

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL

**Materiais Compósitos  
 Aspectos Gerais e Aplicações**

Prof. Márcio R. F. Soares

# Sumário

1. Considerações gerais sobre compósitos e aplicações
2. Fase Matriz (aglutinante)
  - 2.1 Matriz polimérica
  - 2.2 Matriz cerâmica e carbonosa
  - 2.3 Matriz metálica
3. Fase Reforço (enchimento)
  - 3.1 Fibras
  - 3.2 Cargas
  - 3.3 Outras
4. Fechamento

# 1. Considerações gerais sobre compósitos e aplicações

# 1. Considerações gerais - Materiais Compósitos

*Qual a importância dos materiais compósitos?*

- São materiais tecnologicamente estratégicos
- Possuem um amplo campo de aplicação
- Envolvem interação multidisciplinar (aplicações em diversas áreas)



(integram ramos da)



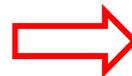
- engenharias
- arquitetura
- biomedicina
- odontologia

...

- Física
- Química
- Ciência dos Materiais
- Tecnologia dos Polímeros
- Metalurgia
- Mecânica Aplicada

...

(levam)



- desenvolvimento de novos materiais
- processos de fabricação
- cálculo de estruturas
- melhoria da qualidade de vida
- utilização de recursos renováveis
- redução de custo

...

## *Qual a ideia por trás dos materiais compósitos?*

- Ao contrário em desenvolver um novo material, modifica-se um material já existente por meio da incorporação de outro(s) componente(s).
- Conceito teve origem inicialmente na indústria aeronáutica pela necessidade de redução de peso, preservando a robustez dos componentes estruturais.



## *Exemplos de materiais compósitos?*

- Ligas metálicas – propriedades intermediárias entre soluto e solvente.

↳ Cementita (carbeto de ferro –  $\text{Fe}_3\text{C}$ )

↳ Bronze de estanho (Cu – macio e dúctil, e Sn – macio e frágil)

↳ Perlita (88% ferrita – macia e dúctil, e 12% cementita – dura e frágil)

- Ligas naturais

↳ Madeira (fibras de celulose – resistente e flexíveis, envolvidas em lignina – rígida)

↳ Ossos (colágeno – proteína macia, envolvido em apatita (mineral duro e frágil))

- ...

## *Afinal, o que são materiais compósitos?*

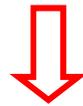
- São estruturas ou componentes fabricados a partir de combinações (**mistura macroscópica**) de dois ou mais constituintes (fases) que apresentam morfologias distintas.



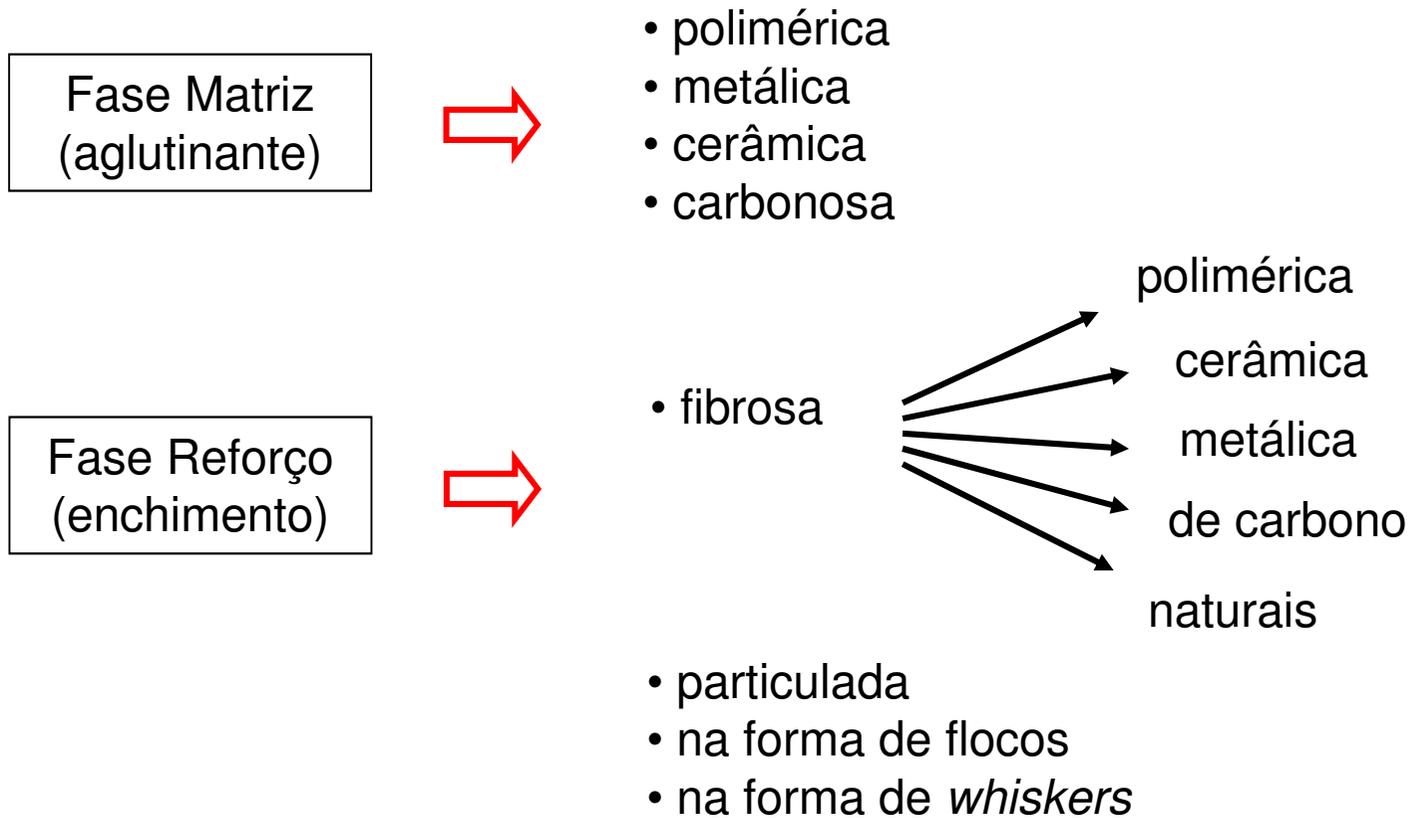
São **constituídos** de uma **matriz contínua**, que envolve **fibras** e ou **partículas** que formam a mistura.



- proteger fibras
- mantêm reforço coeso em configuração estável



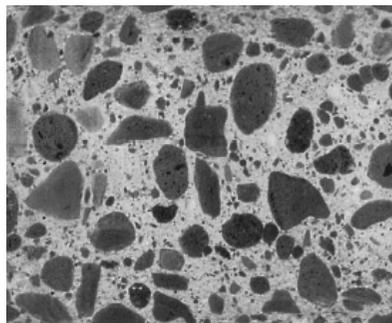
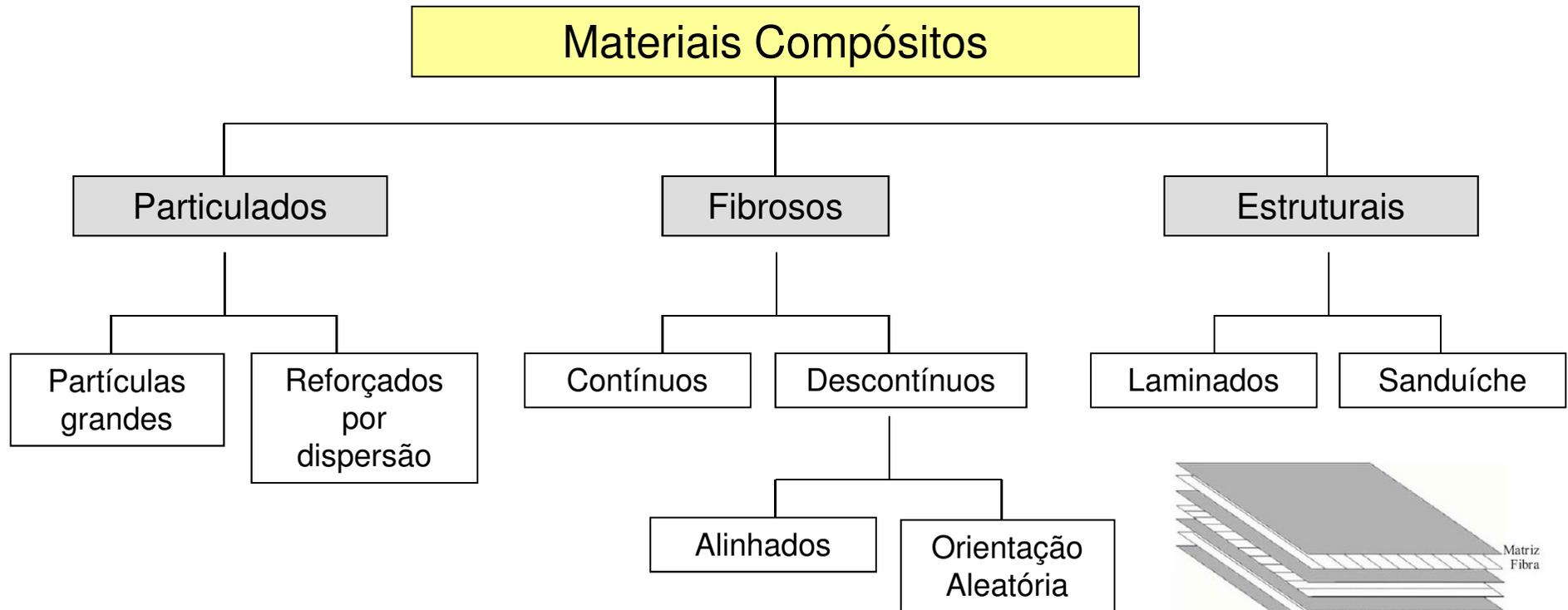
- resistência a carregamentos mecânicos



---

*A combinação destes materiais podem elevar os índices de resistência e rigidez por unidade de massa!*

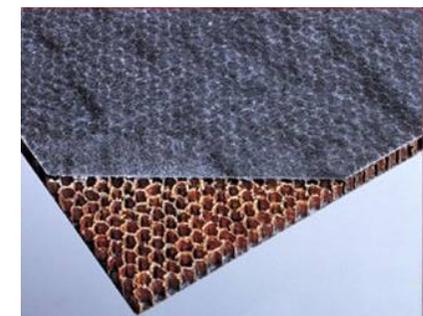
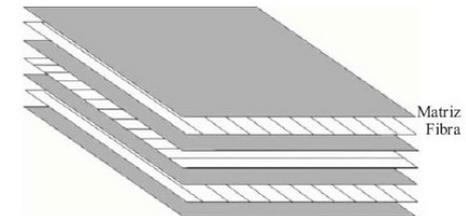
*Classificação mais comum dos materiais compósitos:*



concreto



fibra de vidro



sanduíche

## *Tecnologia em compósitos consiste em:*

- Por exemplo, saber dispor fibras de alta resistência mecânica e grande rigidez

- Em posições e orientações predeterminadas
- Envoltas em uma matriz
- Em frações volumétricas definidas

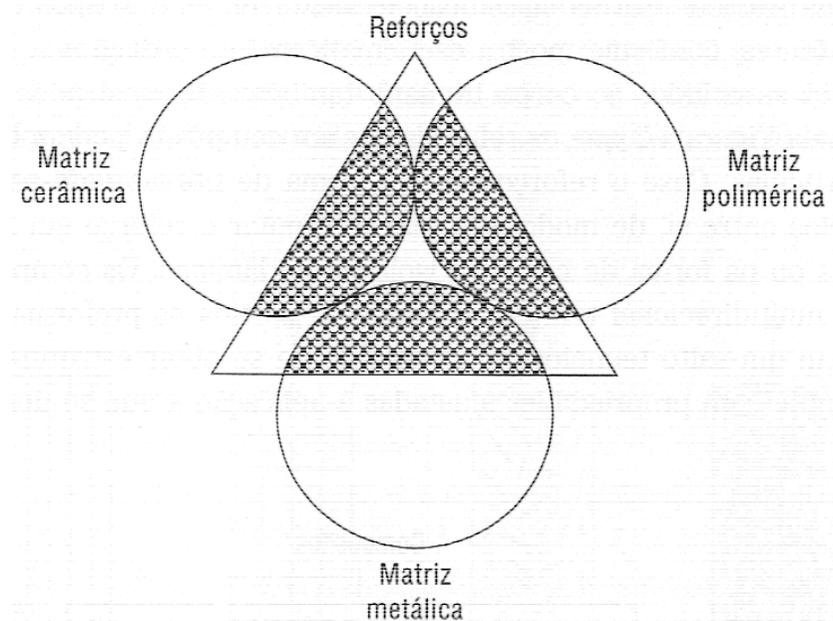
→ **Previsão e controle de propriedades específicas!**



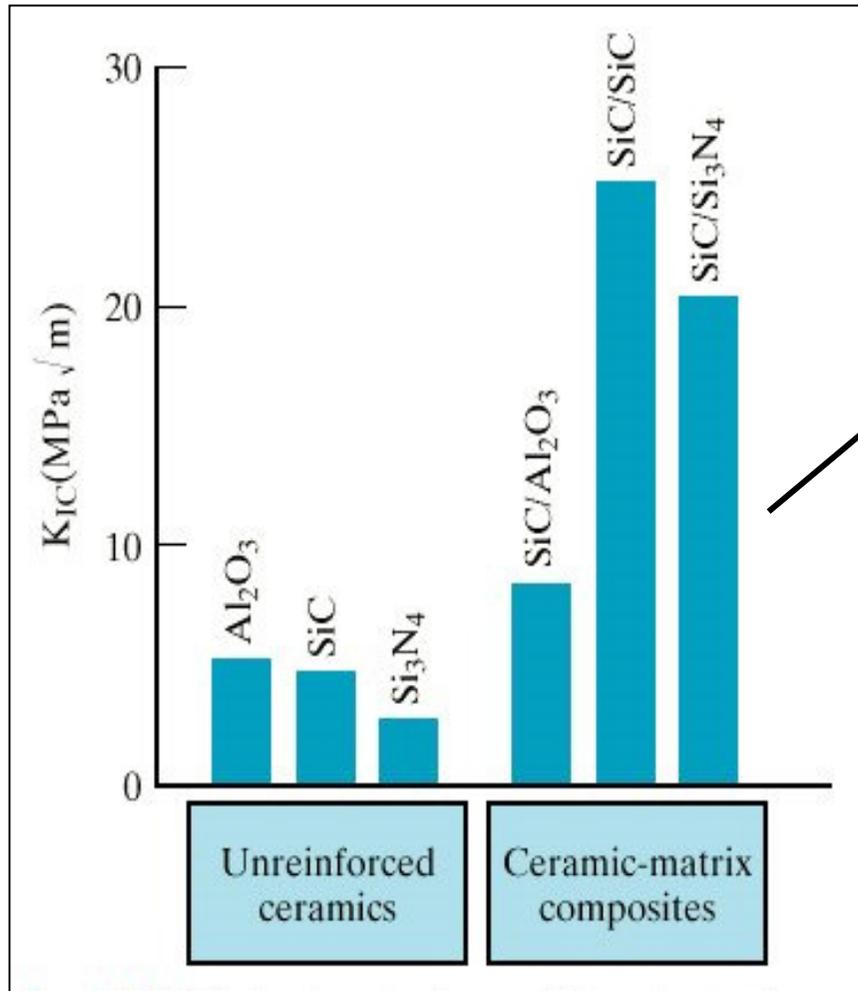
Obtenção de material de desempenho diferente de seus constituintes e com características únicas!



Propriedades finais superiores ao dos constituintes em separado



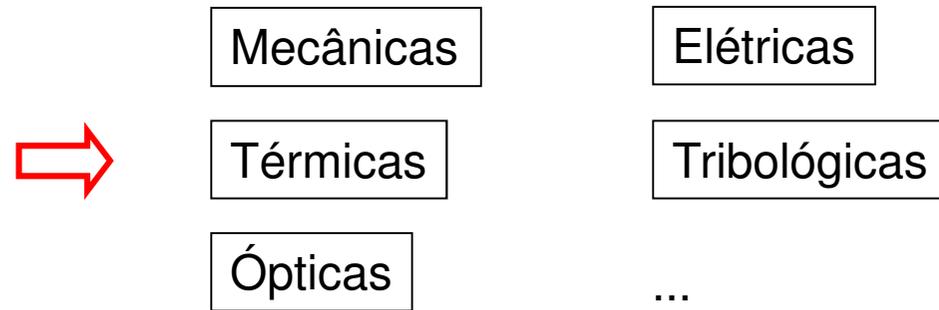
*Ex: Compósitos de fibra cerâmica e matriz cerâmica*



Possuem maior tenacidade à fratura em relação ao cerâmico não reforçado.

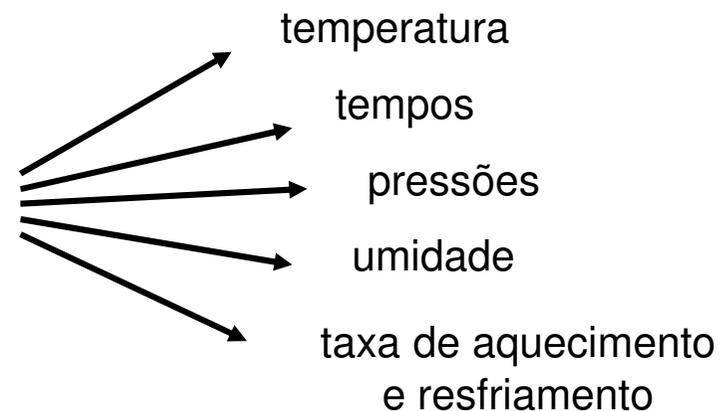
(aplicações a + 1000°C)

*São materiais que possuem diferentes aplicações que envolvem diversas propriedades:*

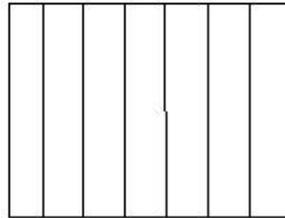


 Propriedades estas, controladas principalmente por

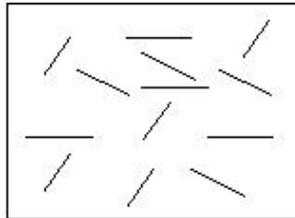
- propriedades individuais de seus constituintes
- sua distribuição
- sua dispersão
- sua forma e tamanho
- e do tipo de interação
- do processo de fabricação adotado



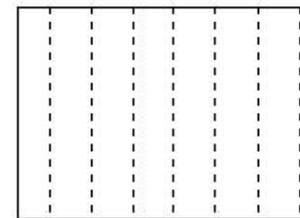
*Diferentes tipos de configurações possíveis para a fase reforço para diferentes aplicações.*



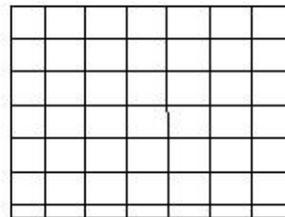
**Fibras contínuas**



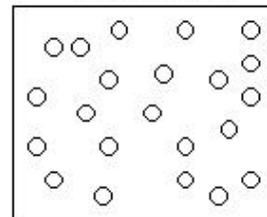
**Fibras curtas aleatórias**



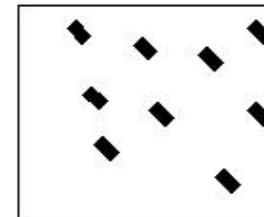
**Fibras curtas orientadas**



**Bidirecionais**



**Partículas esféricas**



**Flocos**



Têm influência direta nas propriedades mecânicas dos compostos

## *Características principais dos compósitos:*



### **Heterogeneidade**

não uniformidade da estrutura físico/química



### **Anisotropia**

dependência direcional das propriedades físicas



### **Simetria**

natureza tensorial das propriedades do material



### **Hierarquia**

empilhamento de unidades estruturais individuais

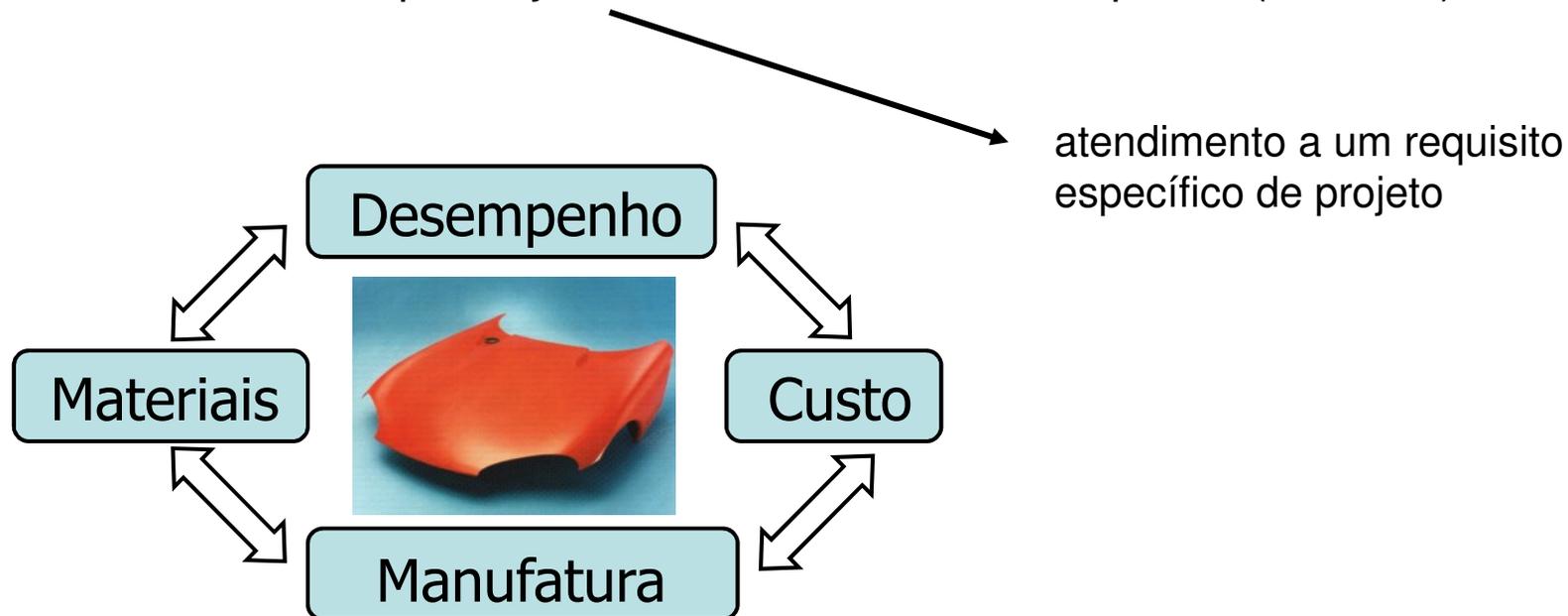
### **# Propriedade interfacial**



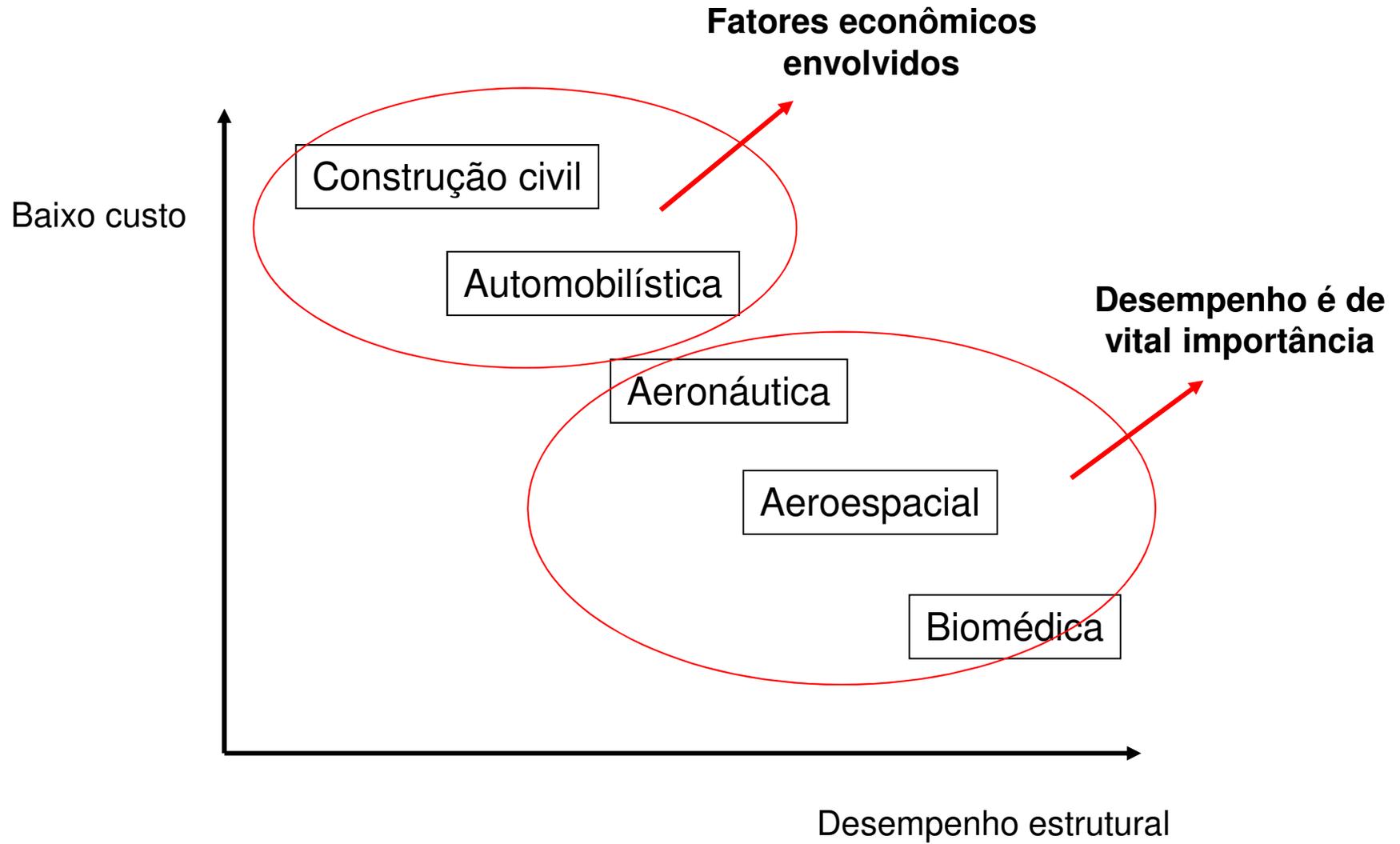
poderia ser pensada  
como uma terceira fase

## *Projeto e Desenvolvimento:*

- Possui um grau de complexidade significativamente maior que materiais isotrópicos tradicionais
- Influência de um grande número de fatores e variáveis
- Modelagem matemática do comportamento mecânico geralmente difícil e trabalhosa.
- Liberdade para ajustar a manufatura do compósito (ilimitado)

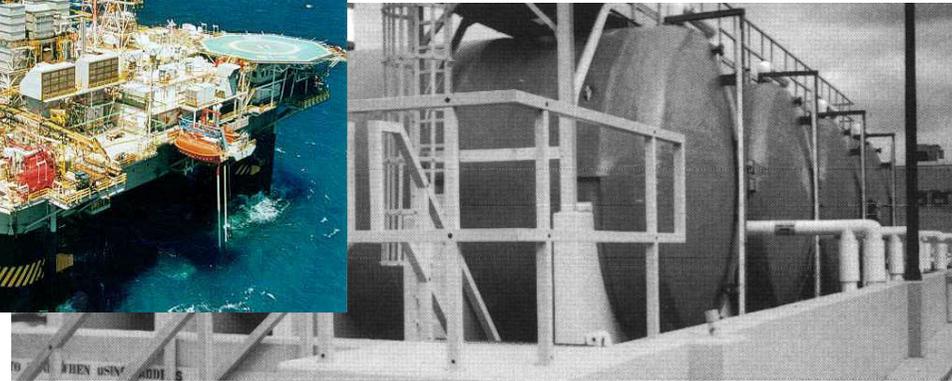


*Requisitos de desempenho vs. baixo custo:*



# Áreas em constante desenvolvimento

Indústria petroquímica (tanques e reservatórios de pressão)

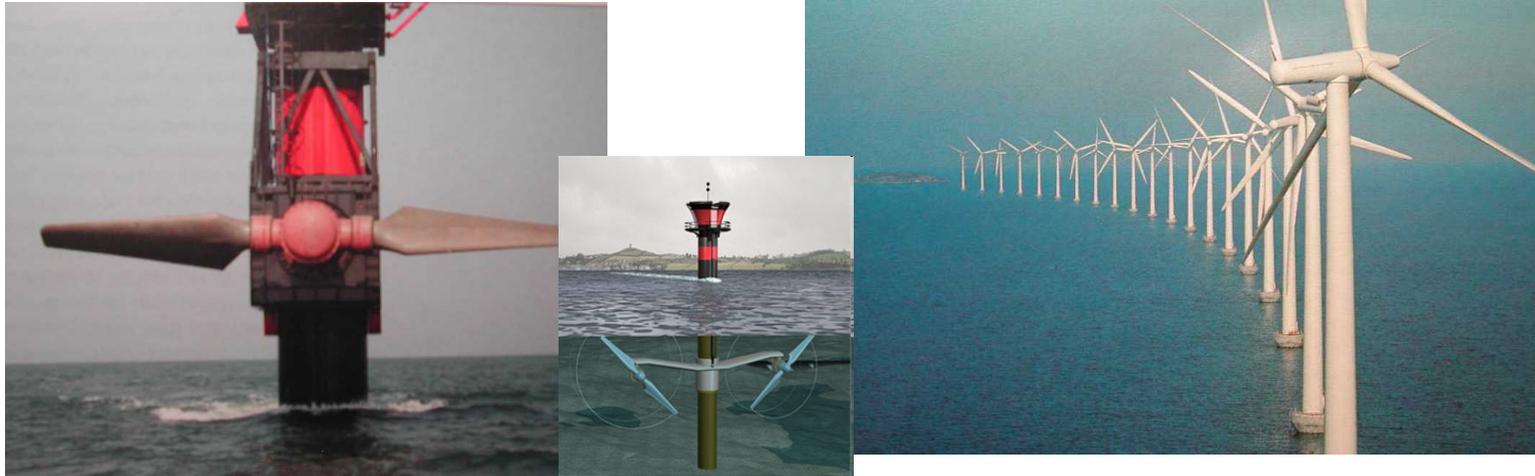


Esportes



# Áreas em constante desenvolvimento

## Geração de energia



## Indústria automotiva

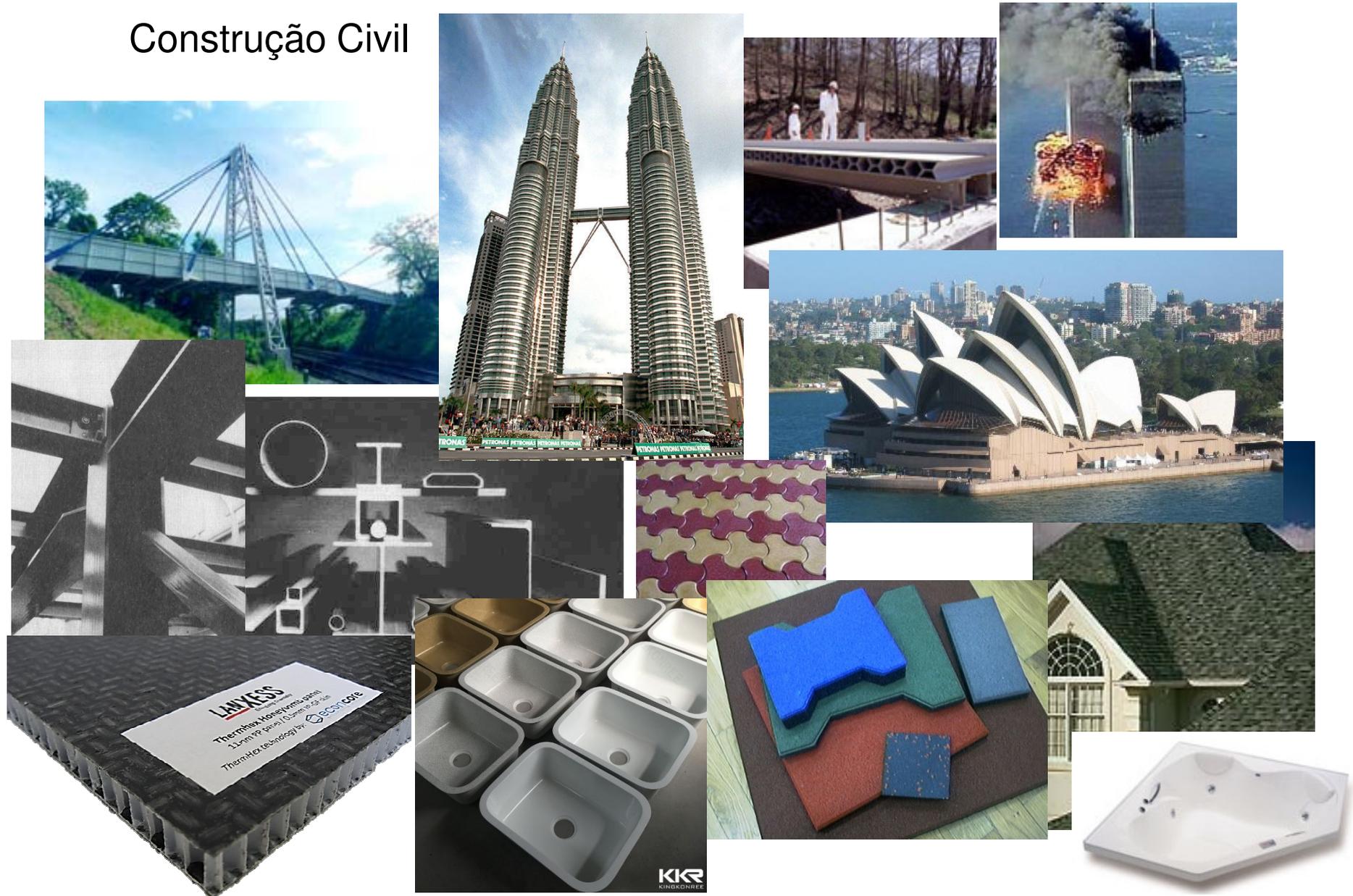


## Militar e Defesa



# Áreas em constante desenvolvimento:

## Construção Civil



1. Considerações gerais sobre compósitos e aplicações

2. Fase Matriz (aglutinante)

2.1 Matriz polimérica

2.2 Matriz cerâmica e carbonosa

2.3 Matriz metálica

## 2.1 Matrizes Poliméricas

- Sistemas poliméricos miscíveis

Misturas uni-fásicas com compatibilidade total entre componentes dentro de certos limites de composição e temperatura



Misturas poliméricas totalmente compatíveis são também chamadas de **LIGAS POLIMÉRICAS**.

- Sistemas poliméricos imiscíveis

Misturas com mais de uma fase



- Com compatibilidade interfacial parcial
- Com incompatibilidade total entre fases



### ***compósitos***

Possui uma importância particular dentro de misturas poliméricas imiscíveis.

- Constituem uma classe de materiais heterogêneos
- Multifásicos (poliméricos ou não)

Componentes descontínuos (comp. Estrutural)
--

- resistência ao esforço

Componentes contínuos (comp. Matricial)
--

- meio de transferência do esforço

## Componentes da mistura não se dissolvem ou se descaracterizam completamente

- Apresentam propriedades do conjunto superiores as de cada componente individual.
- A interface entre as componentes tem influência dominante sobre suas características



O componente matricial é quase sempre um polímero orgânico macio ou duro (**termoplástico** ou **termorrígido**)

- Tem a função de manter a orientação das fibras e seus espaçamentos.
- Transmitir forças de cisalhamento entre as camadas de fibras (resistência a dobra e torções).
- Proteger a fibra de danos superficiais.

Componente	Natureza	Exemplos
Matricial	Termoplástica	Poliâmidas alifáticas Policarbonato Poli(sulfeto de fenileno) Poli(óxido de metileno) Poli-sulfonas Policetonas Poli(tereftalato de butileno)
	Termorrígida	Resina epoxídica Resina fenólica Poliéster insaturado Poli-imidas

## 2.1.1 Matrizes Termorrígidas

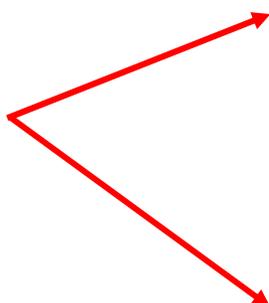
⇒ Apresentam cadeias conectadas entre si por ramificações compartilhadas (ligações predominantemente covalentes)



→ necessita de elevada energia para o rompimento das ramificações (degradação)

- Não são facilmente conformados.
- Não amolecem
- Processados por ação conjunta (pressão e temperatura)

⇒ Aplicações em diversos setores como:

- Eletroeletrônicos
  - de Embalagem
  - Construção Civil
  - Transporte
- 
- Dois setas vermelhas que partem de um ponto central entre as duas listas e apontam para a direita, indicando a transição das aplicações gerais para as específicas.
- Recobrimentos protetores e adesivos
  - Equipamentos para indústria química
  - Compósitos estruturais
  - Encapsulamento eletrônico
  - Freios
  - Aeroespacial

## 2.1.2 Matrizes Termoplásticas

⇒ São caracterizados por ligações químicas tipo (Van der Waals)

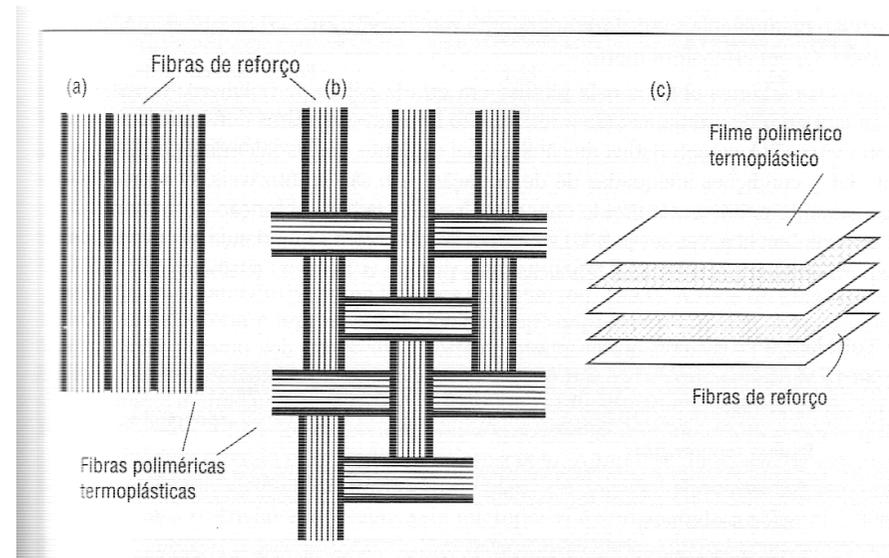


(rompidas facilmente por um aumento de temperatura)

- Fácil reprocessabilidade
- Quando aquecidos após resfriados retornam a sua rigidez inicial.
- Maior tenacidade a fratura
- Maior resistência ao impacto (em relação aos termorígidos)
- Devido a emaranhado de sua cadeia permite deformação quando submetidos a tensões.

⇒ Aplicações:

- Indústria automobilística
- Incorporação de Termoplásticos junto a fibras de reforço para posterior conformação



Formação Pré-formas

## 2.2 Matrizes Cerâmicas e Carbonosas

### 2.2.1 Matrizes de Carbono

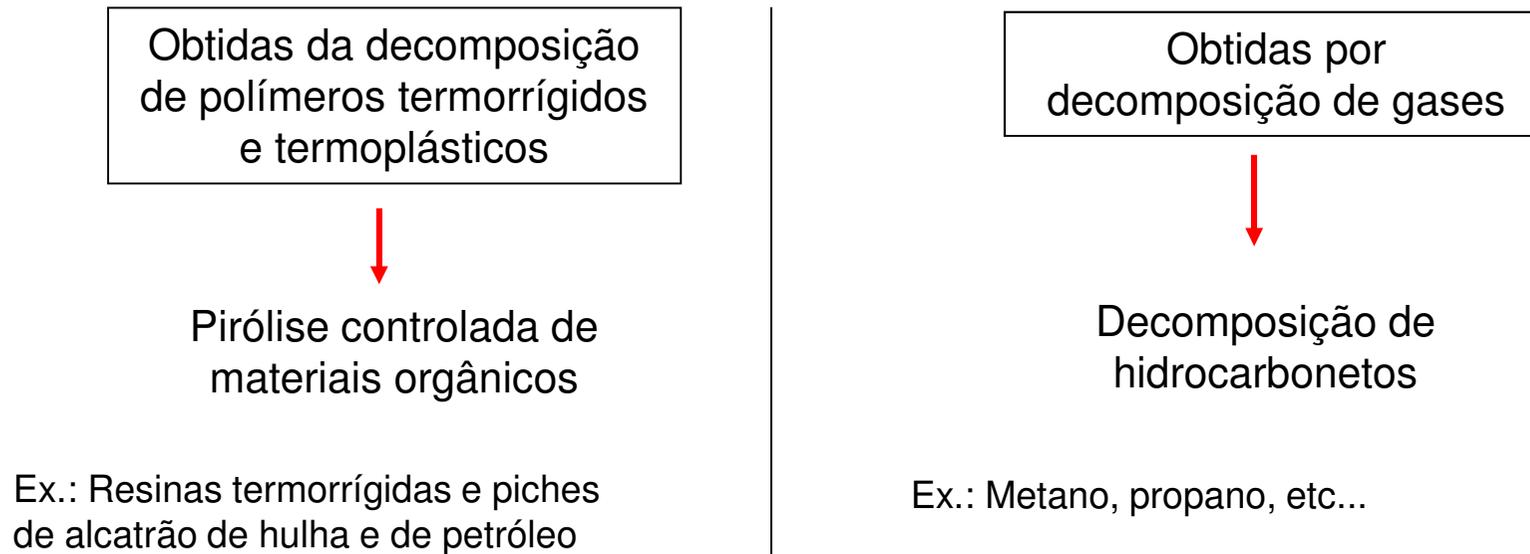
➡ Materiais a base de carbono possuem grande interesse na indústria por

- Manter sua propriedade de resistência mecânica inalterada
- Aumentar o limite de resistência a temperaturas superiores a 1500 °C em atmosfera não-oxidante, de componentes a base destes materiais.



## Matrizes carbonosas utilizadas em compósitos

➡ Quanto a obtenção, elas podem ser divididas em dois grupos



➡ Grande variedade de carbonos podem ser obtidas em função da

- Matéria prima escolhida
- Temperatura de tratamento térmico

## Especial atenção:

→ Ao caso de carbonos obtidos pela pirólise de termorrígidos com alto grau de aromaticidade e reticulação

↳ Há formação de estruturas denominadas de “**carbono vítreo**” ou “*Glassy Carbon*”. (Carbon Glassy Matrix)

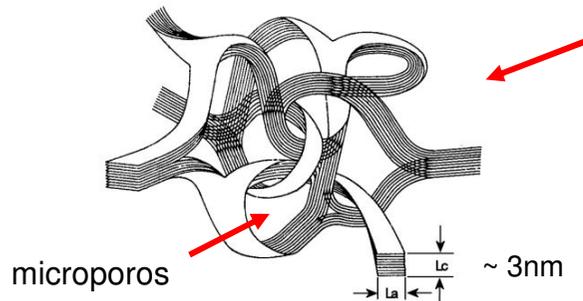
Utilização em materiais de estrutura aeroespacial e biocompatíveis com tecidos moles e duros

- Resistência a altas temperaturas
- Extrema resistência ao ataque químico
- Baixa densidade
- Fratura frágil

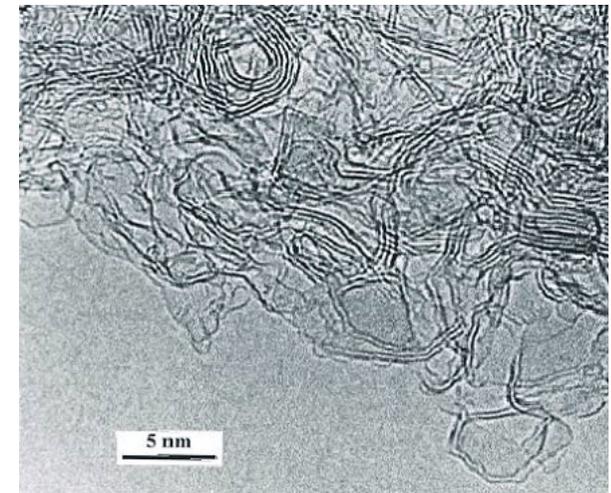
• Matéria prima mais utilizada: Resina Fenólica

• Estrutura do Carbono Vítreo:

Formada por uma rede tridimensional de fitas sem ordenamento a longa distância (unidade básica)



Material é considerado isotrópico a dimensões maiores que 100 nm



## 2.2.2 Matriz de Carbeto de Silício - SiC

⇒ Matriz obtida por

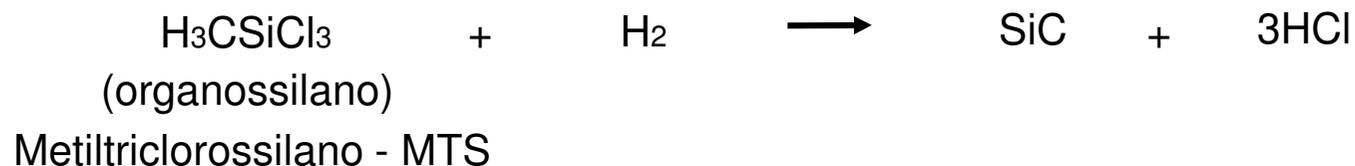
- Prensagem e sinterização de pós de SiC particulado
- Infiltração química em fase vapor (CVD)
- Pirólise polimérica de organossilanos

⇒ Propriedades físicas definidas pelo alto grau de ligação covalente Si-C



Difícil sinterização de compactados de pó de SiC ( $T \sim 1800 \text{ }^\circ\text{C}$ )  
(processamentos cerâmicos convencionais)

Processo alternativo por deposição de SiC por CVD ( $T \sim 1200 \text{ e } 1400 \text{ }^\circ\text{C}$ )



⇒ Devido a versatilidade de manuseio, polímeros pré-cerâmicos tem-se utilizado na obtenção de compósitos de

Matriz Cerâmica  
CMC

Matriz Metálica  
CMM

## 2.2.3 Matriz de Cerâmica Vítreas

→ Obtidas a partir de óxidos metálicos

**Tabela 2.10** Matrizes constituídas de cerâmicas vítreas (Prewo, 1987).

Cerâmica vítrea	Temperatura de uso (°C)	Módulo de elasticidade (GPa)
Li <sub>2</sub> O, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, SiO <sub>2</sub>	1000	90
Li <sub>2</sub> O, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, SiO <sub>2</sub> , Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1200	90
MgO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub>	1200	–
CaO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub>	1250	105

→ Interesse:

- Fluidez inerte desses materiais
- Obtidos em uma única etapa
- Baixo custo das materiais primas envolvidas

→ Propriedades:

- Baixo coeficiente de expansão térmica
- Baixo módulo elástico em relação a compósitos reforçados
- Controle de propriedades de interface-reforço

## 2.3 Matrizes Metálicas

➔ Materiais metálicos são usados em muitos casos como matrizes para compósitos devido a:

- Resistência à corrosão
- Alta resistência mecânica e tenacidade à fratura
- Boa condutividade térmica

➔ Destaque a matrizes metálicas mais usadas na manufatura de compósitos:

- |            |   |   |
|------------|---|---|
| • Alumínio | ➔ | Baixa massa específica                          |
| • Magnésio |   |   |
| • Titânio  | ➔ | Alta condutividade térmica                      |
| • Cobre    |   |   |
| • Aço      | ➔ | Alta resistência a tração, além de ser uma liga |

Compósitos de matriz metálica podem ser obtidos por adição de

- Fibras contínuas

- Particulados



Vantagem no custo de manufatura  
(processos convencionais)

- Fundição
- Metalurgia do pó

- Laminação
  - Forjamento
  - Extrusão
- (pós-processamento)

Dependendo do reforço o compósito pode apresentar

- maior temperatura de uso em relação a matriz
- maior estabilidade térmica
- melhor resistência ao desgaste

Ex.: Al / SiC (matriz / fibra)

Matrizes para compósitos são geralmente processadas por dois métodos

- Fusão do metal na forma de lâminas finas
- Mistura do metal (em pó) + reforço na forma de partícula + fusão



Usual para peças que possam ser pós-processadas por forjamento, laminação etc...

Há métodos que envolvem mistura de pó metálico e polimérico

- Geração de variada gama de compósitos particulados com matrizes metálicas de baixo ponto de fusão. (busca de homogeneidade)

Ex.: Matrizes de Al, Mg tem maior facilidade de processamento

Desvantagem:

- aplicações estruturais a altas temperaturas
- aplicações que envolvam fadiga térmica

( indicado aço e Ti  $T > 1000^{\circ}\text{C}$  )



# Matrizes para Compósitos

- Matrizes poliméricas
- Matrizes cerâmicas
- Matrizes carbonadas
- Matrizes metálicas



As matrizes em compósitos formam a fase contínua que tem como função:

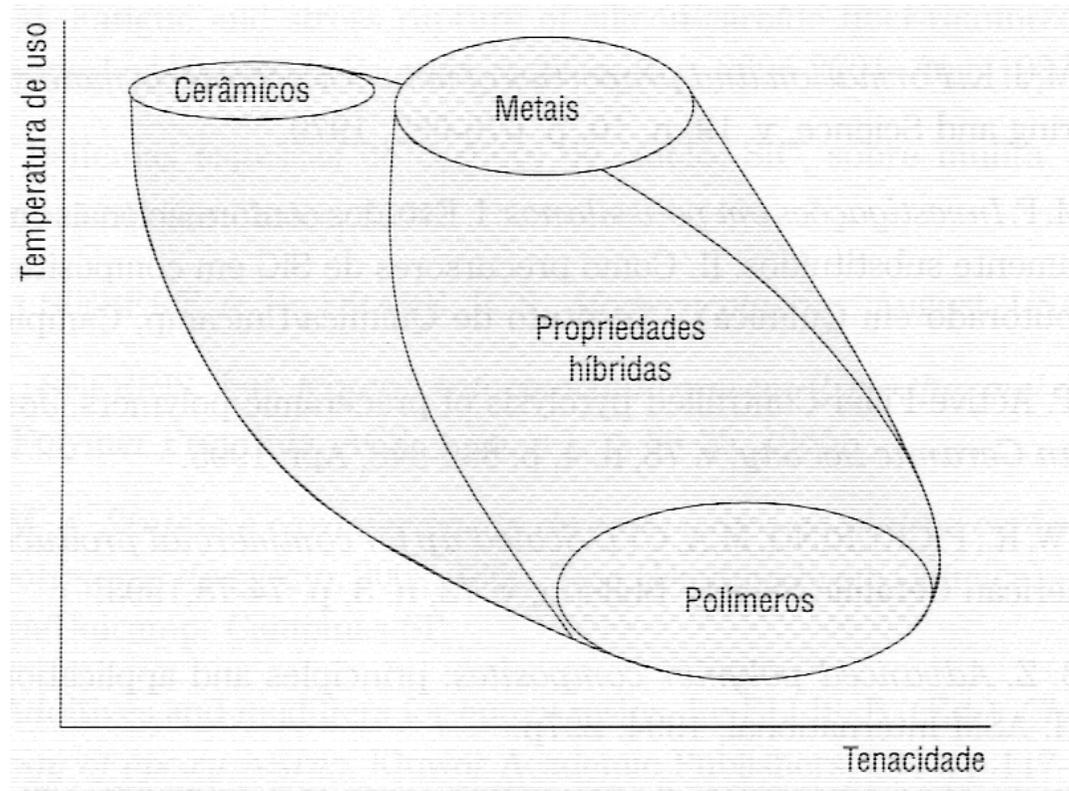


- aglutinar e distribuir reforços ou;
- transferir carregamentos ou tensões aplicadas ao compósitos entre estes reforços.

Escolha:

- depende da aplicação a que se destina
- do processo de fabricação

Representação da variedade combinação de formadores de matrizes que pode ser efetuada durante o processamento do compósito



1. Considerações gerais sobre compósitos e aplicações

2. Fase Matriz (aglutinante)

2.1 Matriz polimérica

2.2 Matriz cerâmica e carbonosa

2.3 Matriz metálica

3. Fase Reforço (enchimento)

3.1 Fibras

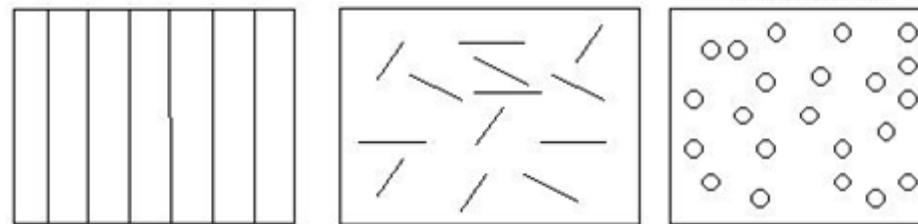
3.2 Cargas

3.3 Outras

## Reforços para Compósitos

⇒ resistência a carregamentos mecânicos

⇒ geralmente apresentados na forma de:



**Fibras contínuas**

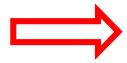
**Fibras curtas**

**Partículas**

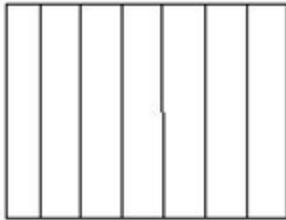
(obtidos por)

- fiação por fusão
- fiação úmido
- fiação a seco

- moagem



## Exemplos:

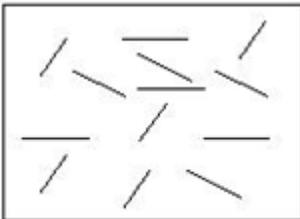


**Fibras contínuas**



- fibra de poliamida aromática
- fibra de carbono
- fibra de boro
- fibra de vidro
- fibra de carbeto de silício
- fibra de aço, alumínio e tungstênio

...

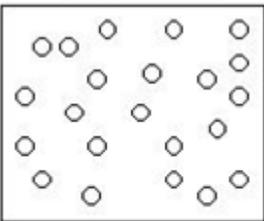


**Fibras curtas**



- fibras cerâmicas
- fibras naturais
- fibra de carbono
- fibra de aço, ferro e cobre
- fibras monocristalinas “*whiskers*”

...



**Partículas**



- negro de fumo
- carbonato de cálcio
- sílica
- grafite

...

# 3.1 Fibras

Propriedades gerais:

- Constituem em um meio efetivo de reforço  
(quanto mais finos apresentam menor número de defeitos)  
→ resistência do material tende a resistência teórica do mesmo
- Sem utilidade estrutural ao não serem aglutinadas por uma matriz
- De configuração geométrica importante

→ possuem alto valor na relação (área superficial) / (volume)

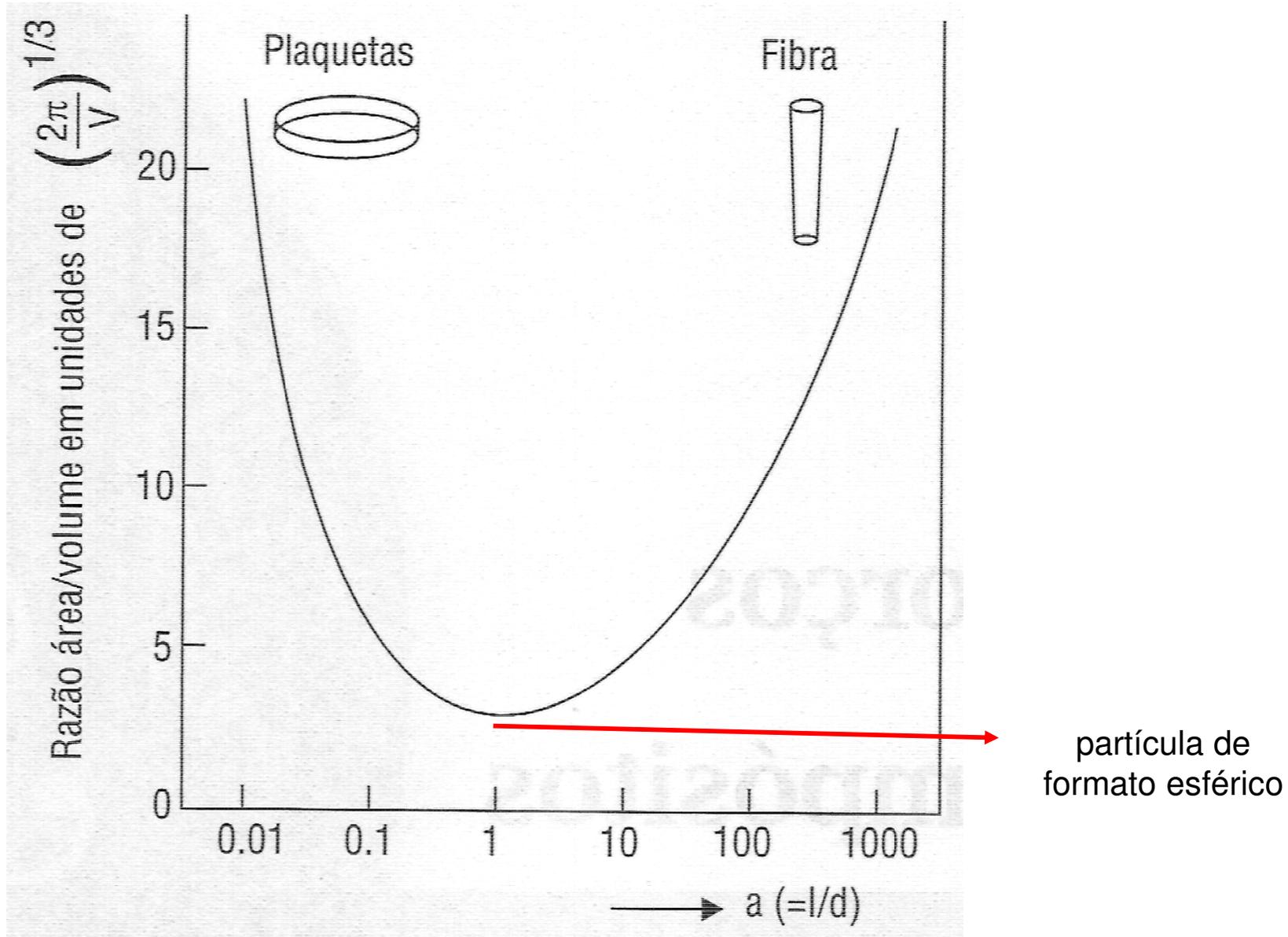
↓ ou seja



a **área interfacial** entre **fibra/matriz** é aumentada em função da relação **comprimento/diâmetro**

**melhor transferência de tensões por unidade de volume**

Razão **área superficial / volume** de uma partícula cilíndrica em função da razão de aspecto  
( l/d )



### 3.1.1 Fibras de Vidro

→ Mais utilizada em compósitos de matriz polimérica

- baixo custo
- alta resistência a tração
- grande inércia química



Figura 14.1 Fibras de vidro a serem usadas como reforço em um compósito de fibra de vidro. (Cortesia da Owens-Corning Fiberglas Corporation.)

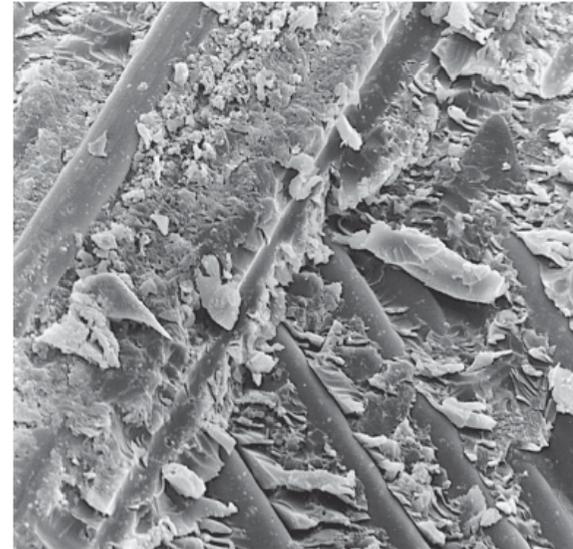


Figura 14.2 O reforço de fibra de vidro em um compósito de fibra de vidro é claramente visto em uma imagem de microscópio eletrônico de varredura de uma superfície de fratura. (Cortesia da Owens-Corning Fiberglas Corporation.)

→ Desvantagens

- baixo módulo de elasticidade
- auto-abrasividade
- baixa resistência a fadiga quando agregada a compósitos

→ Composições típicas usadas na manufatura de compósitos

Tabela 14.1 Composições de fibras de vidro de reforço

Designação	Característica	Composição <sup>a</sup> (% p)								
		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>
Vidro-A	Sílica de cal de soda comum	72	<1	10		14				
Vidro-AR	Resistente a bases alcalinas (para reforço de concreto)	61	<1	5	<1	14	3		7	10
Vidro-C	Resistente à corrosão química	65	4	13	3	8	2	5		
Vidro-E	Composição elétrica	54	15	17	5	<1	<1	8		
Vidro-S	Alta resistência e alto módulo	65	25		10					

Fonte: Dados de J. G. Mohr e W. P. Rowe, *Fiber Glass*, Nova York: Van Nostrand Reinhold Company, Inc., 1978.

<sup>a</sup> Aproximado e sem representar diversas impurezas.

Ex. Baixa concentração de Na é responsável pela baixa condutividade.

## → Produção de fibras

- fibras tanto na forma contínua quanto picotadas
- fibras isotrópicas possuindo mesmo módulo elástico tanto axial quanto transversal
- após a fiação as fibras são recobertas por uma solução aquosa de compostos geralmente orgânicos (encimagem).
  - material lubrificante (tecelagem)
  - agentes ligantes (melhorar adesão com a matriz). Ex. organossilanos

## → Algumas matrizes poliméricas para fibras de vidro

Tabela 14.2 Materiais de matriz polimérica para fibra de vidro

Polímero <sup>a</sup>	Características e aplicações
<b>Termofixo</b>	
Epóxis	Alta resistência (para recipientes feitos por bobinagem)
Poliésteres	Para estruturas gerais (normalmente, reforço de tecido)
Fenólicos	Aplicações em altas temperaturas
Silicones	Aplicações elétricas (por exemplo, placas de circuito impresso)
<b>Termoplástico</b>	
Náilon 66	Menos comuns, ductilidade especialmente boa
Polycarbonato	
Poliestireno	

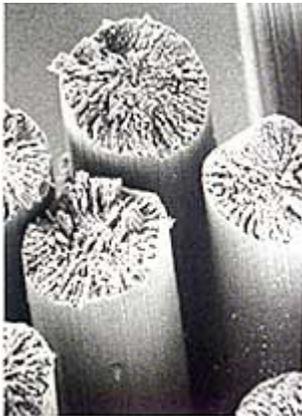
Fonte: Dados de L. J. Broutman e R. H. Krock (eds.), *Modern Composite Materials*, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Co., Inc., 1967, Capítulo 13.

<sup>a</sup> Veja a química nas tabelas 13.1 e 13.2.

### 3.1.2 Fibras de Carbono

→ Material de fibra de alto desempenho, sendo o material de reforço mais utilizado com matrizes poliméricas.

- fibra que possui os maiores módulos específicos e maiores resistências específicas dentre todos os materiais de reforço como fibra.
- mantém seus elevados módulos de tração e resistência em temperaturas elevadas.
- em temperatura ambiente não é afetado pela umidade, uma variedade de solventes, ácidos e bases.
- processo de fabricação de boa relação custo-benefício



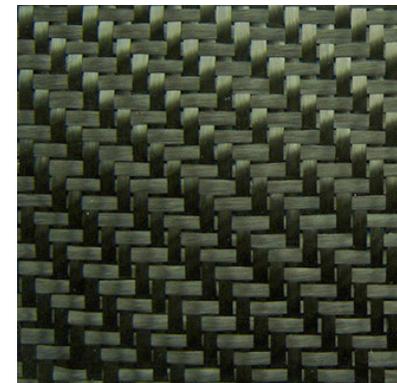
X1,500



X3,000



X20,000



## → Produção

- Pirólise controlada dos precursores orgânicos em forma de fibras
- Processo envolve o tratamento térmico do precursor removendo oxigênio, nitrogênio e hidrogênio
- Propriedades mecânicas são melhoradas pelo aumento da cristalinidade e orientação, e pela redução de defeitos na fibra.



(ideia - a partir de um precursor altamente orientado manter a orientação inicial durante o processo)

## → Classificação das fibras de carbono vai depender do precursor

- *poliacrilonitrila (PAN)*
- *rayon*
- *piche (mineral e vegetal)*



Fibras de carbono derivadas de *rayon* apresentam propriedades mecânicas inferiores às obtidas com outros precursores (baixo custo)

## → Tratamento superficial em fibras de Carbono

- Etapa importante no processo de fabricação de fibras de carbono com a função de melhorar a adesão fibra/matriz
- Em geral são processos proprietários (segredo industrial)

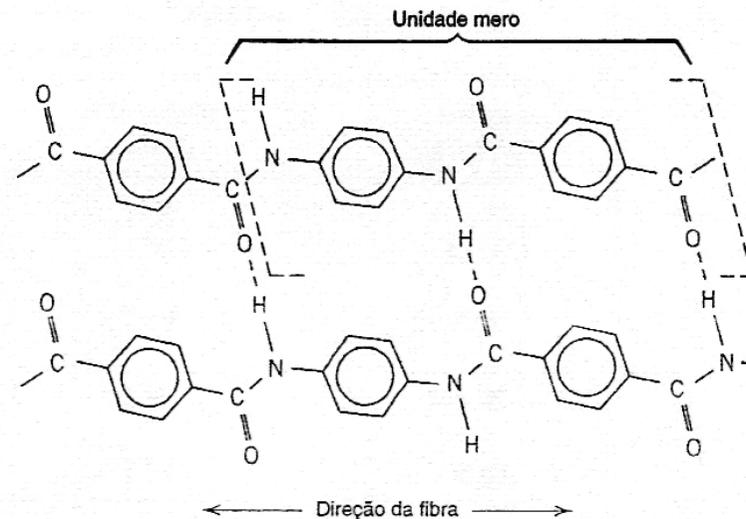
### 3.1.3 Fibras Poliméricas

→ Fibras poliméricas tem ganho importância como reforço de compósitos

- fibra **aramida** (Kevlar, Nomex, ...)
- fibra **polietileno de ultra-alto peso molecular**

→ Produção de fibras resistentes e rígidas devem ter suas cadeias poliméricas orientadas ao longo do eixo da fibra

- garante a existência de fortes ligações covalentes interatômicas ao longo da cadeia



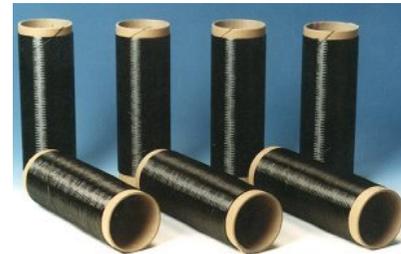
### 3.1.4 Fibras Cerâmicas

→ Uso principal em aplicações a altas temperaturas ( $\sim 1.000\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

- fibras de carbeto de silício (SiC)
- fibras de Tyranno (Si-Ti-C-O)
- fibras de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )
- fibras de boro



carbon-fiber-reinforced  
silicon carbide (C/SiC)



Tyranno

→ Produção envolve basicamente dois processos

- deposição química em fase gasosa (CVD)
- fiação polimérica

### 3.1.5 Fibras Naturais

→ Fibra natural em geral tem como propósito principal atuar como:

- uma carga de material reciclável,
- material de baixo custo, não tóxico,
- material de baixa densidade,
- facilidade de obtenção e manuseio,
- baixa abrasividade,
- biodegradáveis.

→ mais do que atuar como reforço mecânico

→ Alguns desvantagens:

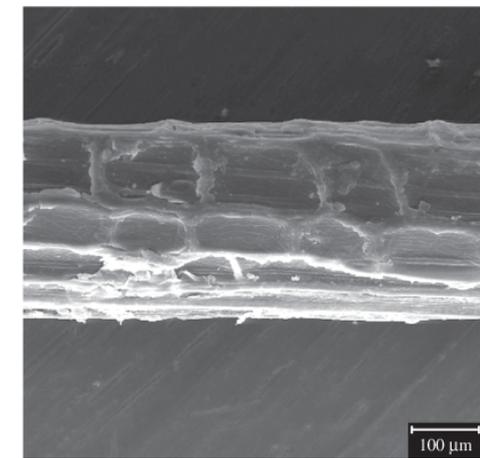
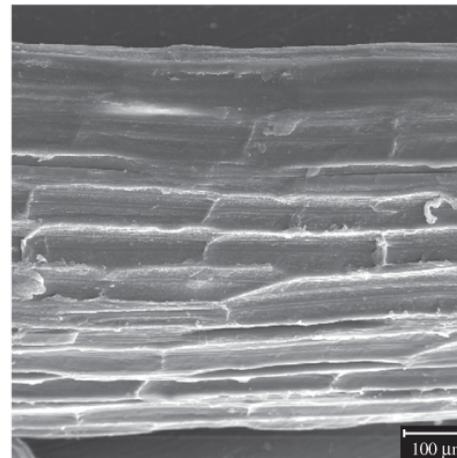
- alta absorção de umidade,
- variação elevada em suas propriedades (fibras de mesma espécie)
- baixa resistência a microorganismos
- baixa estabilidade térmica (<200 °C)

- Material que se destaca é o Asbestos (fibra mineral) por apresentar valores elevados de resistência e rigidez



- Outro material que se destaca como reforço em compósitos de matriz polimérica é o sisal

- ↳ folhas são estruturas tipo sanduíche podendo extrair de 700 a 1400 fibras por folha. (0,5 a 1m de comprimento e diâmetro variando de 10 a 30  $\mu\text{m}$ )



- Variáveis de processamento alteram significativamente as propriedades de compósitos obtidos com fibras vegetais.
- Perdem se comparadas a fibras comerciais como vidro, carbono, aramida. Mas em relação a deformações à ruptura apresentam certa vantagem

- Fibras de basalto

- usado em tecidos a prova de fogo
- empregado em tecnologia aeroespacial e automobilística
- diâmetros de 9, 13, 17 e 22 mm
- ponto de fusão 1.450 °C



## 3.2 Cargas



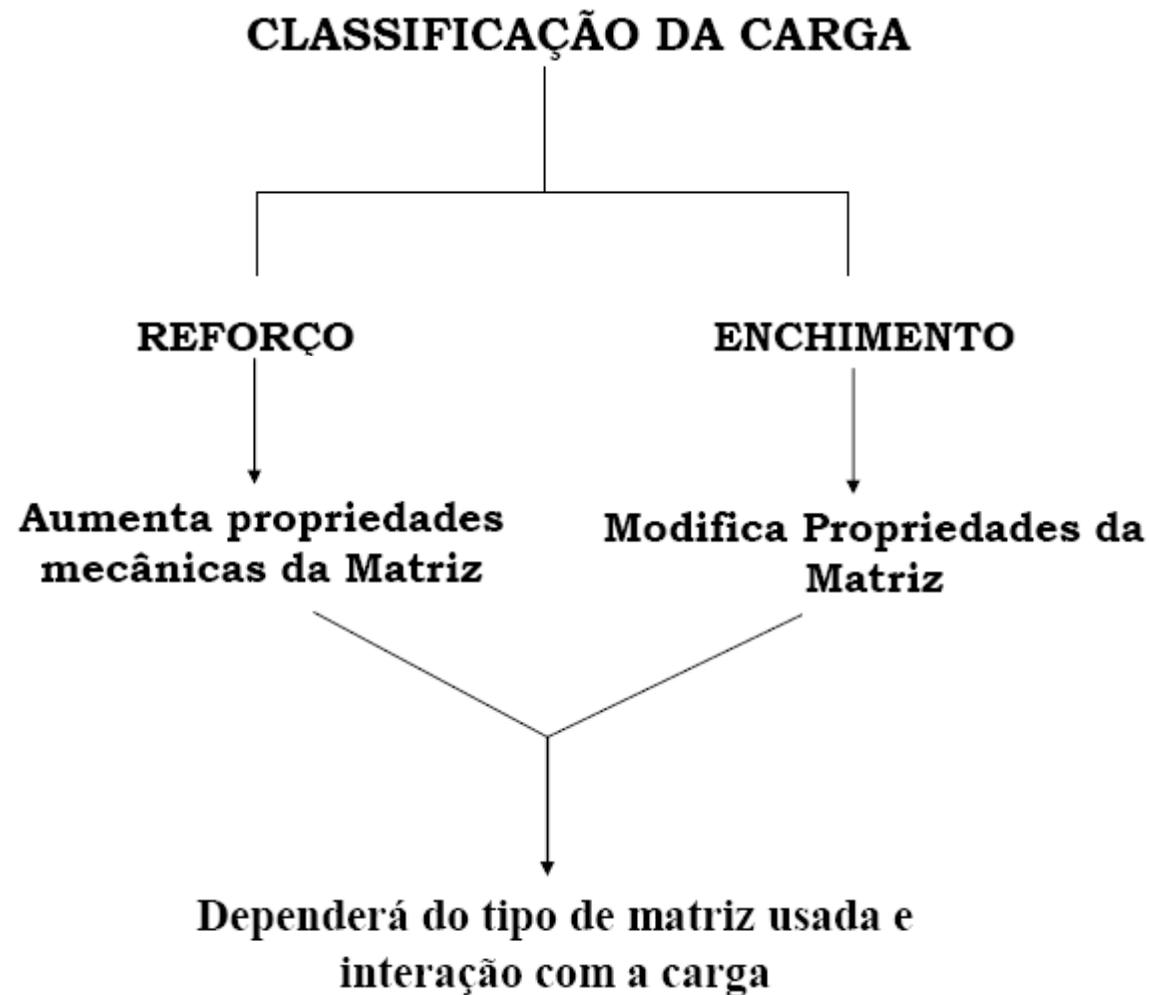
Materiais para reforço na forma de partículas é significativamente maior que na forma de fibras

- Produção mais simples (moagem)
- Processos envolvendo precipitação em solução, atomização ...
- Propriedades mecânicas e térmicas de compósitos são influenciadas pelo tamanho, dispersão, fração volumétrica das partículas na matriz.



Exemplos de enchimento/reforço:

- microesferas de vidro sólidas e ocas
- cargas condutoras, semi-condutoras, metálicas
- negro de fumo
- carbonatos
- ....



- Ex.: negro de fumo
  - matriz termoplástica e termofixa atua como enchimento (redução de custo)
  - matriz elastomérica atua como reforço

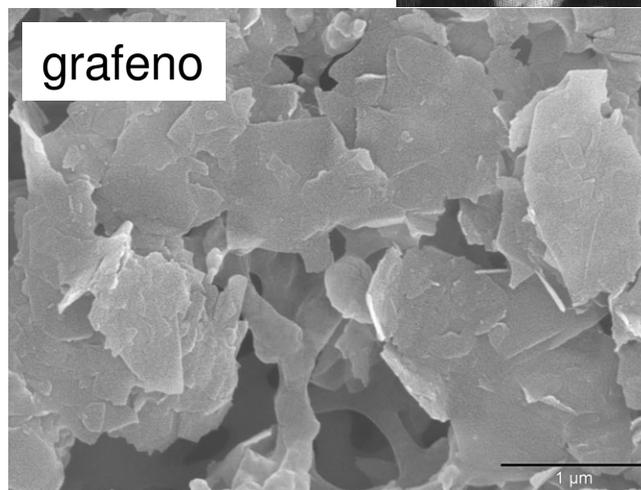
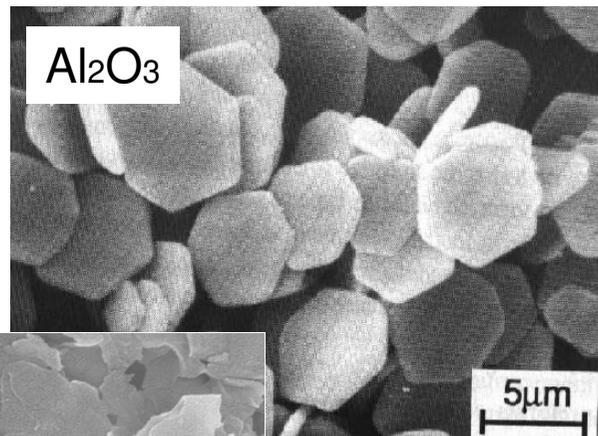
→ Principais cargas particuladas usadas em polímeros



## 3.3 Outras

### plaquetas

- também considerada como carga/reforço com razão de aspecto diferenciada.



- hidroxiapatita
- óxido de alumínio
- grafeno
- carbeto de silício

- melhorias em condutividade térmica/elétrica  
- propriedades mecânicas inferiores aos *whiskers*

## Uísqueres (*whiskers*)

- cristais monocristalinos na forma de fibras de pequenas proporções com uma razão comprimento-diâmetro muito grande (1 a 3  $\mu\text{m}$  diâmetro e 50 a 200  $\mu\text{m}$  comprimento)
- elevado grau de perfeição cristalina e virtualmente isentos de defeitos  
= resistência excepcionalmente elevadas (próximo ao valor teórico).
- de pouca utilização devido ao alto custo
- Grafite, Carbeto de Silício (SiC), Nitreto de Silício (SiN), Óxido de Alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

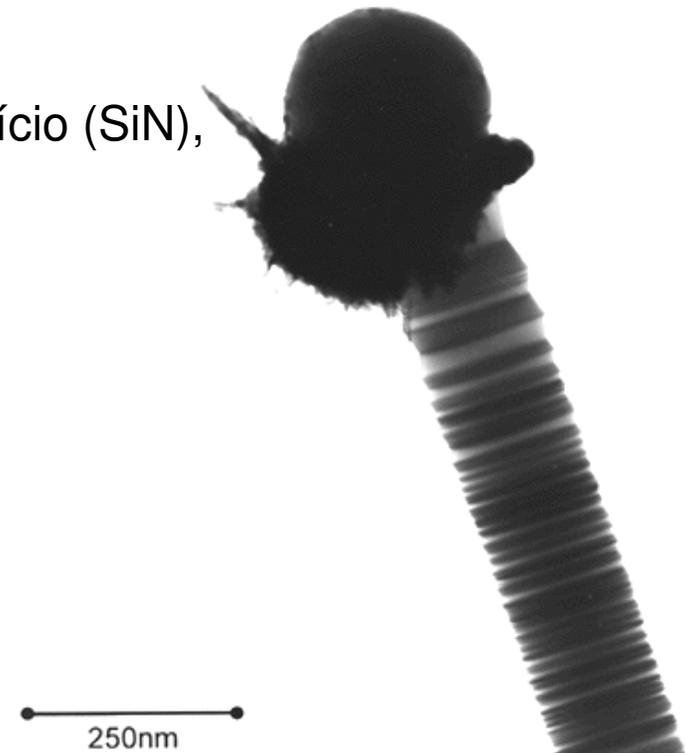
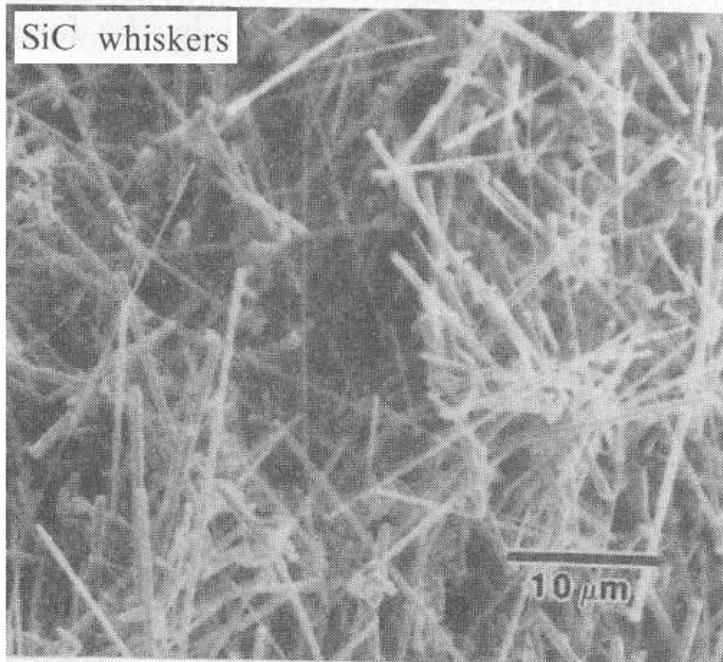


Figura 2: Micrografia de MET de um whisker desenvolvido pelo processo VLS.  
[Figure 2: TEM micrograph showing a whisker grown by VLS process].

1. Considerações gerais sobre compósitos e aplicações

2. Fase Matriz (aglutinante)

2.1 Matriz polimérica

2.2 Matriz cerâmica e carbonosa

2.3 Matriz metálica

3. Fase Reforço (enchimento)

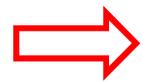
3.1 Fibras

3.2 Cargas

3.3 Outras

4. Fechamento

# Materiais Compósitos:



- São materiais com propriedades diferenciadas que não podem ser atendidas por ligas metálicas, cerâmicas e poliméricas convencionais.

Ex.: (melhoria resistência mecânica e tenacidade)

- São estruturas ou componentes fabricados a partir de combinações (mistura macroscópica) de dois ou mais constituintes (fases) que apresentam morfologias distintas.



matriz contínua, que envolve fibras e ou partículas dispersas formando uma mistura.

## Características desejadas entre fases:

- não sejam miscíveis;
- compatíveis quimicamente;
- separadas por uma interface distinta;
- propriedades mecânicas complementares;
- propriedades finais do compósito como função (mais ou menos linear) das propriedades dos constituintes.

## Propriedades finais são funções da:

- quantidade relativa das fases constituintes
- geometria da fase dispersa
  - forma, tamanho,
  - distribuição e orientação das partículas
  - concentração

Fase Matriz  
(aglutinante)

- proteção da fase reforço
- manutenção do reforço coeso em configuração estável

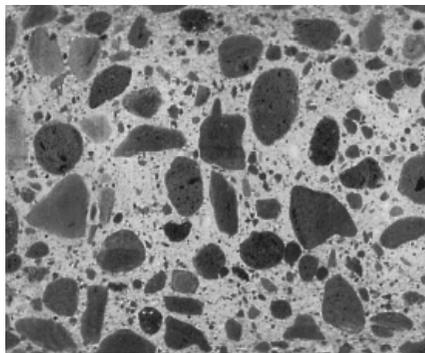
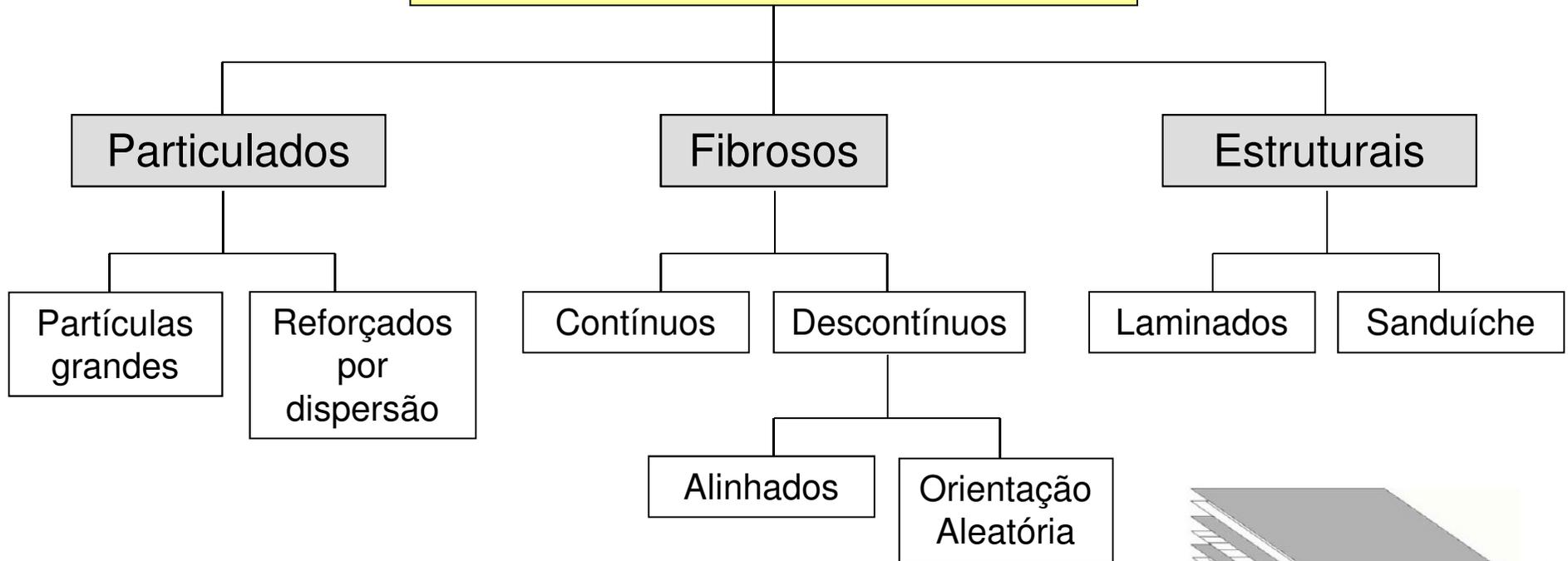
- polimérica
- metálica
- cerâmica
- carbonosa

Fase Reforço  
(enchimento)

- responsável pela resistência a carregamentos mecânicos

- polimérica
  - metálica
  - cerâmica
  - carbonosa
  - natural
- na forma fibrosa
  - na forma particulada
  - na forma de plaquetas
  - na forma de whiskers

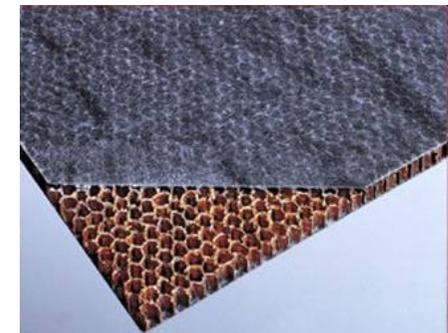
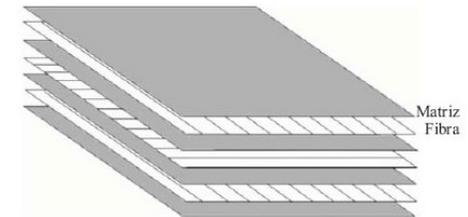
# Materiais Compósitos



concreto



fibra de vidro



sanduíche

Particulados

→ os materiais são equiaxiais; podem ter forma esférica.

Fibrosos

→ fibras contínuas ou descontínuas, ou *wiskers*.

Estruturais

→ camadas alternadas de materiais diferentes como metais, vidros, tecidos ou papéis impregnados com polímeros.

Reforço contínuo

Se estende de forma ininterrupta, pelo menos em uma direção em através de todo o compósito

Fibras contínuas

**Reforços cilíndricos** de diâmetro entre **3 e 30  $\mu\text{m}$** , não apresentando extremidades livres ao longo de seu comprimento (fiados ou em fibras individuais)

Monofilamentos

**Semelhantes às contínuas**, com diâmetros **superiores a 100  $\mu\text{m}$**  (fibras individuais)

## Reforço descontínuo

Constituinte não percolante de um compósito, assumindo a forma de um conjunto de elementos discretos embebidos na matriz

## Fibras curtas

Reforços **cilíndricos descontínuos** com diâmetro **superior a 1  $\mu\text{m}$**

## Whiskers

**Monocristais alongados** com diâmetro **inferior a 1  $\mu\text{m}$**

## Partículas

Reforços praticamente **equiaxiais**, podendo ser mono ou policristalinas (**esféricas, angulares, formato de placas**) dimensões **superiores a 1  $\mu\text{m}$**

## Dispersóides

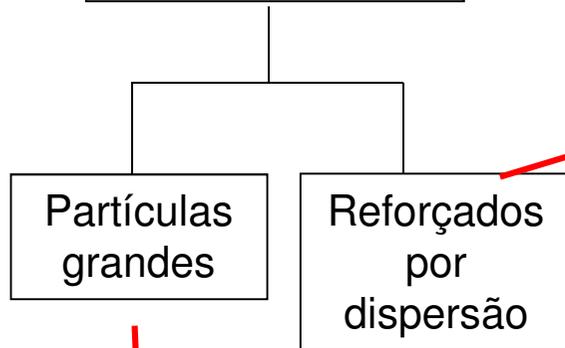
Semelhantes às **partículas**, de dimensões **inferiores a 1  $\mu\text{m}$**

## Plaquetas

**Reforços planares** de espessura **inferiores a 1  $\mu\text{m}$**

## Particulados

*Podem ser re-processados*



Pequenas partículas (diâmetros 0,01 a 0,1  $\mu\text{m}$ )

- Dificultam o movimento de defeitos no material, a deformação plástica é restringida e a resistência à tração e a dureza são melhorados
- Ex. Metais ou ligas metálicas endurecidas por meio da dispersão uniforme de uma porcentagem volumétrica de partículas finas de um material inerte e muito duro

(**ThO<sub>2</sub>** + ligas de Ni = aumenta a resistência a alta T)

Partículas grandes (diâmetros  $> 1 \mu\text{m}$ )

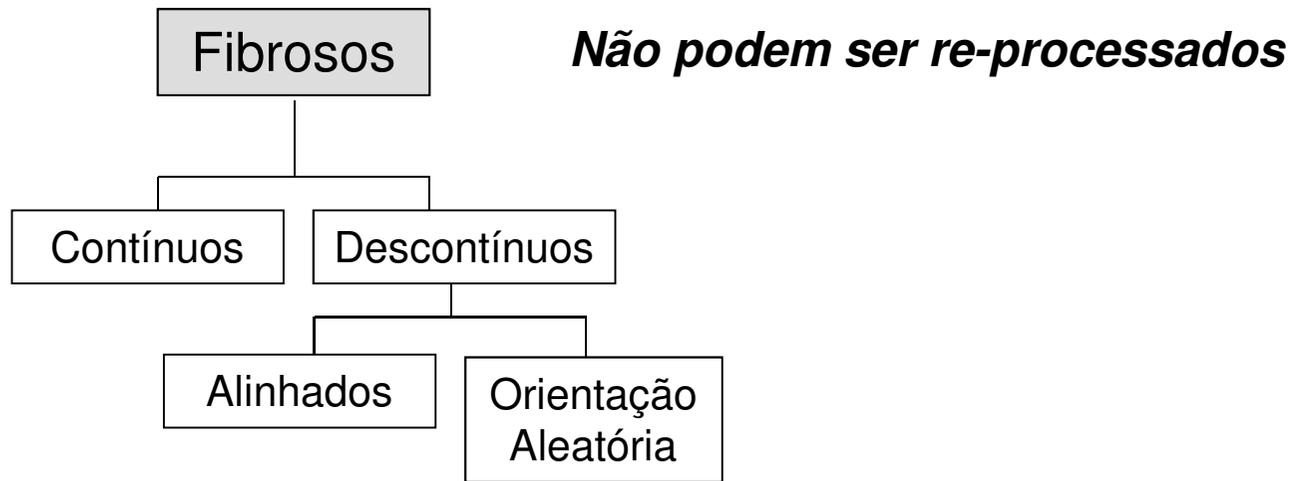
- Interações entre as partículas e a matriz não são ao nível atômico ou molecular, ou seja, as solicitações mecânicas são distribuídas pela matriz e pelo reforço.
- A resistência da interface partícula/matriz é muito importante



**WC+Co:** ferramentas de corte para aços endurecidos; ambas as fases são refratárias = suporta temperaturas elevadas

**negro-fumo:** partículas pequenas e esféricas de carbono adicionadas à borracha vulcanizada. Melhora a resistência à tração, a tenacidade, a resistência à abrasão

**Concreto:** agregado de partículas ligadas umas às outras através de um meio de ligação, o cimento. **Portland** = areia, brita e cimento.



Propriedades relevantes:

- alta rigidez e/ou resistência em relação ao seu peso
- comprimento da fibra (L)

→ há um valor crítico (**L<sub>c</sub>**) que permite uma melhora efetiva da propriedade mecânica do compósito (+ diâmetro e + a ligação fibra matriz).

Ex.: fibra de vidro ou carbono **L<sub>c</sub>** ~ 1mm

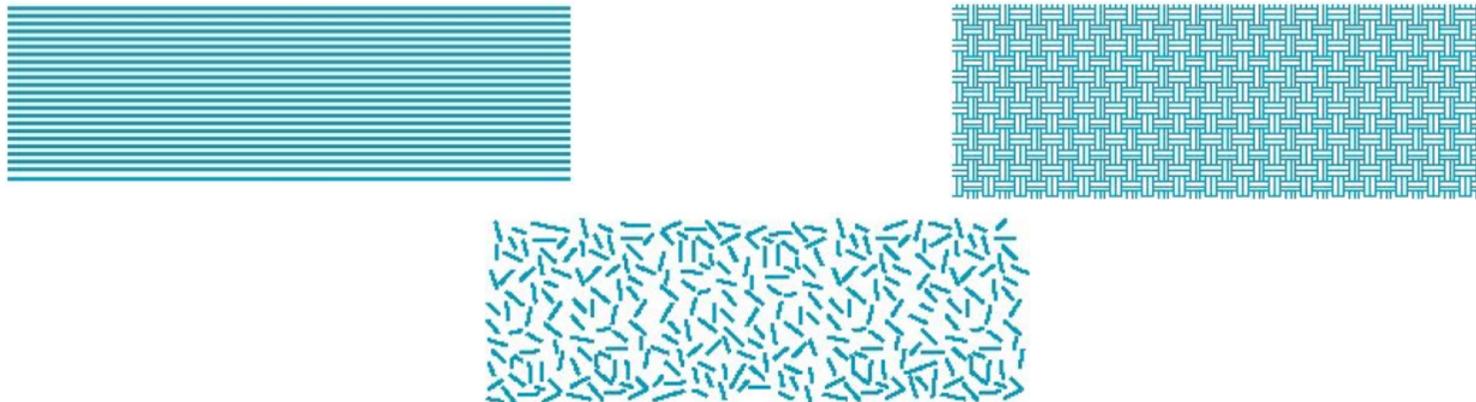
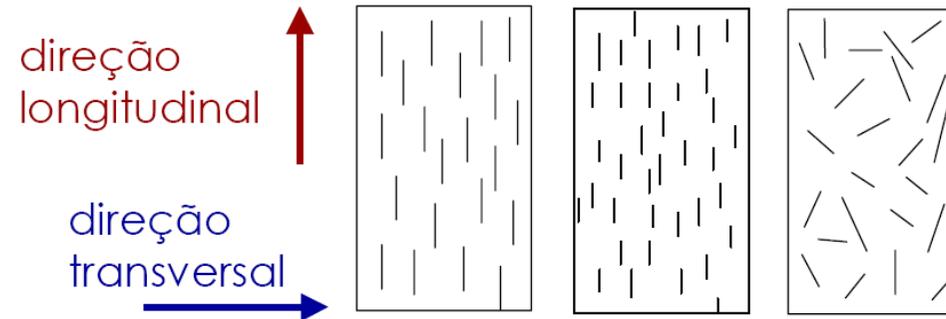
se  $L \gg L_c$ : fibras contínuas

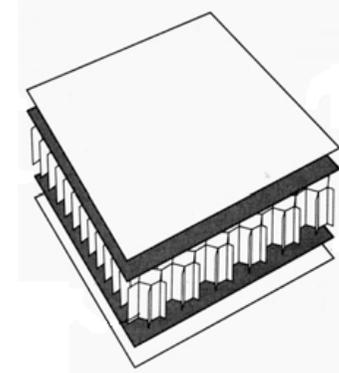
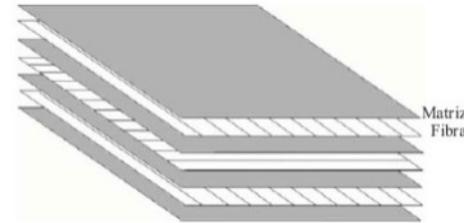
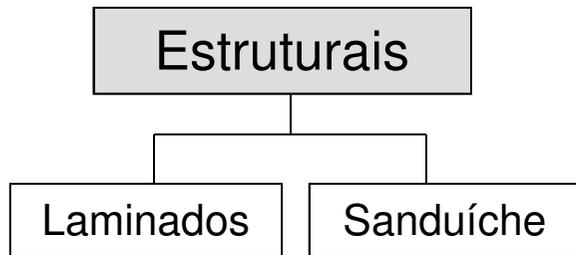
se  $L < L_c$ : fibras descontínuas ou curtas (pequeno reforço!)

- Orientação e Concentração da fibra

- influência significativa sobre as propriedades dos compósitos apresentando propriedades anisotrópicas

- resistência e reforço máximo na direção do alinhamento (longitudinal) e inexistente na direção perpendicular (transversal)





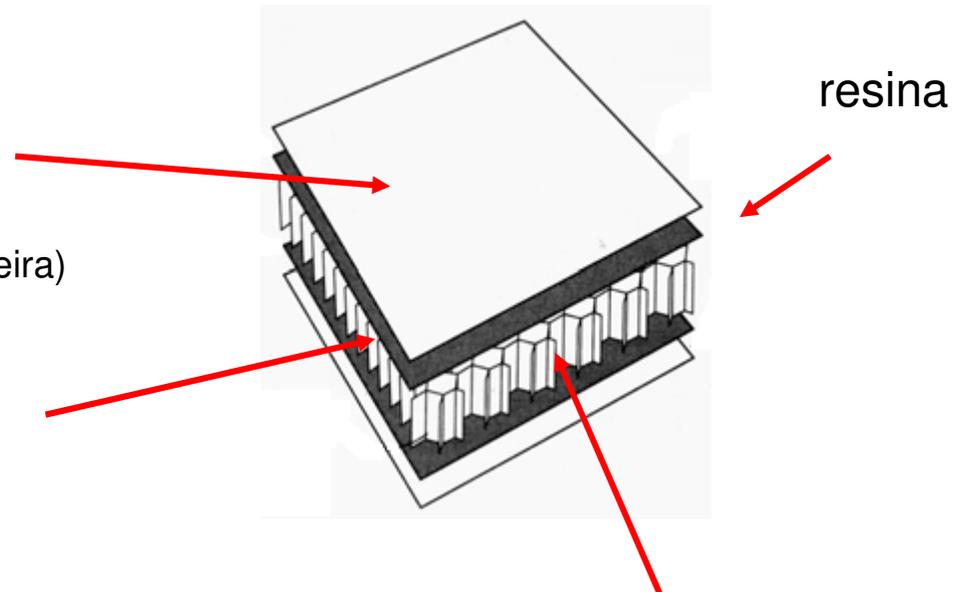
- materiais homogêneos + materiais compósitos
- propriedades dependem além dos constituintes, do projeto geométrico
- painéis em sanduíche

### folhas externas resistentes

- ligas de alumínio
- polímeros reforçados (fibras Ti, aço, madeira)

### tecido com fibras resistentes

- fibra de carbono ou aramida



### Aplicações:

- telhados, pisos, paredes,
- aviação: asas, fuselagem, etc.

### recheio de material menos denso

- polímero em espuma
- borrachas
- formato tipo colméia

Matriz → Reforço ↓	Metal	Cerâmico	Polímero
<b>Metal</b>	combinação de metais imiscíveis	"Cermets"	elastômero + fibra, material de fricção
<b>Cerâmico</b>	<i>Cermets</i> , TiC, TiCN, Carbonetos cementados (p/ ferramentas)  metais reforçados por fibras	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> reforçada por SiC  ferramentas p/ corte BN cúbico	resinas reforçadas por fibra de vidro
<b>Polímero</b>			Matriz epoxídica com reforço de fibras de <i>kevlar</i>

↓

**Metal Matrix Composites**

↓

**Ceramic Matrix Composites**

↓

**Polymer Matrix Composites**

# Compósito com Matrizes Poliméricas (PMC)

## Fibras

- de materiais policristalinos ou amorfos
- diâmetros pequenos
- polímeros ou cerâmicas
- aramidas poliméricas, vidro, carbono, boro,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , SiC

## *Aplicações:*

### Fibra de Carbono

- equipamentos esportivos e de recreação
- componentes estruturais de aeronaves (asas, fuselagem, estabilizadores, etc)

### Fibra de Aramida

- coletes a prova de bala, artigos esportivos, pneus, cordas,
- carcaças de mísseis, substituto do amianto em freios automotivos,
- revestimento de embreagens, etc.

## Filamentos / arames

- diâmetros grandes
- aço, molibdênio, tungstênio
- reforço radial de aço nos pneus de automóveis, carcaças de motores a jato, mangueiras de alta pressão

## Compósitos com Matrizes Cerâmicas (CMC)

- a inclusão de partículas, fibras ou whiskers melhora:
  - a resistência à fratura
  - a resistência à choques térmicos
  - a fluência a alta temperatura

### *Aplicações:*

ferramentas de corte para usinagem de ligas metálicas duras

# Compósitos com Matrizes Metálicas (MMC)

- Podem ser utilizados em temperaturas de serviço mais elevadas do que seus metais-bases análogos.
- Melhora da resistência à abrasão e à fluência; condutividade térmica, estabilidade dimensional.

## Vantagens em relação aos PMC:

- temperaturas operacionais maiores
- não são inflamáveis
- resistência contra a degradação a fluidos orgânicos

## Desvantagens em relação aos CMP

- custo muito maior

## *Aplicações:*

liga de alumínio reforçada com fibra de alumina + fibra de carbono (componentes de motores de automóveis)

fibras de boro em uma liga de alumínio (ônibus espacial)

fibras de grafite em uma liga de alumínio (satélites)

# Previsão das propriedades:

Propriedades previsíveis:

- Densidade

$$\rho_{COMP.} = V_f \rho_f + V_m \rho_m$$

- Módulo de elasticidade

$$E_L = V_f E_f + V_m E_m$$

- Condutividade térmica e elétrica

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



A resistência mecânica é fortemente dependente da ligação entre fibra e matriz, sendo por isso, difícil de prever teoricamente!

# Controle das propriedades:

Razão de aspecto das fibras:

$$L/d$$

Quanto maior razão de aspecto, maior será a resistência da fibra e, conseqüentemente, maior será a resistência do compósito onde está inserida.

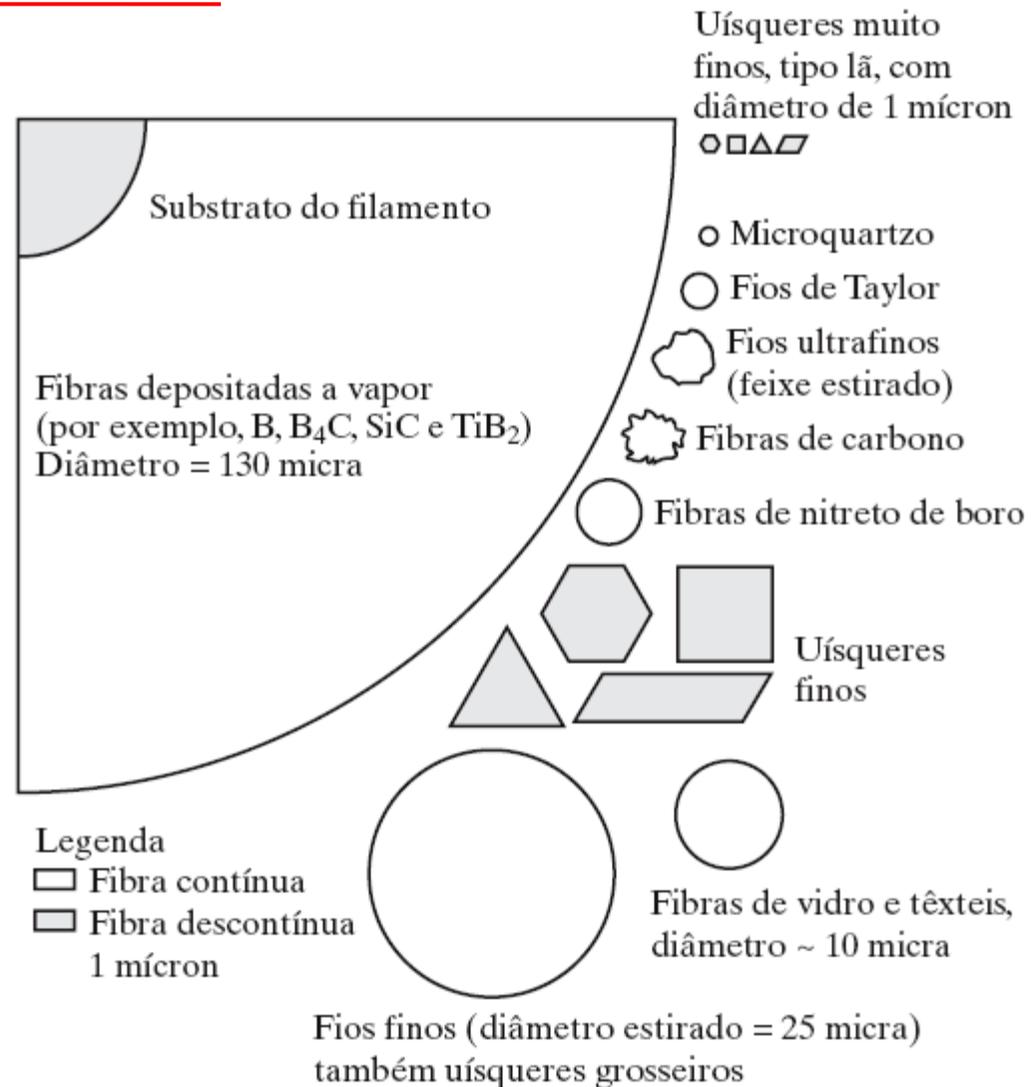
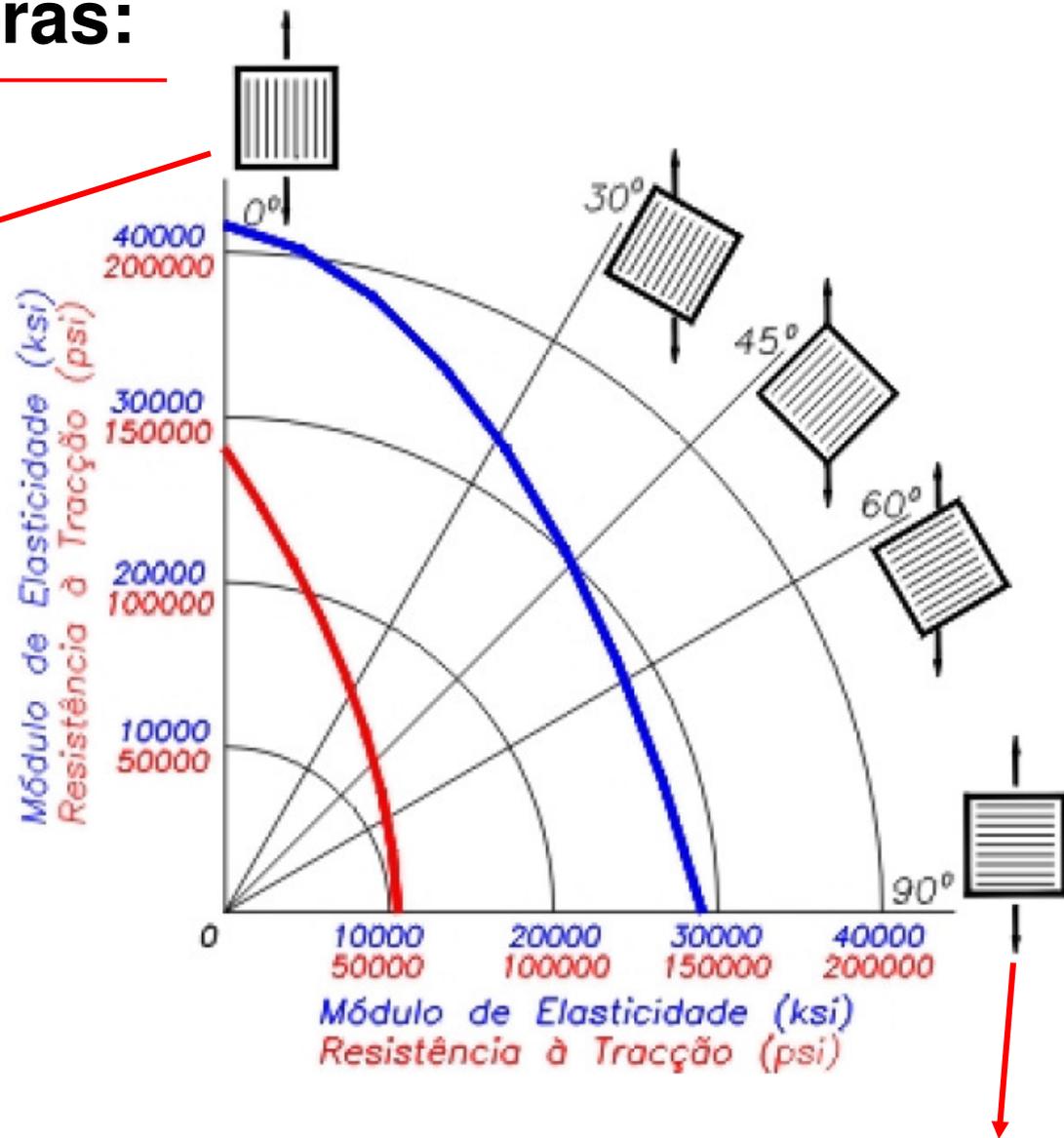


Figura 14.4 Áreas relativas da seção transversal e formas de uma grande variedade de fibras de reforço. (De L. J. Broutman e R. H. Krock (eds.), *Modern Composite Materials*, Massachusetts:

# Orientação das Fibras:

- A resistência será máxima quando as fibras estão orientadas com o esforço



- Resistência mínima na direção perpendicular.

## **Propriedade específicas da Matriz:**

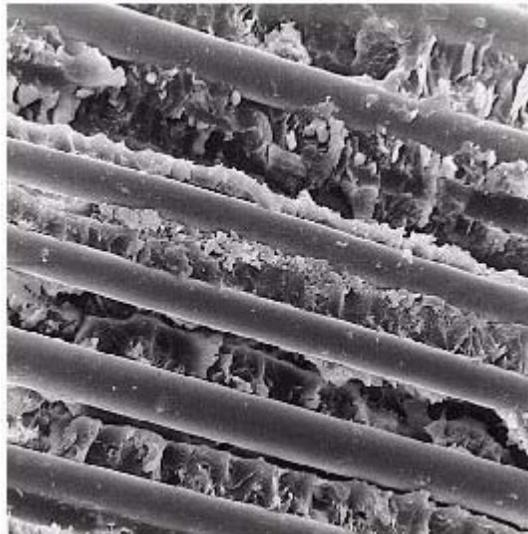
- Matrizes poliméricas têm, em geral, baixa resistência e baixo ponto de fusão;
- Matrizes metálicas têm maior resistência e maior ponto de fusão, mas são mais pesadas;
- Podem ser usadas matrizes cerâmicas para resistência e temperatura extremamente elevadas, perdendo-se tenacidade.

## **Ligação Matriz X Fibra (interface):**

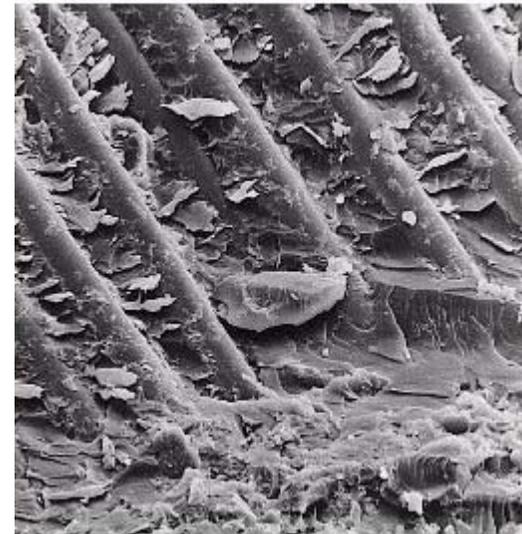
- Caso não haja boa aderência da matriz à fibra, a distribuição de esforços não será eficiente;
- O coeficiente de expansão térmica entre fibra e matriz deve ser muito semelhante (valores próximos, de mesma ordem de grandeza).
- Revestimento aumentam a aderência;

## Fração, em volume, de Fibras

- Quanto maior for este valor, maior será a resistência do compósito, até um valor limite de 80%, a partir do qual deixa de haver a “molhabilidade” total das fibras pela matriz (presença maior de vazios).



**Fraca aderência entre  
as fibras e a matriz**



**Boa aderência entre  
fibras e matriz**