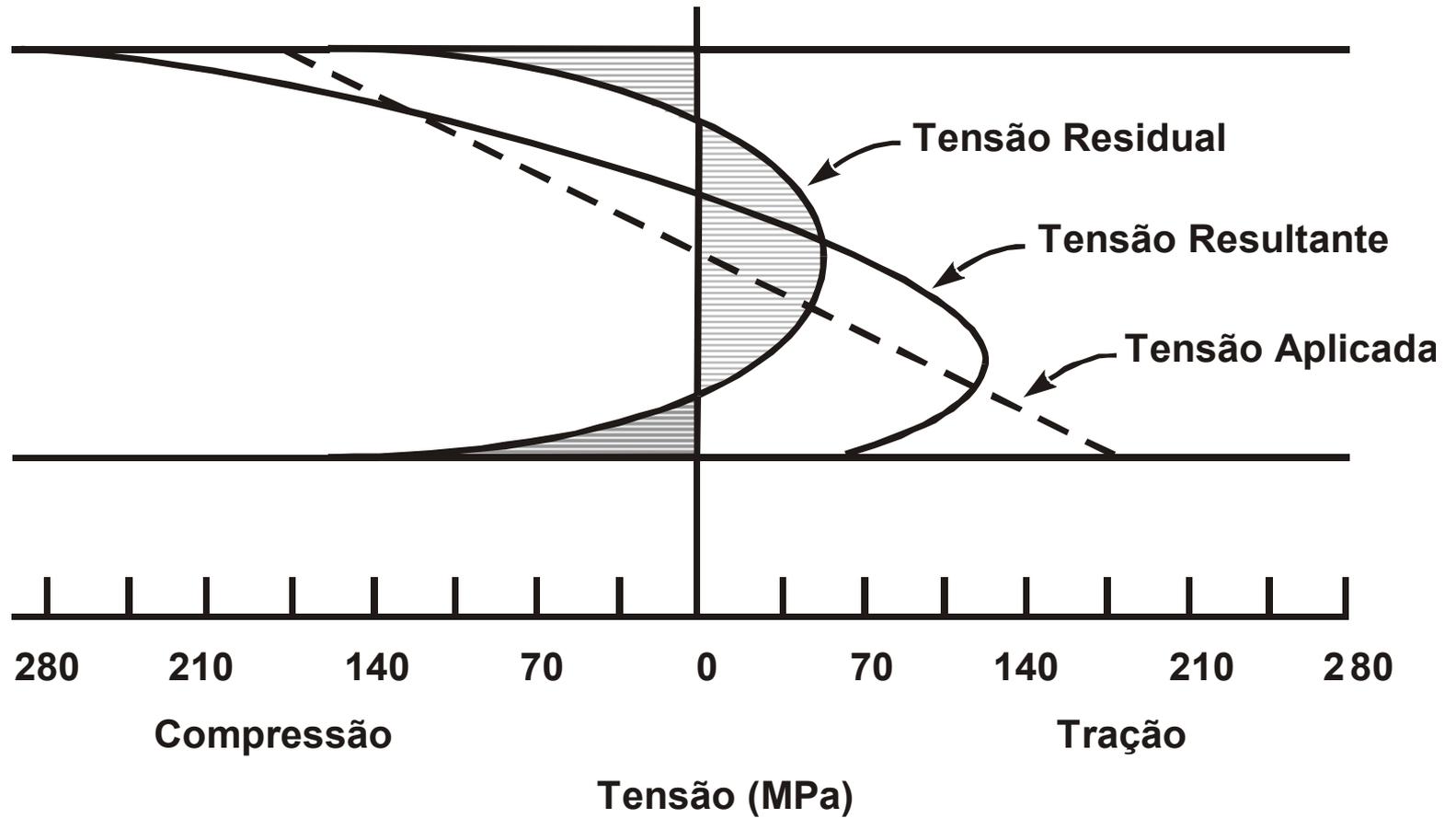
aquecimento

Técnicas de fabricação – vidros



Têmpera de vidros (resfriamento rápido da superfície): produz um estado de compressão superficial que aumenta sua resistência mecânica (50 a 100%)

Tenacificação de Vidros

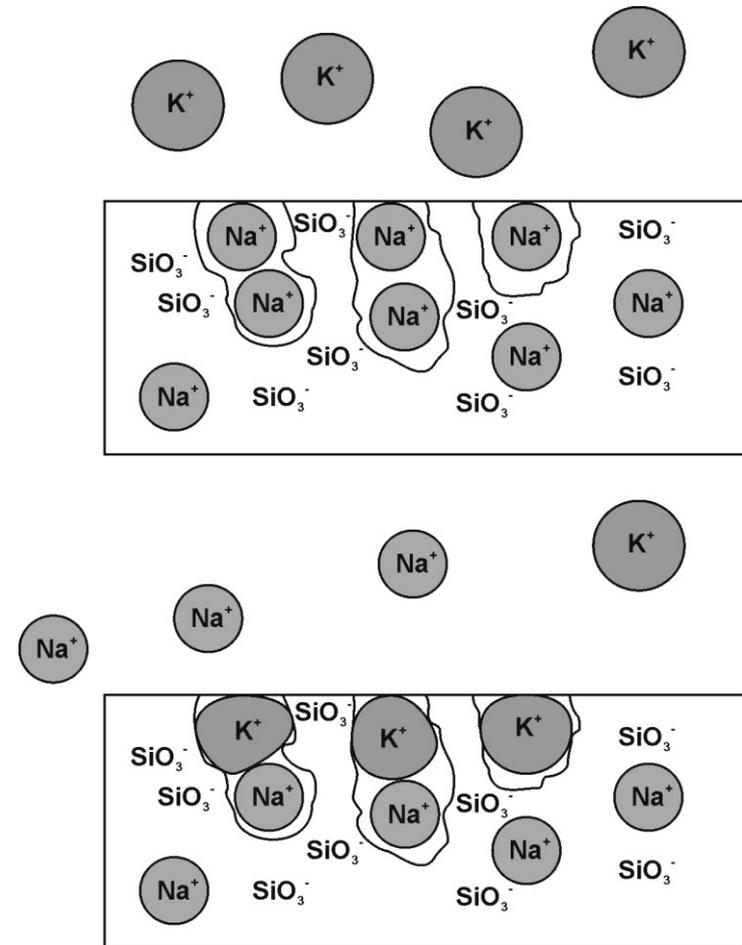


Têmpera térmica



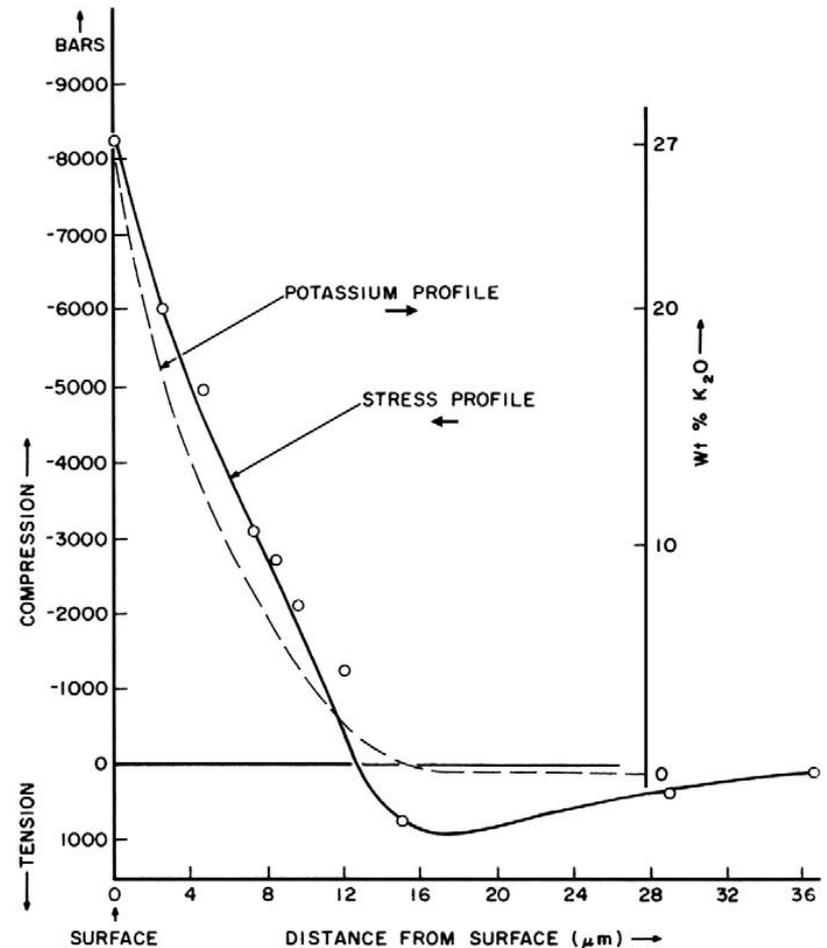
Têmpera química

- Troca iônica na superfície por íons (álcalis) de maior raio iônico:
- **Na⁺** (116 pm) no lugar de **Li⁺** (90 pm)
- **K⁺** (152 pm) no lugar de **Na⁺** (116 pm)
- Temperatura abaixo da transição vítrea

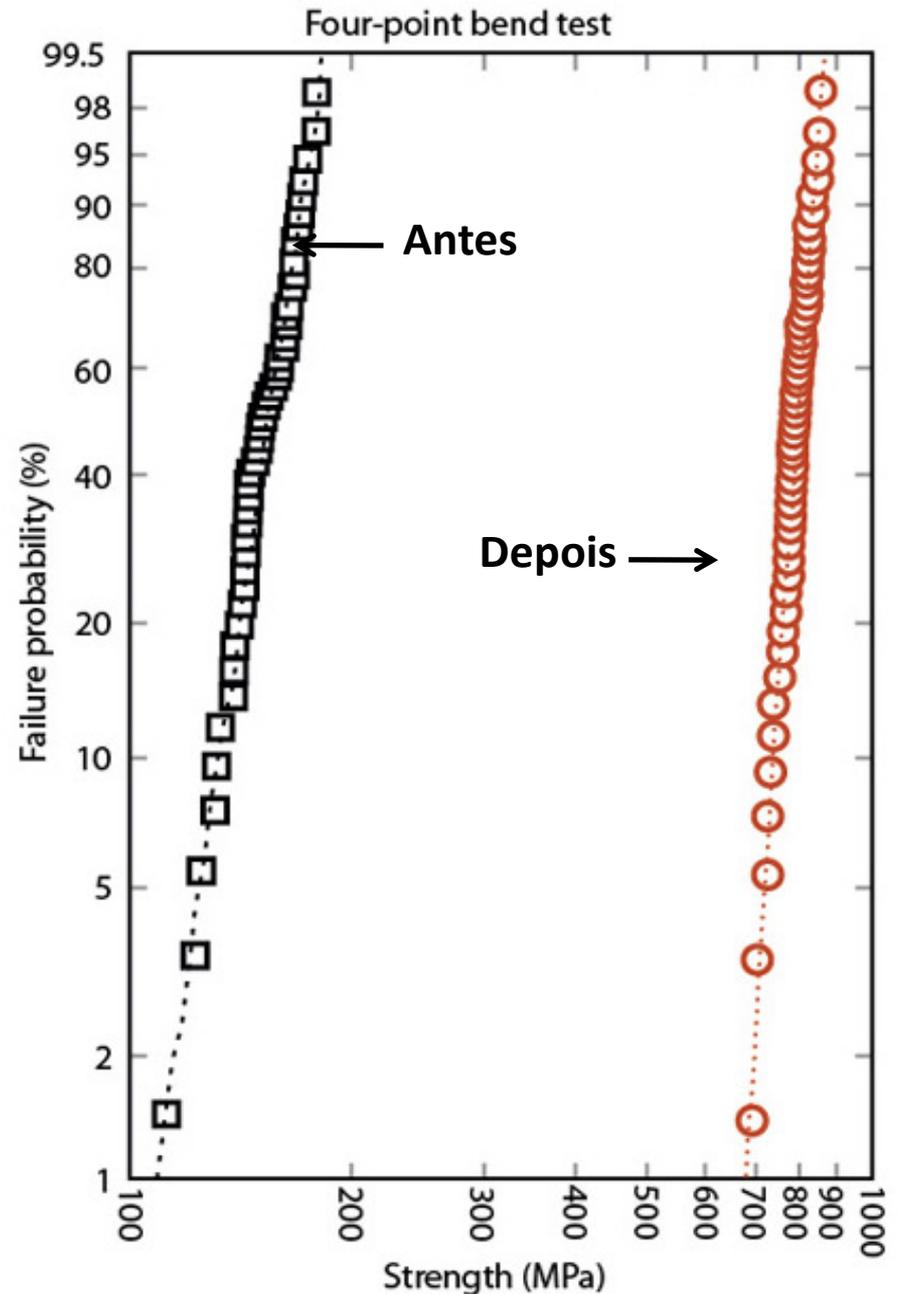


Têmpera química

- Trincas de contato tem $\sim 10 - 50 \mu\text{m}$
- A espessura da difusão e troca iônica precisa ser maior
- Pára-brisa de avião:
 - 400 MPa compressão
 - 300 μm de espessura
 - Proteção contra choque de pássaros
 - teste com frangos
 - 2 kg a 750 km/h!



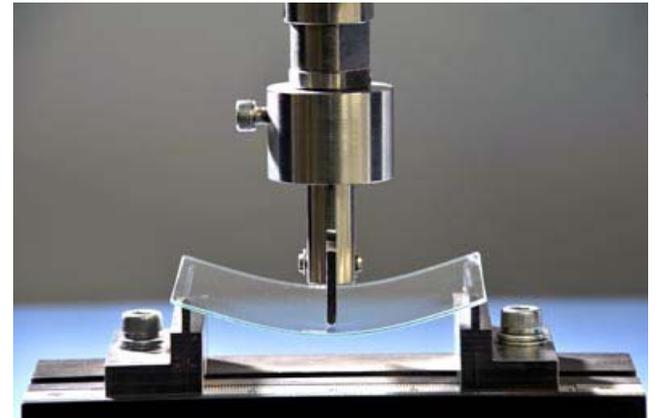
- Vidro de janela
 - $T_g = 550^\circ\text{C}$
- Alumino-silicato de lítio
 - $T_g = 800^\circ\text{C}$
- Varshneya (SGT):
 - **650 MPa a 1 Gpa**
 - **1 mm de espessura!**



Têmpera química



Gorilla® glass – Corning/EUA



Dragontrail® glass – Asahi/Japão

USP 3.790.430 (1974): “ALKALI ALUMINOSILICATE GLASS ARTICLE HAVING AN ION-EXCHANGED SURFACE LAYER”

<http://www.csmonitor.com/Business/new-economy/2010/0802/Gorilla-glass-invented-in-US...>

<http://www.robaid.com/gadgets/asahi-glass-company-introduces-dragontrail-scratch-proof-glass.htm>

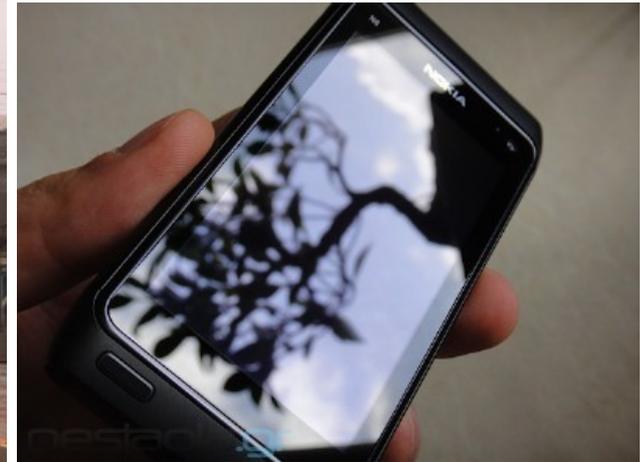
<http://www.youtube.com/watch?v=WpbOoQpwAFs>

Dureza: Resistência ao risco, resistência à indentação (Vicker, Knoop, Brinell) – *Wikipedia*

Dureza	Substância ou Mineral
1	Talco
2	Gesso
2,5	Unha
2,5 to 3	Ouro, Prata
3	Calcita
3,5	Moeda de cobre
4	Fluorita
4 to 4,5	Platina
4 to 5	Ferro
5	Apatita
5,5	Lâmina de faca
5,5	Vidro de janela
6	Ortoclásio

Dureza	Substância ou Mineral
6,5	Lima de aço (ferramenta)
6,5	Pirita
6 to 7	Vidro, Sílica vítrea
7	Quartzo
7 to 8	Aço endurecido
8	Topázio
9	Coríndon
10	Granada
11	Zircônia eletrofundida
12	Alumina eletrofundida
13	SiC
14	BC
15	Diamante

Aplicações



Proteção balística de alta segurança
Janelas em carros, trens, aviões
Janelas a prova de furacões



Asahi Glass Company no Brasil

- maior fabricante de vidros planos do mundo
- uma nova fábrica de vidros planos da AGC está sendo instalada em Guaratinguetá, SP, Brasil
- R\$ 750 milhões
 - R\$ 500 M em máquinas e equipamentos
 - R\$ 250 M em obras de construção
- 1.000 ton/dia
- 500 empregos diretos
 - placas de vidro para janelas e fachadas
 - painéis de energia solar
 - vidros para design de interiores
 - soluções de arquitetura para construção verde
 - vidros integrados com iluminação (LED)
 - vidros para carros
 - displays digitais integrados ao painel de vidro

- a Ambev que já tem um forno de 350 t/dia vai construir ainda este ano um segundo de 400 t/dia no Rio.
- Parece que a nova fábrica da Saint Gobain em Sergipe começa também esse ano e se considerarmos a mexicana Vitro que vai se instalar na Bahia em 2016 notamos que a indústria vidreira vai na contramão da economia brasileira (ano passado foram dois novos floats)