

Aula 2

Propriedades Mecânicas de Cerâmicas

Materials Cerâmicos II
Engenharia de Materiais e Manufatura
EESC/USP – São Carlos
Prof. Dr. Eduardo Bellini Ferreira

Resumo

- Cerâmicas diferem da maioria dos metais e polímeros pois são frágeis à temperatura ambiente.
- Defeitos têm um papel preponderante no comportamento mecânico de materiais cerâmicos.
- Como resultado, medir propriedades, tais como o módulo elástico, é frequentemente muito mais difícil que em outros materiais: a própria preparação do corpo de prova introduz defeitos.
- As curvas tensão deformação de materiais cerâmicos são geralmente obtidas por flexão (3 ou 4 pontos), que em ensaios de tração, pois é muito mais fácil produzir cerâmicas na forma de blocos de seção transversal retangular para esse tipo de ensaio.
- O comportamento frágil dos materiais cerâmicos resulta em baixa tenacidade à fratura (muito difícil de medir corretamente!)
- Um aspecto muito importante dos materiais cerâmicos é que em aplicações sujeitas a tensões mecânicas (principalmente tração), precisamos entender a importância dos defeitos e como incorporá-los no projeto.

Clássico vs. Moderno

- Cerâmicas são frágeis.
- Linhas de discordância não são importantes porque não se movem nas cerâmicas.
- Cerâmicas são materiais policristalinos e a fratura ocorre ao longo dos contornos de grãos.
- É possível curvar uma “folha” de silício formando um tubo.
- É possível curvar uma fibra de alumina até formar um círculo.
- Linhas de discordância se movem na extremidade (ou ponta) de trincas e podem ser produzidas em grande número durante o crescimento de um monocristais.
- Monocristais cerâmicos não têm contorno de grãos, mas também se fraturam.

Clássico vs. Moderno

Modernamente:

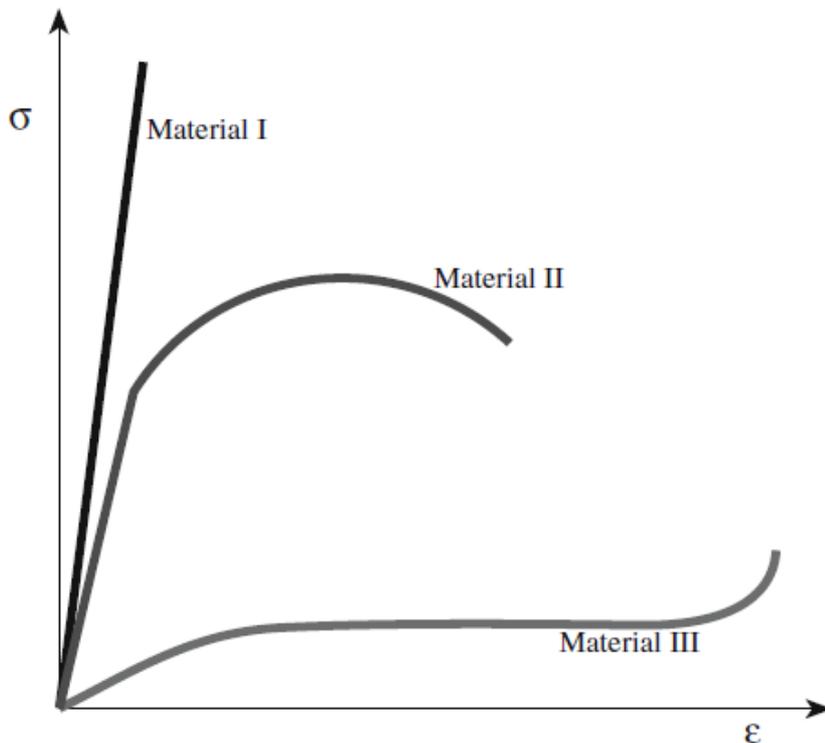
- Podemos usar cerâmicas em filmes finos onde o nível das tensões podem ser muito alto.
- Deformação plástica em altas temperaturas pode ser importante.
- Em algumas cerâmicas modernas, as transformações deslocativas são importantes.

FIGURE 16.1 Trincas em um monocristal de YAG dopado com Nd.



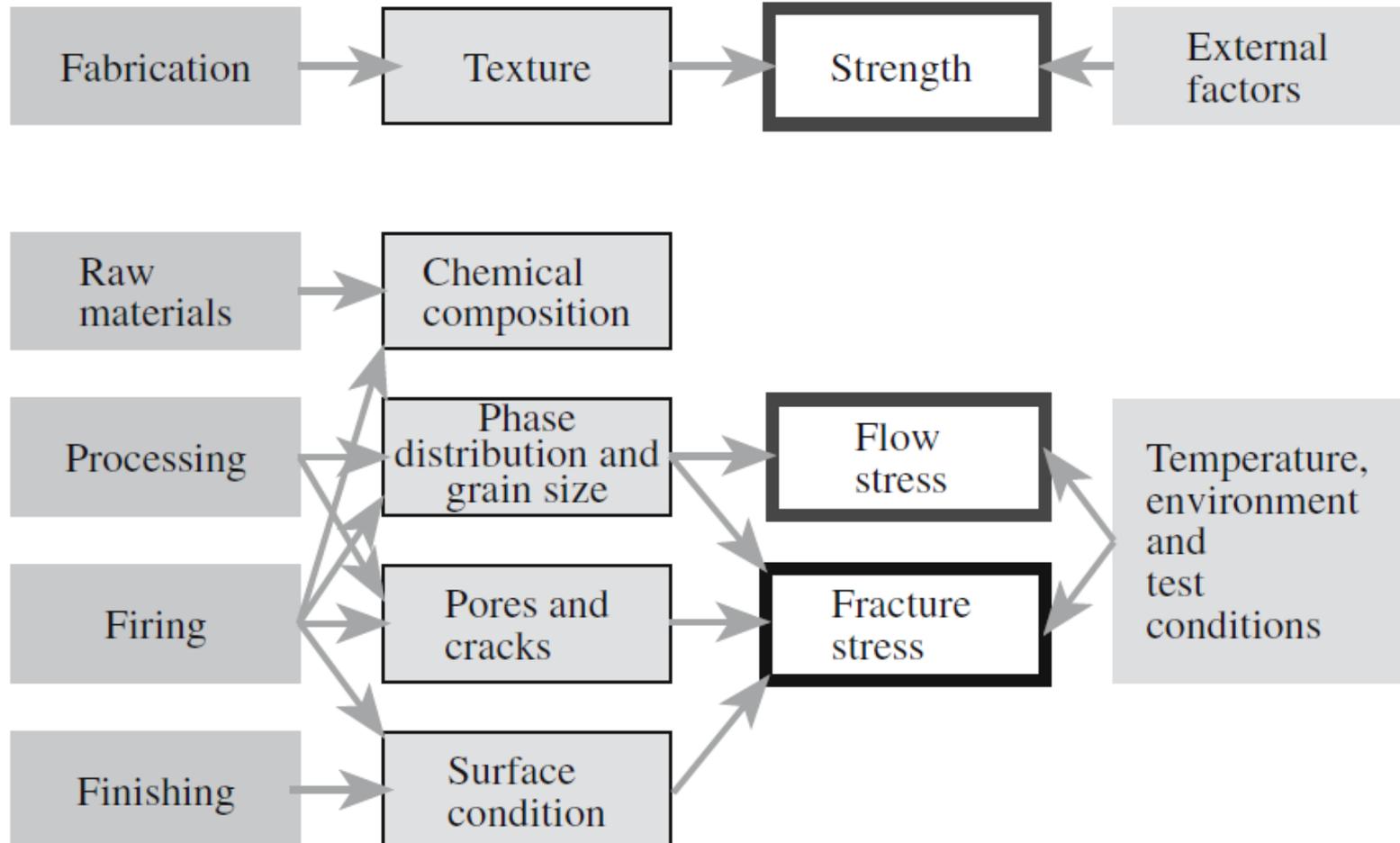
7 cm

Curva tensão-deformação

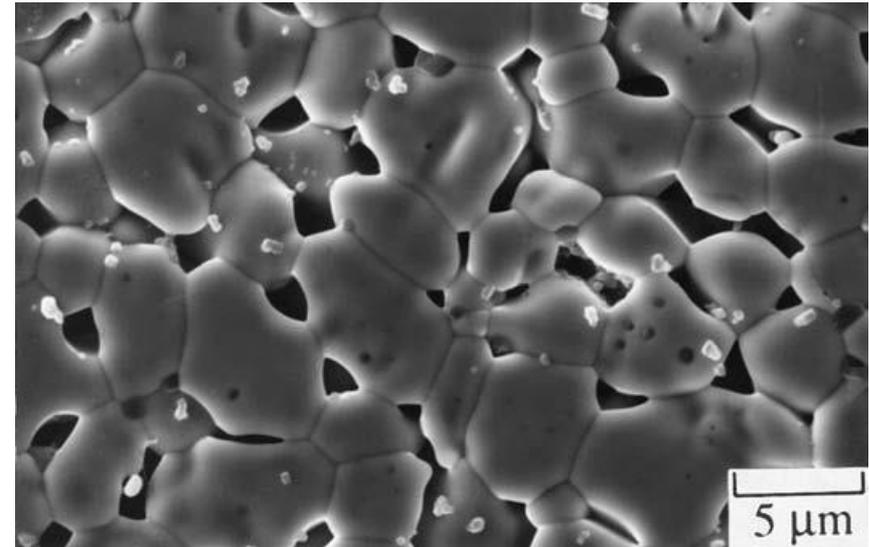
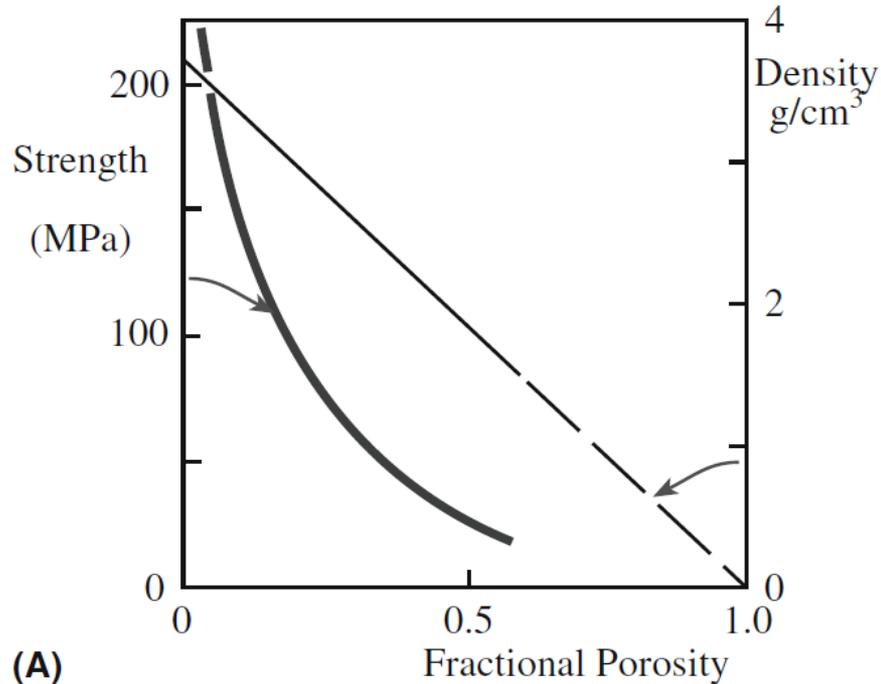


- **Material I:** alto módulo de Young (E), alta tensão de fratura, baixa ductilidade, baixa tenacidade, fratura sem deformação plástica significativa (cerâmicas).
- **Material II:** resistência mecânica moderada, grande ductilidade, deforma plasticamente antes da fratura, o mais tenaz entre os três (metais).
- **Material III:** o menor módulo elástico, grande deformação elástica além do limite de proporcionalidade (não ductilidade), baixa resistência à tração e tenacidade. (elastômeros).

Resistência mecânica de cerâmicas é muito dependente da composição e da microestrutura



Efeito da microestrutura na resistência de materiais cerâmicos

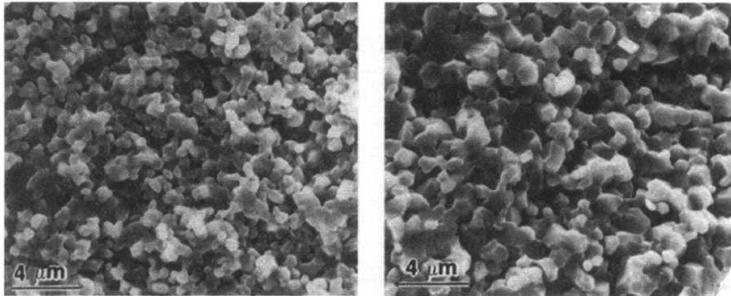


Efeito da porosidade na resistência de Al₂O₃ policristalina.

Remoção incompleta da porosidade durante a sinterização no estado sólido de CeO₂.

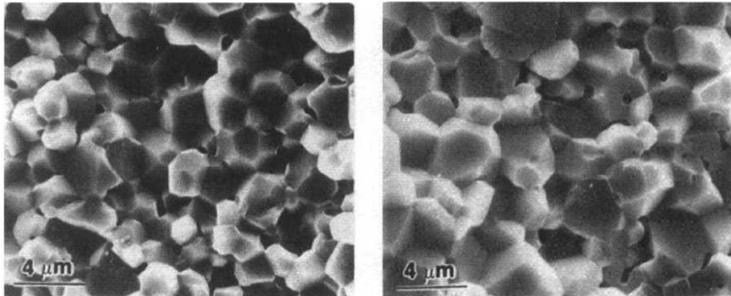
Poros agem como defeitos concentradores de tensão!

Efeito da microestrutura na resistência de materiais cerâmicos



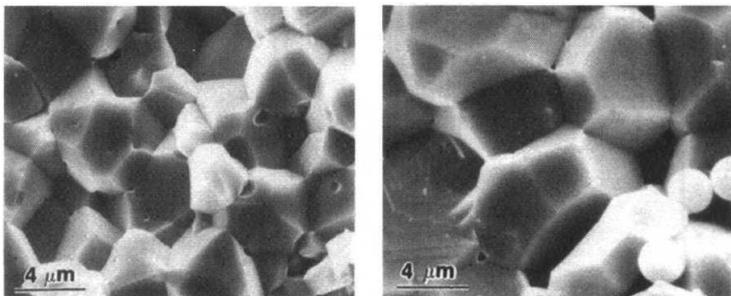
(a)

(b)



(c)

(d)

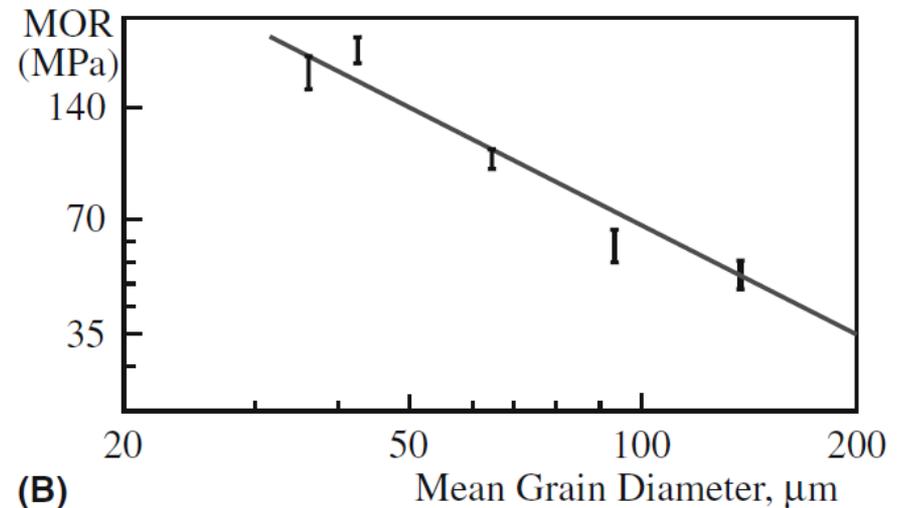


(e)

(f)

Al_2O_3 dopada com MgO sinterizada ao ar a 1600°C em função do tempo.

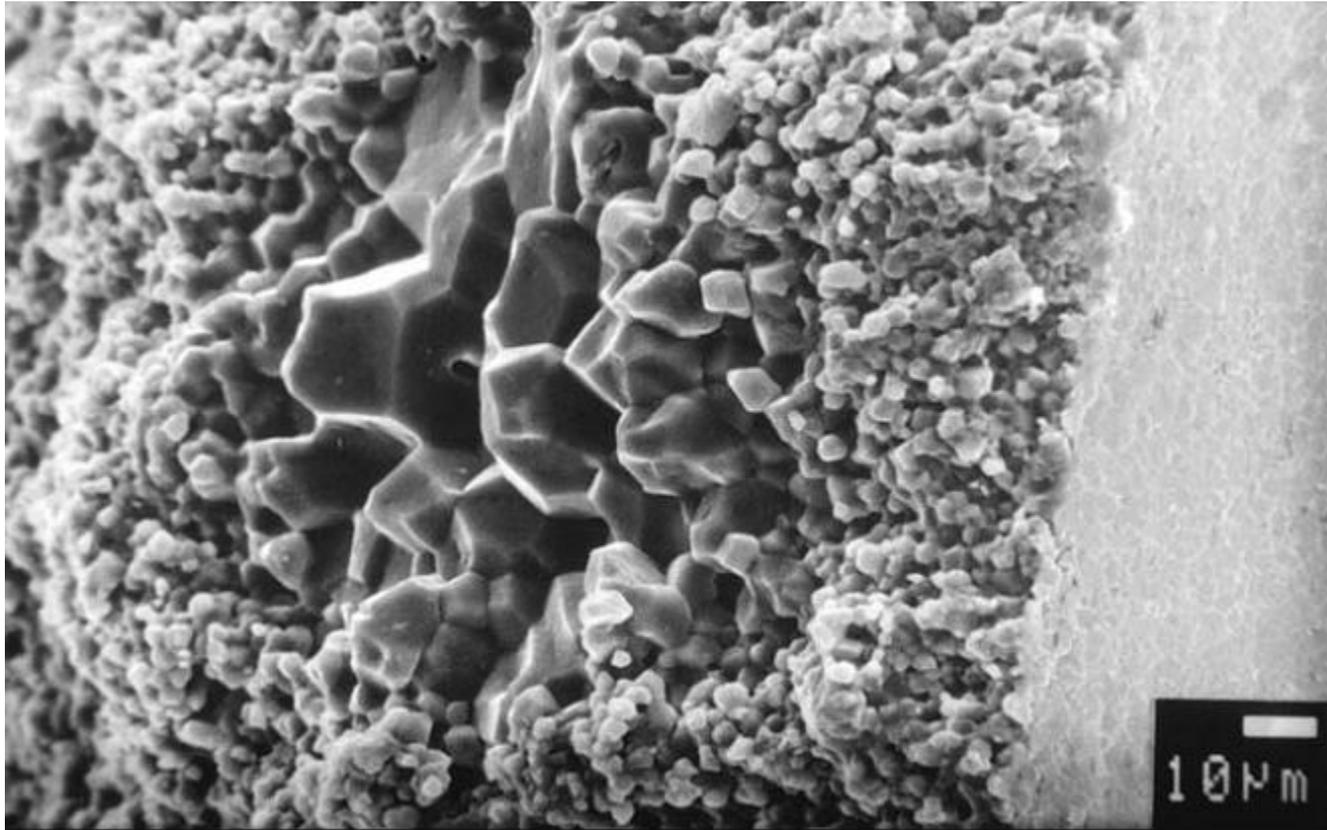
Efeito do tamanho de grãos na resistência de BeO denso.



(B)

Grãos também agem como defeitos concentradores de tensão!

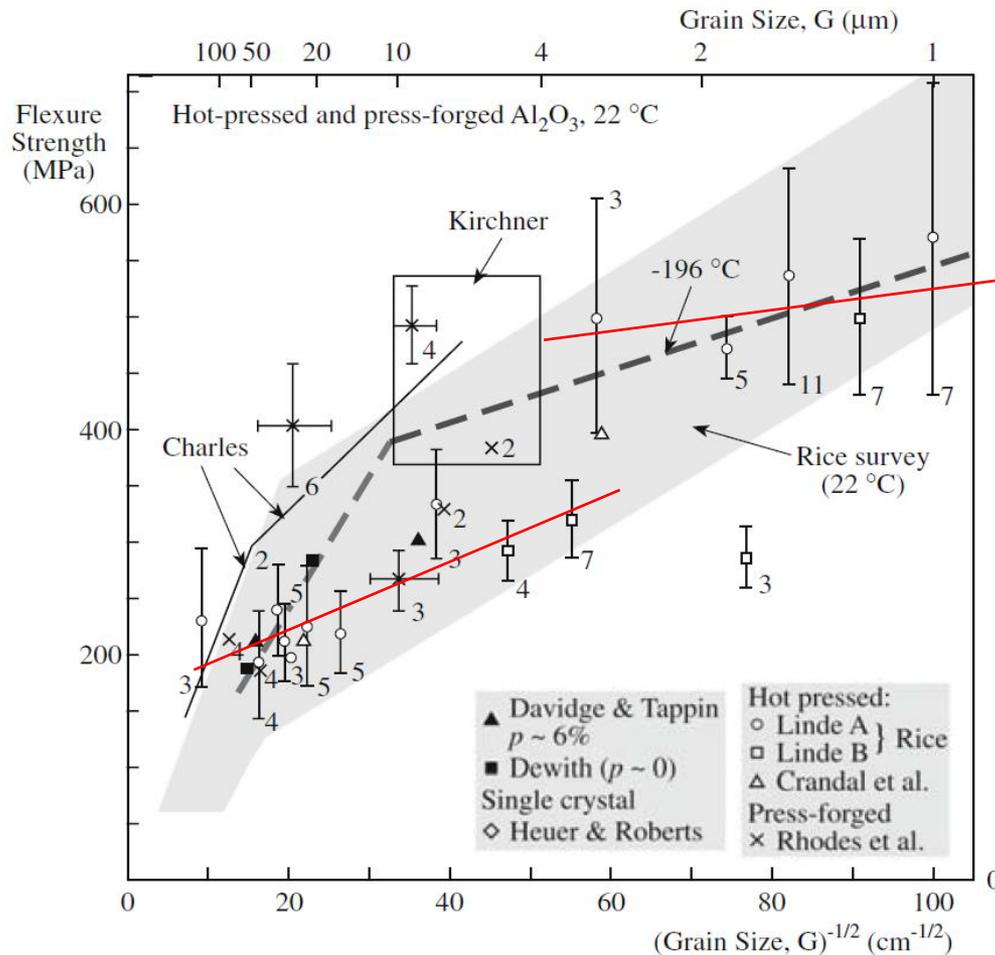
Efeito da microestrutura na resistência de materiais cerâmicos



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

Grãos e poros agem como defeitos concentradores de tensão!

Efeito da microestrutura na resistência de materiais cerâmicos



- Dados de resistência à flexão à temperatura ambiente de Al_2O_3 policristalina em função do tamanho de grãos.
- Há duas regiões distintas, ambas proporcionais a $d^{-1/2}$, onde d é o tamanho de grão, devido à diferentes mecanismos envolvendo trincas pré-existentes, nucleação de trincas e linhas de discordância.

Resistência mecânica de materiais cerâmicos

- Quando expressar a resistência mecânica de materiais cerâmicos, deve-se também informar:
 - Composição química (Al_2O_3 95%, 99,7% de pureza)
 - Densidade relativa (95%, 99% da densidade teórica)
 - Tamanho de grãos, tamanhos mínimo (D10) e máximo (D90) esperados
 - Tipo de ensaio (flexão 3 ou 4 pontos, tração)
- Cerâmicas de alta performance combinam alta resistência à tração com as vantagens tradicionais dos materiais cerâmicos:
 - Grande inércia química
 - Alta refratariedade
 - Alta dureza
- Exemplos:
 - Si_3N_4 , SiC , ZrO_2 , Al_2O_3
- Formatos:
 - Monólitos
 - Compósitos
 - Coberturas
 - Fibras
 - Whiskers

Resistência mecânica de materiais cerâmicos

- Ao aplicar cerâmicas sob tensões mecânicas, seria ideal ter informações sobre:
 - Módulo de Young
 - Tensão média de ruptura (resistência mecânica média) e módulo de Weibull
 - Tenacidade
 - Taxa ou velocidade de propagação de trinca
 - Resistência à fadiga cíclica
 - Curvas de fluência
 - Dados de ruptura sob tração
- Tudo isso em função da temperatura!
- Principais diferenças em como cerâmicas são ensaiadas, em relação aos ensaios em metais:
 - É muito difícil realizar ensaios de tração em materiais cerâmicos, pois trincas podem ser introduzidas no processo de fabricação dos corpos de prova.
 - Cerâmicas são mais resistentes à compressão que em tração, devido à forma como as trincas se propagam.
 - Para cerâmicas, é necessário se preocupar com a estatística (espalhamento) dos resultados!

Ensaio mecânico devem seguir normas.

TABLE 16.1 ASTM Standards on Mechanical Properties and Testing of Ceramics

Mechanical properties and performance

C1161-02	Test Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature ^a
C1198-01	Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio for Advanced Ceramics by Sonic Resonance
C1211-02	Test Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics at Elevated Temperatures
C1259-01	Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio for Advanced Ceramics by Impulse Excitation of Vibration
C1273-95	Test Method for Tensile Strength of Monolithic Advanced Ceramics at Ambient Temperature
C1291-95	Test Method for Elevated Temperature Tensile Creep Strain, Creep Strain Rate, and Creep Time-to-Failure for Advanced Monolithic Ceramics
C1326-99	Test Method for Knoop Indentation Hardness of Advanced Ceramics
C1327-97	Test Method for Vickers Indentation Hardness of Advanced Ceramics
C1361-01	Practice for Constant-Amplitude, Axial, Tension-Tension Cyclic Fatigue of Advanced Ceramics at Ambient Temperature
C1366-97	Test Method for Tensile Strength of Monolithic Advanced Ceramics at Elevated Temperatures
C1368-01	Test Method for Determination of Slow Crack Growth Parameters of Advanced Ceramics by Constant Stress-Rate Flexural Testing at Ambient Temperature
C1421-01	Test Method for the Determination of Fracture Toughness of Advanced Ceramics
C1424-99	Test Method for Compressive Strength of Monolithic Advanced Ceramics at Ambient Temperatures
C1465-00	Test Method for Determination of Slow Crack Growth Parameters of Advanced Ceramics by Constant Stress-Rate Flexural Testing at Elevated Temperature
C1499-02	Test Method for Monotonic Equi-biaxial Flexural Strength Testing of Advanced Ceramics at Ambient Temperature
C1525-02	Test Method for Determination of Thermal Shock Resistance for Advanced Ceramics by Water Quenching

Reliability

C1175-99	Guide to Test Methods for Nondestructive Testing of Advanced Ceramics
C1212-98	Practice of Fabricating Ceramic Reference Specimens Containing Seeded Voids
C1239-95	Practice for Reporting Uniaxial Strength Data and Estimating Weibull Distribution Parameters for Advanced Ceramics
C1322-02	Practice for Fractography and Characterization of Fracture Origins in Advanced Ceramics
C1336-96	Practice for Fabricating Non-Oxide Ceramic Reference Specimens Containing Seeded Inclusions
C1495-01	Test Method for Effect of Surface Grinding on Flexure Strength of Advanced Ceramics

^aStandards for both three-point and four-point bending; --••, year of current version of standard, e.g., -01 is 2001.

Efeito da composição no módulo elástico

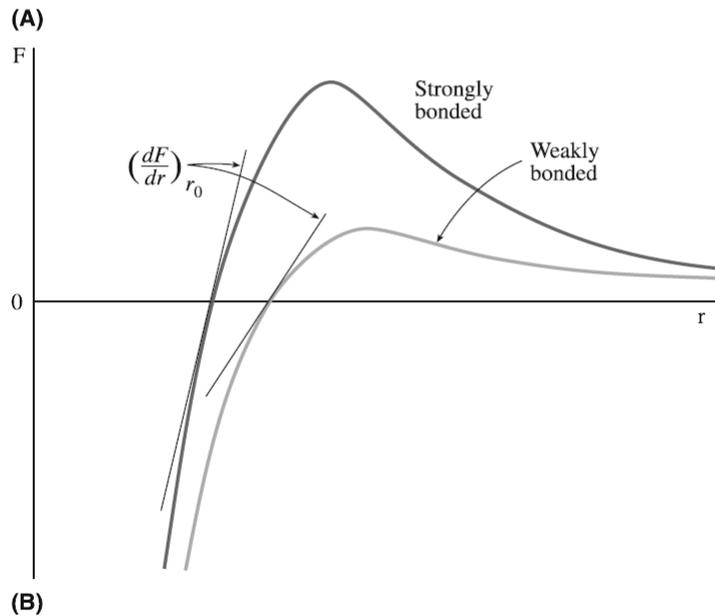
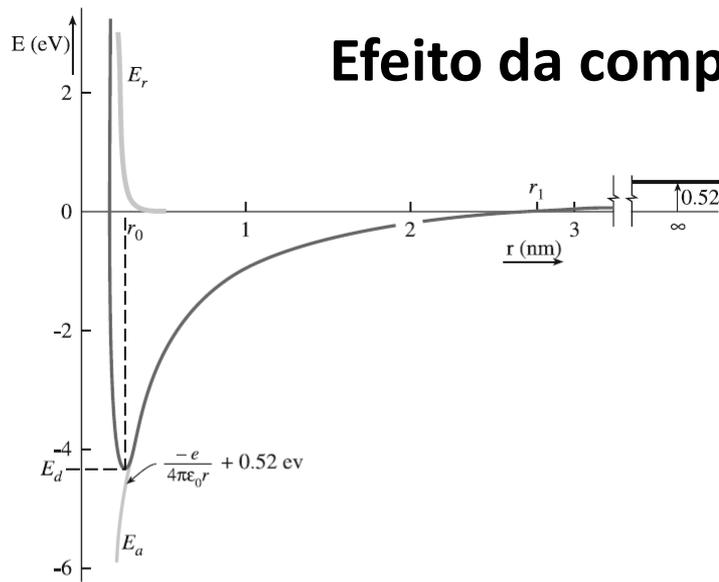


FIGURE 4.1 (a) Bond-energy curve for KCl. At infinite separation, the energy is that required to form K^+ and Cl^- from the corresponding atoms. (b) Force-distance curves for two materials: one where the bonding is strong and one where it is weak.

TABLE 4.2 Young's Moduli as a Function of Melting Temperature

Compound	Average Young's modulus (GPa)	Melting temperature, ($^{\circ}\text{C}$)
Titanium carbide	310	3180
Tungsten	414	2996
Silicon carbide	345	Sublimes > 2800
Periclase (MgO)	207	2800
Beryllia (BeO)	310	2585
Spinel (MgAl_2O_4)	241	2160
Corundum (Al_2O_3)	366	2050
Iron	207	1539
Copper	110	1083
Halite (NaCl)	34	801
Aluminum	69	660
Magnesium	41	650
Polystyrene	2.8	<300
Nylon	2.8	<300
Rubber	0.07	<300

Efeito da temperatura no módulo elástico

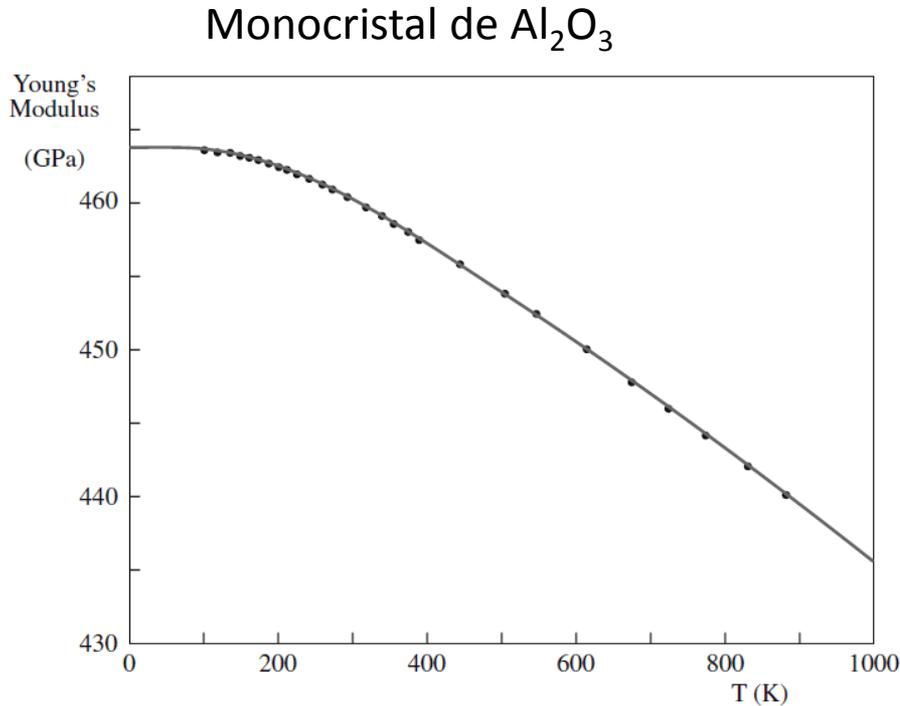


FIGURE 4.2 Temperature dependence of Young's modulus for corundum.

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 - bT \exp\left(\frac{-T_0}{T}\right)$$

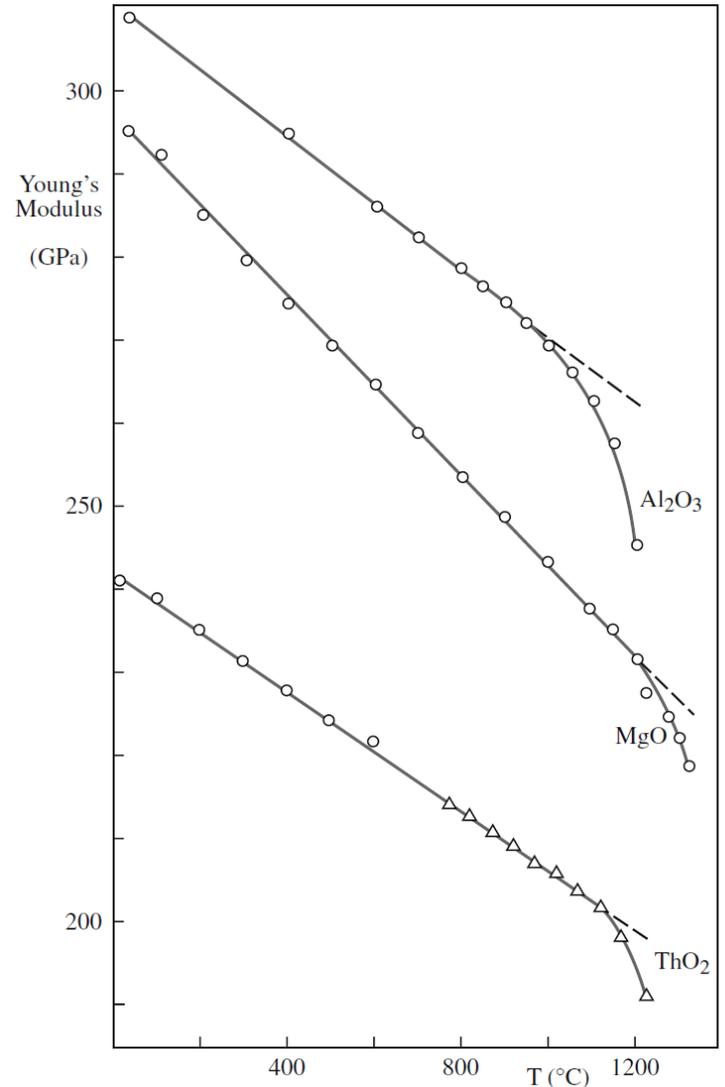


FIGURE 4.3 Temperature dependence of Young's modulus of several polycrystalline ceramics.

Módulo elástico

TABLE 16.3 Expressions for Various Isotropic Elastic Moduli; Various Pairs of Moduli

<i>Moduli</i>	<i>Independent pair of moduli</i>			
	\mathcal{E}, μ	B, μ	B, ν	λ, μ
\mathcal{E}	\mathcal{E}	$9B\mu/(3B + \mu)$	$3B(1 - 2\nu)$	$\mu(3\lambda + 2\mu)/(\lambda + \mu)$
μ	μ	μ	$3B(1 - 2\nu)/2(1 + \nu)$	μ
B	$\mathcal{E}\mu/3(3\mu - \mathcal{E})$	B	B	$\lambda + (2\mu/3)$
ν	$(\mathcal{E}/2\mu) - 1$	$(3B - 2\mu)/(6B + 2\mu)$	ν	$\lambda/(2\lambda + \mu)$
λ	$(\mathcal{E} - 2\mu)\mu/(3\mu - \mathcal{E})$	$B - (2\mu/3)$	$3\nu B(1 + \nu)$	λ

Efeito da microestrutura no módulo elástico

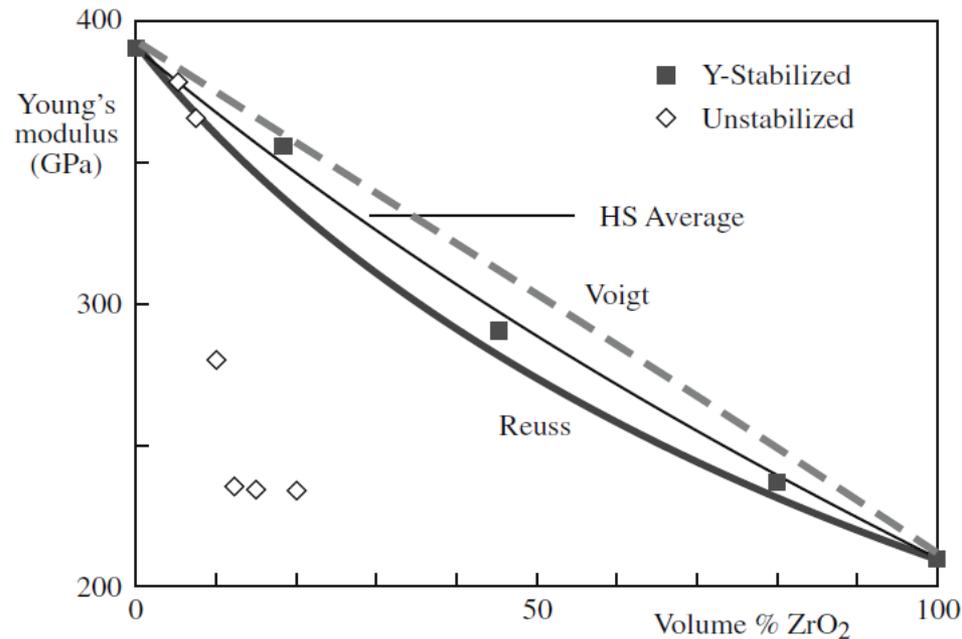


FIGURE 16.7 Comparison of predicted values of Young's modulus for an Al₂O₃ tetragonally stabilized ZrO₂ composite with experimental data.

Efeito da porosidade no módulo elástico

TABLE 16.5 Relations between Porosity, P , and Young's Modulus, \mathcal{E}

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0(1 - aP)$$

Linear decrease in Young's modulus with porosity when P is small, $a \sim 4$

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0(1 - aP + bP^2)$$

For a low concentration of spherical pores ($a \sim 1.9$, $b \sim 0.9$)

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0(1 - aP)^b$$

For solid foams with very high porosity $P > 0.7$ ($a = 1$, $b = 2$)

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0[(1 - P)^2/1 + (a - 1)P]$$

a is a shape factor with values depending on porosity:

$a = 2.5$ for interconnected porosity ($1/a = 0.4$)

$a = 3.3-1.4$ for porosity that resembles ribbons ($1/a = 0.3-0.7$)

$a = 0.6-1.0$ for isolated pores ($1/a = 0.6-1.0$)

($1/a$ is known as the Nielson shape factor)

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \exp(-aP)$$

Empirical for oxides with porosity in the range 0-40% ($a \sim 4$)

Exercícios

- Explicar o que são transformações deslocativas e reconstrutivas e dar um exemplo em materiais cerâmicos.

- Carter-Norton:

16.1 In Figure 16.7 the experimental data for the unstabilized samples deviate from the predicted values for Young's modulus. (a) What do we mean by "unstabilized." (b) How can you account for the difference in the predicted values and experimental values?

16.2 Is Young's modulus affected more by the presence of an intergranular glass phase or an equal amount of porosity? Justify your answer with a suitable calculation. (*Dica, nos cálculos, no caso de vidro intergranular, considere Al_2O_3 como a cerâmica e vidro de janela ou soda-cal nos contornos dos grãos*).