

# Materiais Cerâmicos II

## Propriedades Mecânicas - Fratura: Fragilidade

Samuel da Silveira Martins

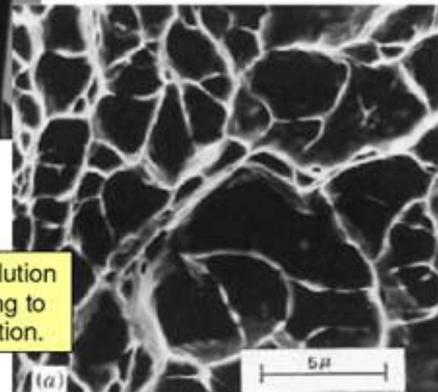
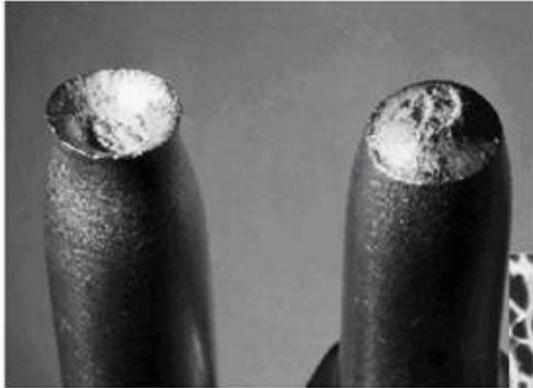
# Propriedades Mecânicas de cerâmicas

## Tenacidade a fratura (fratura frágil)

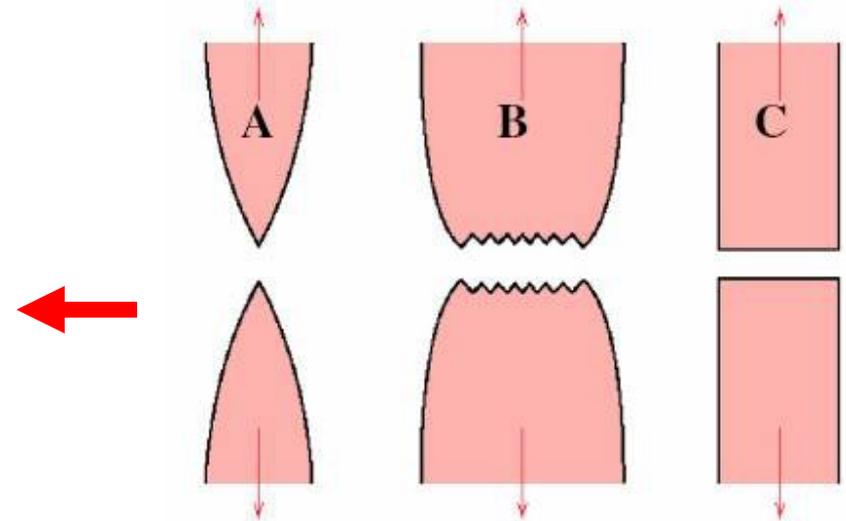
- Apresentam pouca ou nenhuma absorção de energia durante a fratura (ausência de deformação plástica).
- Os valores de LTR (resistência a fratura) são bastante inferiores aos estimados pela teoria a partir das forças de ligação interatômicas. Isso se deve à presença de defeitos críticos, que atuam como “amplificadores de tensão”.

# Ruptura – superfícies de fratura

## Ductile Fracture



SEM Fractography studies at high resolution shows spherical "dimples" corresponding to micro-cavities that initiated crack formation.



**A – Fratura dútil – metais macios tais como Au, Cu, polímeros e vidros a alta temperatura**

**B – Fratura moderadamente dútil – a maior parte dos metais**

**C – Fratura frágil**

# FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÃO

Para ocorrência da fratura:

1) **necessidade de tensão:** em algum ponto no sólido, a tensão local deve ser alta o suficiente para superar a força de coesão do sólido; isso pode ser alcançado pela concentração de tensão devido à presença de defeitos tais como microtrincas pré-existentes.

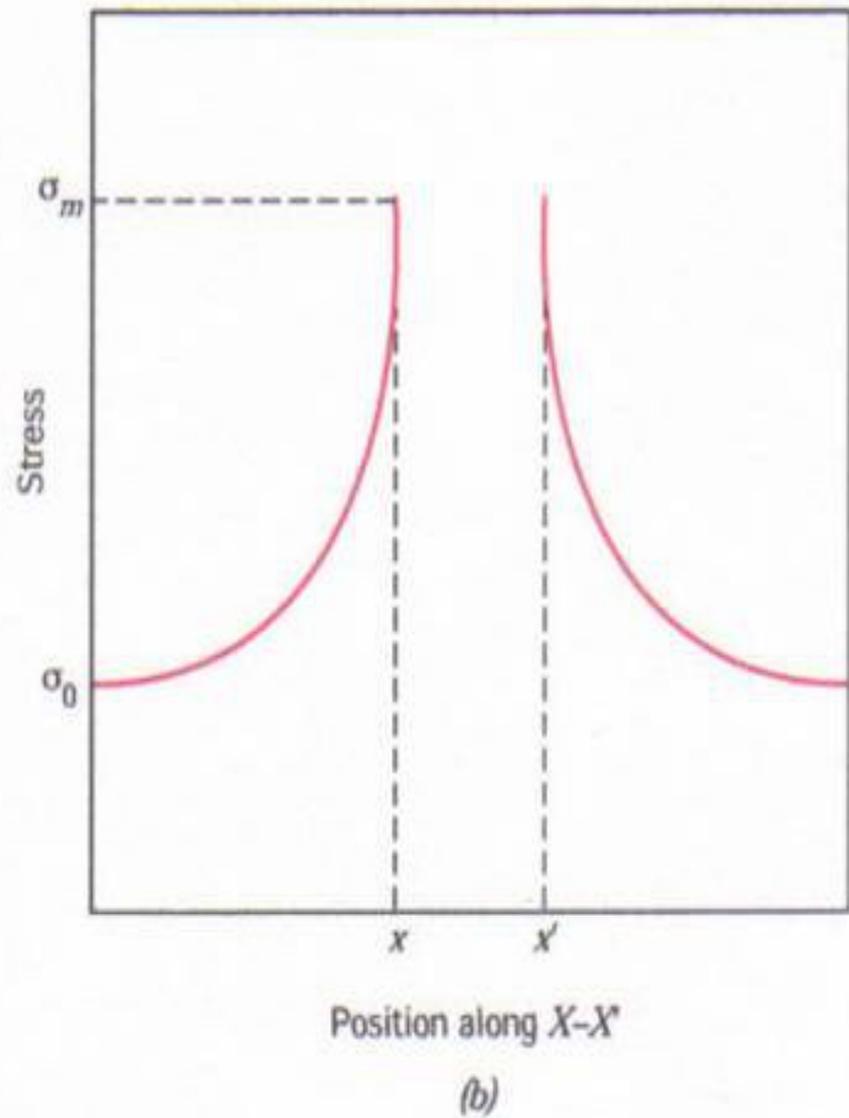
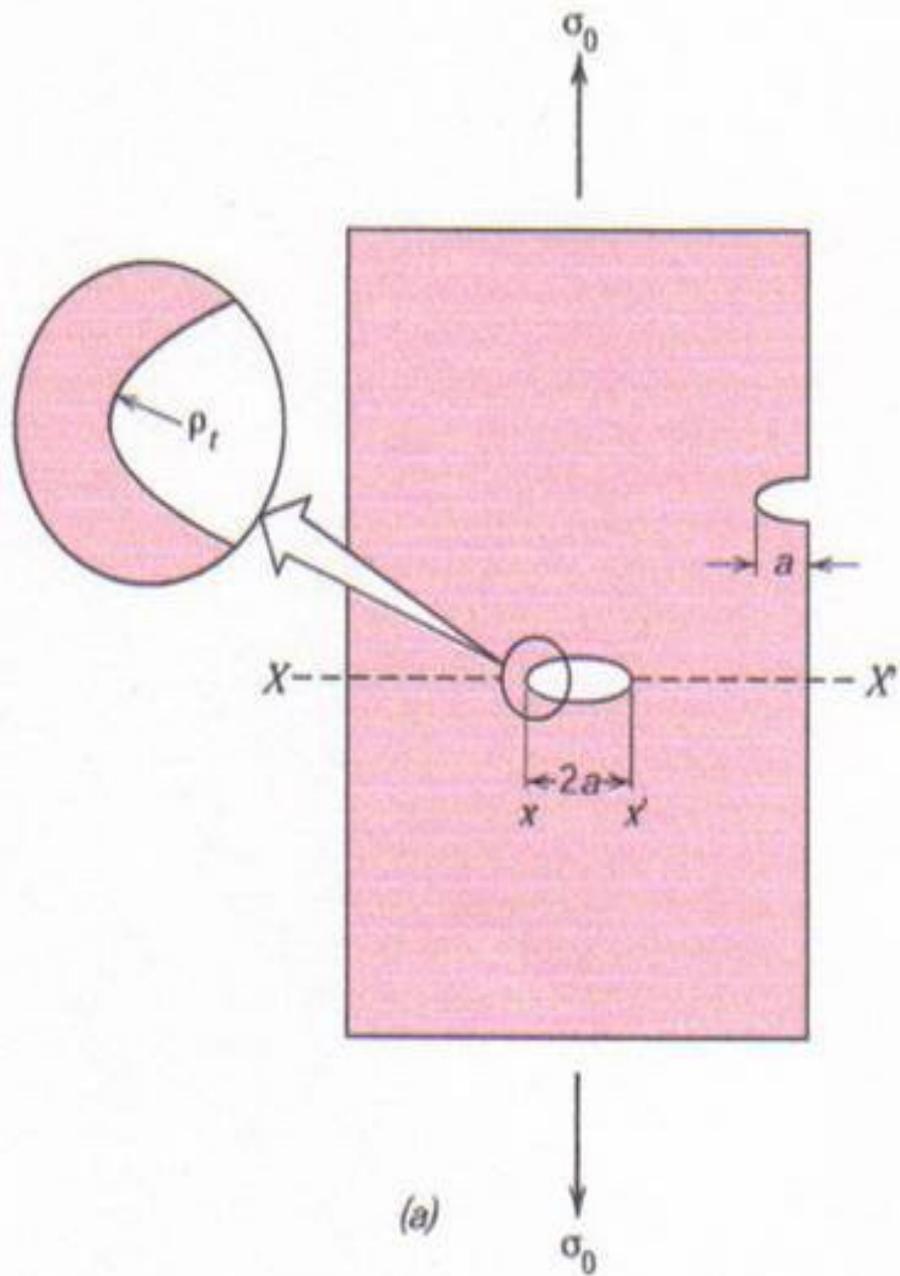
2) **necessidade de energia:** deve ser fornecida energia potencial suficiente para superar a resistência ao aumento do comprimento da trinca (isto é, conversão de energia elástica armazenada em energia de superfície); isto pode ser alcançado pelo trabalho realizado pelas forças externas.

- O grau de amplificação depende do comprimento da trinca, assim como do raio de curvatura da “ponta da trinca”.
- São fatores microestruturais “amplificadores de tensão”: trincas de superfície, microtrincas internas, poros e arestas de grão.

$$\sigma_f = \left( \frac{2E\gamma}{\pi a} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Por esse critério, a tensão de ruptura depende de:

- a) Módulo de Young, propriedade intrínseca do material
- b) Energia de superfície, propriedade intrínseca
- c) Comprimento do maior defeito

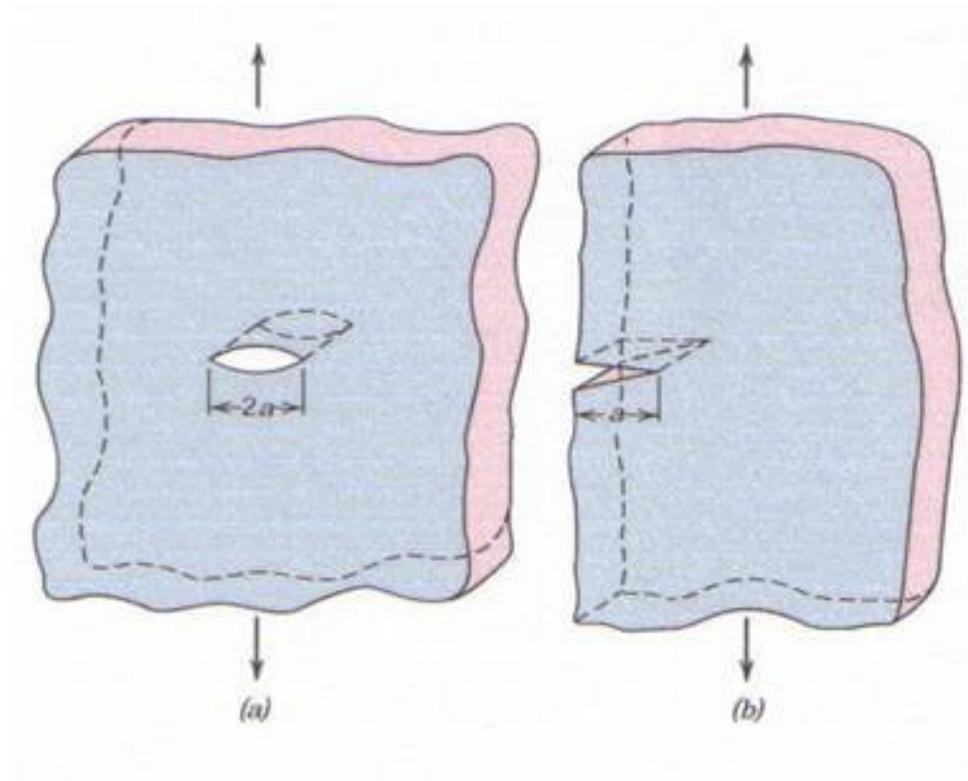


# FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÃO

$$K_I = Y \cdot \sigma \cdot (\pi c)^{1/2}$$

- onde  $Y$  é um fator adimensional, que depende da amostra e geometria da trinca;  
 $\sigma$  = tensão aplicada;  
 $c$  = comprimento de uma trinca na superfície ou metade do comprimento de uma trinca interna

# FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÃO



$$Y = 1$$

$$Y = 1,12$$

**TABLE 18.4 Fracture Toughness for Several Ceramics**

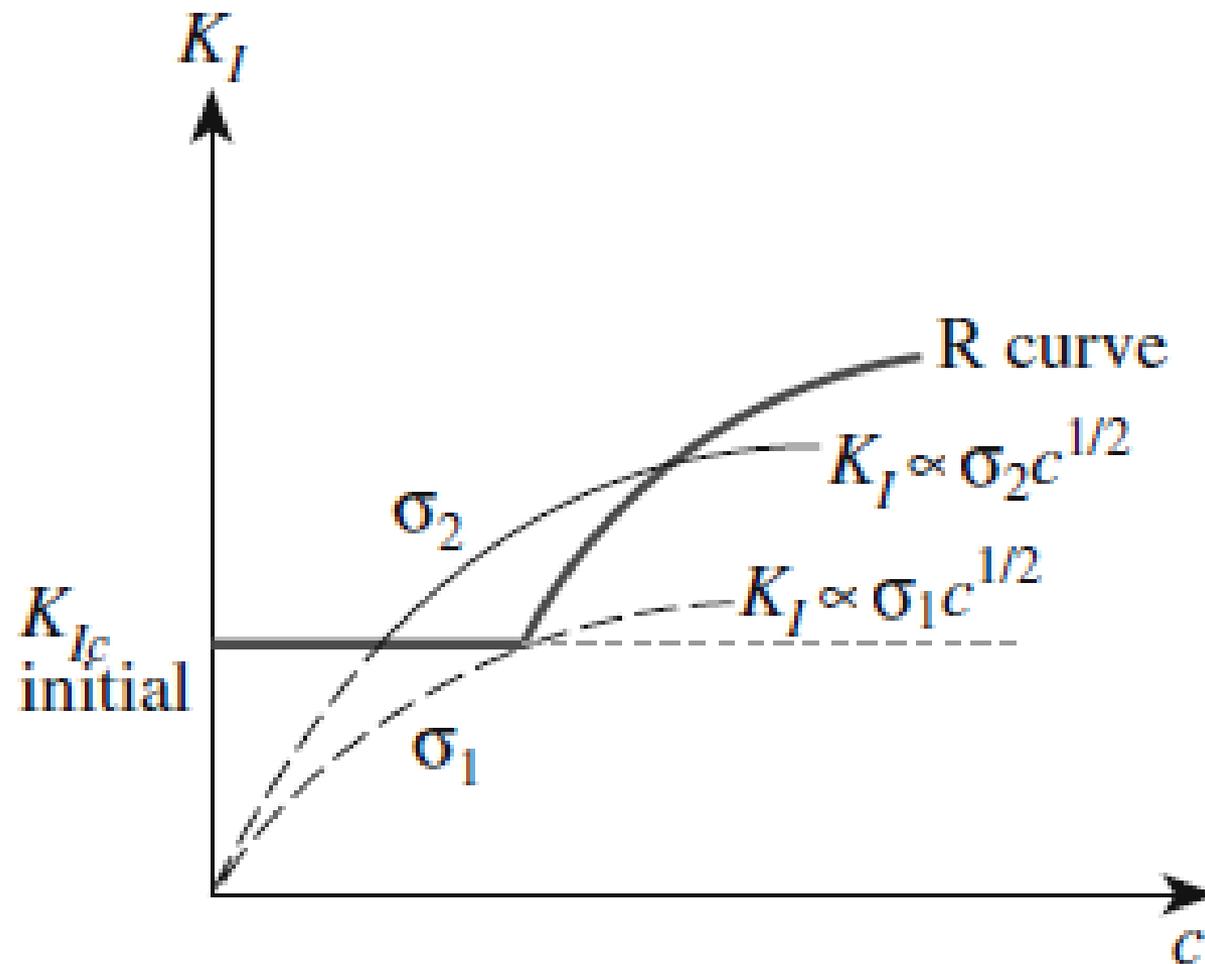
<i>Ceramic</i>	$K_{Ic}$ (MPa·m <sup>1/2</sup> )
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.0–6.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (single crystal, 1012)	2.2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (single crystal, 0001)	>6.0
MgO	2.5
MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	1.9–2.4
Mullite (fully dense)	2.0–4.0
ThO <sub>2</sub>	1.6
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.5
ZrO <sub>2</sub> (cubic)	3.0–3.6
ZrO <sub>2</sub> (partially stabilized)	3.0–15.0
SiC (hot pressed)	3.0–6.0
SiC (single crystal)	3.7
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (hot pressed)	3.0–10.0
TiC	3.0–5.0
WC	6.0–20.0
CaF <sub>2</sub>	0.80
KCl (single crystal)	–0.35
MgF <sub>2</sub>	1.00
SrF <sub>2</sub>	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 18.5 Theoretical and Measured Values of  $G_c$  for Some Materials**

<i>Material</i>	<i>Theoretical <math>G_c = 2\gamma</math> (N/m)</i>	<i>Measured <math>G_c</math> (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

# CURVAS R

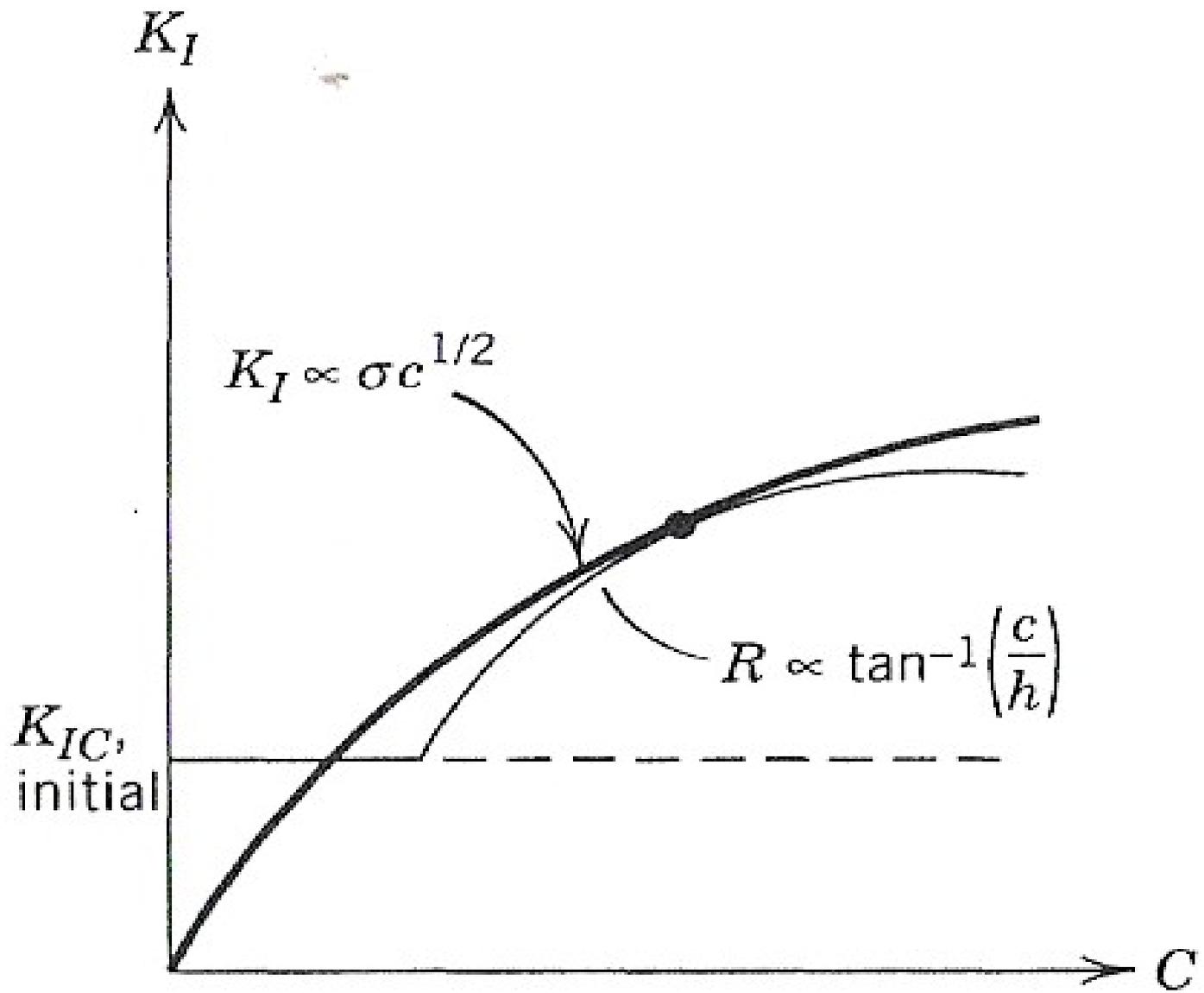
- A resistência à fratura  $R$  está relacionada com a tenacidade à fratura.
- A curva  $R$ , é um gráfico de tenacidade à fratura vs comprimento da trinca, relata a resistência à quebra do comprimento da trinca.



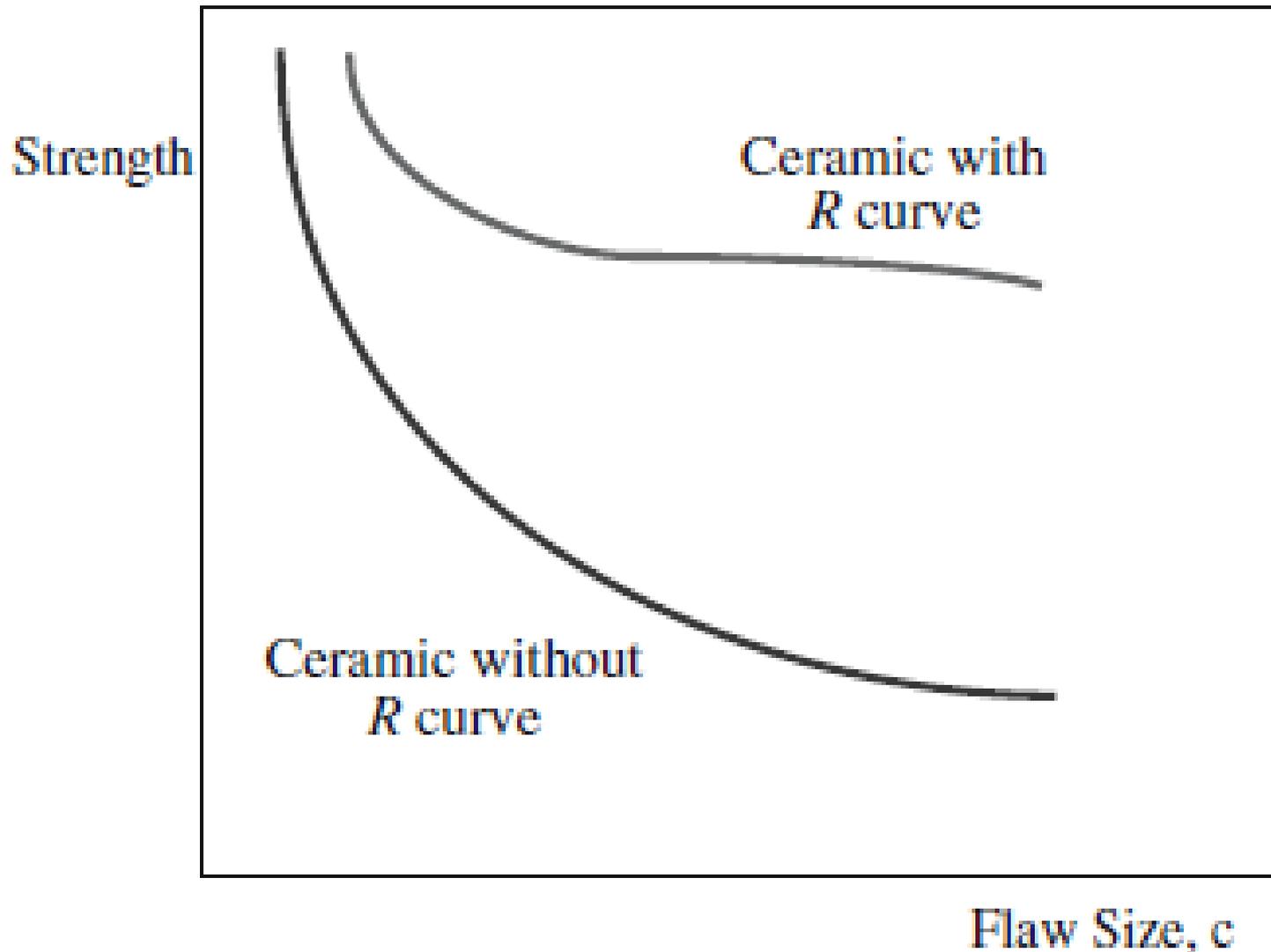
**FIGURE 18.7** A material showing *R* curve behavior (bold curve) exhibits a region of stable crack growth and flaw tolerant behavior. The lighter curves  $\sigma_1$  and  $\sigma_2$  represent typical Griffith behavior.

# CURVAS R

- As implicações seguintes aplicam-se a cerâmica que mostram comportamento da curva R:
  - Degradação da resistência é menos dependente do tamanho da falha.
  - Confiabilidade é aumentada. Há uma região onde a força é insensível.
  - Resistência à fadiga é diminuída
  - Resistência ao choque térmico melhor.



Crack length



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

# MECANISMOS DE AUMENTO DE TENACIDADE

- Os materiais cerâmicos geralmente apresentam baixos valores de tenacidade à fratura.
- Para muitas das aplicações em engenharia temos de aumentar a resistência do material cerâmico.

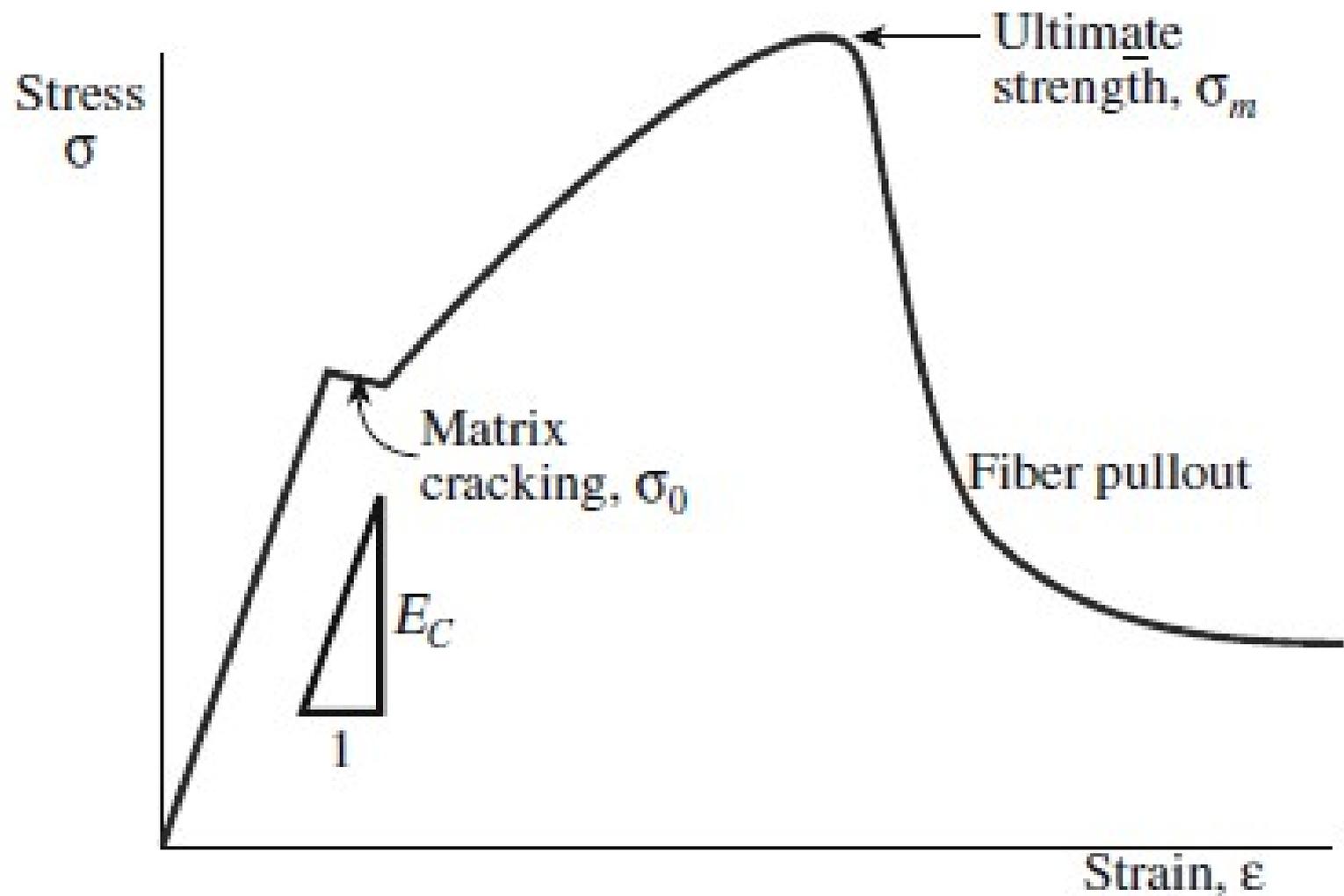
**TABLE 18.6 Classification of Toughening Mechanisms in Ceramics**

<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

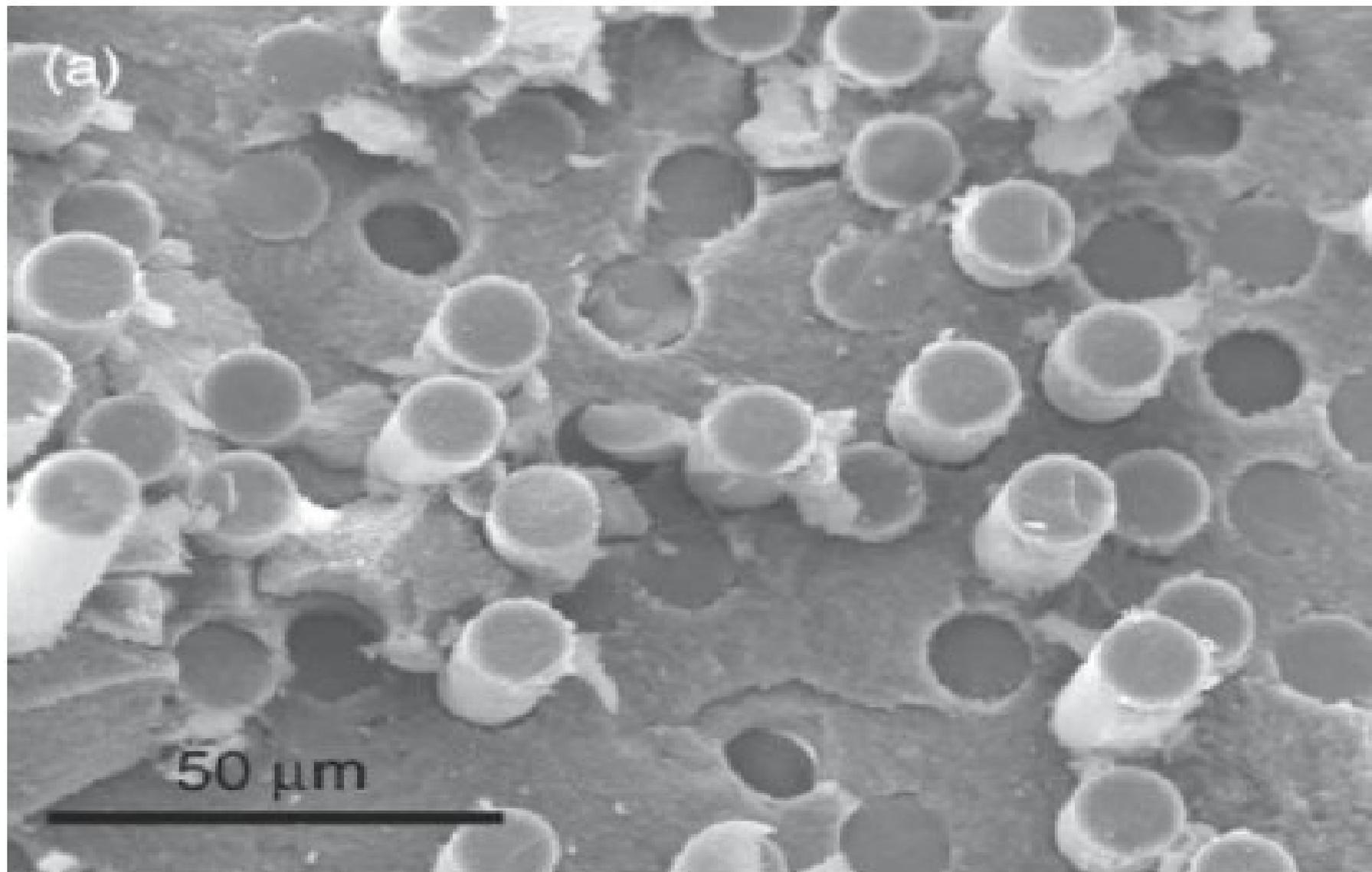
# MECANISMOS DE AUMENTO DE TENACIDADE

## REFORÇO DOS MATERIAIS CERÂMICOS POR FIBRAS

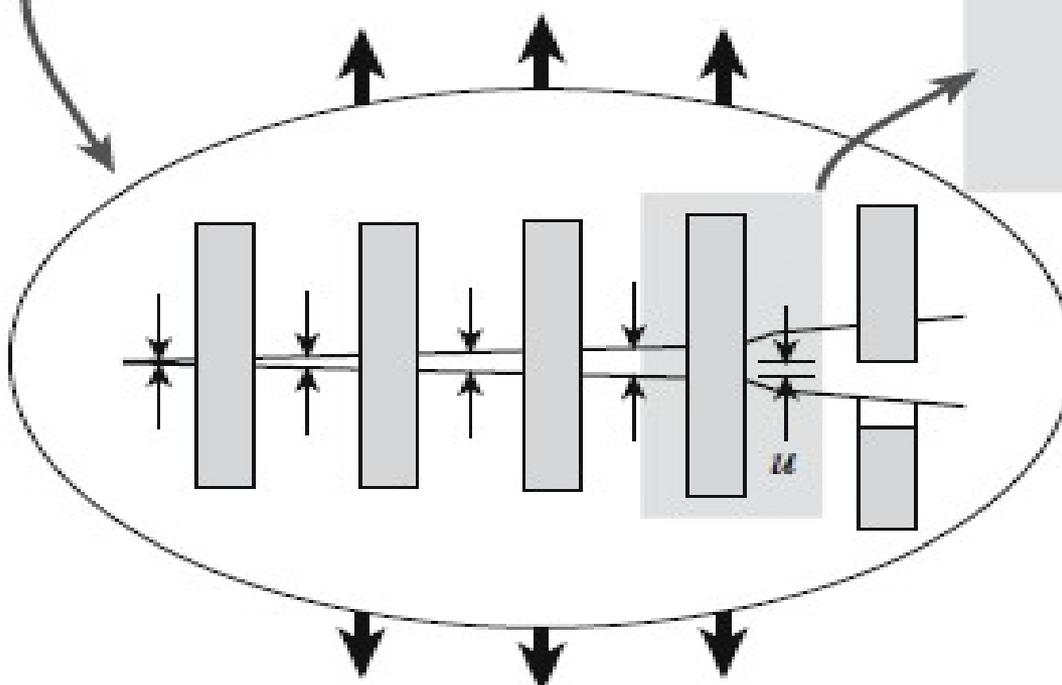
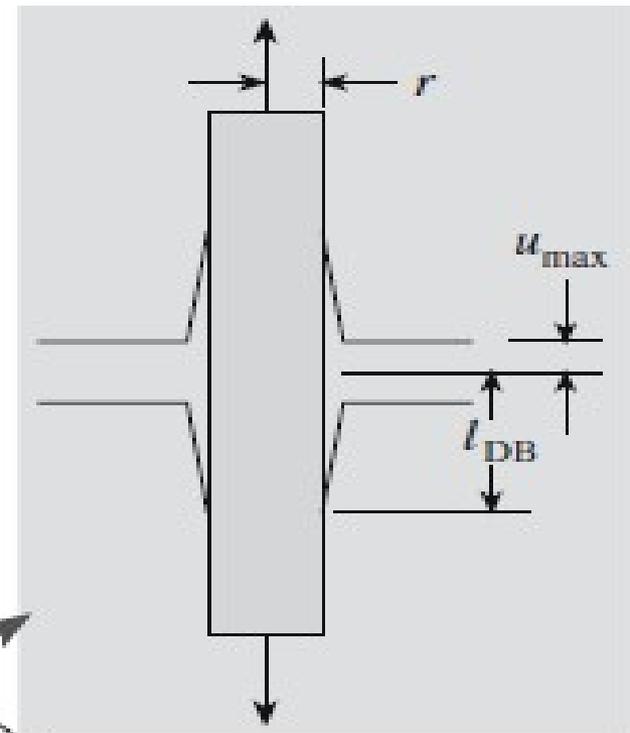
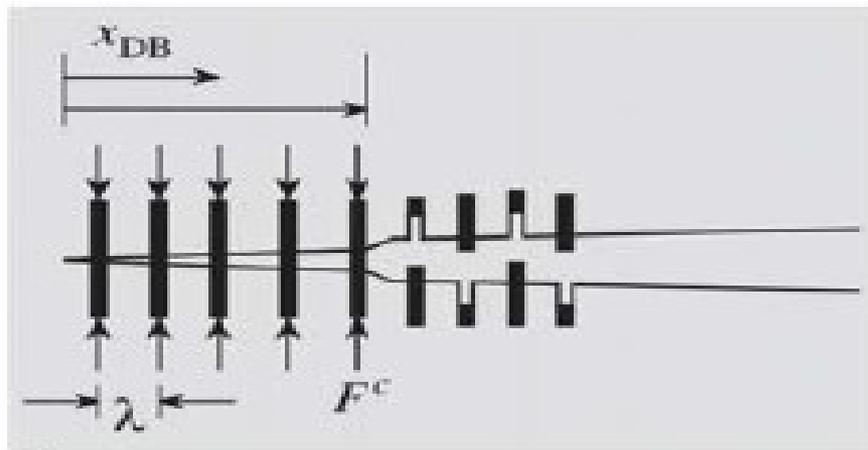
- ✓ Fibras são monocristais que cresceram preferencialmente ao longo de um eixo tornando-se agulhas com diâmetro de  $0.5\ \mu\text{m}$  a  $10\ \mu\text{m}$  e com até centímetros de comprimento. Normalmente são de SiC (carbeto de silício) e são adicionados para melhorar a tenacidade. Tem sido testados em  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (alumina),  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (nitreto de silício) e em  $\text{MoSi}_2$  (silicieto de molibdênio)



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



**FIGURE 18.18** SEM image showing fiber pullout on the fracture surface of  $\text{AlPO}_4$ -coated alumina/mullite fiber/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  CMC, hot pressed at  $1250^\circ\text{C}$  for 1 h.



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

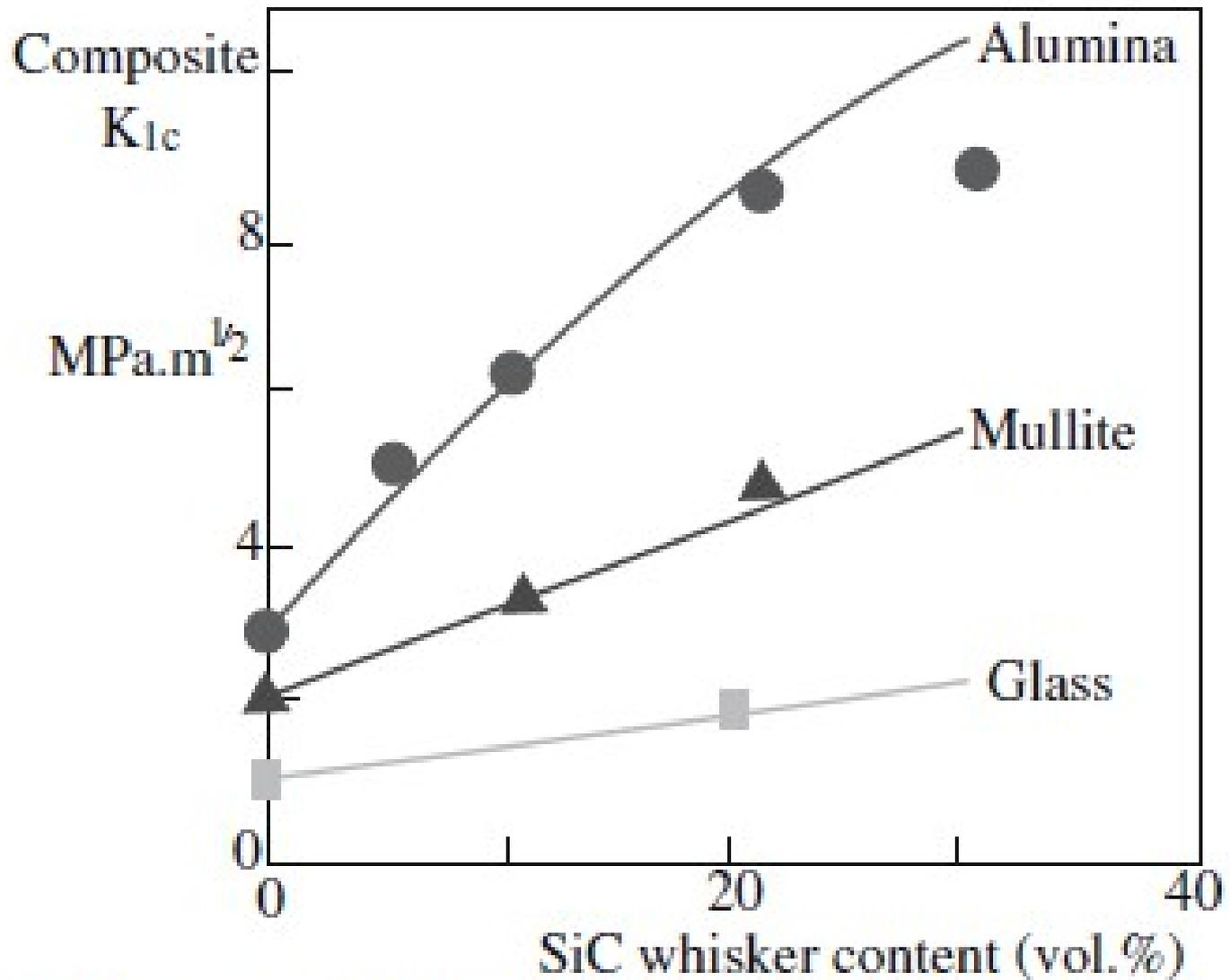
# MECANISMOS DE AUMENTO DE TENACIDADE

Para o caso específico em que o aumento da tenacidade é devido à deformação elástica de um reforço sem atrito interfacial,  $K_{Ic}$  foi determinado ser:

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

# MECANISMOS DE AUMENTO DE TENACIDADE

- Fatores contribuem para a resistência à fratura de um compósito cerâmico:
  - ✓ fração de volume do reforço.
  - ✓ módulo de Young da matriz e reforço.
  - ✓ Força da interface matriz/reforço.



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

# MECANISMOS DE AUMENTO DE TENACIDADE

## REFORÇO DOS MATERIAIS CERÂMICOS POR TRANSFORMAÇÃO DE FASE

- Mecanismos:
  - ✓ Microtrincamentos;
  - ✓ Transformações induzidas por tensão;
  - ✓ Transformação superficial.

# MECANISMOS DE AUMENTO DE TENACIDADE

- Microtrincamentos:

- O aparecimento de microtrincas pode ser induzido pela incorporação de partículas de  $ZrO_2$ , numa matriz cerâmica.

- Essas microtrincas aumentam a resistência da cerâmica pela sua capacidade, para desviar e bifurcar uma rachadura de propagação.

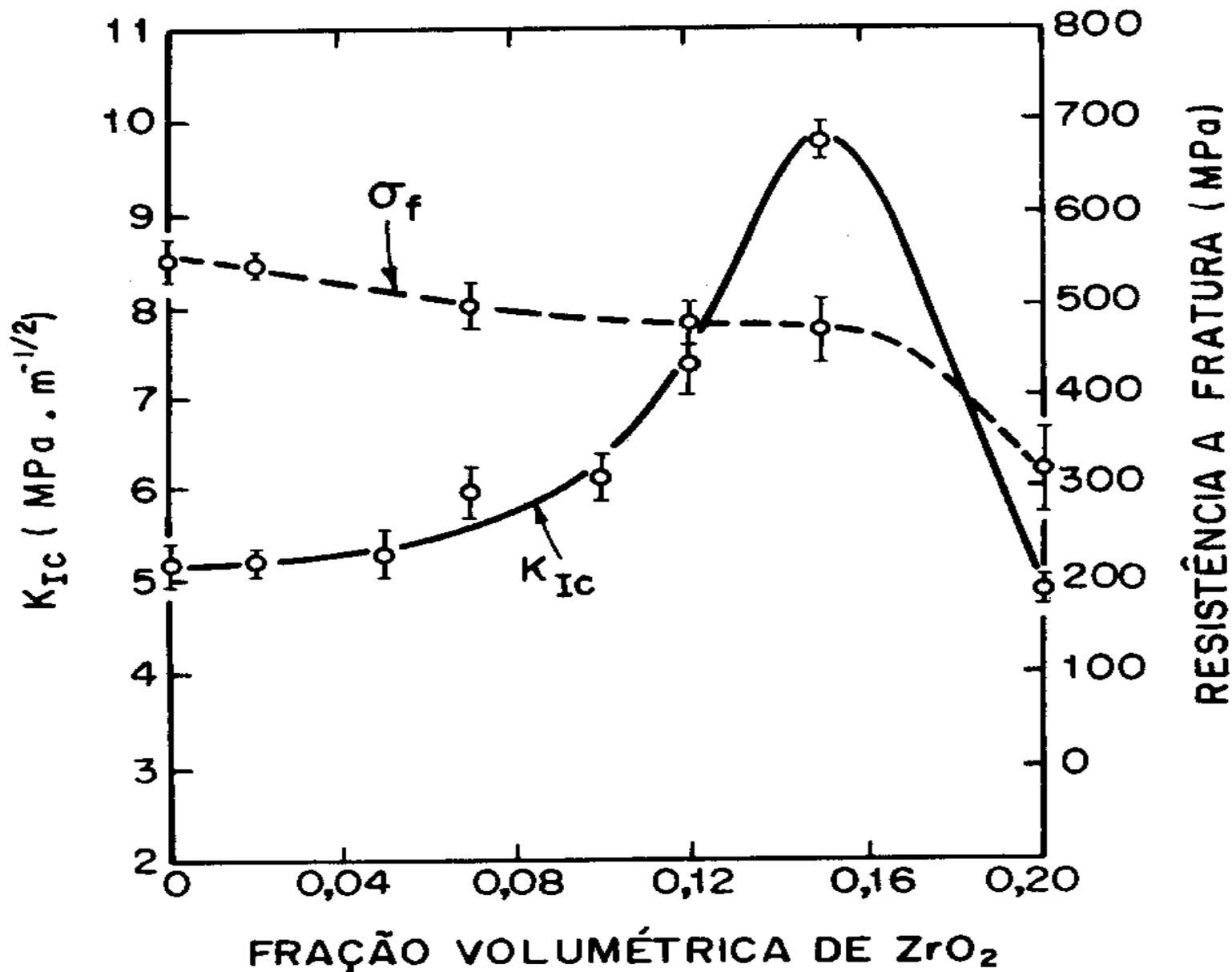
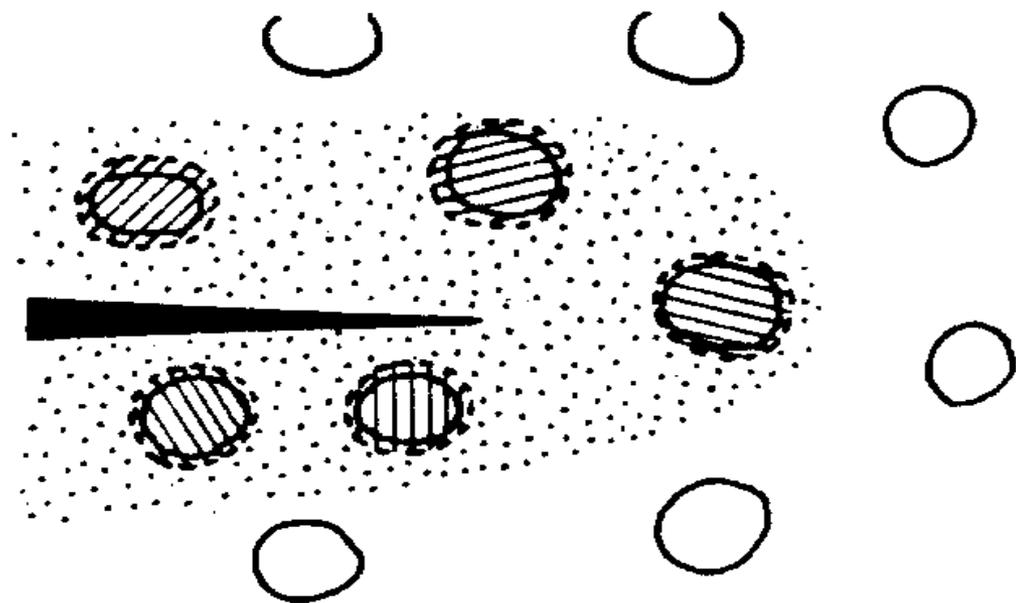


Figura 9 — Tenacidade à fratura e resistência à fratura versus fração volumétrica de ZrO<sub>2</sub>.

# MECANISMOS DE AUMENTO DE TENACIDADE

- Transformações induzidas por tensão.
  - O mecanismo de aumento de tenacidade é devido á transformação tetragonal -> monoclinica induzida por tensão.
  - Tensões aliviam a pressão da matriz sobre as partículas de  $ZrO_2$ .

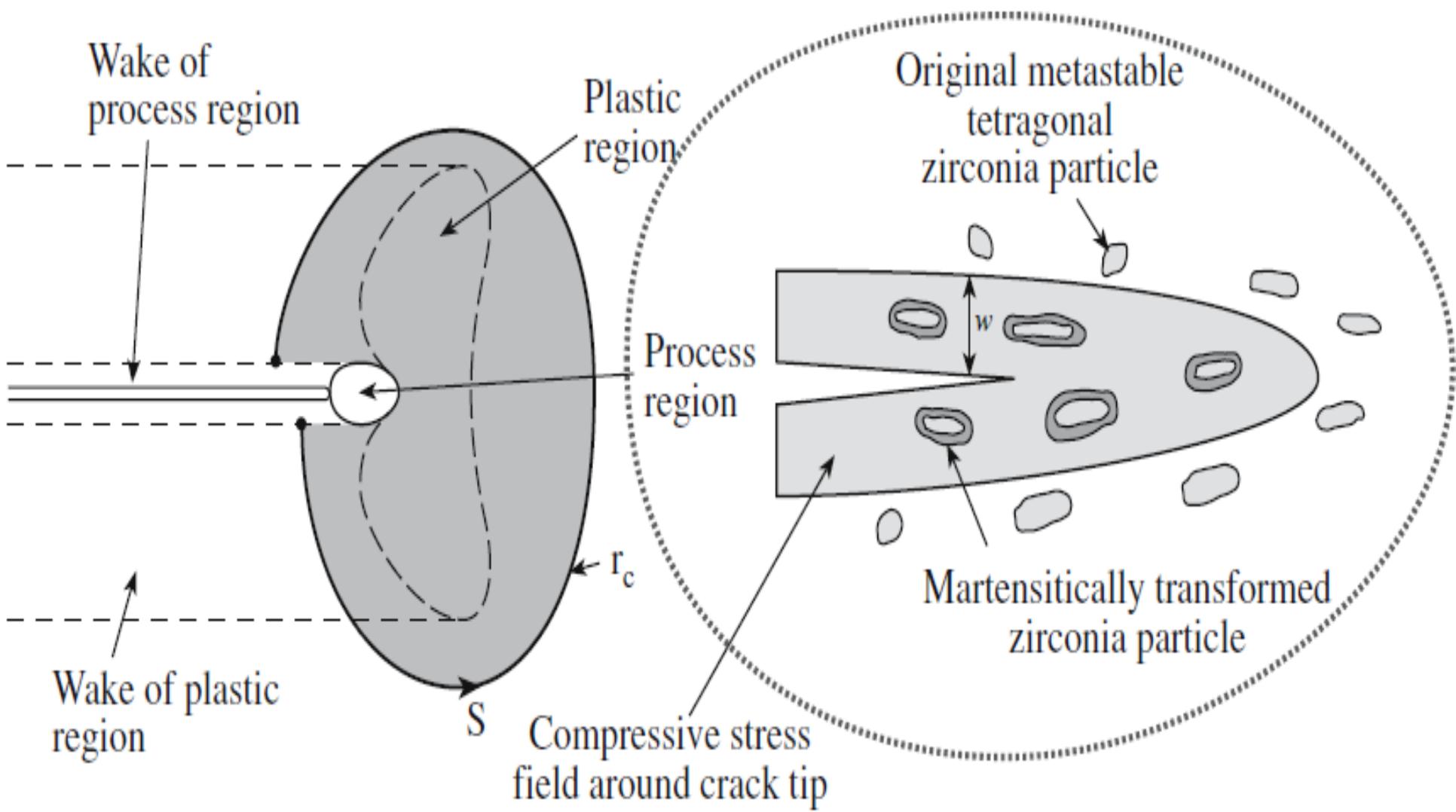


○ ORIGINAL  $ZrO_2$  (TETRAGONAL)

▨  $ZrO_2$  PÓS TRANSFORMAÇÃO

⋯ CAMPO DE TENSÃO

*Figura 10 — Transformações de partículas de  $ZrO_2$  induzidas por tensão.*



# Resumo de critérios para aumento da tenacidade por transformação de fase

---

	Transformação induzida por tensão	Nucleação de microtrincas
Tamanho de partícula	$d < d_c$	$d_c < d < D_c$
Geometria de partícula	esférica	irregular
Distribuição de tamanhos	estreita	estreita
Tamanho dos grãos da matriz	—	$\approx$ iguais a $d$
Diferenças entre coeficientes de expansão	minimizar	minimizar
Tenacidade e $E$ da matriz	maximizar	maximizar
Concentração de CaO, MgO, $Y_2O_3$	minimizar	—
Concentração de $HfO_2$	maximizar	—
Fração volumétrica de $ZrO_2$	maximizar	otimizar

---

# MECANISMOS DE AUMENTO DE TENACIDADE

-A eficácia dos diferentes mecanismos de tenacidade para a cerâmica estrutural parece diminuir na seguinte ordem:

- ✓ Reforço de fibra contínua – **mais eficaz**
- ✓ Partículas de metal disperso
- ✓ Tenacificação por transformação de fase
- ✓ Plaquetas e reforço de partículas
- ✓ Microtrincamento – **menos eficaz**

# REFERÊNCIAS

- CARTER, C.B.; NORTON, M.G. Ceramic Materials-Science and Engineering. New York: editora Springer, 2007.
- CHIANG, Y.; BIRNIE, D.; KINGERY, W.D. Physical Ceramics-Principles for ceramic science and engineering. USA: John Wiley & Sons, 1976.
- ZANOTTO, E.D.; MIGLIORE JR, A.R. Propriedades mecânicas de materiais cerâmicos: uma introdução. Dema-Ufscar, São Carlos-SP. Ceramica v.37, n247, 1991.