

Propriedades Mecânicas de Cerâmicas

Determinação experimental

Crescimento subcrítico de trinca

Resistência mecânica de vidros

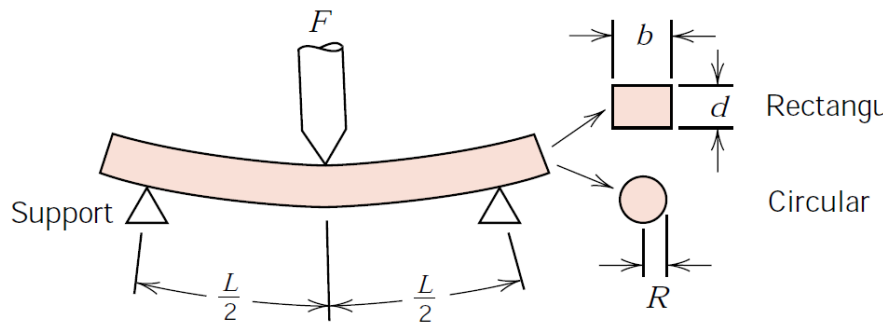
Prof. Dr. Eduardo Bellini Ferreira

Departamento de Engenharia de

Materiais – EESC/USP

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	$\frac{FL}{4}$	$\frac{d}{2}$	$\frac{bd^3}{12}$	$\frac{3FL}{2bd^2}$

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

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

Grande variação de resultados!

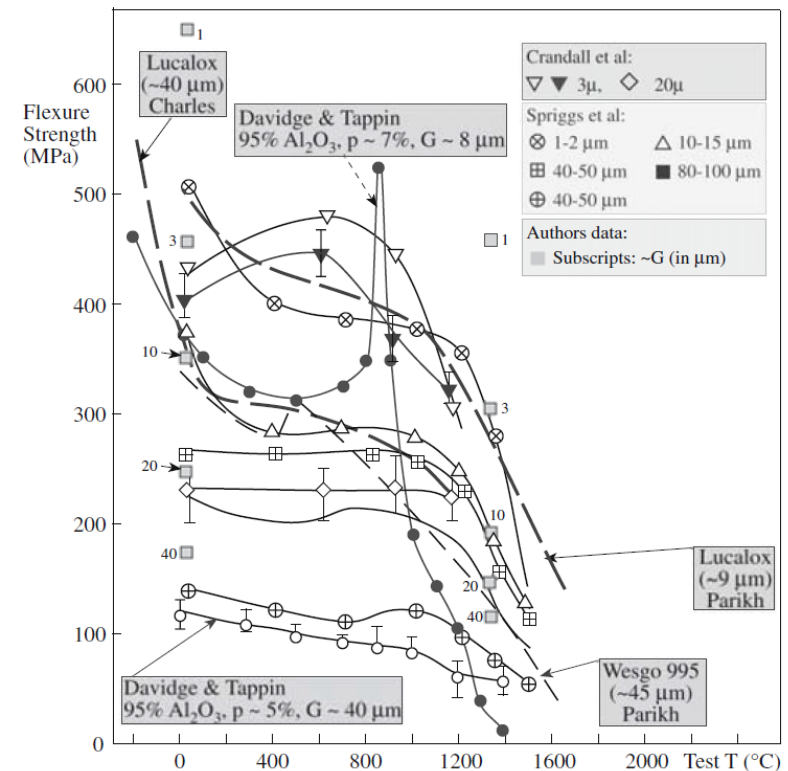
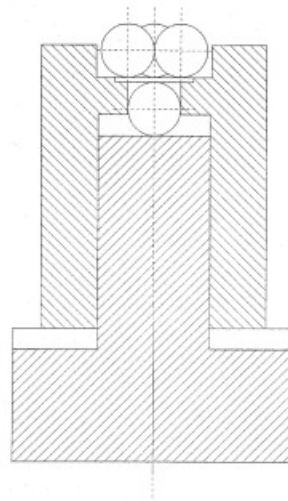


FIGURE 16.12 Flexural strength of polycrystalline Al_2O_3 as a function of test temperature.

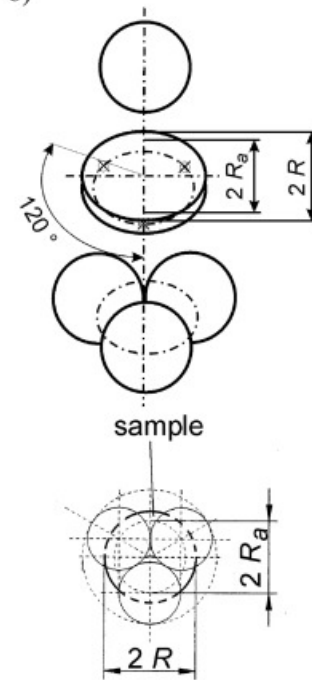
Os valores em geral são mais altos que os resultantes de ensaios de tração pura!
Esse ensaio superestima a resistência dos materiais cerâmicos.



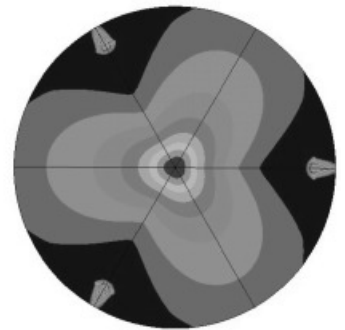
a)



b)



c)



Ensaio mecânicos de cerâmicas

tração versus compressão

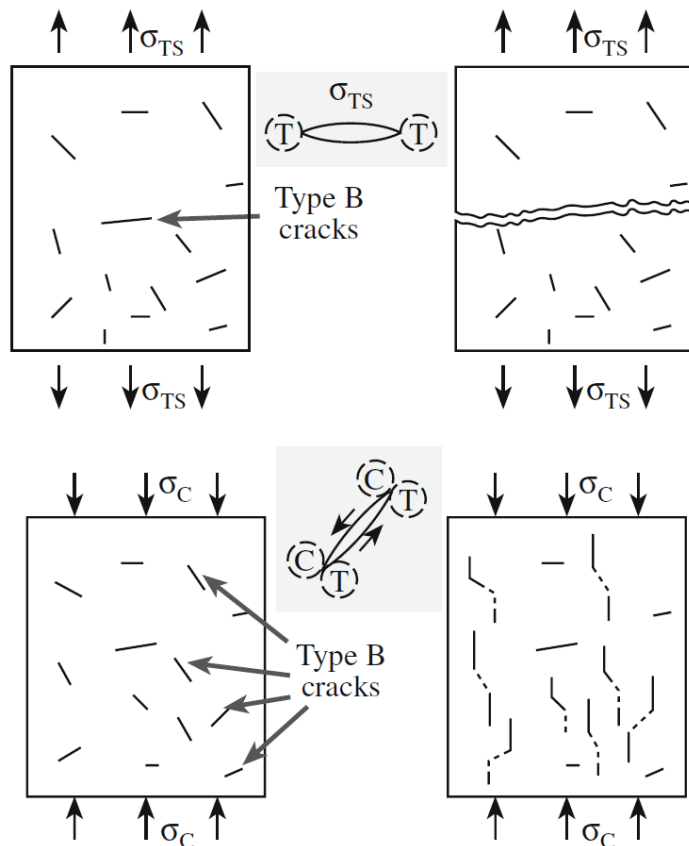


FIGURE 16.10 Illustration of unstable and stable crack propagation for a brittle material in tension (T) and compression (C), respectively. Stable crack propagation will lead to crushing.

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

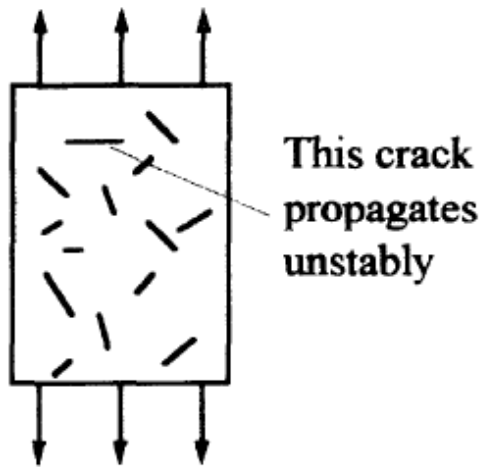
Estimativa da resistência à compressão :

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

c_{av} = comprimento médio de trincas

$x = 10$ a 15

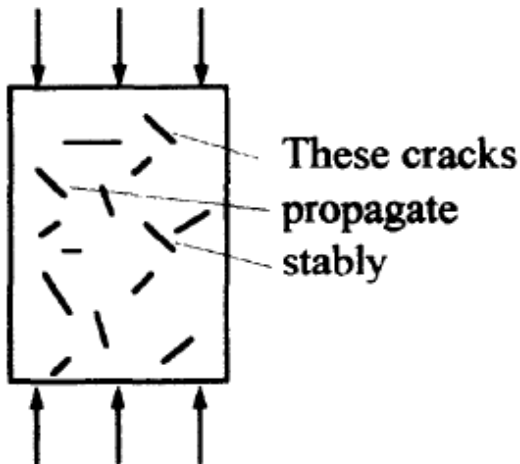
Fratura por compressão



(a)



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.

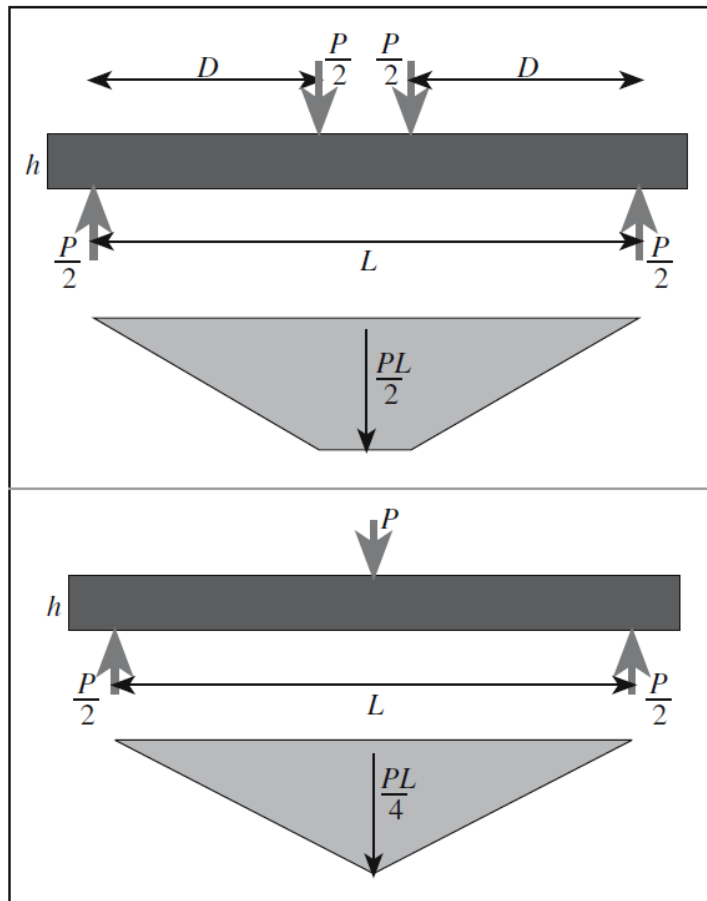


(b)



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

Ensaio mecânicos 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

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

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

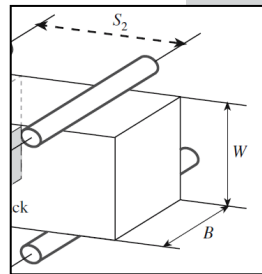
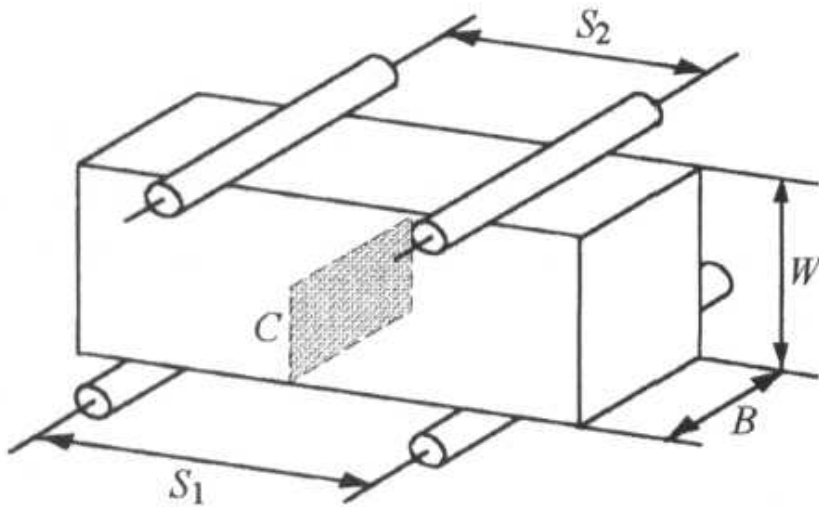


FIGURE 16.11 The geometries for three- and four-point bending.

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).

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

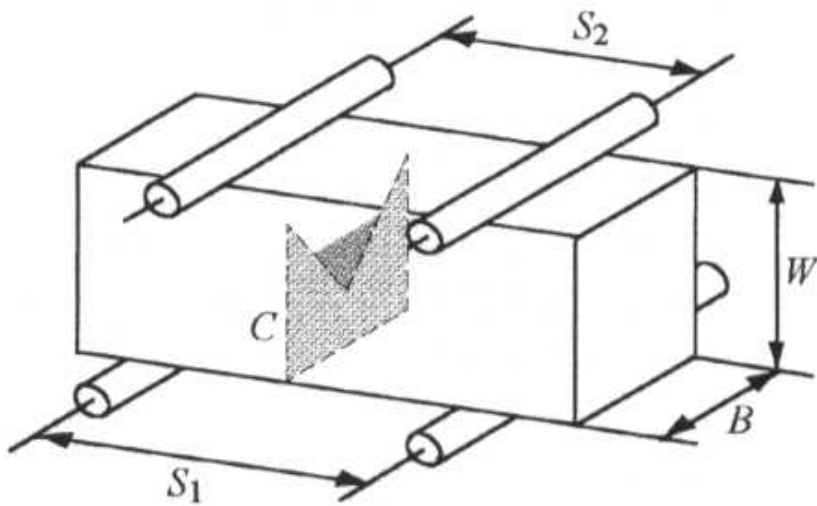
F_f é a carga aplicada

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

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

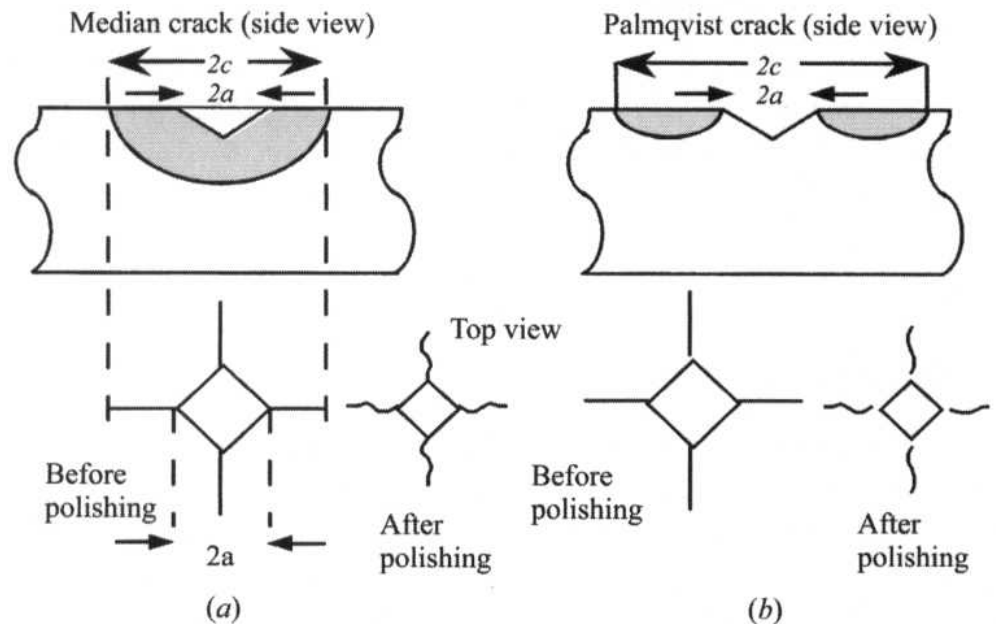
Φ é um fator geométrico

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

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

$$K_{IC} = \sqrt{2\gamma_s E}$$

K_{IC} é a tenacidade à fratura

γ_s é a energia de superfície

E é o módulo elástico

Y é uma constante; geometria

c é o tamanho do maior defeito na superfície e metade do mesmo no volume

- 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.

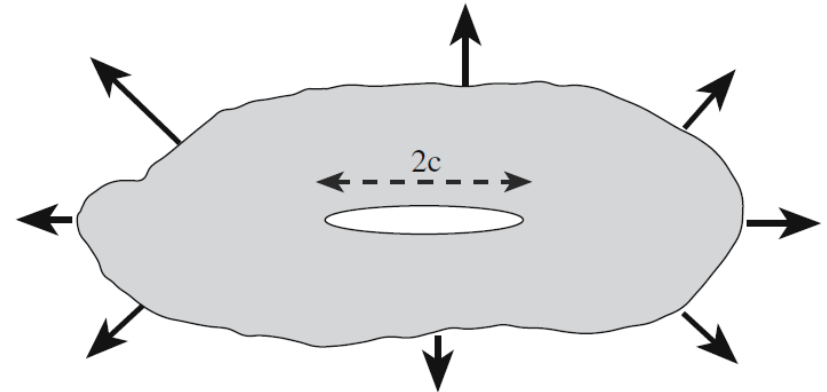
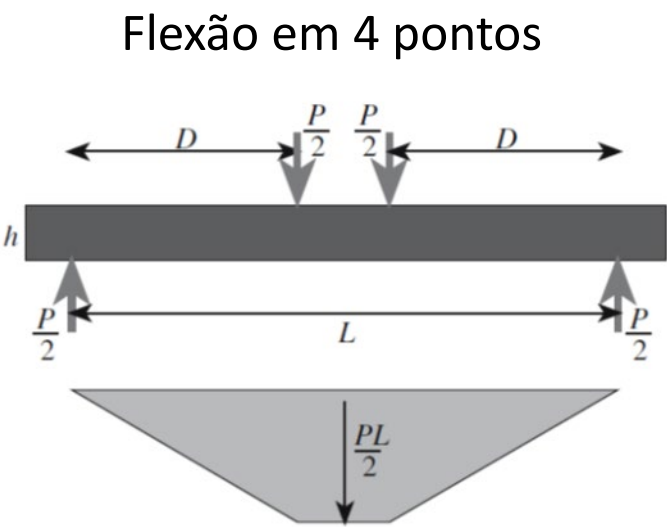


FIGURE 18.5 The “Griffith” crack of length $2c$.

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

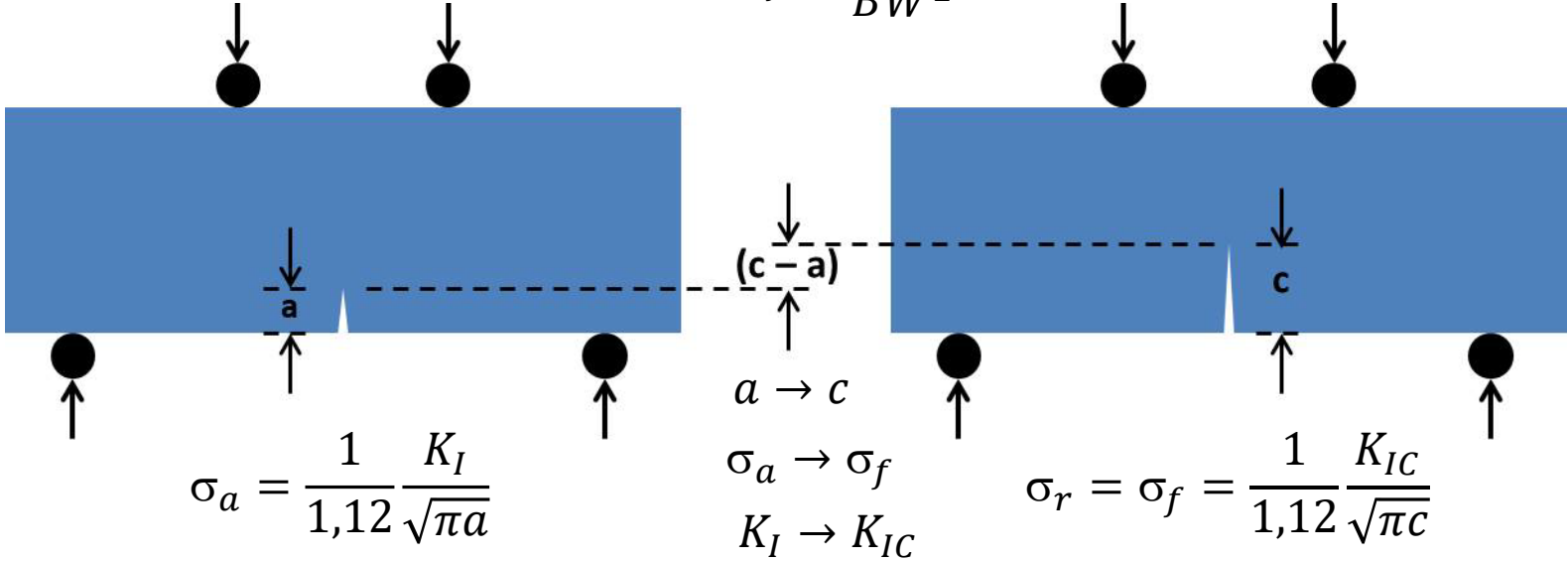
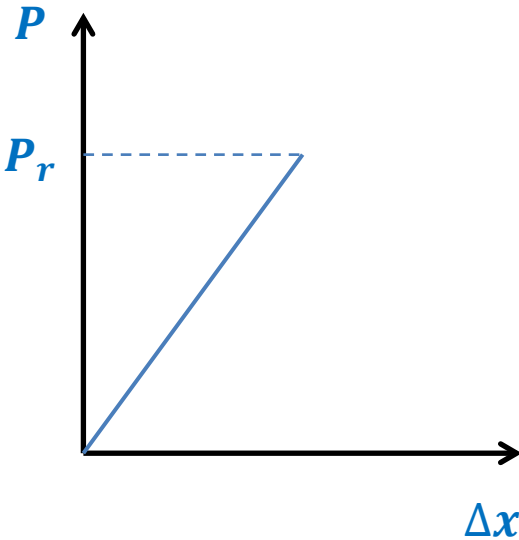


σ_a = tensão aplicada

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

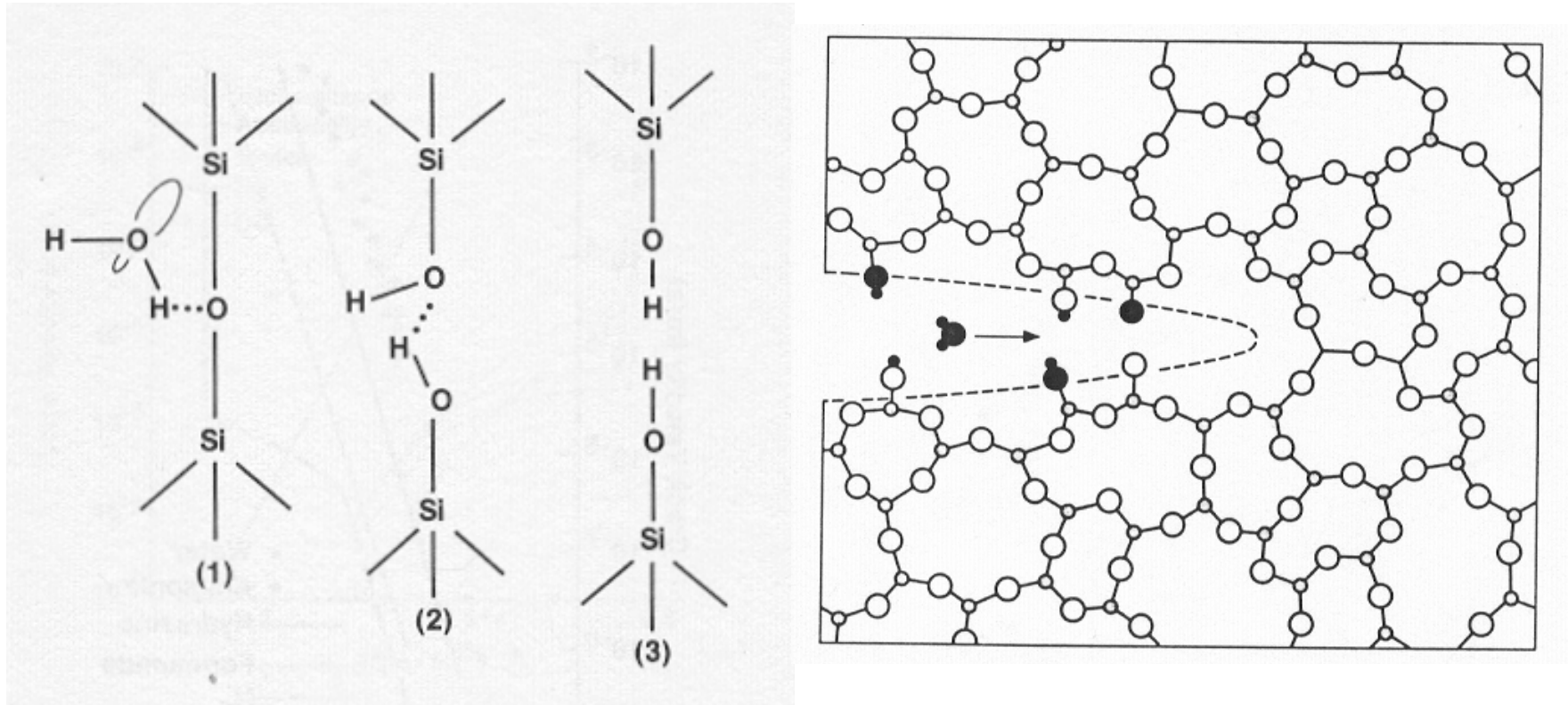
Na carga de ruptura, P_r , calculamos a tensão de ruptura, σ_r (ou tensão de fratura, σ_f , é a mesma coisa):

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

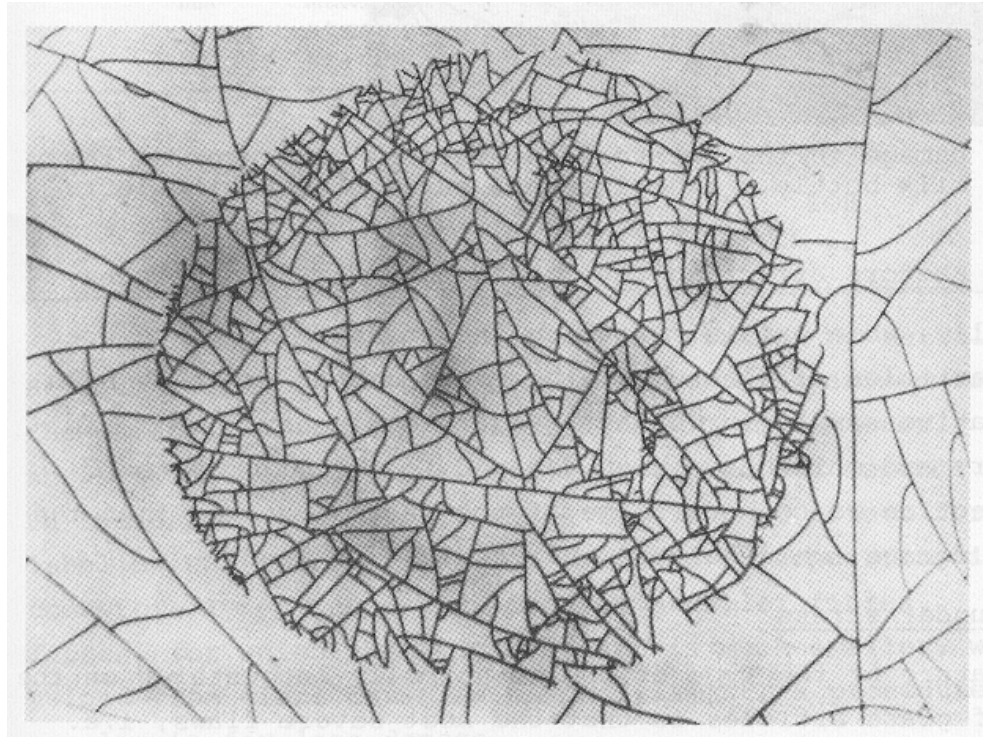


Quando o defeito cresce estavelmente (sem propagação catastrófica), em algum momento ele alcançará o tamanho crítico para fratura, e a fratura ocorrerá instavelmente (catastroficamente).

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



O efeito do ambiente – água

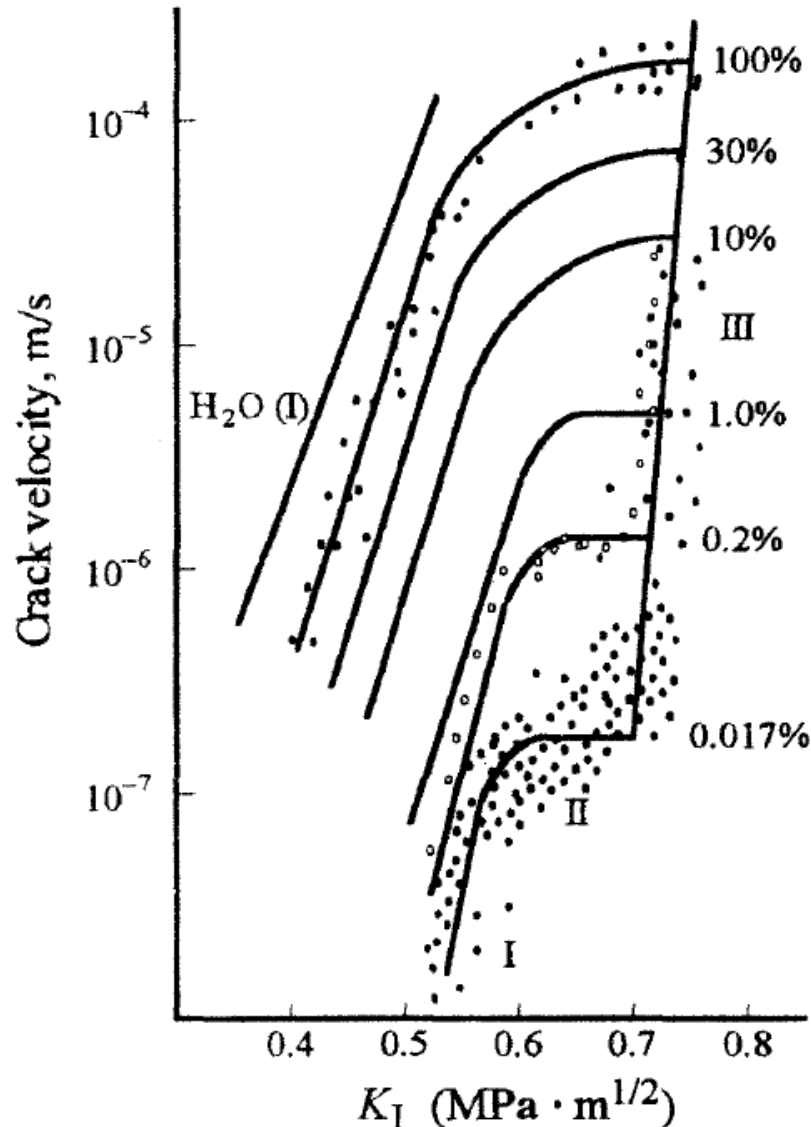


100 μm

F. M. Ernsberger, *Proc. Roy. Soc. A*257 (1960) 213-223

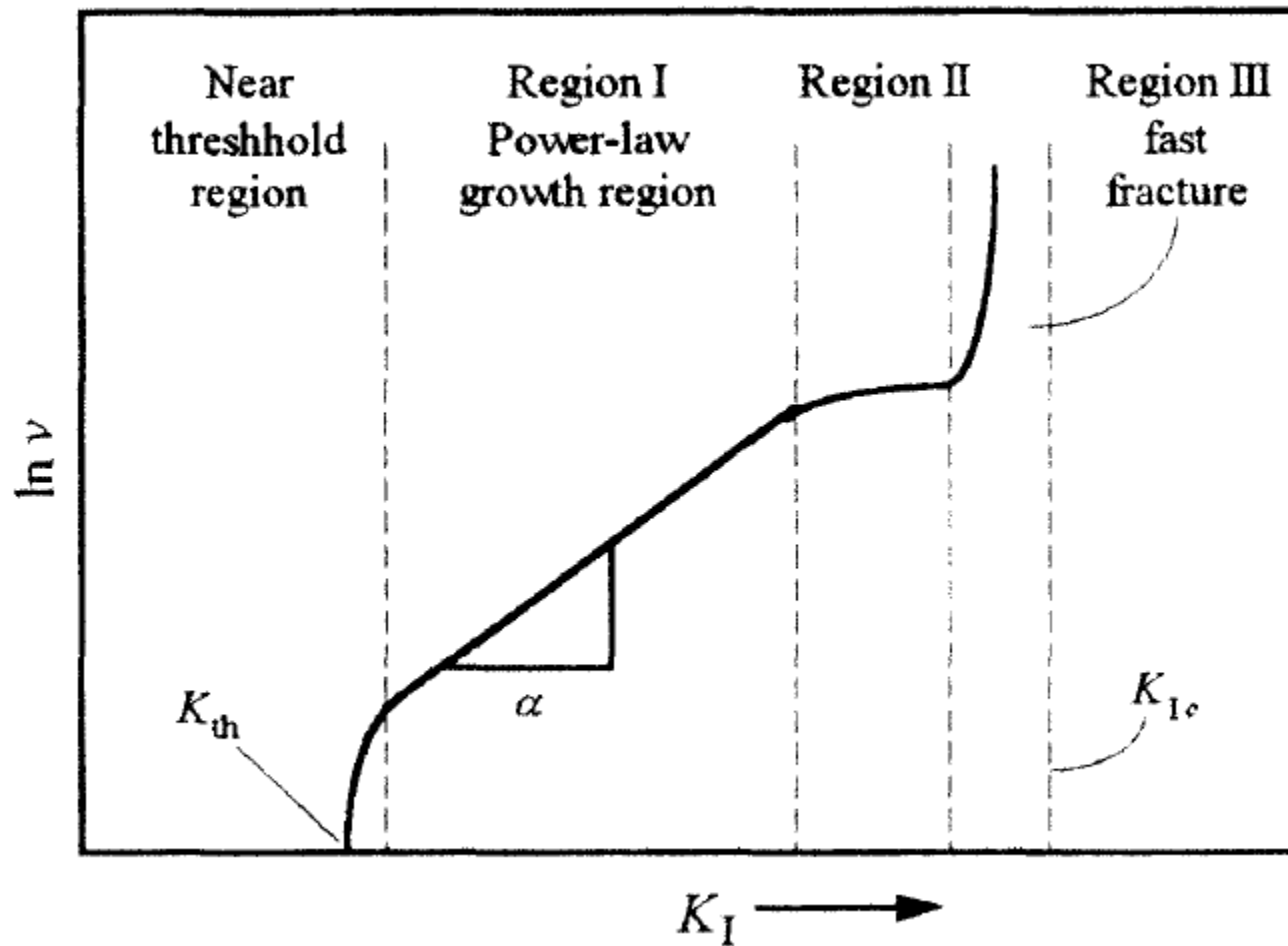
F. M. Ernsberger in *Advances in Glass Technology* (1962) 511-524, Plenum Press, New York

Crescimento Subcrítico de Trinca



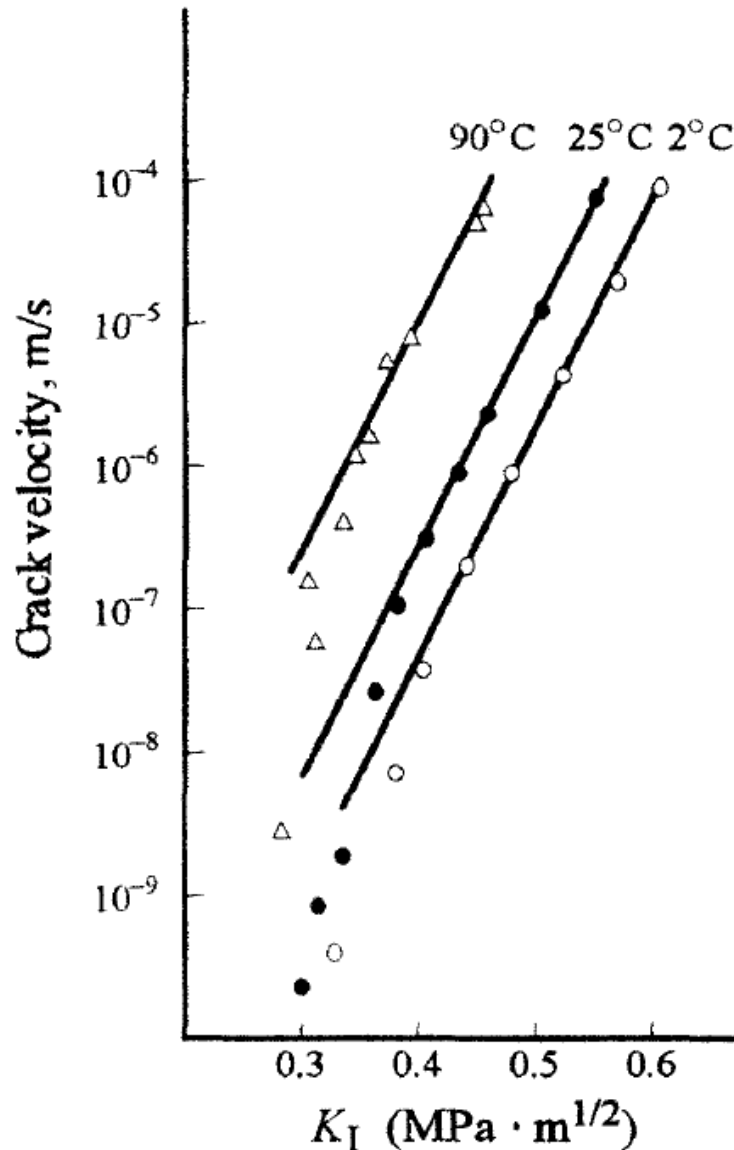
Dados reais para um vidro de janela (soda-cal) testado em atmosfera de N_2 com diferentes umidades relativas.

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

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

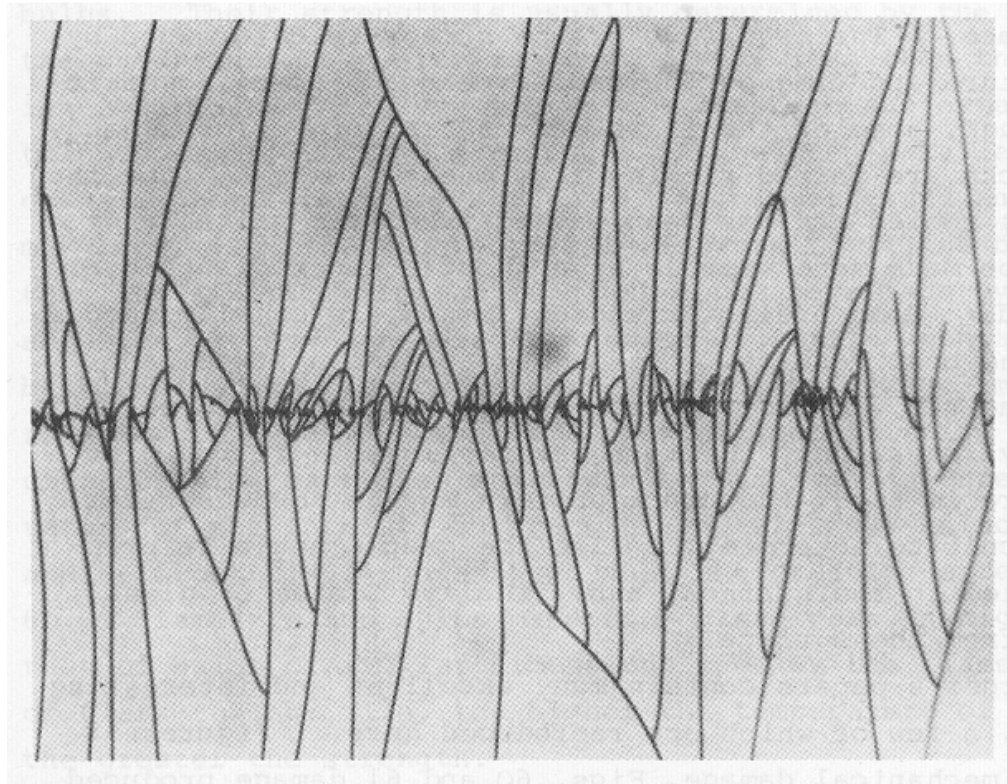
Aumento da resistência em vidros

- 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

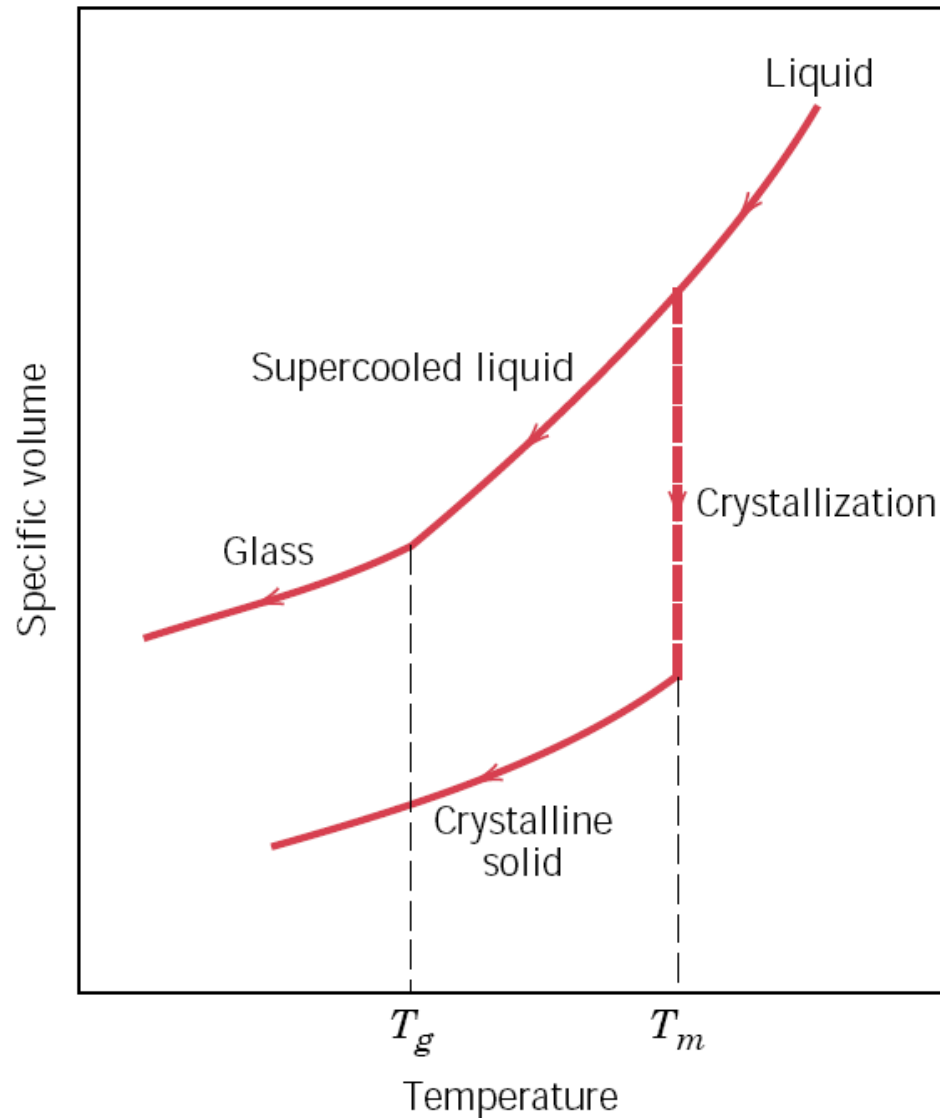


100 μm

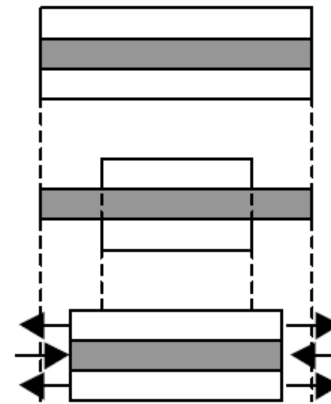
F. M. Ernsberger, Proc. R. Soc. A257 (1960) 213-223

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

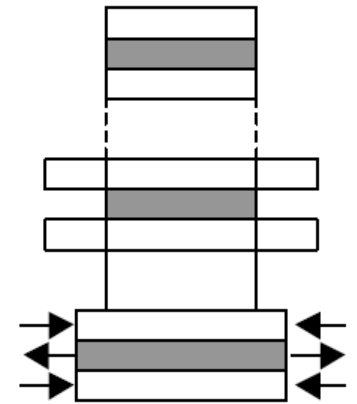
Técnicas de fabricação – vidros



Tensões residuais vs. Recozimento

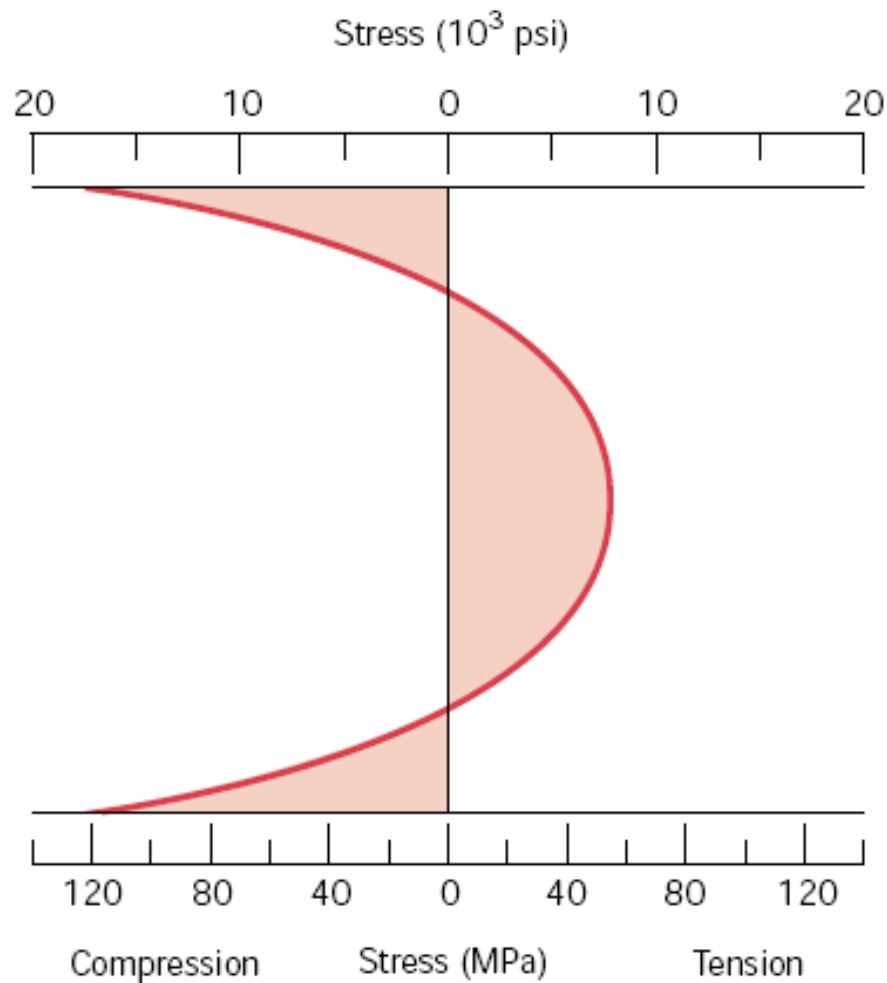


resfriamento



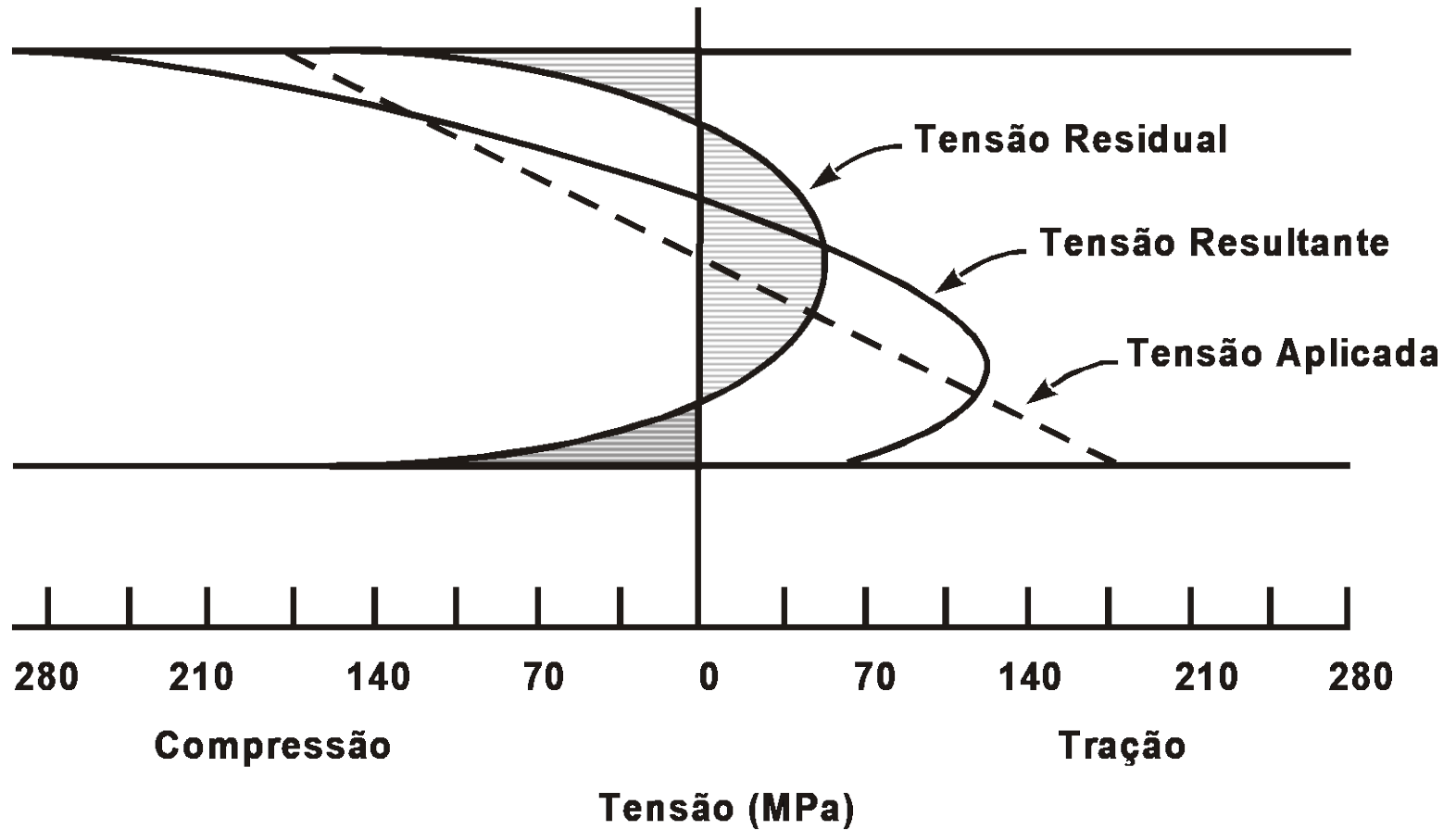
aquecimento

Técnicas de fabricação – vidros

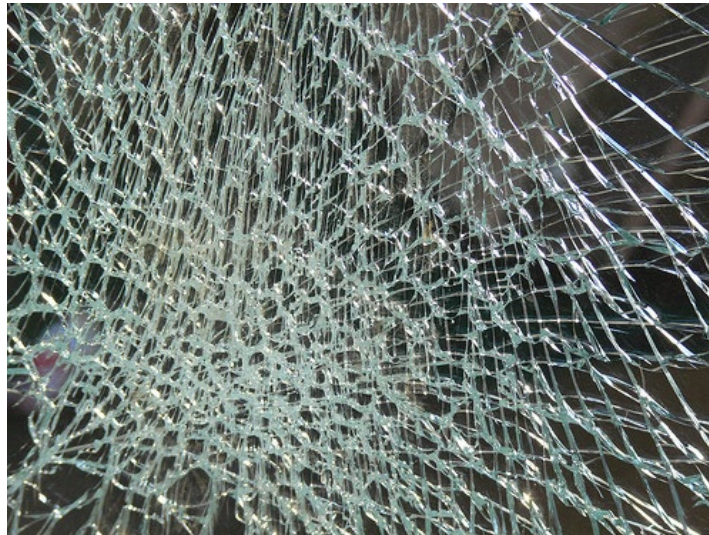


Têmpera de vidros (resfriamento rápido da superfície): produz um estado de compressão superficial que aumenta sua resistência mecânica (50 a 100%)

Tenacificação de Vidros

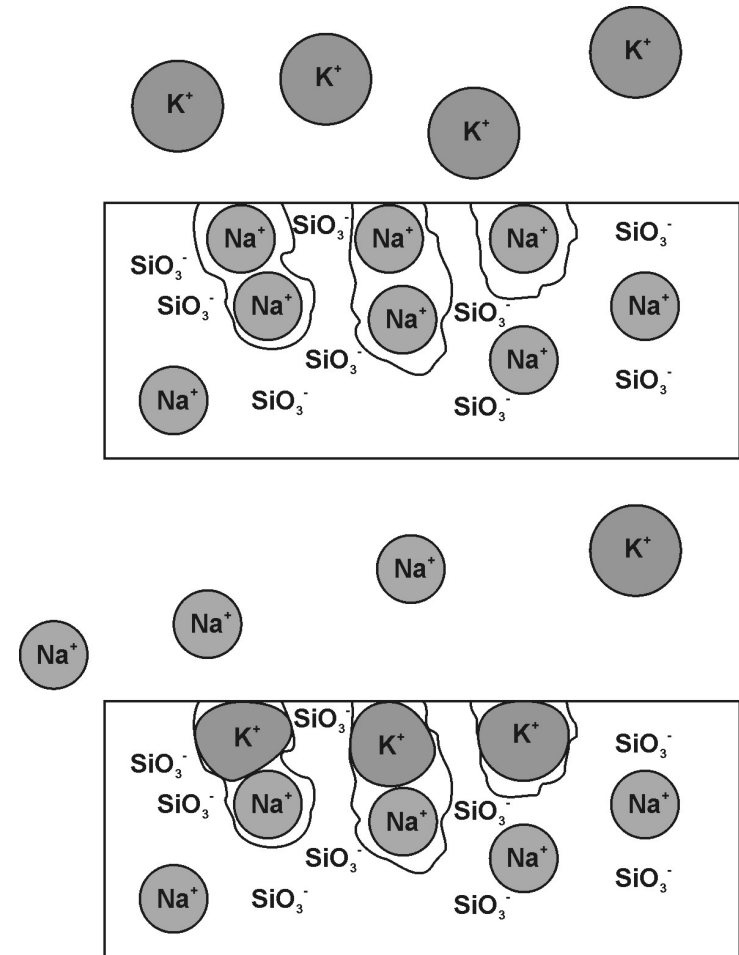


Têmpera térmica



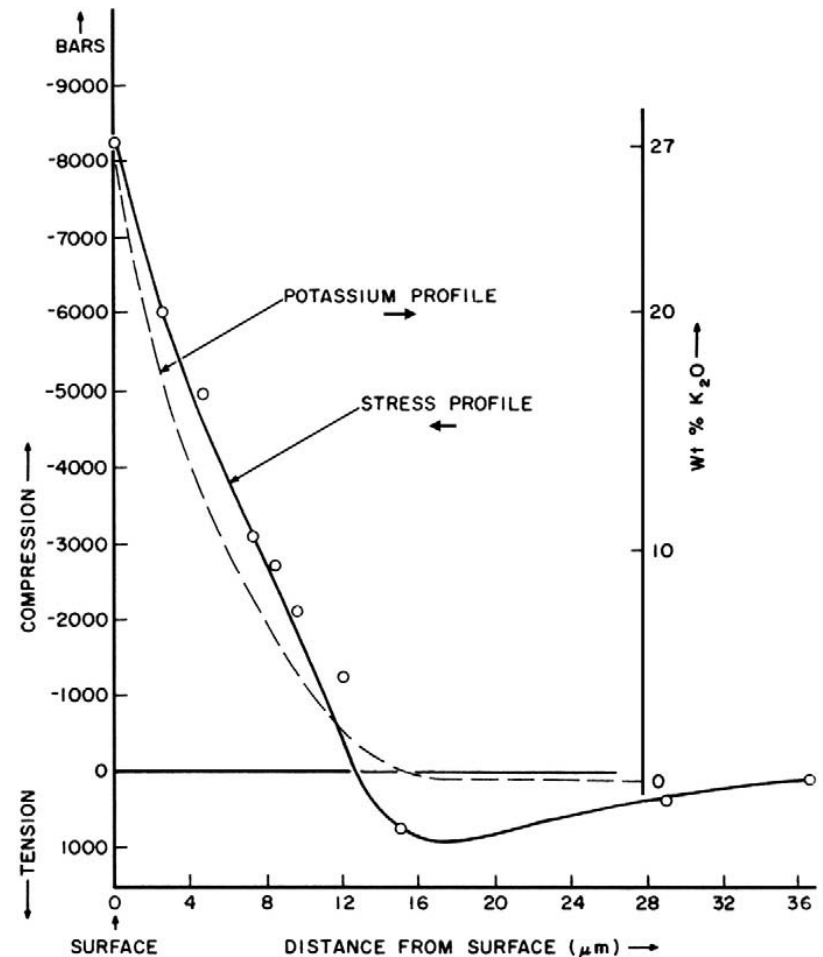
Têmpera química

- 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

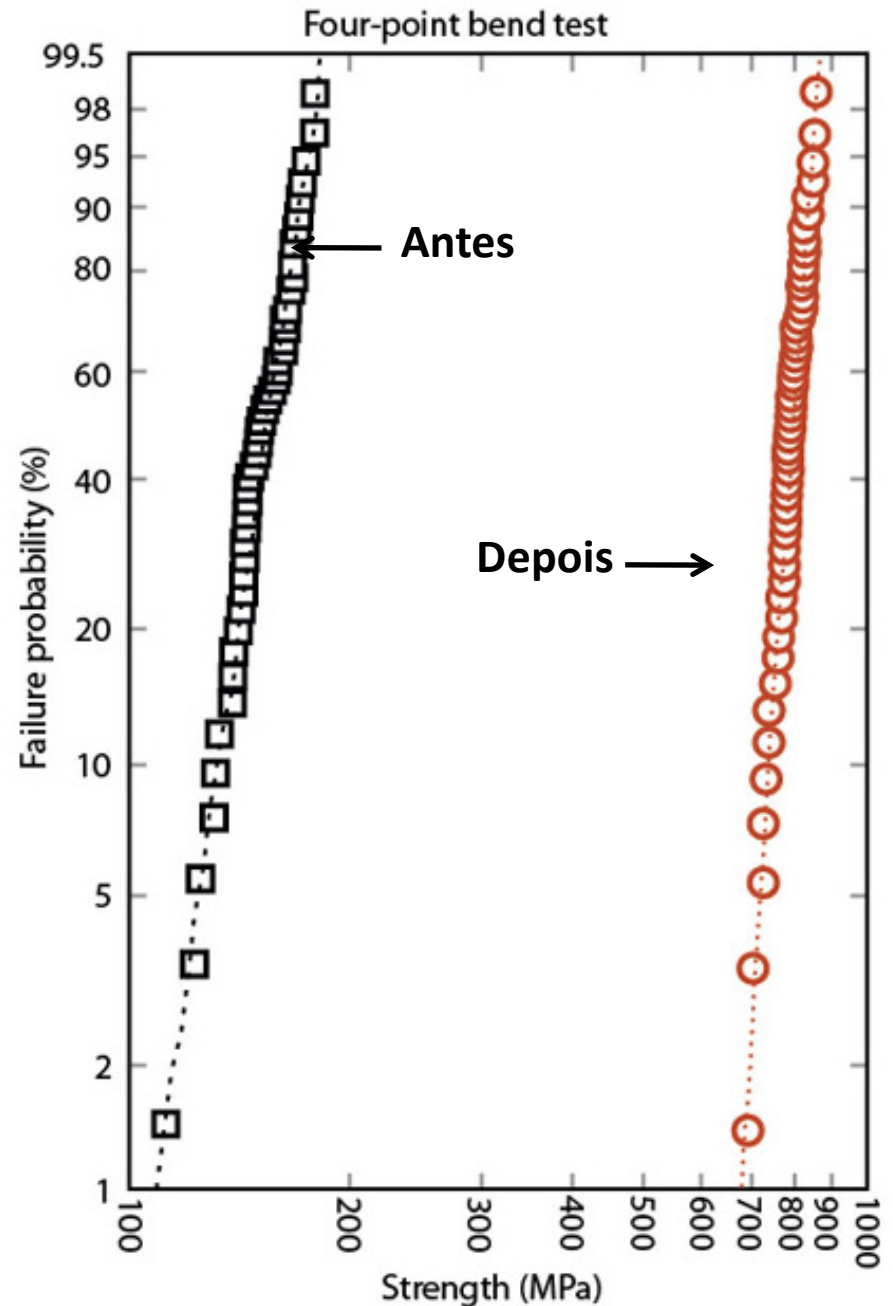


Têmpera química

- 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!



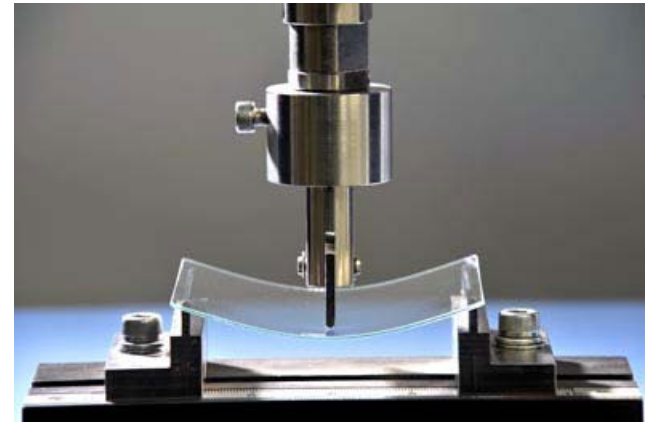
- Vidro de janela
 - $T_g = 550^\circ\text{C}$
- Alumino-silicato de lítio
 - $T_g = 800^\circ\text{C}$
- Varshneya (SGT):
 - 650 MPa a 1 Gpa
 - 1 mm de espessura!



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>

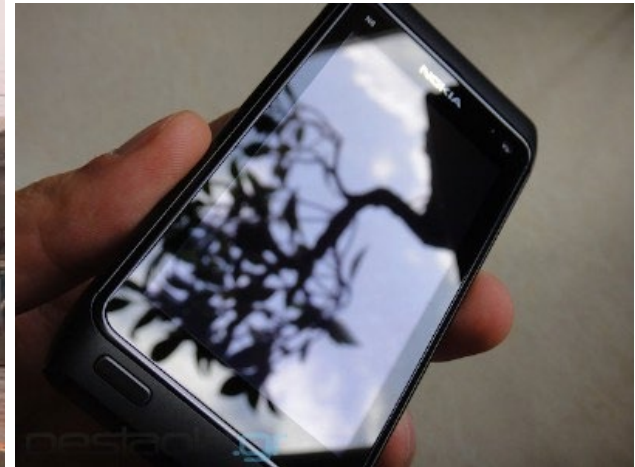
<http://www.youtube.com/watch?v=WpbOoQpwAFs>

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



http://www.qwiki.com/q/#!/Transparent_Armor_Gun_Shield