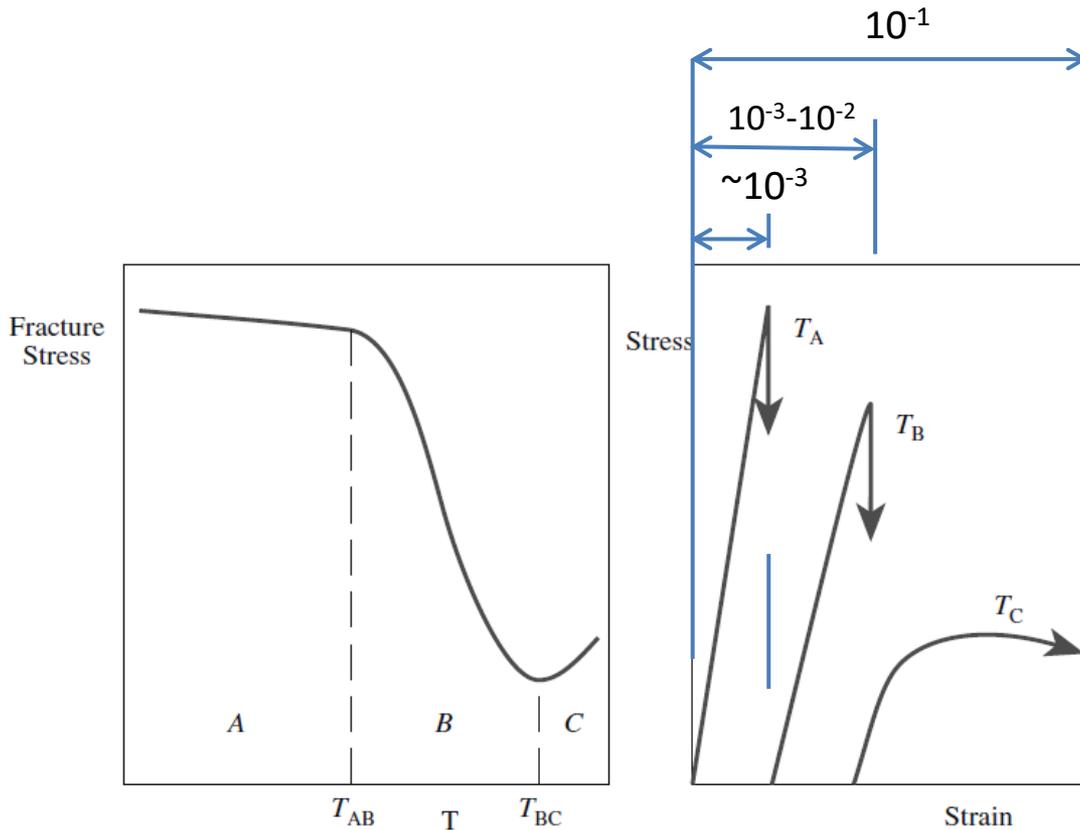


# Aula 3

## Propriedades Mecânicas de Cerâmicas

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

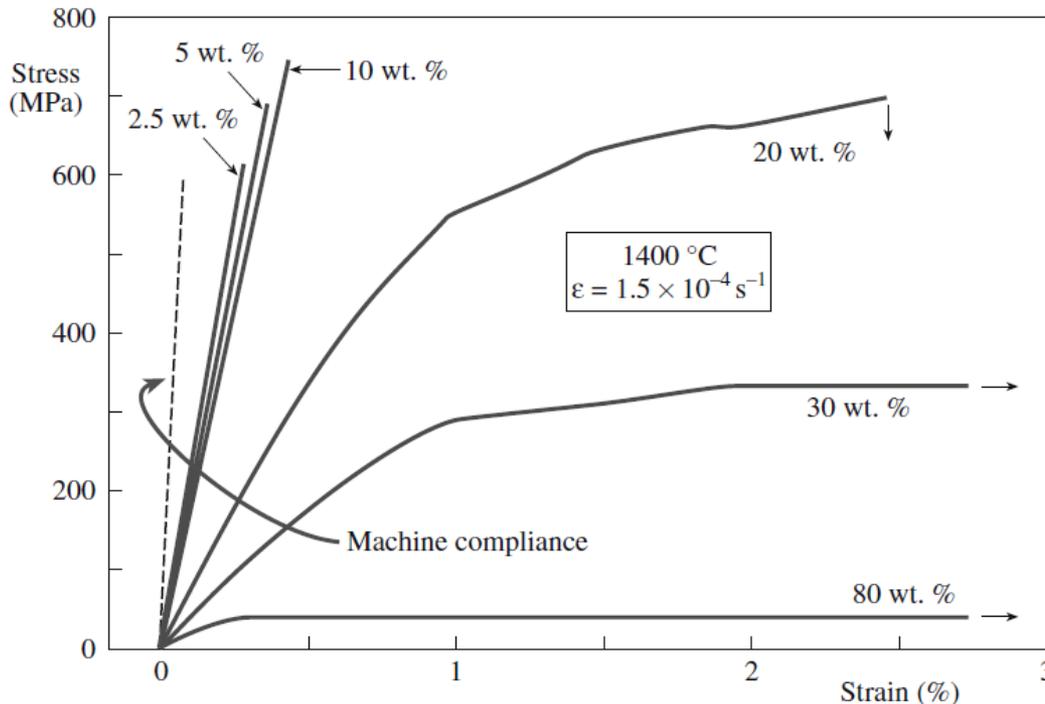
# Efeito da temperatura na resistência mecânica



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

- Cerâmicas podem exibir transição frágil-dúctil.
- O comportamento na região C é raro.
- $T_{AB} = 1700^{\circ}\text{C}$  p/ MgO
- $T_{AB} = 2000^{\circ}\text{C}$  p/ SiC
- Grafite, talco e  $\text{MoSi}_2$  deformam plasticamente à temperatura ambiente.

# Efeito da temperatura na resistência mecânica



**FIGURE 16.9** Stress–strain curve for  $\text{Si}_3\text{N}_4$  at  $1400^\circ\text{C}$  for various amounts of silica. The machine compliance is the inherent displacement within the instrument.

- Muitas cerâmicas são sinterizadas via fase líquida, como auxiliar de densificação, com formação de fase vítrea ou cristalina de baixo ponto de fusão nos pontos triplos entre grãos ou ao longo de todo o contorno de grãos.
- Nesse caso, acima da temperatura de amolecimento do vidro ou líquido, uma grande deformação plástica pode ocorrer.
- Exemplo:  $\text{Si}_3\text{N}_4$  com  $\text{SiO}_2$ .

# Tração vs. Compressão

- Metais apresentam comportamento  $\sigma$ - $\varepsilon$  similar tanto em tração quanto em compressão.
- Cerâmicas não: a resistência à tração em geral é muito menor que a resistência em compressão.

TABLE 16.6 Ratio of Compressive Strength  $\sigma_{cc}$  to Bending Strength,  $\sigma_c$

<i>Ceramic</i>	<i>Grain size (<math>\mu m</math>)</i>	$\sigma_{cc}/\sigma_c$
TiB <sub>2</sub>	20–50	4–6
ZrB <sub>2</sub>	20–50	4–6
B <sub>4</sub> C	1	7
WC	1–6	4–6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1–100	4–30
MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	1	7
ThO <sub>2</sub>	4–60	13–17
UO <sub>2</sub>	20–50	5–18

# Tração vs. Compressão

- As trincas se comportam de forma diferente em tração e compressão.
- Em compressão, as trincas se desviam de sua orientação original e se propagam estavelmente ao longo do eixo de compressão.
- A fratura não ocorre pela rápida propagação de trinca, como ocorre em tração.
- O resultado é que o material é moído ao invés de se fraturar.
- Em **tração**, nossa preocupação é com o **maior defeito**, ou “defeito crítico”! Especialmente se o defeito encontrar-se na superfície.
- Em **compressão**, nossa preocupação é com o **tamanho de defeito médio**,  $c_{av}$ .
- Dentes são compósitos cerâmicos: eles sobrevivem por anos mesmo quando muitas trincas estão presentes.

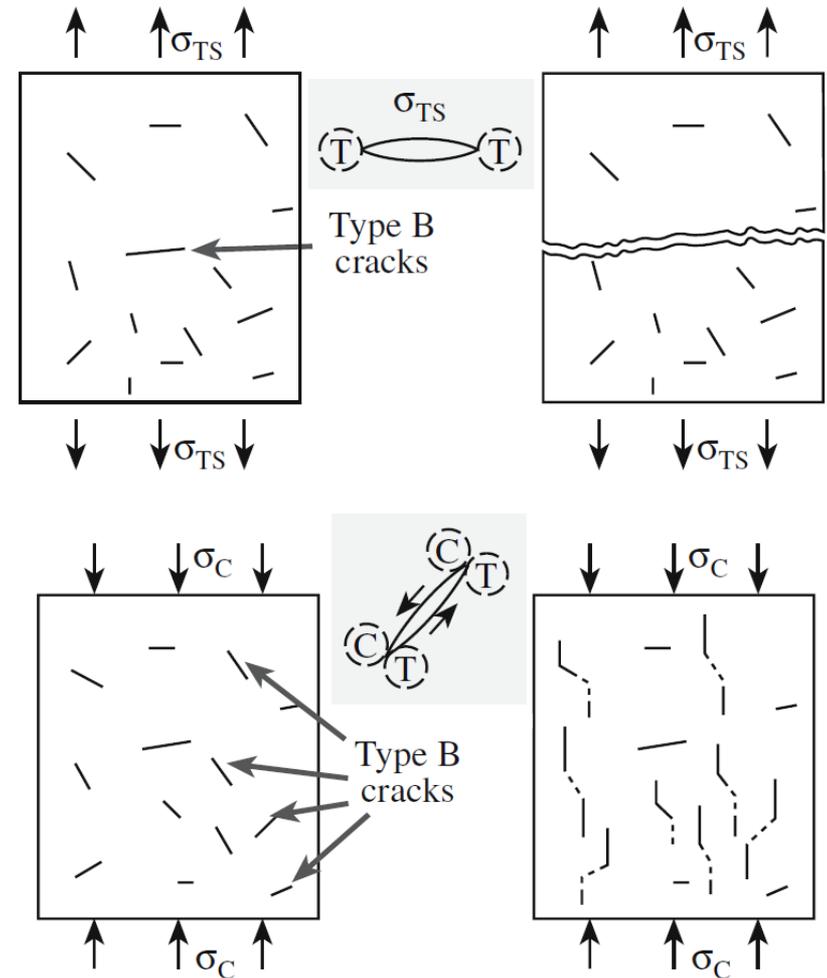


FIGURE 16.10 Illustration of unstable and stable crack propagation for a brittle material in tension (T) and compression (C), respectively. Stable crack propagation will lead to crushing.

# Tração vs. Compressão

- Podemos estimar a **resistência à tração** de um material cerâmico conhecendo seu  $K_{IC}$  e substituindo o valor de  $c$  na equação abaixo:

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

- $K_{IC}$  = fator de intensidade de tensão crítico ou tenacidade à fratura do material
- $\sigma_f$  = tensão de fratura
- $c$  = tamanho do maior defeito ou defeito crítico (**comprimento do defeito na superfície ou metade do comprimento do defeito no volume**)
- $Y$  é um termo geométrico (veja o próximo slide!)
- No próximo slide:  $Y = F$  e  $S_G$  é a **tensão aplicada, que é igual a  $\sigma_f$  no limite da fratura.**

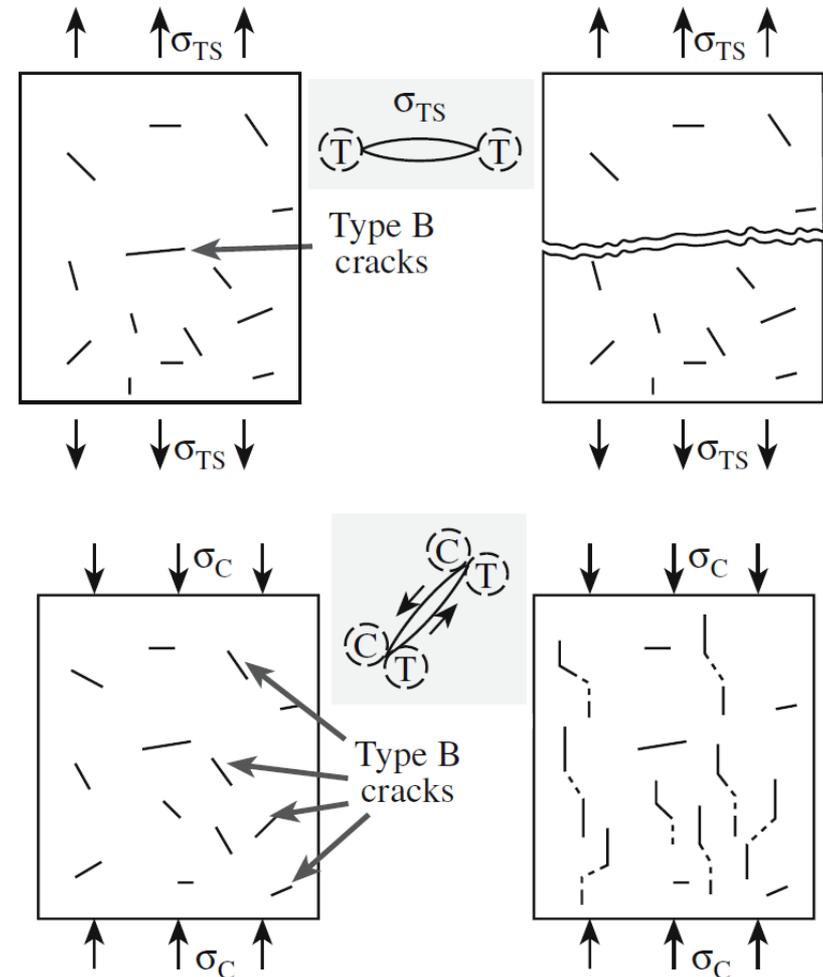


FIGURE 16.10 Illustration of unstable and stable crack propagation for a brittle material in tension (T) and compression (C), respectively. Stable crack propagation will lead to crushing.

value of the factor  $K_I$ . On this basis,  $K_I$  is a measure of the severity of the crack. Its definition in a formal mathematical sense is

$$K_I = \lim_{r, \theta \rightarrow 0} (\sigma_y \sqrt{2\pi r}) \quad (8.8)$$

It is generally convenient to express  $K_I$  as

$$K_I = FS\sqrt{\pi a} \quad (8.9)$$

where the factor  $F$  is needed to account for different geometries. For example, if a central crack in a plate is relatively long, Eq. 8.2 needs to be modified, as the proximity of the specimen edge causes  $F$  to increase above unity. The quantity  $F$  is a function of the ratio  $a/b$ , as shown in Fig. 8.12, curve (a). Curves (b) and (c) show the variation of  $F$  with  $a/b$  for two additional cases of cracked members under tension, specifically, for double-edge-cracked plates and for single-edge-cracked plates.

### 8.3.3 Additional Comments on $K$ and $G$

For loading in Mode II or III, analogous, but distinct, stress field equations exist, and stress intensities  $K_{II}$  and  $K_{III}$  can be defined in a manner analogous to  $K_I$ . However, most practical applications involve Mode I. As a convenience, the subscript on  $K_I$  will be dropped, and  $K$  without such a subscript is understood to denote  $K_I$ , that is,  $K = K_I$ .

The quantities  $G$  and  $K$  can be shown to be related as follows:

$$G = \frac{K^2}{E'} \quad (8.10)$$

where  $E'$  is obtained from the material's elastic modulus  $E$  and Poisson's ratio  $\nu$ :

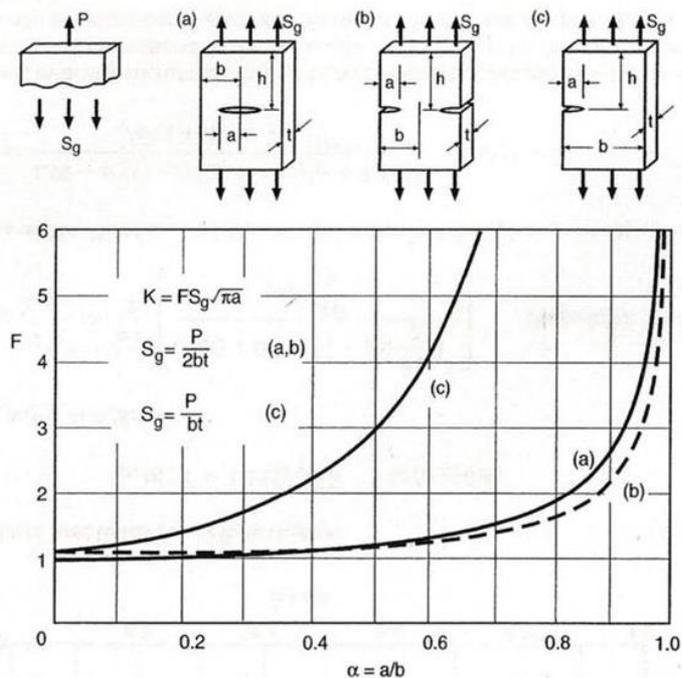
$$\begin{aligned} E' &= E & (\text{plane stress; } \sigma_z = 0) \\ E' &= \frac{E}{1-\nu^2} & (\text{plane strain; } \varepsilon_z = 0) \end{aligned} \quad (8.11)$$

Equation 8.10 and the dependence of  $G$  on load versus displacement behavior, Eq. 8.6, can be exploited to evaluate  $K$ . Slopes on  $P$ - $v$  curves, as in Fig. 8.9, are employed in a procedure called the *compliance method*. See any book on fracture mechanics or Tada (2000) for details.

Since  $G$  and  $K$  are directly related according to Eq. 8.10, only one of these concepts is generally needed. We will primarily employ  $K$ , which is consistent with most engineering-oriented publications on fracture mechanics.

## 8.4 APPLICATION OF $K$ TO DESIGN AND ANALYSIS

For fracture mechanics to be put to practical use, values of stress intensity  $K$  must be determined for crack geometries that may exist in structural components. Extensive analysis work has been published, and also collected into handbooks, giving equations or plotted curves that enable  $K$  values to be calculated for a wide variety of cases. A special section of the References at the



Values for small  $a/b$  and limits for 10% accuracy:

$$\begin{aligned} \text{(a)} \quad K &= S_g \sqrt{\pi a} & \text{(b)} \quad K &= 1.12 S_g \sqrt{\pi a} & \text{(c)} \quad K &= 1.12 S_g \sqrt{\pi a} \\ & (a/b \leq 0.4) & & (a/b \leq 0.6) & & (a/b \leq 0.13) \end{aligned}$$

Expressions for any  $\alpha = a/b$ :

$$\begin{aligned} \text{(a)} \quad F &= \frac{1 - 0.5\alpha + 0.326\alpha^2}{\sqrt{1-\alpha}} & (h/b \geq 1.5) \\ \text{(b)} \quad F &= \left(1 + 0.122 \cos^4 \frac{\pi\alpha}{2}\right) \sqrt{\frac{2}{\pi\alpha} \tan \frac{\pi\alpha}{2}} & (h/b \geq 2) \\ \text{(c)} \quad F &= 0.265(1-\alpha)^4 + \frac{0.857 + 0.265\alpha}{(1-\alpha)^{3/2}} & (h/b \geq 1) \end{aligned}$$

Figure 8.12 Stress intensity factors for three cases of cracked plates under tension. Geometries, curves, and equations labeled (a) all correspond to the same case, and similarly for (b) and (c). (Equations as collected by [Tada 85] pp. 2.2, 2.7, and 2.11.)

# Tração vs. Compressão

- Podemos estimar a resistência à compressão substituindo o comprimento médio de defeitos como sendo igual a  $2c_{av}$  na equação abaixo:

$$K_{IC} = Y\sigma_f\sqrt{\pi c_{av}}$$

- e multiplicador o resultado por um fator de 10 a 15.

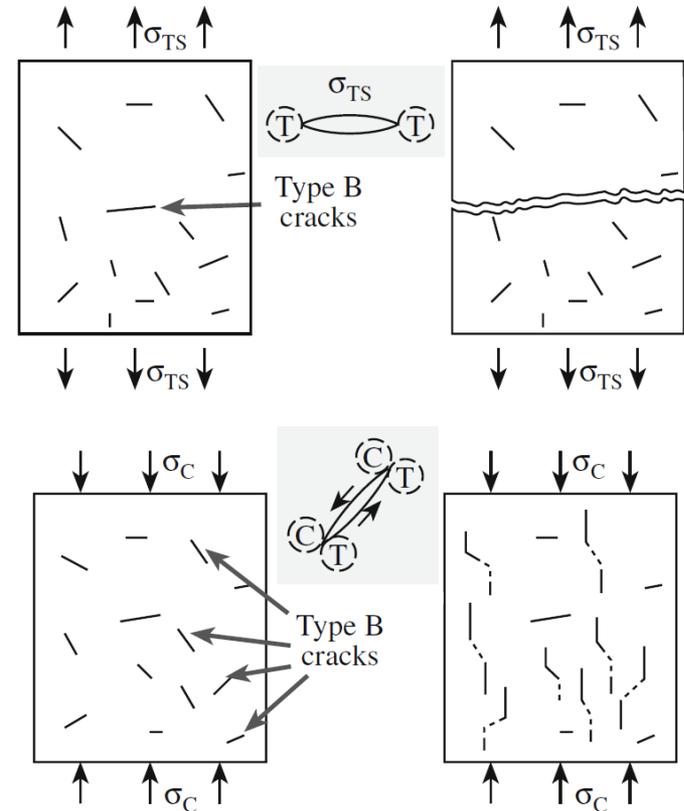


FIGURE 16.10 Illustration of unstable and stable crack propagation for a brittle material in tension (T) and compression (C), respectively. Stable crack propagation will lead to crushing.

<i>Material</i>	<i>Yield Strength</i>		$K_{Ic}$	
	<i>MPa</i>	<i>ksi</i>	<i>MPa</i> $\sqrt{m}$	<i>ksi</i> $\sqrt{in.}$
<b>Metals</b>				
Aluminum Alloy <sup>a</sup> (7075-T651)	495	72	24	22
Aluminum Alloy <sup>a</sup> (2024-T3)	345	50	44	40
Titanium Alloy <sup>a</sup> (Ti-6Al-4V)	910	132	55	50
Alloy Steel <sup>a</sup> (4340 tempered @ 260°C)	1640	238	50.0	45.8
Alloy Steel <sup>a</sup> (4340 tempered @ 425°C)	1420	206	87.4	80.0
<b>Ceramics</b>				
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
<b>Polymers</b>				
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

# Exercícios

- Calcule corretamente o valor da relação  $\frac{\sigma_S}{\sigma_V}$ , pois o que foi feito em aula estava errado! Considere:
  - $\sigma_S$  é a resistência à tração para uma cerâmica com o maior defeito localizado na superfície, e
  - $\sigma_V$  é a resistência à tração da mesma cerâmica, cujo maior defeito tem o mesmo comprimento do caso acima, mas localizado no volume do material.
- Encontre na literatura a tenacidade à fratura típica da  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Considerando defeitos de  $10\ \mu\text{m}$ , qual seria a resistência à fratura esperada sob tração e sob compressão se o maior defeito estivesse no volume? E na superfície?
- Faça o mesmo para o vidro de janela ou soda-cal.

**Vou resolver o exercício no início na próxima aula, portanto não serão aceitos os exercícios entregues após a correção!**