

# MATERIAIS COMPÓSITOS

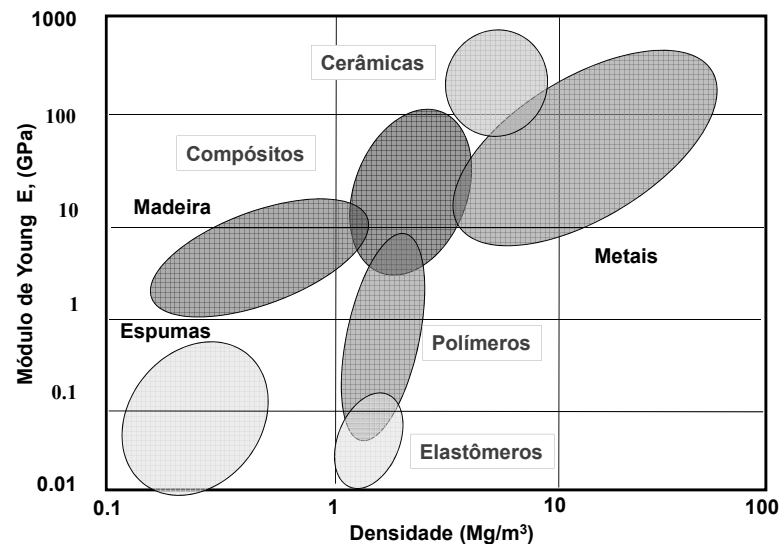
## 1ª Parte

Prof. Cláudio Gouvêa dos Santos

### Principais Classes de Materiais de Engenharia

	Ligação	Microestrutura	Vantagens	Desvantagens
Metais	metálica	grãos cristalinos	<ul style="list-style-type: none"> <li>fortes e firmes</li> <li>dúcteis</li> <li>condutores</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>fratura</li> <li>fatiga</li> </ul>
Polímeros	covalente e secundária	cadeias de moléculas	<ul style="list-style-type: none"> <li>baixo custo</li> <li>leves</li> <li>resistem a corrosão</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>baixa resistência</li> <li>baixa firmeza</li> <li>escoamento</li> </ul>
Cerâmicas	iônica e covalente	grãos cristalinos amorfa	<ul style="list-style-type: none"> <li>fortes, firmes, duras</li> <li>termorresistentes</li> <li>resistem a corrosão</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>fragilidade</li> </ul>
Compósitos	várias	matriz e fibra, etc	<ul style="list-style-type: none"> <li>fortes, firmes</li> <li>leves</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>alto custo</li> <li>deslaminção</li> </ul>

### Módulo X Densidade para Diferentes Materiais



### Breve Histórico

Os antigos egípcios já “fabricavam” compósitos combinando palha e barro para produzir tijolos de adobe.

Árvores e plantas fornecem compósitos naturais que foram usados pelos homens pré-históricos e ainda são usados largamente na construção civil e em estruturas de andaimes.

A madeira é um bom exemplo de compósito natural, uma combinação de fibras de celulose e lignina. A celulose proporciona resistência e a lignina funciona como “cola” que liga e estabiliza a fibra.

O bambu é compósito de madeira muito eficiente. Os componentes são também celulose e lignina, como em qualquer madeira, entretanto o bambu é oco. Isso resulta em uma estrutura leve, porém, firme. Varas de pescar e tacos de golfe copiam esse *design* natural.

Madeira compensada era usada por antigos mesopotâmios em 3400 a. C., que colavam camadas de madeira em diferentes ângulos para obter propriedades melhores que a madeira natural.

O processo de cartonagem envolvendo camadas de linho ou papiro mergulhados em gesso remonta aos tempos de 2100 a.C. e era usado para preparar máscaras de morte.

O concreto foi descrito por volta de 25 a.C. por Vitruvius que em seus 10 Livros de Arquitetura distinguia tipos de agregados apropriados para a preparação de argamassas de cal, recomendando a utilização de pozolana para cimentos de construção ou de uso subaquático.

Papel *mâché* também é um compósito de papel e cola que tem sido usado por centenas de anos.

Um exemplo de compósito natural é o osso, que incorpora o mineral hidroxiapatita, responsável pela sua rigidez, e o colágeno, uma proteína elástica, que melhora sua resistência à fratura.

Desde 1940 tem havido um rápido desenvolvimento na produção e uso de materiais compósitos, que teve como causa três fatores principais:

1. Os veículos militares, tais como aviões, helicópteros e foguetes, colocaram um “prêmio” nos materiais leves e de alta resistência. Enquanto os componentes metálicos que haviam sido usados até então certamente “deram conta do recado” em termos de propriedades mecânicas, o elevado peso desses componentes eram proibitivos. Quanto mais pesado um avião ou helicóptero, menos carga seus motores podem carregar.
2. As indústrias de polímeros estavam crescendo rapidamente e tentaram expandir o mercado para uma variedade de aplicações. O aparecimento de polímeros novos e nos laboratórios de desenvolvimento oferecia uma solução possível para uma variedade de usos, desde que alguma coisa pudesse ser feita para aumentar as propriedades mecânicas dos plásticos.
3. A resistência, em tese, extremamente alta de certos materiais, tais como as fibras de vidro foi sendo descoberta. A questão era como usar esses materiais de resistência potencialmente alta para resolver os problemas apresentados pelas demandas militares.

## O que significa o termo *material compósito*?

### Definição do dicionário Houaiss:

*“material constituído pela aglutinação de duas ou mais substâncias”*

### Definição para a Engenharia de Materiais:

*Conjunto de dois ou mais materiais diferentes, combinados em escala macroscópica, para funcionarem como uma unidade, visando obter um conjunto de propriedades que nenhum dos componentes apresenta individualmente.*

Muitos materiais compósitos são constituídos de apenas duas fases:

- Matriz
- Fase dispersa

Tipicamente as fases dispersas são resistentes e com baixas densidades, enquanto a matriz é um material dúctil ou tenaz.

Se o compósito for projetado e fabricado corretamente, combinará a resistência do reforço com a tenacidade da matriz para alcançar um combinação de propriedades desejadas, não disponíveis em nenhum dos materiais isoladamente.

As propriedades do compósito resultante serão função das propriedades das fases constituintes, das suas quantidades relativas e da geometria da fase dispersa (forma, tamanho, distribuição, etc.)

## Classificação dos Materiais Compósitos (em função do tipo de matriz)

### Compósitos de Matriz Metálica

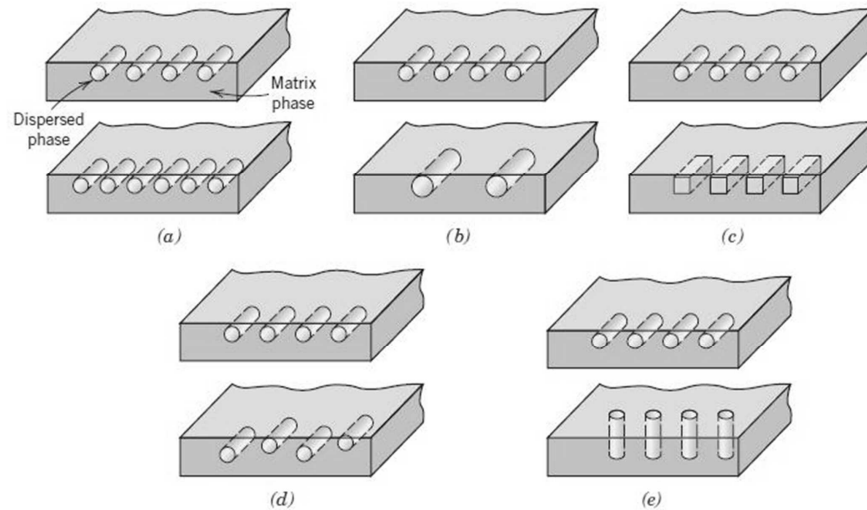
Esses compósitos oferecem módulos de elasticidade, ductilidade e resistência a elevadas temperaturas maiores que os compósitos de matriz polimérica.

Além disso, apresentam alta resistência a abrasão, estabilidade dimensional e tenacidade.

Entretanto são mais pesados e mais difíceis de processar.

Exemplos de Matrizes: Al, Ti, Mg, Fe, Cu, Ni

Exemplos de Compósitos: Al-SiC (carbeto de silício), Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (alumina)



### Compósitos de Matriz Cerâmica

Esses compósitos são usados em aplicações onde são desejáveis resistência a altas temperaturas e a ambientes corrosivos.

São fortes e firmes, mas carecem de tenacidade (ductilidade).

Usualmente os materiais usados como matriz são carbeto de silício, nitreto de silício, óxido de alumínio e mulita (um composto de alumínio, silício e oxigênio). Eles retêm sua resistência até 1600 °C.

Os mesmos materiais usados como matriz são também usados como reforço, mas sob formas diferentes tais como monofilamentos (*whiskers*), fibras picadas ou fios, para alcançar propriedades desejadas.

Esses compósitos encontram aplicações em motores de automóveis e jatos, mineração em águas profundas, ferramentas de corte, moldes e vasos de pressão.

Fiber	Matrix	Applications
Graphite	Aluminum	Satellite, missile, and helicopter structures
	Magnesium	Space and satellite structures
	Lead	Storage-battery plates
	Copper	Electrical contacts and bearings
Boron	Aluminum	Compressor blades and structural supports
	Magnesium	Antenna structures
	Titanium	Jet-engine fan blades
Alumina	Aluminum	Superconductor restraints in fission power reactors
	Lead	Storage-battery plates
	Magnesium	Helicopter transmission structures
Silicon carbide	Aluminum, titanium	High-temperature structures
	Superalloy (cobalt-base)	High-temperature engine components
Molybdenum, tungsten	Superalloy	High-temperature engine components

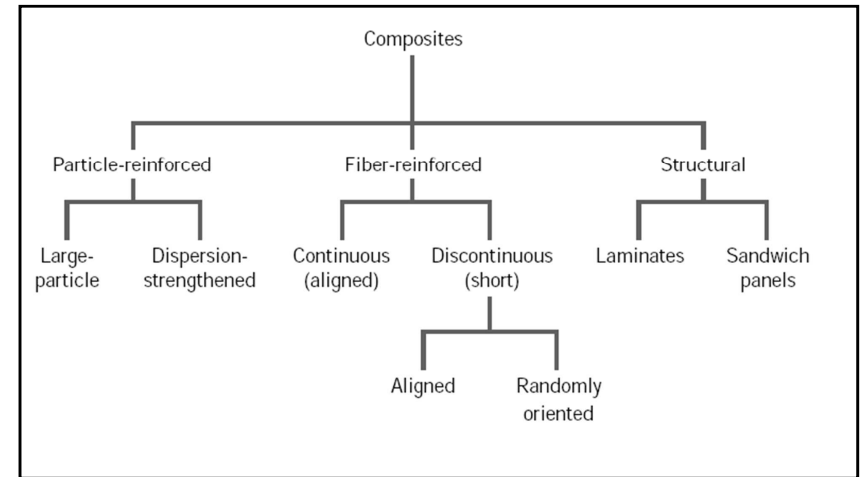
## Compósitos de Matriz Polimérica

Esses compósitos assim como os plásticos reforçados com fibras são genericamente referidos simplesmente como **plásticos reforçados**.

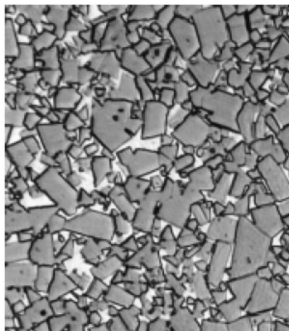
Comumente as fibras usadas são de vidro, carbono, boro e aramidas, que apresentam altas resistência e firmeza específicas.

Tanto termoplásticos como termofixos são usados como matriz. Os termoplásticos geralmente incluem PE, Nylon, PS, PP, PC e PVC; os principais termofixos são resinas epóxi, poliéster e fenólicas.

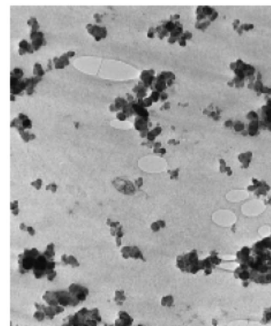
## Classificação dos Materiais Compósitos (em função do tipo de reforço)



## Compósitos de partículas grandes podem ser preparados com todos os três tipos de materiais (metais, polímeros e cerâmicas).



Exemplo: Fotomicrografia de carbeto sinterizado de WC-Co. Áreas claras são da matriz de WC; as regiões escuras são de WC.



Exemplo - Micrografia de partículas esféricas reforçantes de negro de fumo num composto de borracha sintética da face de rolamento de pneu.

## Compósitos Reforçados por Partículas

### Regra da Mistura (sob carregamento elástico)

**M & P in series**

$L_0$        $\Delta L$

**M & P in parallel**

$$\sigma_M = \sigma_P = \sigma$$

$$L_0 = V_M L_0 + V_P L_0$$

$$\Delta L = V_M L_0 \frac{\sigma_M}{E_M} + V_P L_0 \frac{\sigma_P}{E_P} = V_M L_0 \frac{\sigma}{E_M} + V_P L_0 \frac{\sigma}{E_P}$$

$$\frac{\Delta L}{L_0 \sigma} = \frac{1}{E_c} = \frac{V_M}{E_M} + \frac{V_P}{E_P}$$


---


$$\varepsilon = \varepsilon_M = \varepsilon_C, F_C = F_M + F_P$$

$$A_C \sigma_C = A_M \sigma_M + A_P \sigma_P$$

$$\sigma_C = V_M \sigma_M + V_P \sigma_P$$

$$\frac{\sigma_C}{E_c} = \frac{V_M \sigma_M}{E_M} + \frac{V_P \sigma_P}{E_P}$$

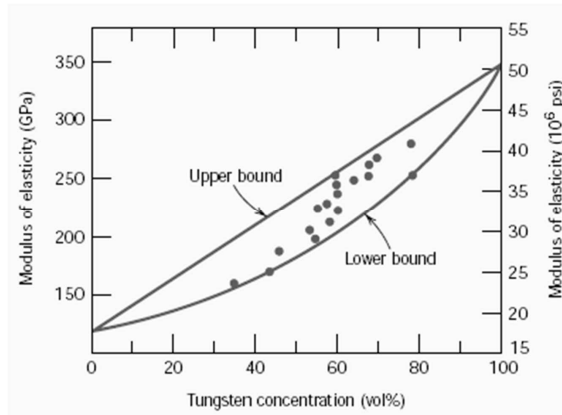
$$\frac{\sigma_C}{E_c} = \frac{\varepsilon}{E_c} = \frac{V_M \varepsilon}{E_M} + \frac{V_P \varepsilon}{E_P}$$

# Compósitos Reforçados por Partículas

## Regra da Mistura

$$E_c = E_m V_m + E_p V_p$$

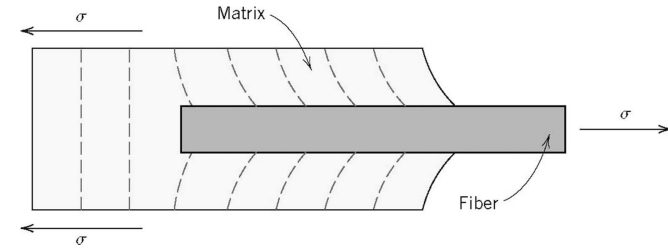
$$E_c = \frac{E_m E_p}{V_m E_p + V_p E_m}$$



Exemplo: Módulo de elasticidade X percentagem volumétrica de tungstênio para um compósito de partículas de tungstênio dispersas dentro de uma matriz de cobre.

# Compósitos Reforçados por Fibras

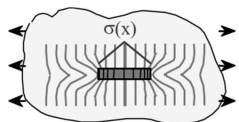
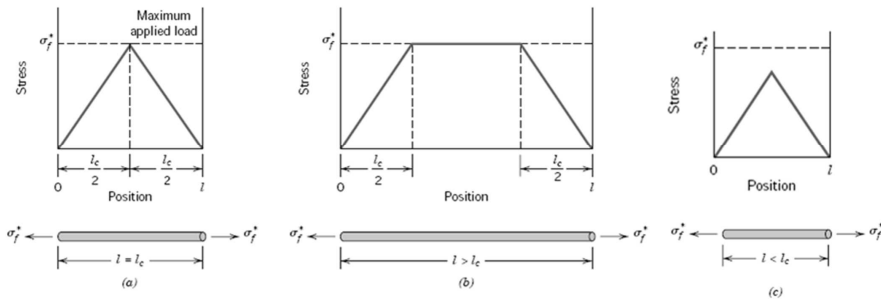
## Influência do comprimento da fibra



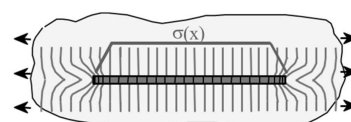
Modelo de deformação na matriz circundante a uma fibra que está sujeita a uma tensão de tração aplicada.

$$l_c = \frac{\sigma_f d}{2\tau_c}$$

## Influência do comprimento da fibra

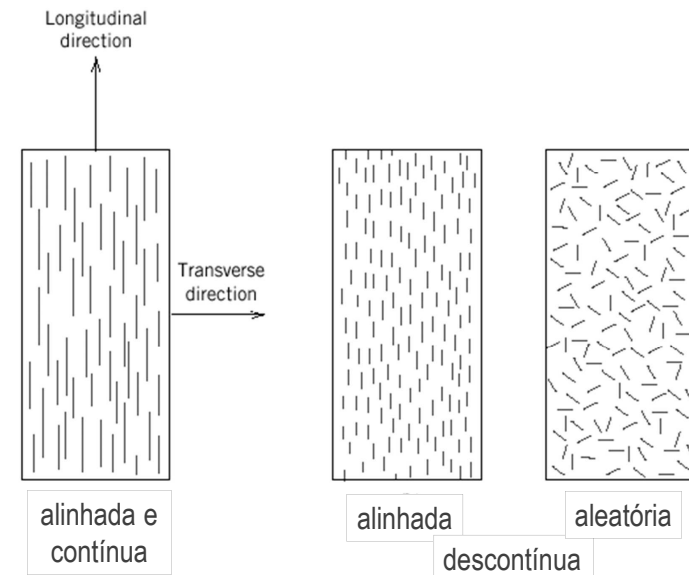


Pior eficiência da fibra

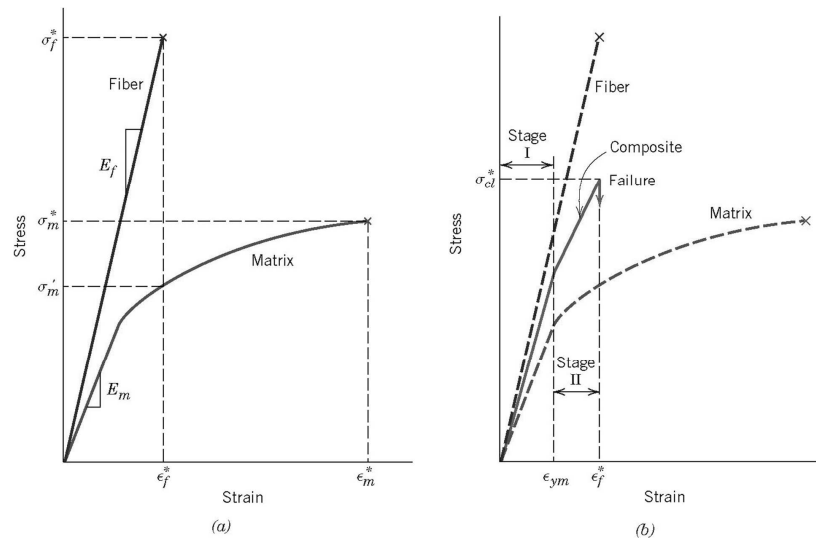


Melhor eficiência da fibra

## Influência da orientação da fibra e sua concentração



## Compósitos de Fibras Contínuas e Alinhadas



## Compósitos de Fibras Contínuas e Alinhadas

### (a) Carregamento Longitudinal (Isodeformação)

$$F_c = F_m + F_f$$

$$\sigma_c A_c = \sigma_m A_m + \sigma_f A_f$$

$$\sigma_c = \sigma_m \frac{A_m}{A_c} + \sigma_f \frac{A_f}{A_c}$$

$$\sigma_c = \sigma_m V_m + \sigma_f V_f$$

$$\frac{\sigma_c}{\epsilon_c} = \frac{\sigma_m}{\epsilon_m} V_m + \frac{\sigma_f}{\epsilon_f} V_f$$

$$E_c = E_m V_m + E_f V_f$$

$$E_c = E_m (1 - V_f) + E_f V_f$$

### Exercício

Um compósito reforçado com fibra de vidro contínua e alinhada consiste de 40% em volume de fibras de vidro com um módulo de elasticidade de  $69 \times 10^3$  MPa e 60% de uma resina de poliéster que, quando curada, apresenta um módulo de  $3,4 \times 10^3$  MPa.

- Determine o módulo de elasticidade desse compósito na direção longitudinal.
- Se a área da seção transversal vale  $258 \text{ mm}^2$  e uma tensão de 48,3 MPa é aplicada na direção longitudinal, calcule o valor da carga suportada por cada uma das fases fibra e matriz.
- Determine a deformação sustentada por cada fase quando a tensão mencionada no item (b) é aplicada.
- Considerando resistências à tração de  $3,5 \times 10^3$  e 69 MPa, respectivamente, para a fibra de vidro e para a resina de poliéster, determine a resistência à tração longitudinal desse compósito.

## Compósitos de Fibras Contínuas e Alinhadas

### (b) Carregamento Transversal (Isotensão)

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

$$\epsilon_c = \epsilon_m V_m + \epsilon_f V_f$$

$$\frac{1}{E_c} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_f}{E_f}$$

$$\frac{\sigma}{E_c} = \frac{\sigma}{E_m} V_m + \frac{\sigma}{E_f} V_f$$

$$E_c = \frac{E_m E_f}{V_m E_f + V_f E_m} = \frac{E_m E_f}{(1 - V_f) E_f + V_f E_m}$$

### Exercício

Um compósito reforçado com fibra de vidro contínua e alinhada consiste de 40% em volume de fibras de vidro com um módulo de elasticidade de  $69 \times 10^3$  MPa e 60% de uma resina de poliéster que, quando curada, apresenta um módulo de  $3,4 \times 10^3$  MPa. Determine o módulo de elasticidade desse compósito na direção transversal.

## Compósitos de Fibras Descontínuas e Alinhadas

$$(TS)_c = (TS)_f V_f \left(1 - \frac{l_c}{2l}\right) + (TS)_m (1 - V_f)$$

$$(TS)_c = \frac{l\tau_c}{d} V_f + (TS)_m (1 - V_f)$$

## Compósitos de Fibras Descontínuas e Orientadas Aleatoriamente

$$E_c = KE_f V_f + E_m V_m$$

Tabela – Policarbonatos Não-reforçados e Reforçados com Fibras de Vidro Orientadas Aleatoriamente.  
Fiber Reinforcement (vol%)

Property	Unreinforced	Fiber Reinforcement (vol%)		
		20	30	40
Specific gravity	1.19–1.22	1.35	1.43	1.52
Tensile strength [MPa (ksi)]	59–62 (8.5–9.0)	110 (16)	131 (19)	159 (23)
Modulus of elasticity [GPa (10 <sup>6</sup> psi)]	2.24–2.345 (0.325–0.340)	5.93 (0.86)	8.62 (1.25)	11.6 (1.68)
Elongation (%)	90–115	4–6	3–5	3–5
Impact strength, notched Izod (lb <sub>f</sub> /in.)	12–16	2.0	2.0	2.5

## Eficiência de Reforço

$$E_c = KE_f V_f + E_m V_m$$

### Fatores de eficiência:

- alinhadas em 1D:  $K = 1$  (||)
- alinhadas em 1D:  $K = 0$  (⊥)
- aleatórias em 2D:  $K = 3/8$  (isotropia 2D)
- aleatórias em 3D:  $K = 1/5$  (isotropia 3D)

Considerações sobre orientação e comprimento de fibra para um compósito particular dependerão do nível e da natureza da tensão aplicada bem como do custo de fabricação. Taxas de produção para compósitos de fibras curtas (tanto alinhada como aleatoriamente orientada) são rápidas, e formas intrincadas podem ser conformadas e que não são possíveis com o reforço por fibras contínuas. Além disso, os custos de fabricação são consideravelmente mais baixos do que para fibras contínuas e alinhadas.

## Módulo Elástico e Resistência a Tração em função da direção medida em relação ao eixo longitudinal de um compósito de resina epóxi reforçada com fibra de carbono.

