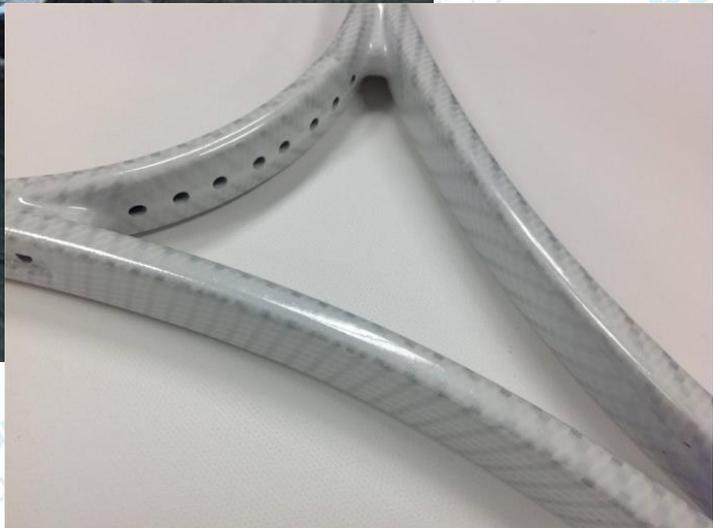


# ***MATERIAIS DE ENGENHARIA - (SEM 5908) -***

## ***Aula 07 – Materiais Compósitos***

**Prof. Dr. Carlos Alberto Fortulan**



# LIGAÇÕES

LIGAÇÕES PRIMÁRIAS OU FORTES  
100 Kcal/mol

LIGAÇÕES SECUNDÁRIAS OU FRACAS  
10 Kcal/mol

Forças de Van-der-Waals

Ligação IÔNICA

Atração entre íons negativos e positivos.

Ligação METÁLICA

Elétrons Livres Formando uma Nuvem eletrônica.

Ligação COVALENTE

Compartilhamento dos elétrons de valência. Apresentam características de direcionalidade

# MATERIAIS

METÁLICOS

POLÍMEROS

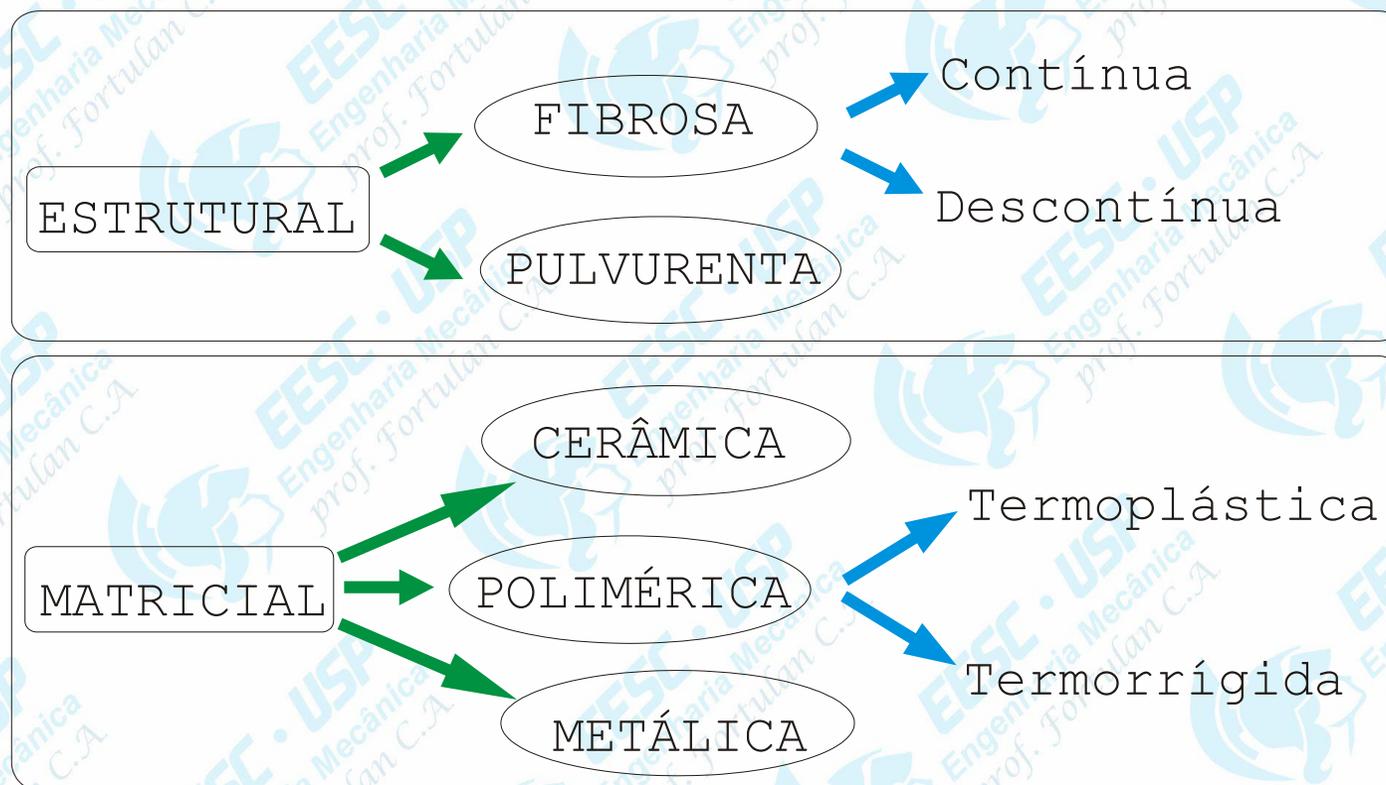
CERÂMICAS

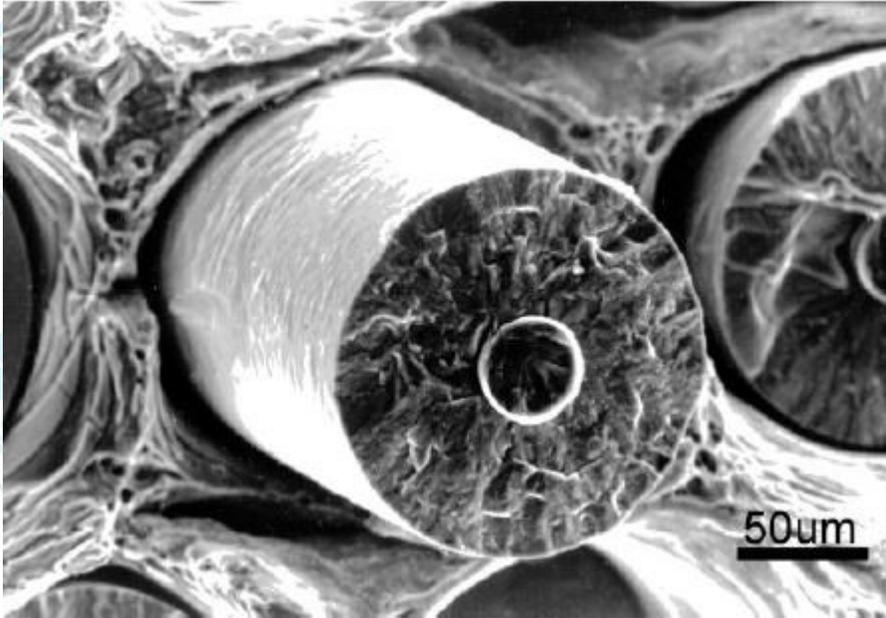
## COMPÓSITOS

São materiais que consistem de pelo menos, dois componentes: a matriz e o agente de reforço. O principal objetivo é o de melhorar determinadas propriedades da matriz com características complementares.

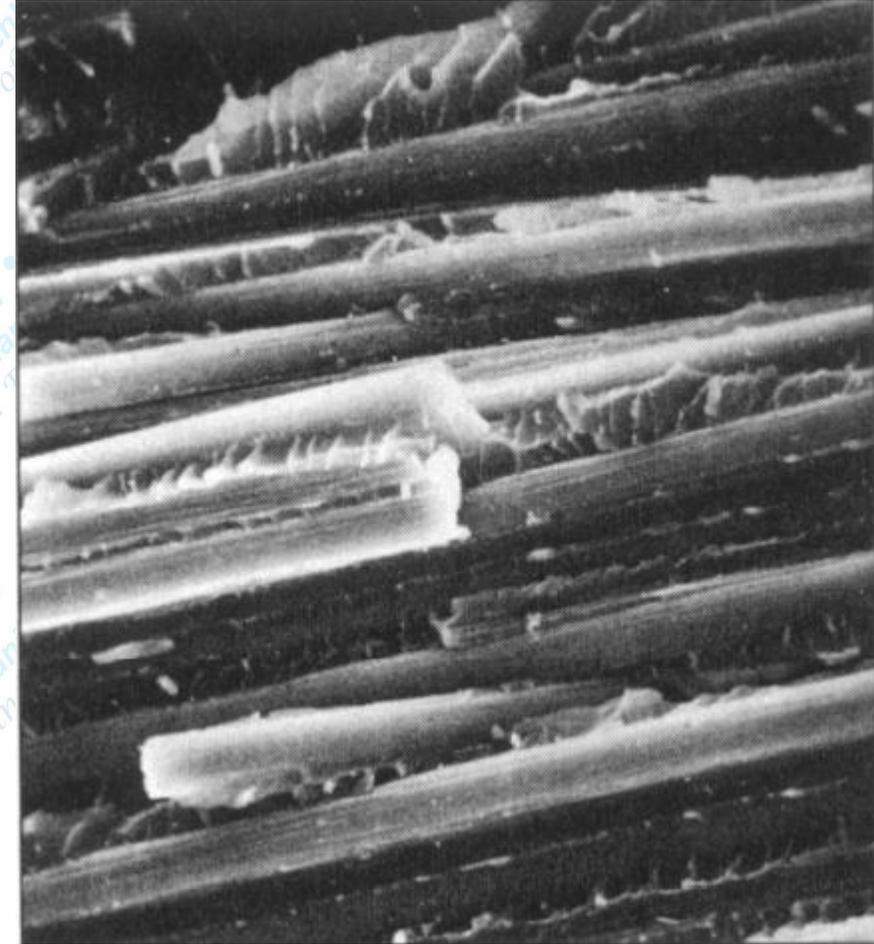
# COMPÓSITOS

Constituem de uma classe de materiais heterogêneos multifásicos. Neles um dos componentes descontínuos, fornece a principal resistência ao esforço (**componente estrutural**), e o outro contínuo é o meio de transferência deste esforço (**componente matricial**).





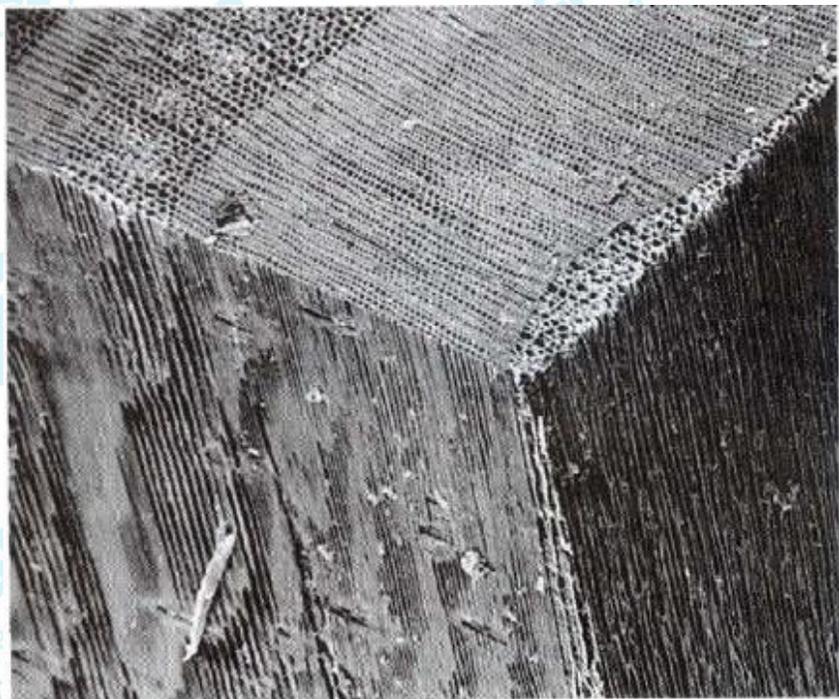
Compósito de fibra polimérica



Compósito de matriz polimérica

## Tipos e exemplos

- Pessoas (tecidos ósseos, ...)
- Árvores
- Matrizes reforçadas com fibras  
fibras de vidro-epoxi
- Matrizes reforçadas com particulados  
pneus (negro de fumo na borracha, mas também contém fibras contínuas (arame de aço ou cinta polimérica)

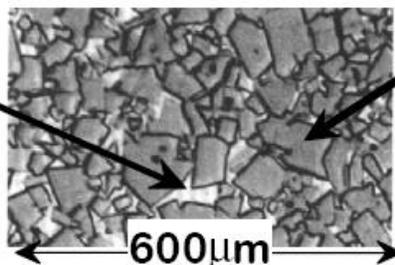


Pinho

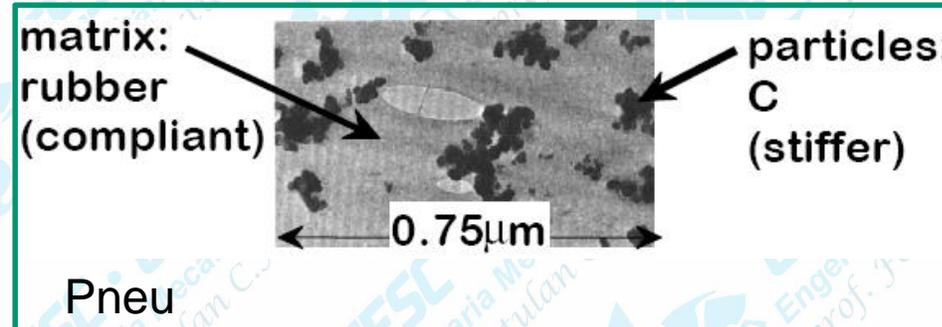
matrix:  
cobalt  
(ductile)

$V_m$ :  
10-15vol%!

Ferramenta de corte WC/Co



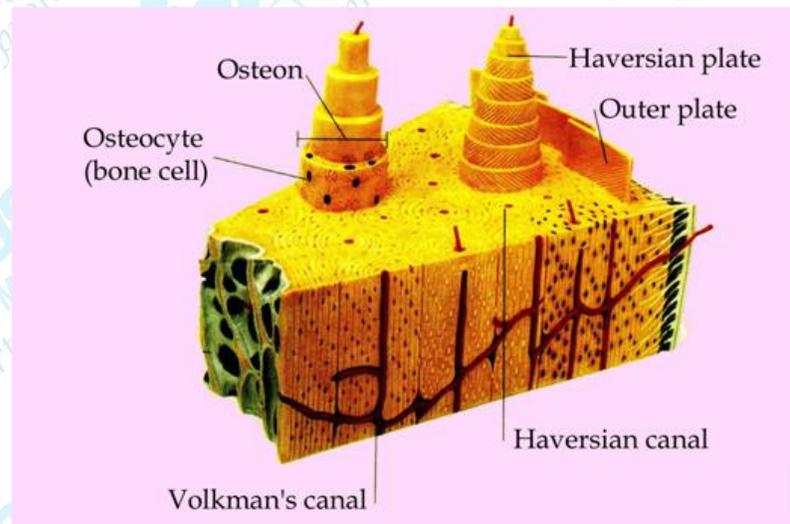
particles:  
WC  
(brittle,  
hard)



matrix:  
rubber  
(compliant)

particles:  
C  
(stiffer)

Pneu



Constituintes do osso: colágeno (20% em peso),  
fosfatos de cálcio (70% em peso) e água (9% em  
peso), proteínas, polissacarídeos, e lipídeos.

# Fibras e partículas como agente de reforço

Vidro;  
Kevlar;  
Carbono;  
Thermoplástico;  
Alumina  
SiC (Carbeto de Silício)  
Aço  
Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (Nitreto de Silício)  
SiO<sub>2</sub> - Sílica  
Talco  
Rochas  
Negro de Fumo  
Carbonato de Cálcio

# FIBRAS DE VIDRO

- ✓ Convencional - com fibras de vidro com valor de módulo elástico moderadamente alto.
- ✓ Compósitos avançados – com fibras de vidro com valores de módulos elásticos maiores que o do E-vidro.

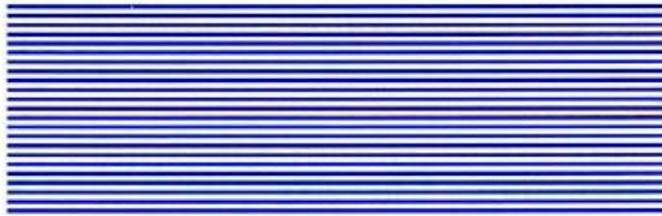
Table 14.1 Compositions of Glass-Reinforcing Fibers

Designation	Characteristic	Composition <sup>a</sup> (wt %)								
		SiO <sub>2</sub>	(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>
A-glass	Common soda–lime silica	72	<1	10		14				
AR-glass	Alkali resistant (for concrete reinforcement)	61	<1	5	<1	14	3		7	10
C-glass	Chemical corrosion resistant	65	4	13	3	8	2	5		
E-glass	Electrical composition	54	15	17	5	<1	<1	8		
S-glass	High strength and modulus	65	25		10					

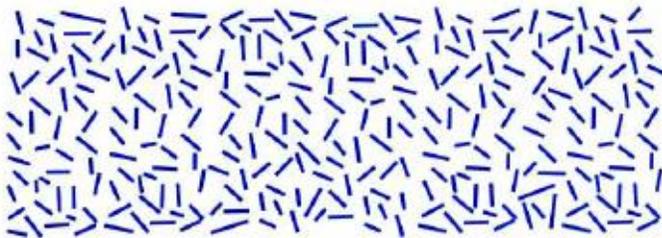
Source: Data from J. G. Mohr and W. P. Rowe, *Fiber Glass*, Van Nostrand Reinhold Company, Inc., NY, 1978.

<sup>a</sup> Approximate and not representing various impurities.

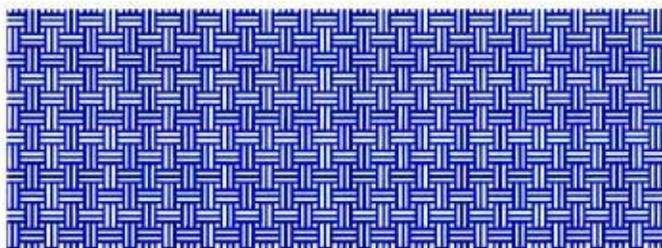
# FORMATOS



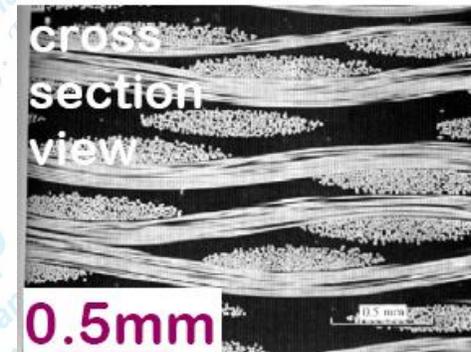
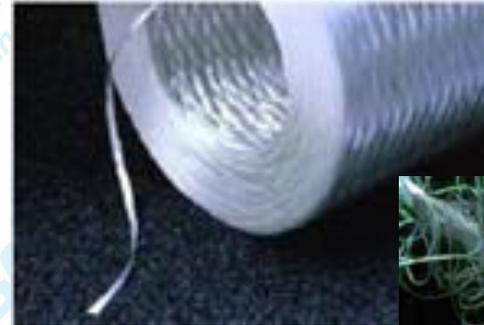
(a)



(b)



(c)



a) contínuo, b) particulado, c) tecido, pulvurento.

# REFORÇO - TECIDO

Tecido de material contínuo

Tecido de material cortado



-Superfície (Vel)

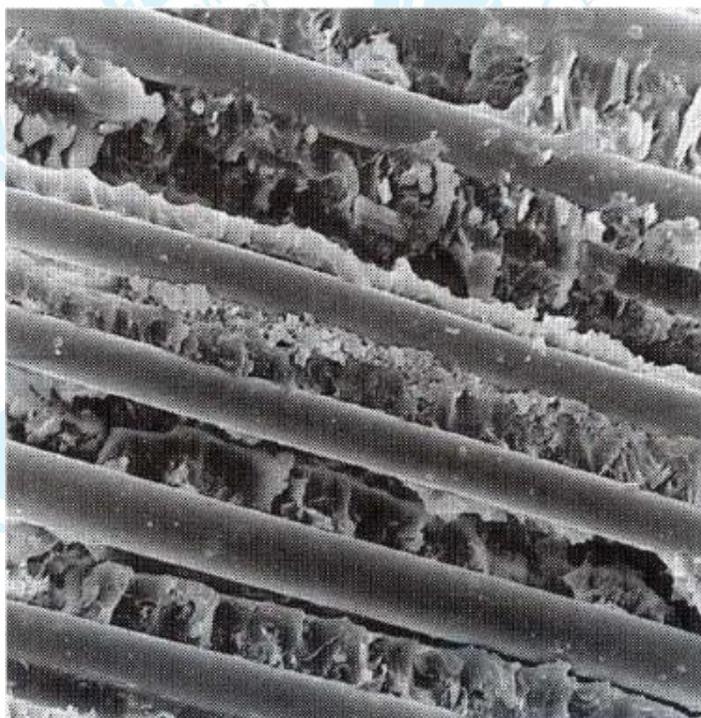


# MATRIZES

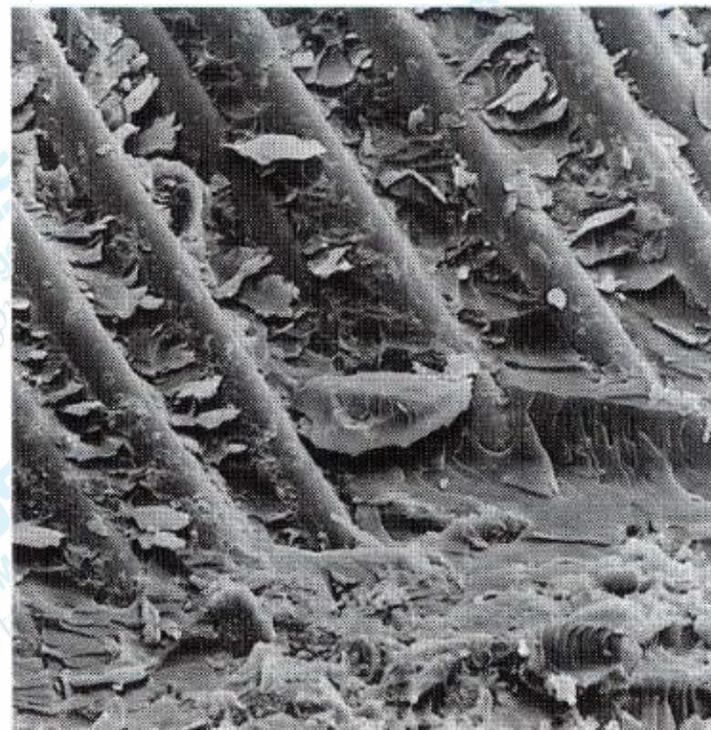
Protegem e separam os reforços, transmitem esforços

- Polímeros
  - Epoxi; poliéster, poliuretano, borracha
- Metal
  - Al, Cu, Ti, Ni
- Cerâmica
  - vidro, cimento

# INTERFACE x INTERFASE



Fraca união química matriz-reforço



Forte união química matriz-reforço

**Table 14.2** *Polymeric Matrix Materials for Fiberglass*

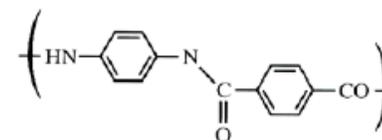
<b>Polymer<sup>a</sup></b>	<b>Characteristics and applications</b>
<b>Thermosetting</b>	
Epoxies	High strength (for filament-wound vessels)
Polyesters	For general structures (usually fabric reinforced)
Phenolics	High-temperature applications
Silicones	Electrical applications (e.g., printed-circuit panels)
<b>Thermoplastic</b>	
Nylon 66	Less common, especially good ductility
Polycarbonate	
Polystyrene	

Source: Data from L. J. Broutman and R. H. Krock, Eds., *Modern Composite Materials*, Addison-Wesley Publishing Co., Inc., Reading, MA, 1967, Chapter 13.

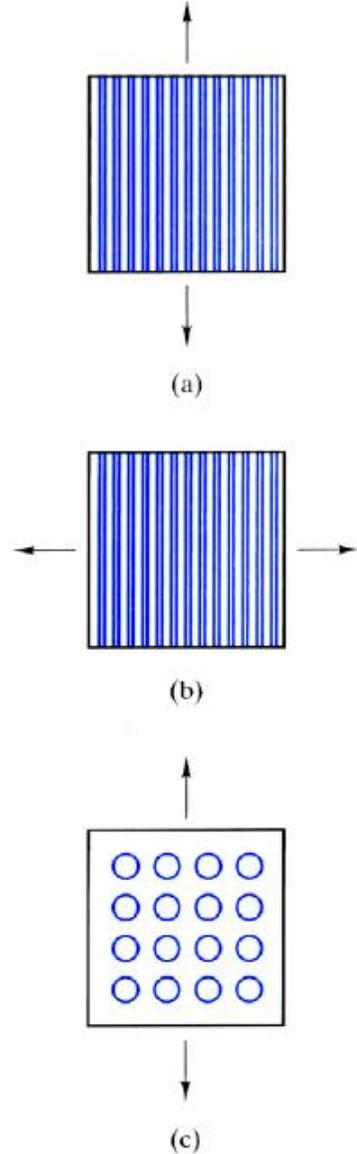
<sup>a</sup>See Tables 13.1 and 13.2 for chemistry.

**Table 14.3** *Advanced Composite Systems Other Than Fiberglass*

<b>Class</b>	<b>Fiber/Matrix</b>
Polymer matrix	Para-aramid (Kevlar <sup>a</sup> )/epoxy
	Para-aramid (Kevlar <sup>a</sup> )/polyester
	C (graphite)/epoxy
	C (graphite)/polyester
	C (graphite)/polyetheretherketone (PEEK)
	C (graphite)/polyphenylene sulfide (PPS)
Metal matrix	B/Al
	C/Al
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Al
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Mg
	SiC/Al
	SiC/Ti (alloys)
Ceramic matrix	Nb/MoSi <sub>2</sub>
	C/C
	C/SiC
	SiC/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	SiC/SiC
	SiC/Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>
	SiC/Li–Al–silicate (glass-ceramic)

**Formula for para-aramid**

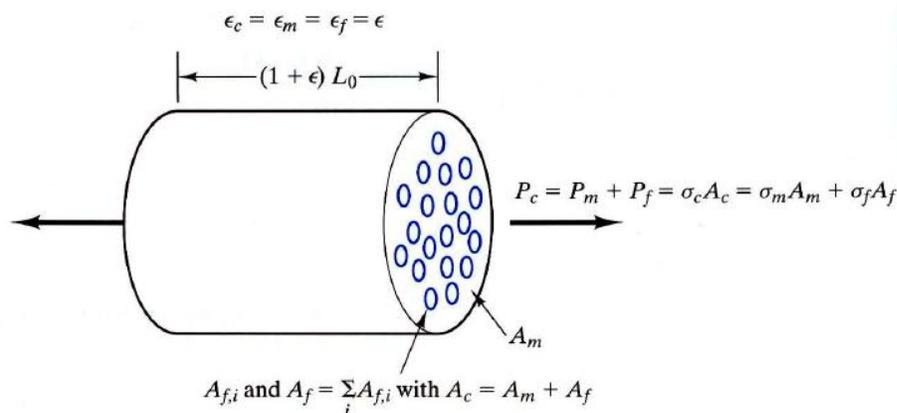
# PROPRIEDADES



De natureza altamente anisotrópica

De natureza isotrópica

# Carregamento paralelo ao reforço das fibras - isostrain



$$E_c = V_m E_m + V_f E_f$$

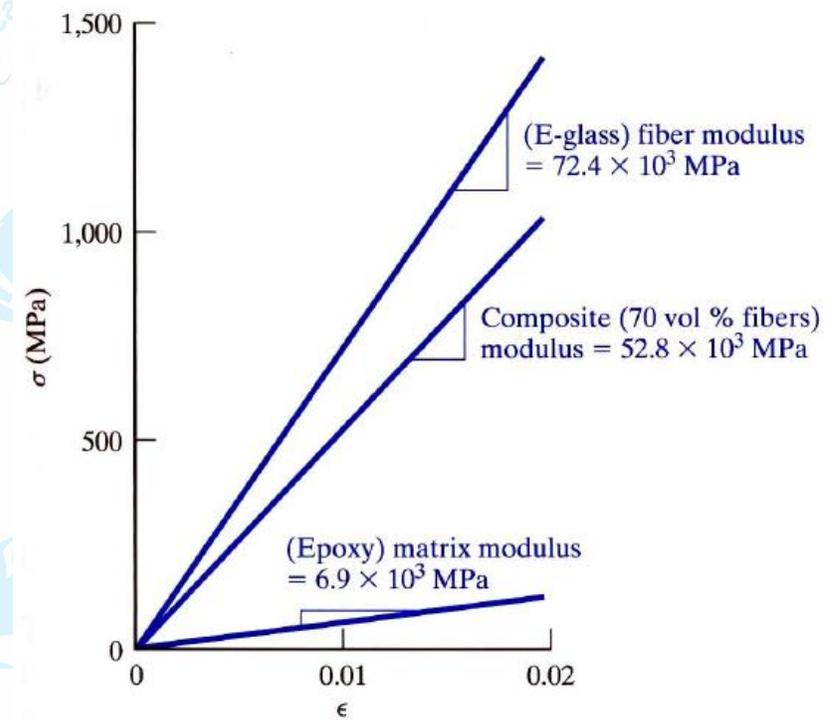
$$V_m + V_f = 1$$

$$P_f/P_c = E_f/E_c \cdot V_f$$

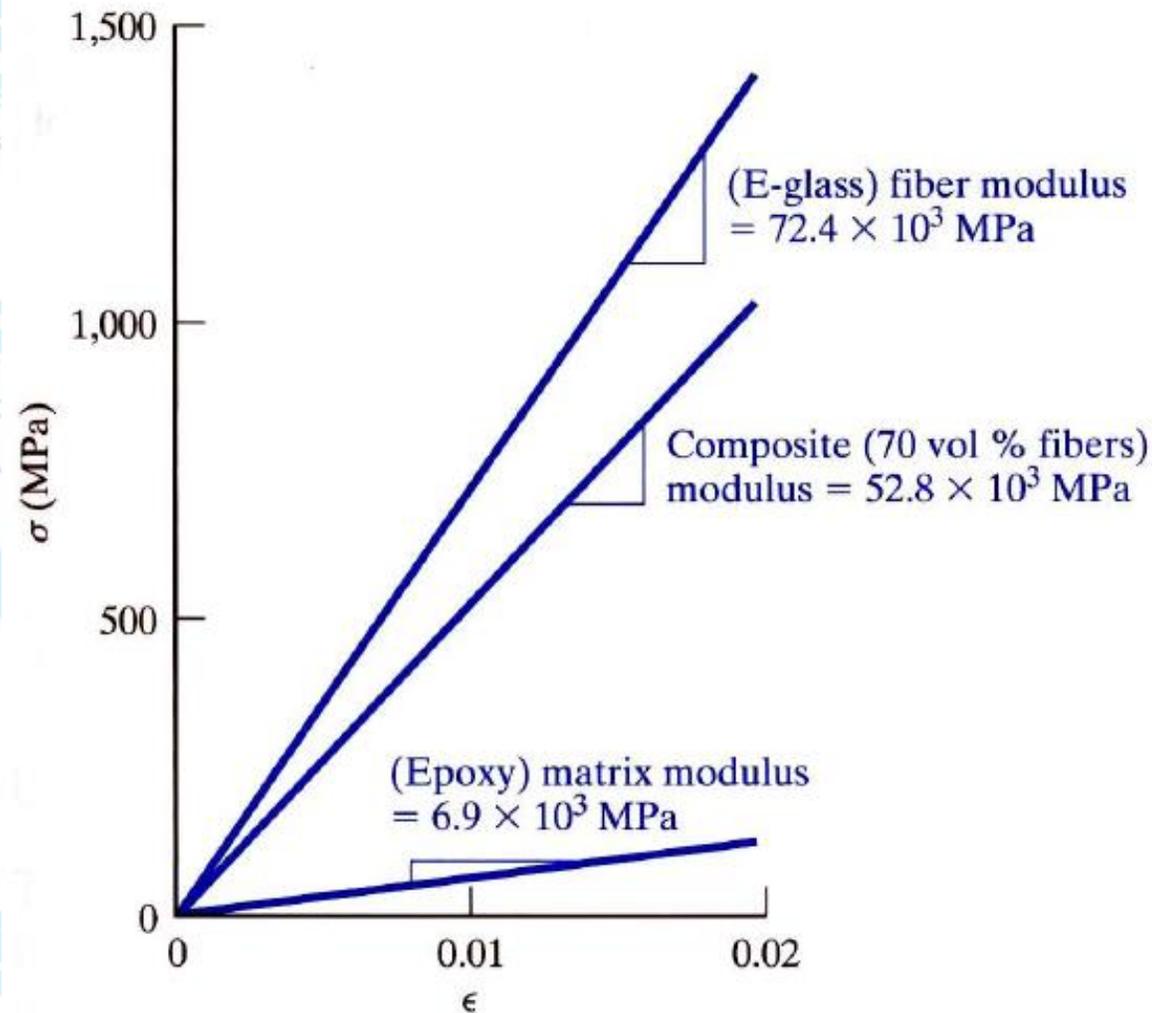
$$X_c = V_m X_m + V_f X_f$$

X pode ser diferentes propriedades como: difusividade, condutividade térmica, cond. elétrica,..

(Iso deformação)



70vol% reinforcing phase



**70vol% reinforcing phase**

Ex. 7.1 Calcule o módulo elástico e a condutividade do compósito para o poliéster reforçado com 60 vol% de vidro-E sob condições de isodeformação.

$$E_{\text{poliéster}} = 6,9 \text{ GPa}$$

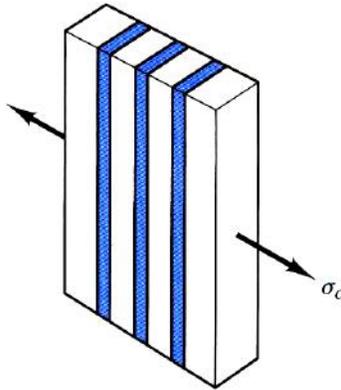
$$k_{\text{poliéster}} = 0,17 \text{ W/m.K}$$

$$E_{\text{vidro-E}} = 72,4 \text{ GPa}$$

$$k_{\text{vidro-E}} = 0,97 \text{ W/m.K}$$

# Carregamento perpendicular ao reforço das Fibras: ISOSTRESS

(Iso tensão)



$$\sigma_c = \sigma_m = \sigma_f$$

$$\frac{1}{E_c} = \frac{\nu_m}{E_m} + \frac{\nu_f}{E_f},$$

$$E_c = \frac{E_m E_f}{\nu_m E_f + \nu_f E_m}.$$

$$X_c = \frac{X_m X_f}{\nu_m X_f + \nu_f X_m},$$

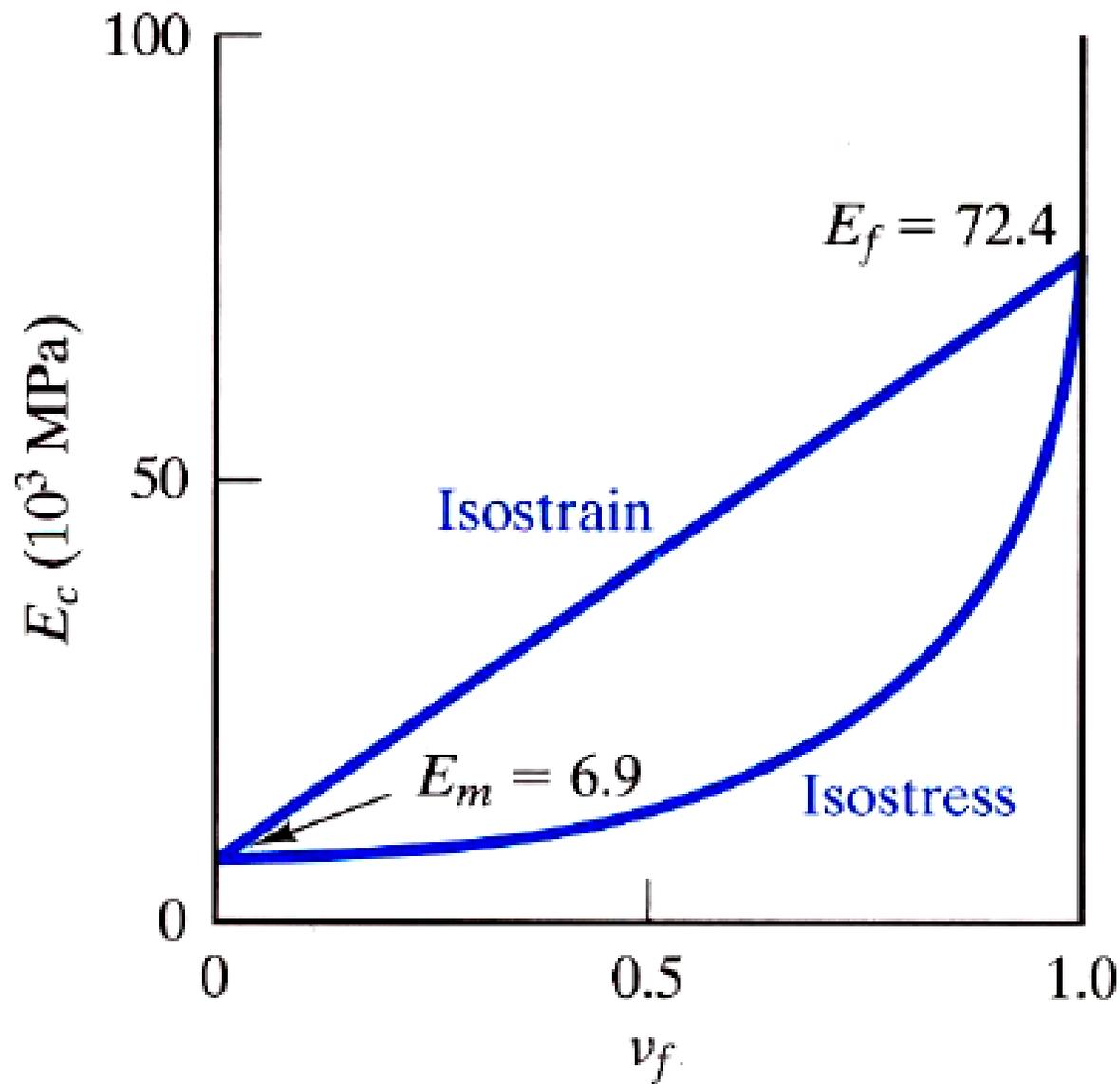
Ex. 7.2 Calcule o módulo elástico e a condutividade do compósito para o poliéster reforçado com 60 vol% de vidro-E sob condições de isotensão.

$$E_{\text{poliéster}} = 6,9 \text{ GPa}$$

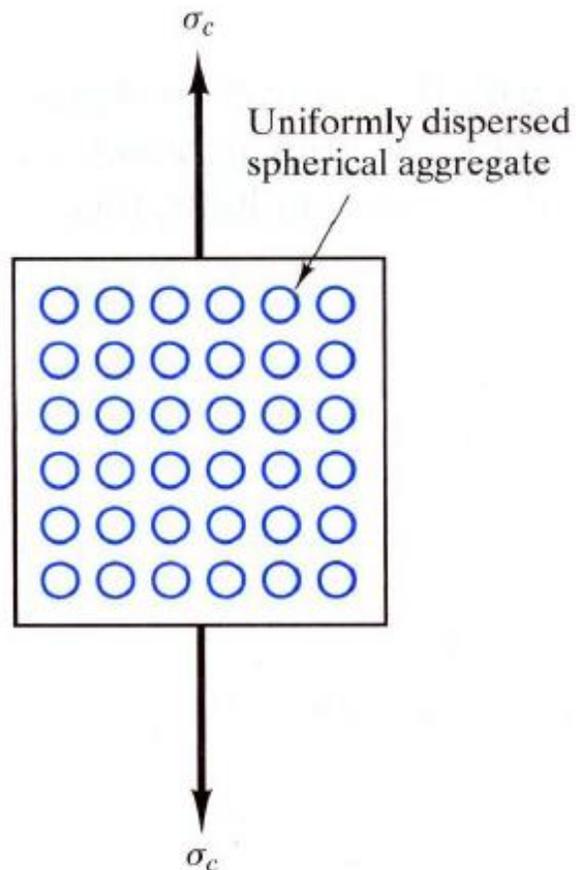
$$k_{\text{poliéster}} = 0,17 \text{ W/m.K}$$

$$E_{\text{vidro-E}} = 72,4 \text{ GPa}$$

$$k_{\text{vidro-E}} = 0,97 \text{ W/m.K}$$



# Carregamento distribuído compósito com particulado uniformemente



$$E_c^n = v_l E_l^n + v_h E_h^n$$

$l$  – the low-modulus phase

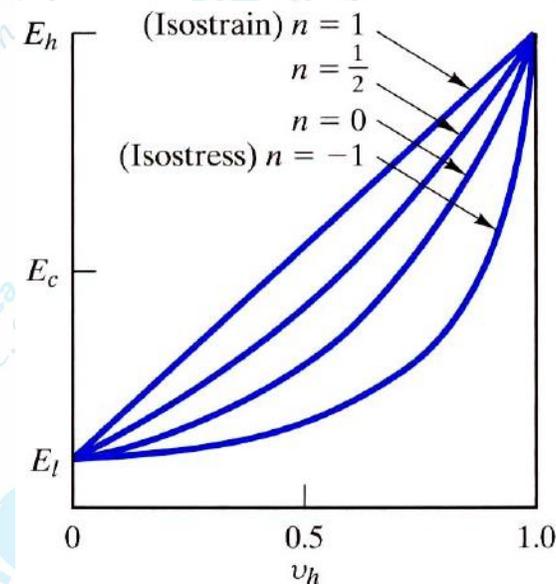
$h$  – the high modulus phase

$n = 1$ , for the isostrain case, an extreme case:  
rubber balls in a steel matrix

$n = -1$ , for the isostress case, such as steel  
balls in a rubber matrix

$n = 0$ , a higher-modulus aggregate in a low-  
modulus matrix

$n = 1/2$ , a low-modulus aggregate in a higher-  
modulus matrix



Ex. 7.3 Um compósito formado por 50 vol% de WC em matriz de cobalto tem módulo elástico igual a 366 GPa. Calcule o valor de  $n$  para que este compósito seja usado como ferramenta de corte.

$$E_{Co} = 207 \text{ GPa}$$

$$E_{WC} = 704 \text{ GPa}$$

$$E_c^n = v_l E_l^n + v_h E_h^n$$

**Table 1.4 Properties of Commonly Used Resins**

Resins	Density $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Elastic Modulus $E$ (Mpa)	Shear Modulus $G$ (Mpa)	Poisson Ratio $\nu$	Tensile Strength $\sigma_{Ult}$ (Mpa)	Elongation $E\%$	Coefficient of Thermal Expansion $\alpha$ (°C <sup>-1</sup> )	Coefficient of Thermal Conductivity $\lambda$ (W/m°C)	Heat Capacity $C$ (J/kg°C)	Useful Temperature Limit $T_{max}$ (°C)	Price 1993 (\$/kg)
<i>Thermosets</i>											
Epoxy	1200	4500	1600	0.4	130	2 (100°C) 6 (200°C)	$11 \times 10^{-5}$	0.2	1000	90 to 200	6 to 20
Phenolic	1300	3000	1100	0.4	70	2.5	$1 \times 10^{-5}$	0.3	1000	120 to 200	
Polyester	1200	4000	1400	0.4	80	2.5	$8 \times 10^{-5}$	0.2	1400	60 to 200	2.4
Polycarbonate	1200	2400		0.35	60		$6 \times 10^{-5}$		1200	120	
Vinylester	1150	3300			75	4	$5 \times 10^{-5}$			>100	4
Silicone	1100	2200		0.5	35					100 to 350	
Urethane	1100	700 to 7000			30	100				100	4
Polyimide	1400	4000 to 19,000	1100	0.35	70	1	$8 \times 10^{-5}$	0.2	1000	250 to 300	
<i>Thermoplastics</i>											
Polypropylene (pp)	900	1200		0.4	30	20 to 400	$9 \times 10^{-5}$		330	70 to 140	
Polyphenylene sulfone (pps)	1300	4000			65	100	$5 \times 10^{-5}$			130 to 250	
Polyamide (pa)	1100	2000		0.35	70	200	$8 \times 10^{-5}$		1200	170	6
Polyether sulfone (pes)	1350	3000			85	60	$6 \times 10^{-5}$			180	25
Polyetherimide (pei)	1250	3500			105	60	$6 \times 10^{-5}$	0.2		200	20
Polyether-ether-ketone (peek)	1300	4000			90	50	$5 \times 10^{-5}$	0.3		140 to 250	96

Table 14.10 Mechanical Properties of Common Matrix Materials

Class	Example	$E$ [MPa (ksi)]	T.S. [MPa (ksi)]	Flexural strength [MPa (ksi)]	Compressive strength (after 28 days) [MPa (ksi)]	Percent elongation at failure	$K_{IC}$ (MPa $\sqrt{m}$ )
Polymer <sup>a</sup>	Epoxy	6,900 (1,000)	69 (10)	—	—	0	0.3–0.5
	Polyester	6,900 (1,000)	28 (4)	—	—	0	—
Metal <sup>b</sup>	Al	$69 \times 10^3 (10 \times 10^3)$	76 (11)	—	—	—	—
	Cu	$115 \times 10^3 (17 \times 10^3)$	170 (25)	—	—	—	—
Ceramic <sup>c</sup>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	550 (80)	—	—	4–5
	SiC	—	—	500 (73)	—	—	4.0
	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (reaction bonded)	—	—	260 (38)	—	—	2–3
Portland cements <sup>d</sup>	Type I	—	2.4 (0.35)	—	24 (3.5)	—	—
	Type II	—	2.3 (0.33)	—	24 (3.5)	—	—
	Type III	—	2.6 (0.38)	—	21 (3.0)	—	—
	Type IV	—	2.1 (0.30)	—	14 (2.0)	—	—
	Type V	—	2.3 (0.33)	—	21 (3.0)	—	—

<sup>a</sup>From Tables 6.8 and 8.3.

<sup>b</sup>For high-purity alloys with no significant cold working from *Metals Handbook*, 9th ed., Vol. 2, American Society for Metals, Metals Park, OH, 1979.

<sup>c</sup>Source: Data from A. J. Klein, *Advanced Materials and Processes*, 2, 26 (1986).

<sup>d</sup>Source: Data from R. Nicholls, *Composite Construction Materials Handbook*, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1976.

Table 14.11 Mechanical Properties of Common Dispersed-Phase Materials

Group	Dispersed phase	$E$ [MPa (ksi)]	T.S. [MPa (ksi)]	Compressive strength [MPa (ksi)]	Percent elongation at failure
Glass fiber <sup>a</sup>	C-glass	$69 \times 10^3 (10 \times 10^3)$	3,100 (450)	—	4.5
	E-glass	$72.4 \times 10^3 (10.5 \times 10^3)$	3,400 (500)	—	4.8
	S-glass	$85.5 \times 10^3 (12.4 \times 10^3)$	4,800 (700)	—	5.6
Ceramic fiber <sup>a</sup>	C (graphite)	$340 - 380 \times 10^3 (49 - 55 \times 10^3)$	2,200–2,400 (320–350)	—	—
	SiC	$430 \times 10^3 (62 \times 10^3)$	2,400 (350)	—	—
Ceramic whisker <sup>a</sup>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$430 \times 10^3 (62 \times 10^3)$	$21 \times 10^3 (3,000)$	—	—
Polymer fiber <sup>b</sup>	Kevlar <sup>c</sup>	$131 \times 10^3 (19 \times 10^3)$	3,800 (550)	—	2.8
Metal filament <sup>a</sup>	Boron	$410 \times 10^3 (60 \times 10^3)$	3,400 (500)	—	—
Concrete aggregate <sup>d</sup>	Crushed stone and sand	$34 - 69 \times 10^3 (5 - 10 \times 10^3)$	1.4–14 (0.2–2)	69–340 (10–50)	—

<sup>a</sup> Source: Data from L. J. Broutman and R. H. Krock, Eds., *Modern Composite Materials*, Addison-Wesley Publishing Co., Inc., Reading, MA, 1967.

<sup>b</sup> Source: Data from A. K. Dhingra, Du Pont Company.

<sup>c</sup> Trade name, Du Pont.

<sup>d</sup> Source: Data from R. Nicholls, *Composite Construction Materials Handbook*, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1976.

Table 14.12 Mechanical Properties of Common Composite Systems

Class	$E$ [MPa (ksi)]	T.S. [MPa (ksi)]	Flexural strength [MPa (ksi)]	Compressive strength [MPa (ksi)]	Percent elongation at failure	$K_{IC}^a$ (MPa $\sqrt{m}$ )
Polymer-matrix						
E-glass (73.3 vol %) in epoxy (parallel loading of continuous fibers) <sup>b</sup>	$56 \times 10^3$ ( $8.1 \times 10^3$ )	1,640 (238)	—	—	2.9	42–60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> whiskers (14 vol %) in epoxy <sup>b</sup>	$41 \times 10^3$ ( $6 \times 10^3$ )	779 (113)	—	—	—	—
C (67 vol %) in epoxy (parallel loading) <sup>c</sup>	$221 \times 10^3$ ( $32 \times 10^3$ )	1,206 (175)	—	—	—	—
Kevlar <sup>d</sup> (82 vol %) in epoxy (parallel loading) <sup>c</sup>	$86 \times 10^3$ ( $12 \times 10^3$ )	1,517 (220)	—	—	—	—
B (70 vol %) in epoxy (parallel loading of continuous filaments) <sup>b</sup>	$210 - 280 \times 10^3$ ( $30 - 40 \times 10^3$ ) <sup>c</sup>	1,400–2,100 (200–300) <sup>c</sup>	—	—	—	46
Metal matrix						
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (10 vol %) dispersion-strengthened aluminum <sup>b</sup>	—	330 (48)	—	—	—	—
W (50 vol %) in copper (parallel loading of continuous filaments) <sup>b</sup>	$260 \times 10^3$ ( $38 \times 10^3$ )	1,100 (160)	—	—	—	—
W particles (50 vol %) in copper <sup>b</sup>	$190 \times 10^3$ ( $27 \times 10^3$ )	380 (55)	—	—	—	—
Ceramic-matrix						
SiC whiskers in Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>c</sup>	—	—	800 (116)	—	—	8.7
SiC fibers in SiC <sup>e</sup>	—	—	750 (109)	—	—	25.0
SiC whiskers in reaction-bonded Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> <sup>e</sup>	—	—	900 (131)	—	—	20.0
Wood						
Douglas fir, kiln-dried at 12% moisture (loaded parallel to grain) <sup>d</sup>	$13.4 \times 10^3$ ( $1.95 \times 10^3$ ) <sup>f</sup>	85.5 (12.4) <sup>f</sup>	—	49.9 (7.24)	—	11–13
Douglas fir, kiln-dried at 12% moisture (loaded perpendicular to grain) <sup>d</sup>	—	—	—	5.5 (0.80)	—	0.5–1
Concrete						
Standard concrete, water/cement ratio of 4 (after 28 days) <sup>g</sup>	—	—	—	41 (6.0)	—	0.2
Standard concrete, water/cement ratio of 4 (after 28 days) with air entrainer <sup>g</sup>	—	—	—	33 (4.8)	—	—

Table 14.13 *Specific Strengths (Strength/Density)*

Group	Material	Specific strength [mm (in.)]
Noncomposites	1040 steel <sup>a</sup>	$9.9 \times 10^6 (0.39 \times 10^6)$
	2048 plate aluminum <sup>a</sup>	$16.9 \times 10^6 (0.67 \times 10^6)$
	Ti-5Al-2.5Sn <sup>a</sup>	$19.7 \times 10^6 (0.78 \times 10^6)$
	Epoxy <sup>b</sup>	$6.4 \times 10^6 (0.25 \times 10^6)$
Composites	E-glass (73.3 vol %) in epoxy (parallel loading of continuous fibers) <sup>c</sup>	$77.2 \times 10^6 (3.04 \times 10^6)$
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> whiskers (14 vol %) in epoxy <sup>c</sup>	$48.8 \times 10^6 (1.92 \times 10^6)$
	C (67 vol %) in epoxy (parallel loading) <sup>d</sup>	$76.9 \times 10^6 (3.03 \times 10^6)$
	Kevlar <sup>e</sup> (82 vol %) in epoxy (parallel loading) <sup>d</sup>	$112 \times 10^6 (4.42 \times 10^6)$
	Douglas fir, kiln-dried to 12% moisture (loaded in bending) <sup>c</sup>	$18.3 \times 10^6 (0.72 \times 10^6)$

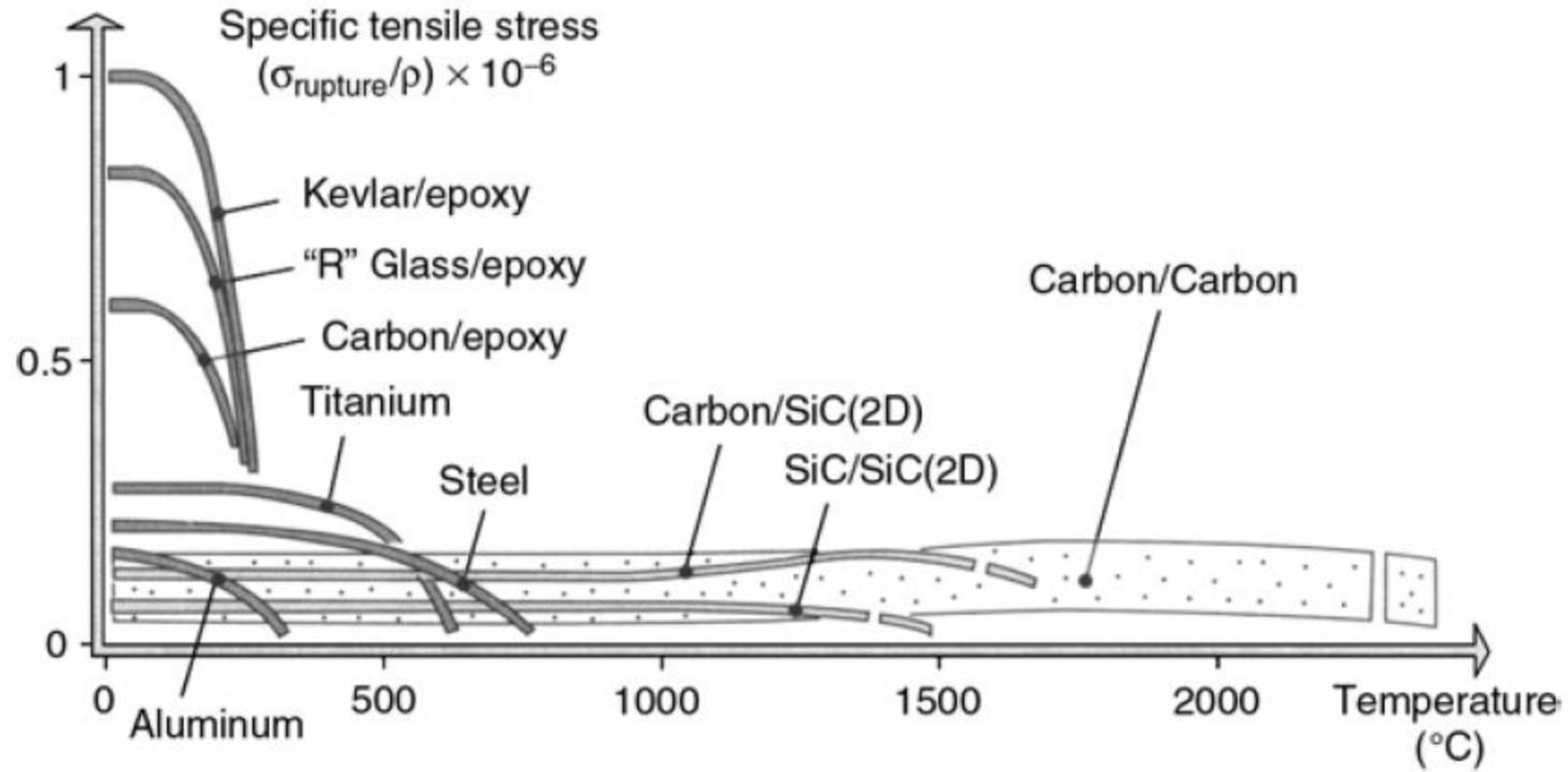


Figure 1.6 Specific Strength of Different Composites

Ex 7.5. Deseja-se fabricar um implante com mesmo módulo elástico do osso cortical (17-25 GPa → **20 GPa**), quanto devo adicionar de micro fibra de biovidro no acrílico para obtê-lo? E se o acrílico for poroso a 60 vol%?

$$E_{\text{acrílico}} = 3,5 \text{ GPa}$$

$$E_{\text{biovidro}} = 69 \text{ GPa}$$

Ex. 7.6 Materiais compósitos são muito utilizados na construção de aeronaves e dentre estes se destacam os reforços por fibras de carbono e aramida (um dos nomes comerciais utilizados é o kevlar). Qual é a diferença entre estas 2 fibras:

**Ex. 7.7**

31) Esferas compactas de raio,  $r$ , e cilindros de comprimento  $L$ , ambos manufacturados a partir do vidro, foram dispersas separadamente numa mesma matriz polimérica, obtendo-se dois compósitos de densidades iguais. Numa primeira aproximação, adotou-se a forma cilíndrica como sendo representante da fibra de vidro descontínua. Admitindo-se que o raio médio,  $r$ , da esfera é igual ao raio médio do cilindro (fibra) e  $L \geq 2r$ , assinale a alternativa correta que prevê o efeito relativo da forma geométrica dos particulados na resistência a tração do compósito.

Dados:  $\frac{A_e}{A_c} = \frac{(2r)}{(L+r)}$ ;  $r$ : raio,  $L$ : comprimento do cilindro;  $A_e$ : área da esfera,  $A_c$ : área do cilindro.

- A. a esfera de vidro produzirá um compósito mais resistente à tração porque a forma esférica é mais tenaz que a cilíndrica.
- B. a fibra de vidro produzirá um compósito menos resistente à tração porque a fibra é menos dúctil do que a esfera.
- C. a fibra produzirá um compósito com menor resistência à tração porque a área de contato entre a forma cilíndrica e a matriz polimérica é menor que a esférica.
- D. a fibra produzirá um compósito com maior resistência à tração porque a área de contato entre forma cilíndrica e a matriz polimérica é maior que a esférica.
- E. a esfera de vidro produzirá um compósito mais resistente à tração porque a forma esférica é mais rígida do que a cilíndrica.

**Ex. 7.8**

35) Os materiais e/ou produtos com propriedades mecânicas (rigidez, ductilidade e tenacidade, por exemplo) dependentes da direção, nas quais são medidas, denominam-se de:

- A. Isotrópicos
- B. Anisotrópicos
- C. Semicristalinos
- D. Amorfos
- E. Não cristalinos

**Ex. 7.9.** Uma empresa precisa fazer um compósito para uso em coletes à prova de balas. Nesse caso, a empresa precisa criar um compósito:

- (A) reforçado por fibras, com a matriz bastante dura, altamente aderente às fibras. A deformação das fibras absorverá a energia da bala e evitará a deformação da matriz.
- (B) reforçado com fibras de alta resistência, utilizando uma matriz de baixa resistência mecânica e com baixa aderência às fibras, para absorver a energia da bala sem que a blindagem se rompa.
- (C) formado de camadas alternadas de um material bastante duro, para absorver a energia da bala, e camadas de um material bastante mole, que será responsável por se deformar e forçar o material duro a se manter íntegro.
- (D) de dois materiais bastante duros, com estruturas contínuas entrelaçadas. Essas estruturas permitem que os dois materiais se desloquem entre si, acomodando a bala durante sua penetração.
- (E) reforçado com partículas de altíssima dureza e baixa tenacidade. As partículas vão se estilhaçar, absorvendo a maior parte da energia do impacto da bala, deixando a matriz da blindagem íntegra.

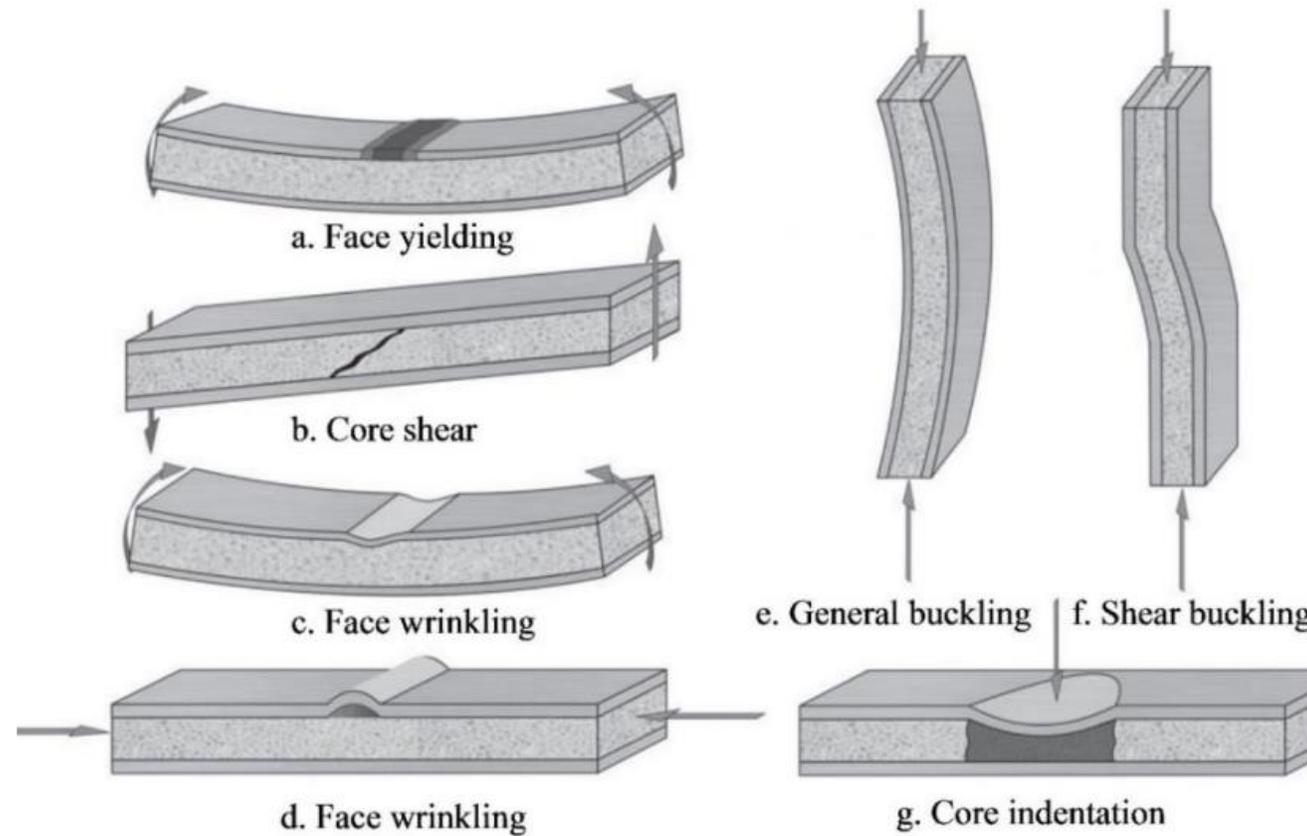
(B) reforçado com fibras de alta resistência, utilizando uma matriz de baixa resistência mecânica e com baixa aderência às fibras, para absorver a energia da bala sem que a blindagem se rompa.

# Compósitos em Sanduiche

Uma estrutura em sanduíche é uma forma especial de um compósito laminado, geralmente é composto por duas folhas de face fortemente ligadas por um adesivo a um núcleo de peso leve.

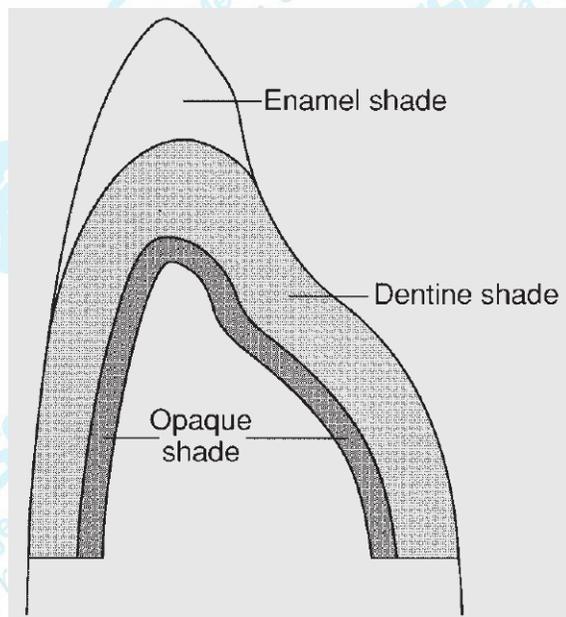
Ambos os componentes, individualmente, são moderadamente frágeis e maleáveis, mas rígidos e fortes quando unidos como uma estrutura de sanduíche.

Tem muitas vantagens, como economia de peso, corrosão, resistência, capacidade de colisão e estabilidade aprimorada em comparação com outros materiais estruturais.



Steeves, CA & Fleck, NA 2004, 'Material selection in sandwich beam construction', Scripta materialia, vol. 50, no. 10, pp. 1335-1339.

# Compósitos Cerâmicos



Opaque shade → Resistência a flexão

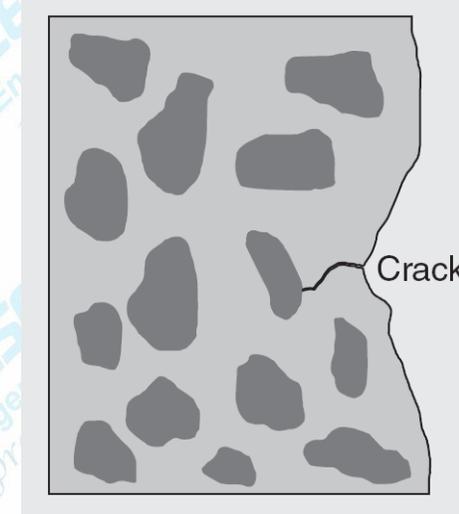
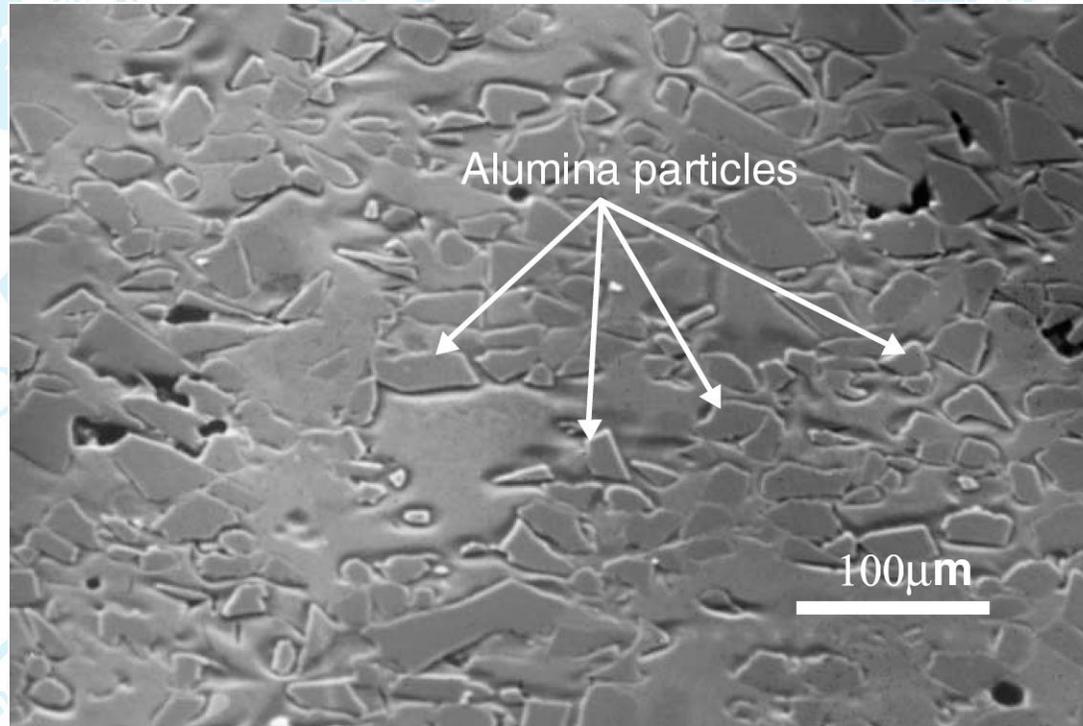
- ✓ Porcelana: 40 – 60 MPa;
- ✓ Porcelana reforçada com alumina; 120-180 MPa
- ✓ infiltração do núcleo de alumina com vidro; 350-500MPa

✓ Vitro-cerâmica

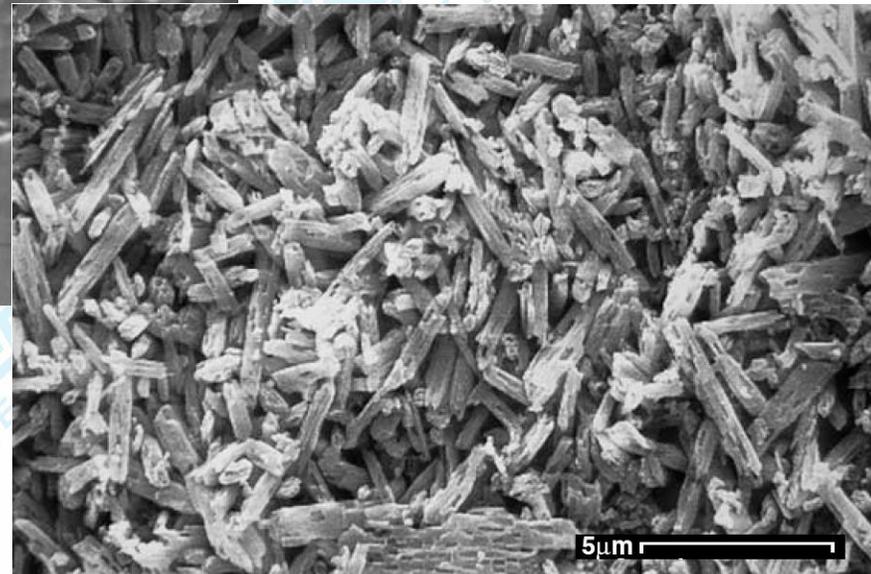
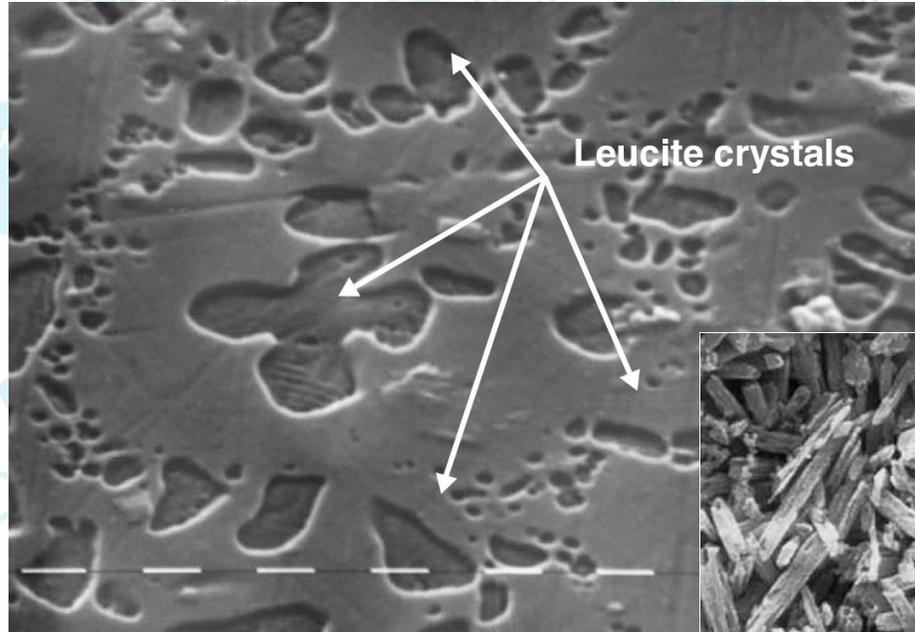
- ✓ p.ex: leucite -  $\text{KAlSi}_2\text{O}_6$  > 120MPa
- Dissilicato de lítio -  $\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$  350-450MPa

Orthofosfato de lítio -  $\text{Li}_3\text{PO}_4$

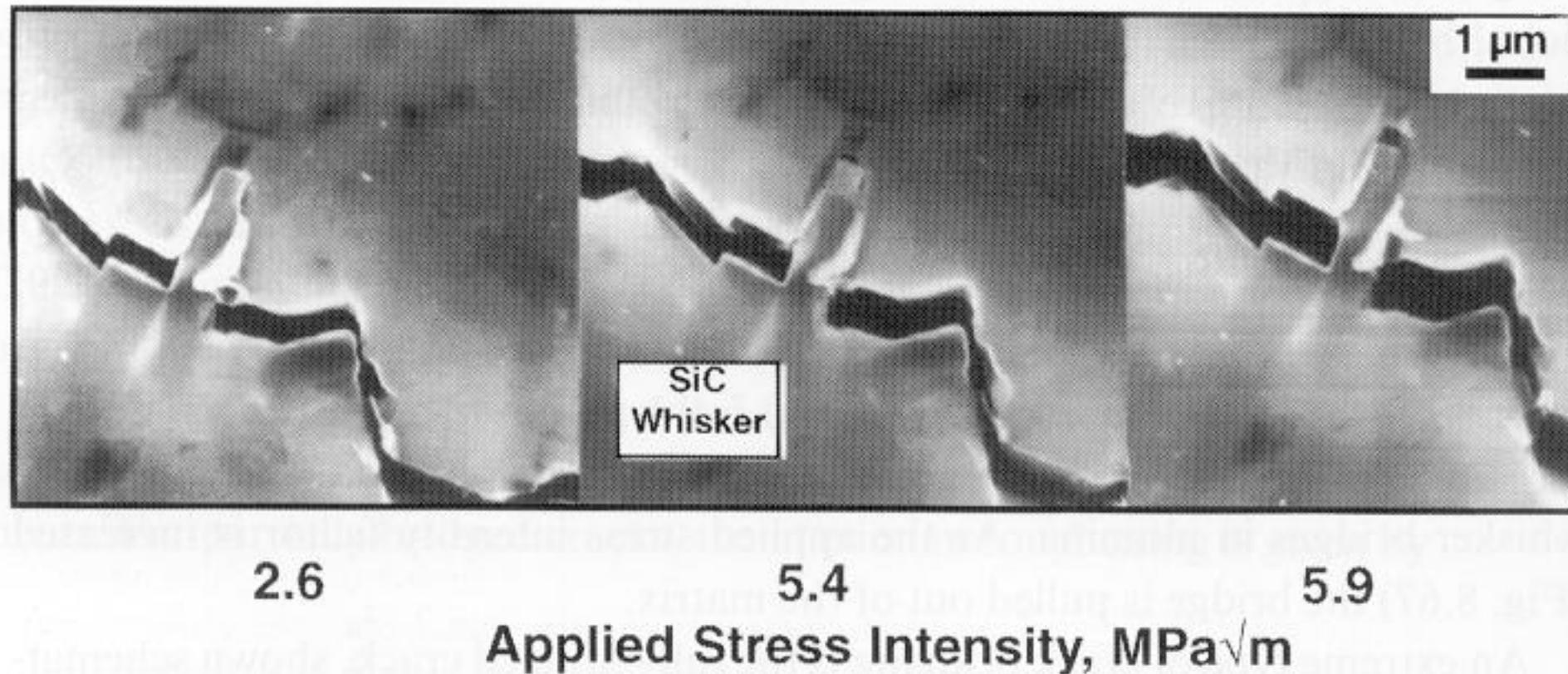
# Reforço pela adição de partículas de alumina



# Vitro cerâmicas



Dissilicato de lítio – cristais aciculares entrelaçados.



**Figure 8.67** Series of scanning electron micrographs showing a silicon carbide whisker bridge being pulled out of an alumina matrix as the applied stress intensity factor is increased. (From P. Becher *et al.*, 1996, reproduced courtesy of The American Ceramic Society, Westerville, OH.)

## Referências

- AGARWAL, B.D.; BROUTMAN, L.J. (1990). *Analysis and performance of fiber composites, second edition*. New York, John Wiley & Sons, Inc.
- ASTM D790-96a. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.
- <https://www.ccm.udel.edu/Techsite/Pages/Simulations-Index.html>
- HYER, M. W. (1998). *Stress analysis of reinforced composite materials*. Singapore, WCB/McGraw-Hill.