

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 – Fe_3C)

↳ 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))

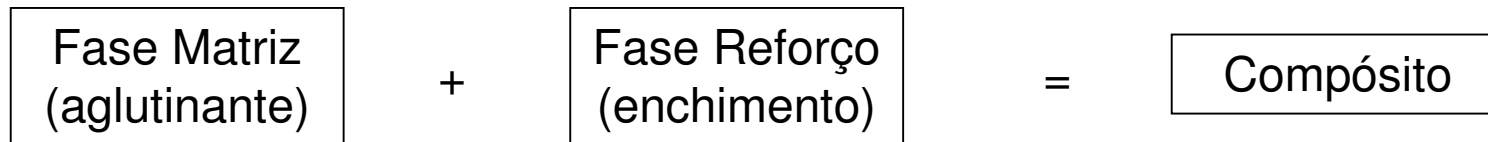
- ...

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.



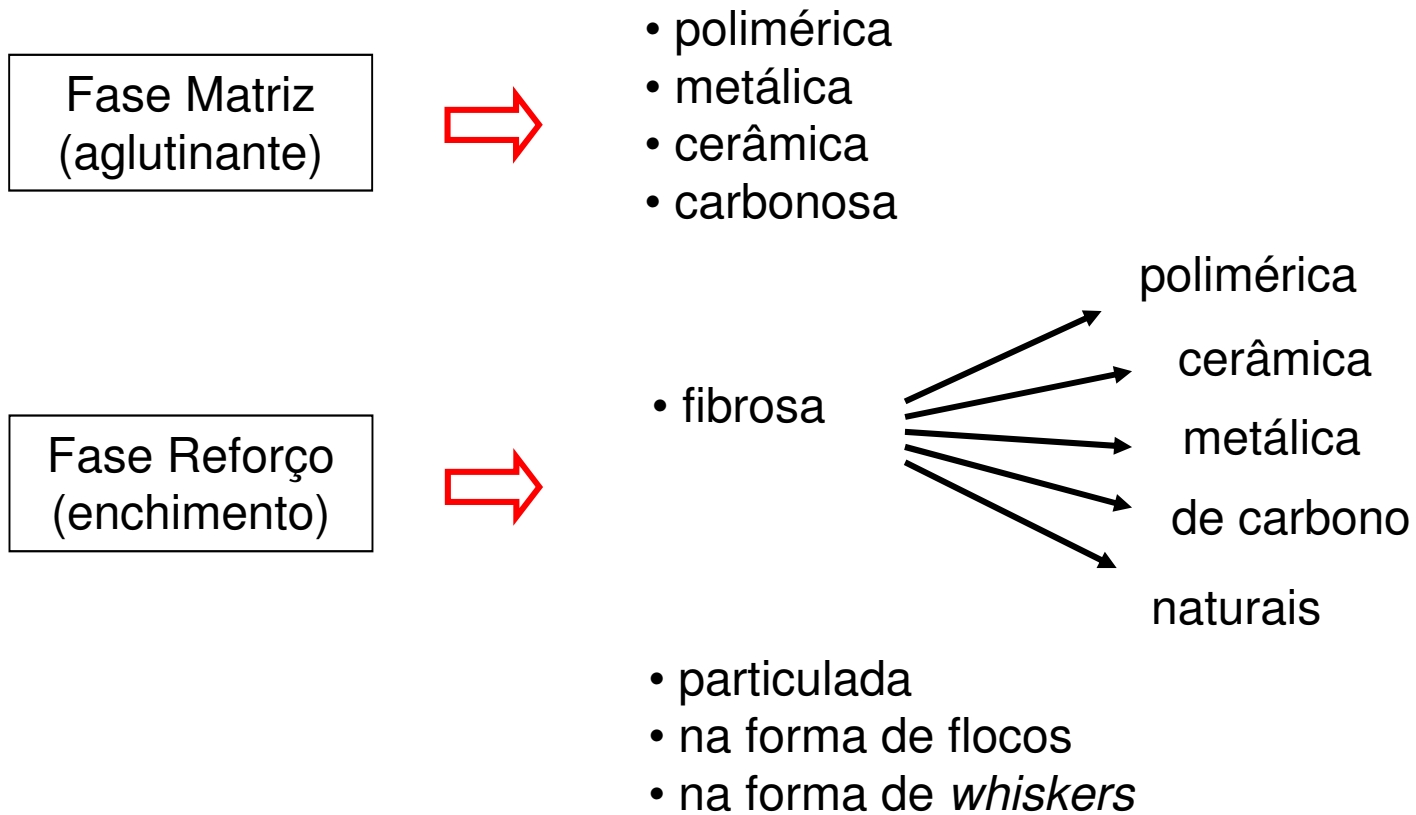
São **constituídos** de uma **matriz contínua**, que envolve **fibras** e ou **partículas** que formam a mistura.



- proteger fibras
- mantêm reforço coeso em configuração estável

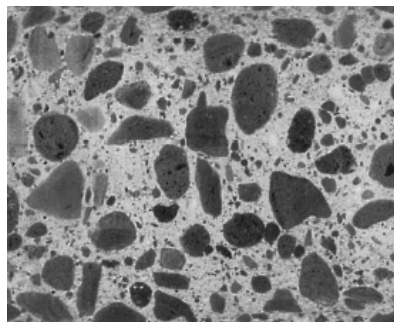
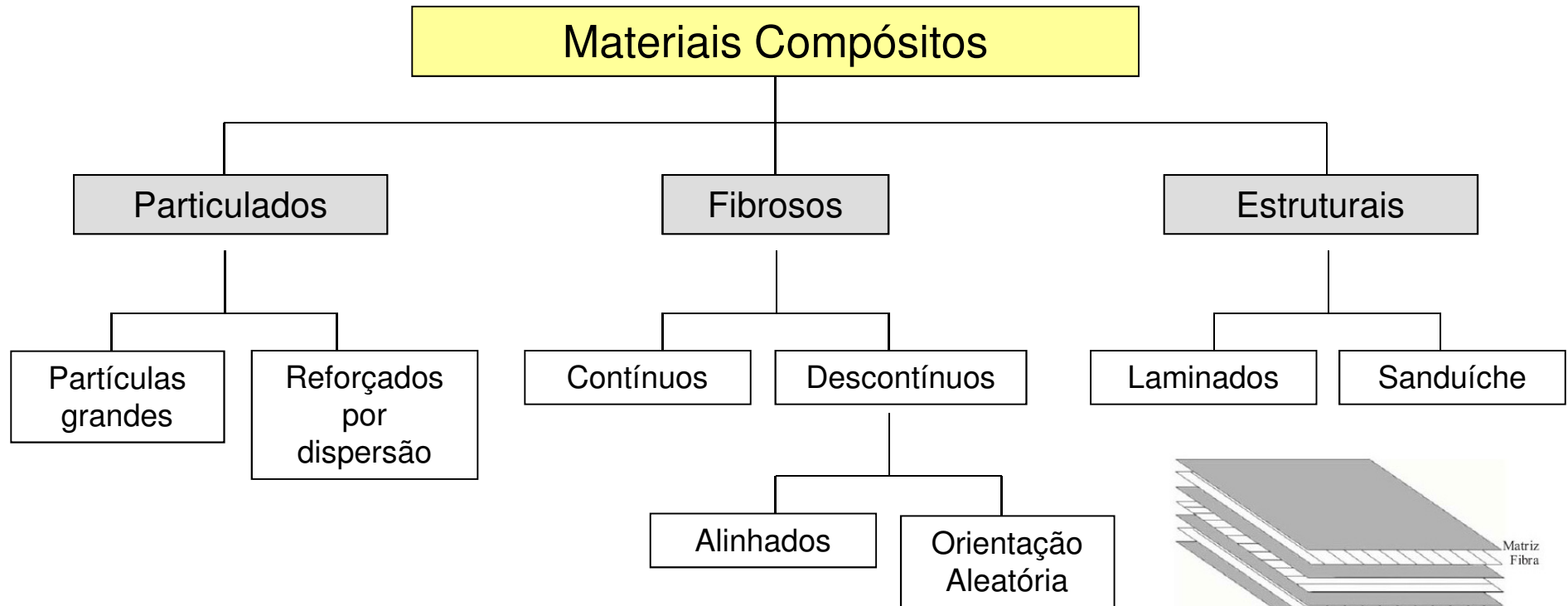


- resistência a carregamentos mecânicos

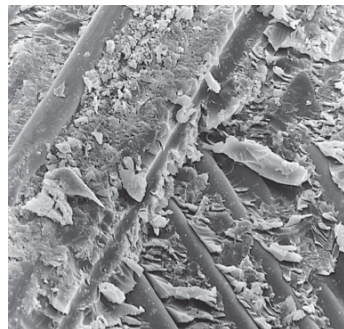


A combinação destes materiais podem elevar os índices de resistência e rigidez por unidade de massa!

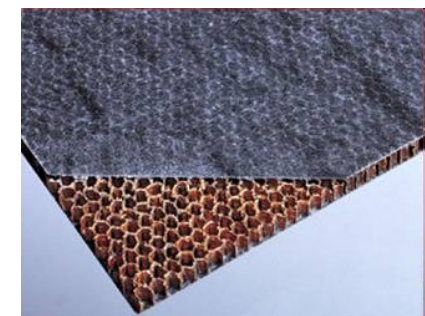
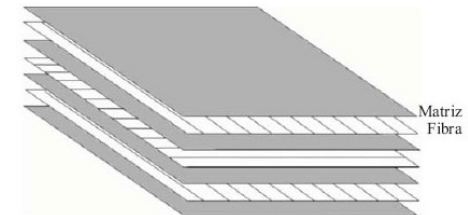
Classificação mais comum dos materiais compósitos:



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

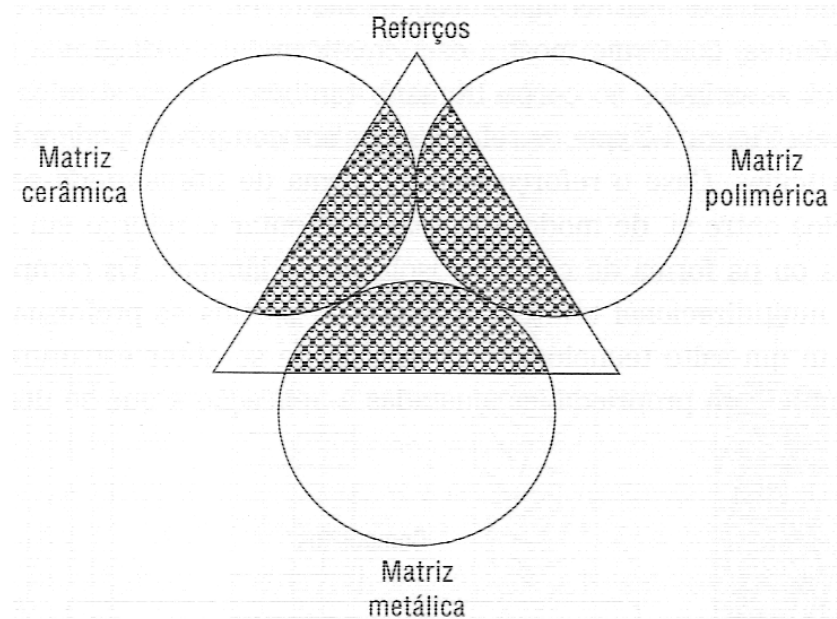
→ **Previsão e controle de propriedades específicas!**



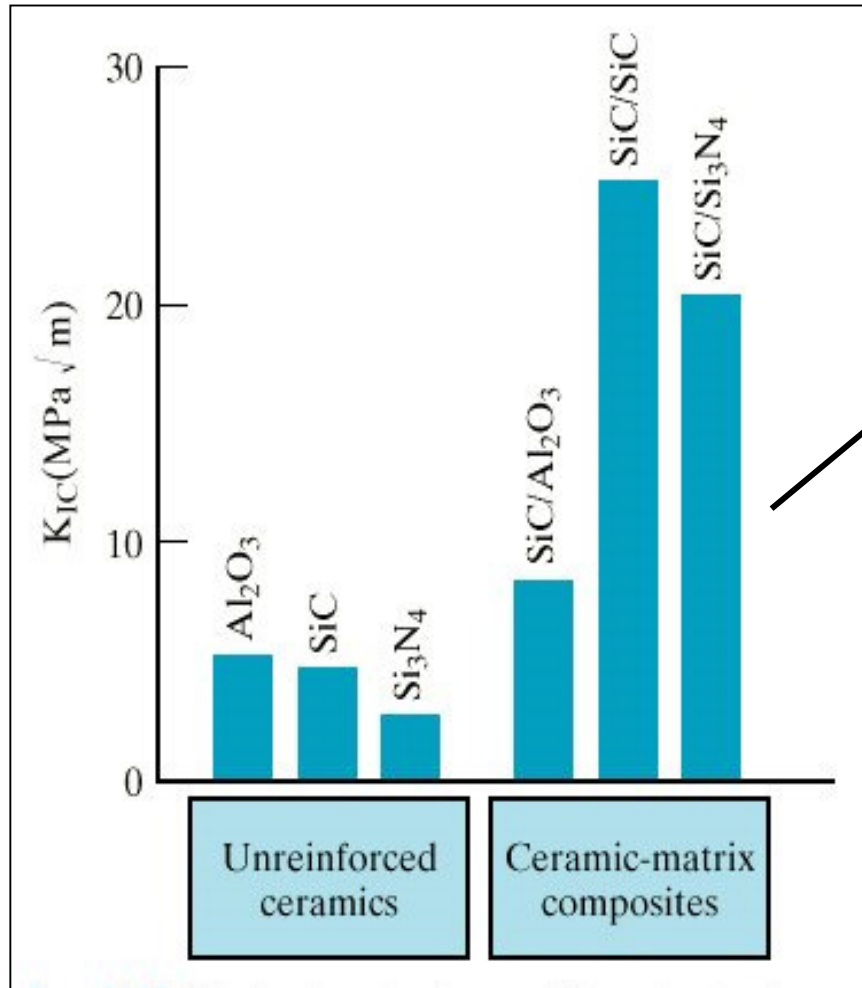
Obtenção de material de desempenho diferente de seus constituintes e com características únicas!



Propriedades finais superiores ao dos constituintes em separado



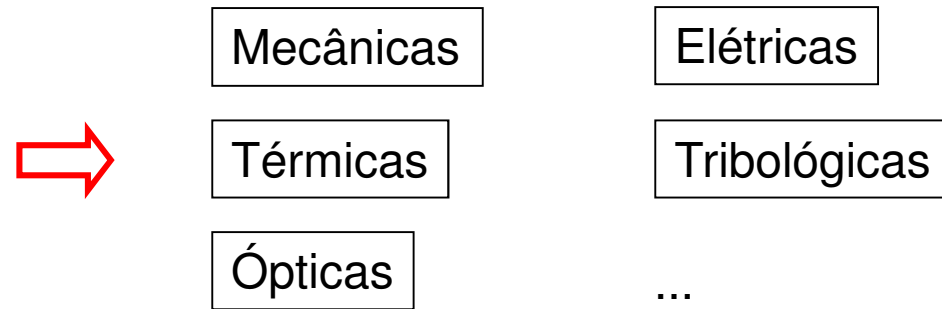
Ex: Compósitos de fibra cerâmica e matriz cerâmica




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

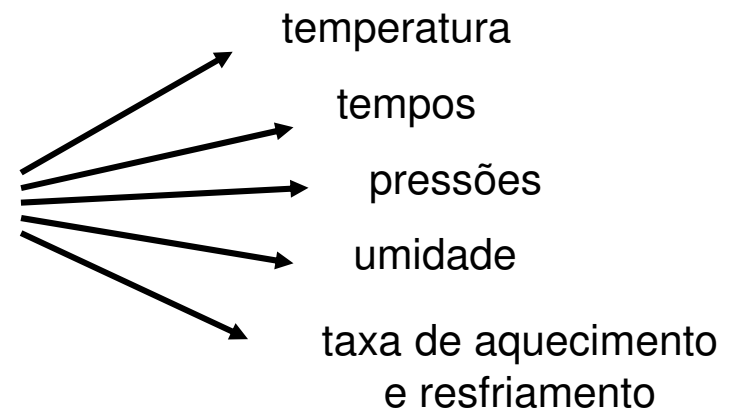
(aplicações a + 1000°C)

São materiais que possuem diferentes aplicações que envolvem diversas propriedades:

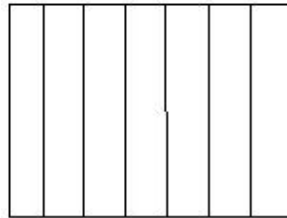


 Propriedades estas, controladas principalmente por

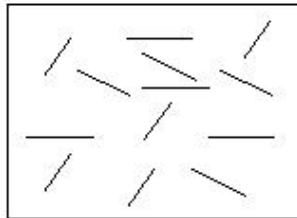
- propriedades individuais de seus constituintes
- sua distribuição
- sua dispersão
- sua forma e tamanho
- e do tipo de interação
- do processo de fabricação adotado



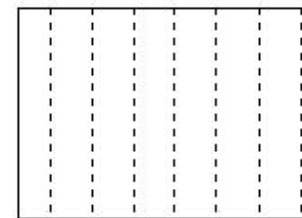
Diferentes tipos de configurações possíveis para a fase reforço para diferentes aplicações.



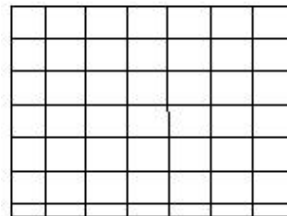
Fibras contínuas



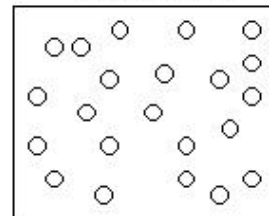
**Fibras curtas
aleatórias**



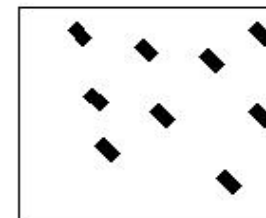
**Fibras curtas
orientadas**



Bidirecionais



Partículas esféricas



Flocos



Têm influência direta nas
propriedades mecânicas dos
compósitos

Características principais dos compósitos:



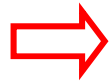
Heterogeneidade

não uniformidade da estrutura físico/química



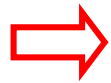
Anisotropia

dependência direcional das propriedades físicas



Simetria

natureza tensorial das propriedades do material



Hierarquia

empilhamento de unidades estruturais individuais

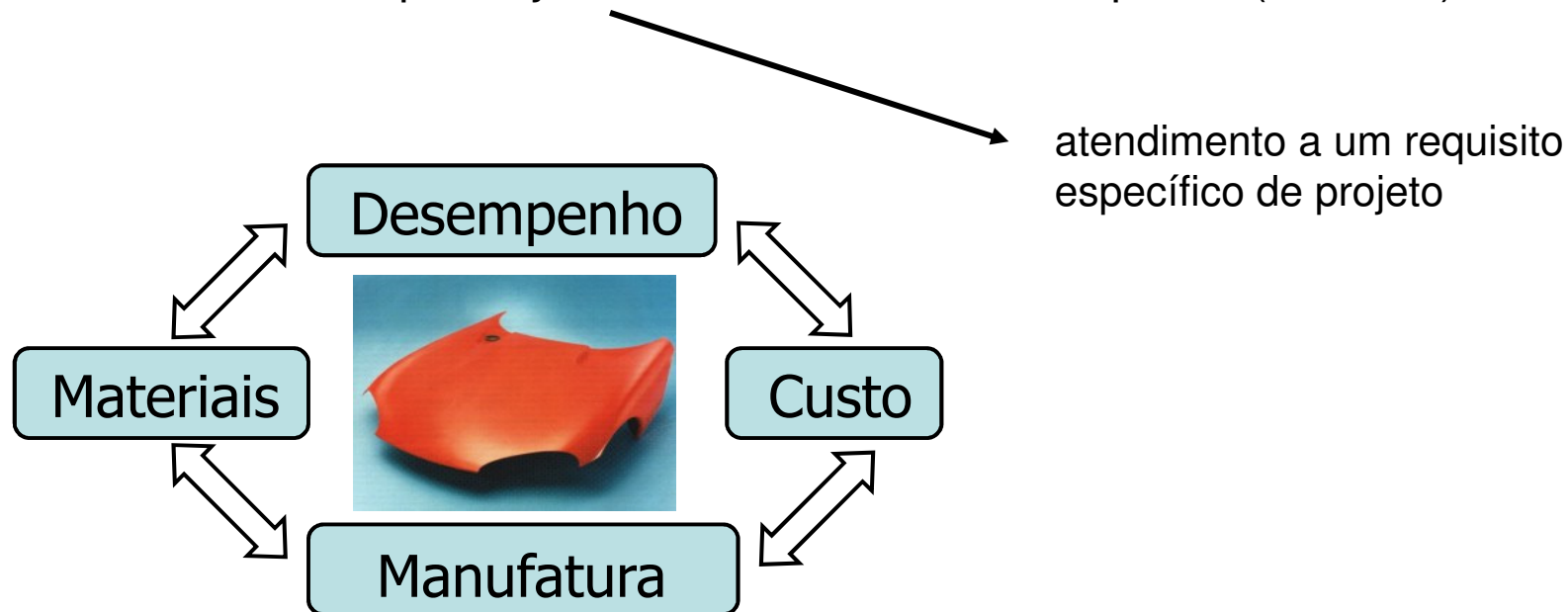
Propriedade interfacial



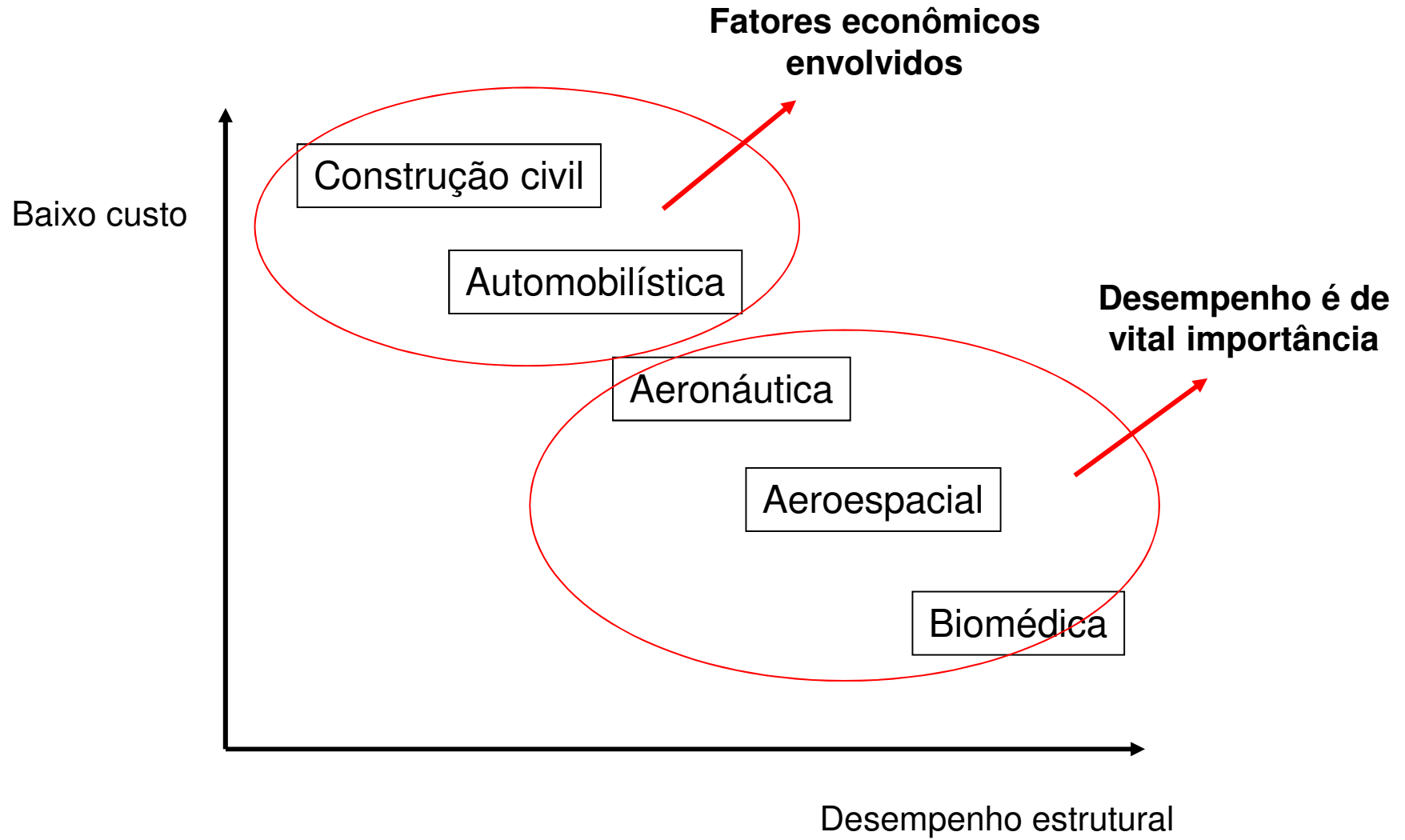
poderia ser pensada
como uma terceira fase

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)

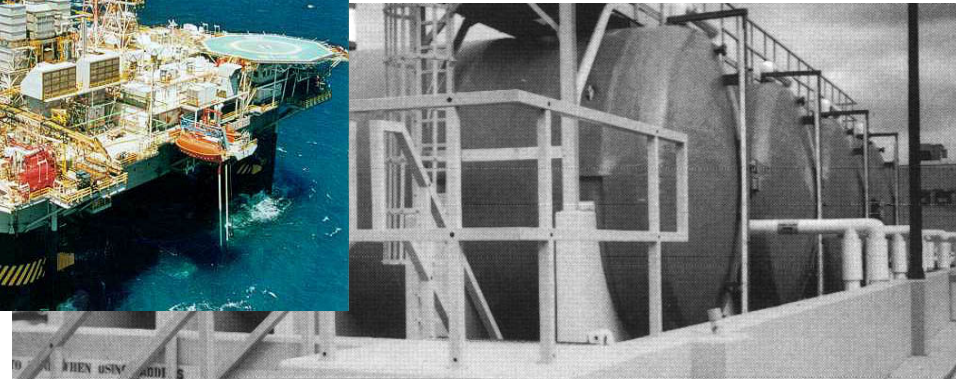


Requisitos de desempenho vs. baixo custo:



Áreas em constante desenvolvimento

Indústria petroquímica (tanques e reservatórios de pressão)

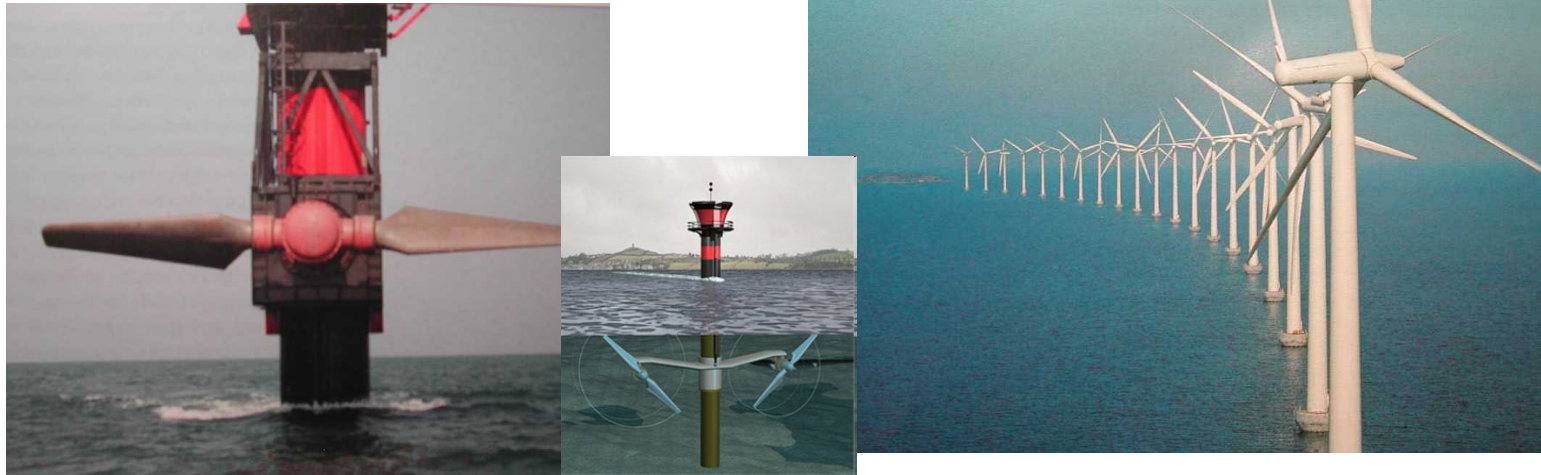


Esportes



Áreas em constante desenvolvimento

Geração de energia



Indústria automotiva

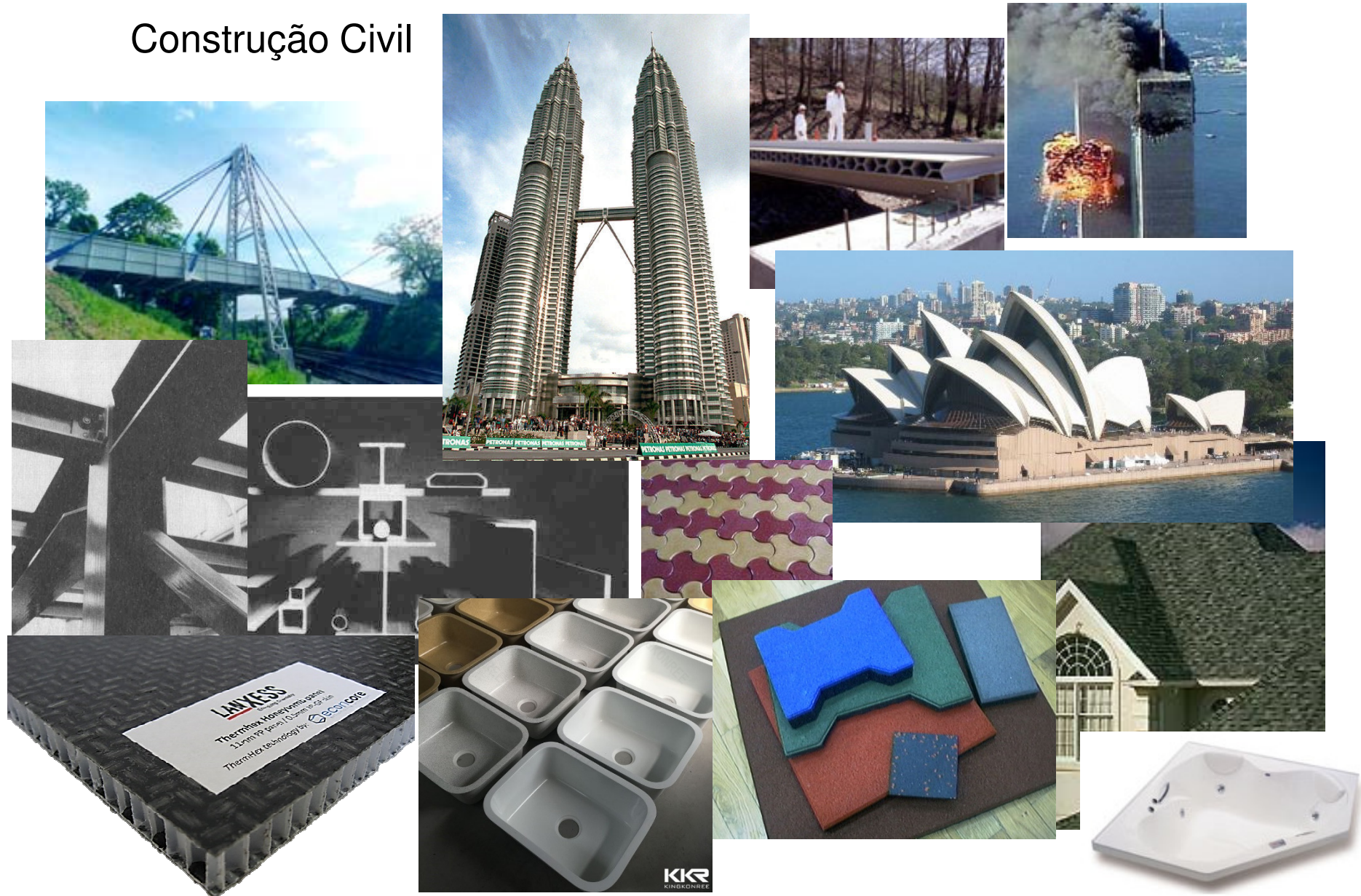


Militar e Defesa



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

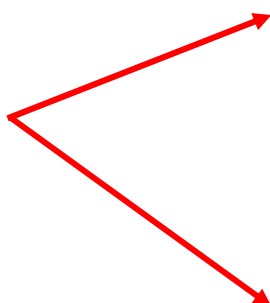
⇒ Apresentam cadeias conectadas entre si por ramificações compartilhadas (ligações predominantemente covalentes)



→ 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 e apontam para duas listas de aplicações, indicando que as propriedades mencionadas se aplicam a ambos os conjuntos de setores.
- 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)

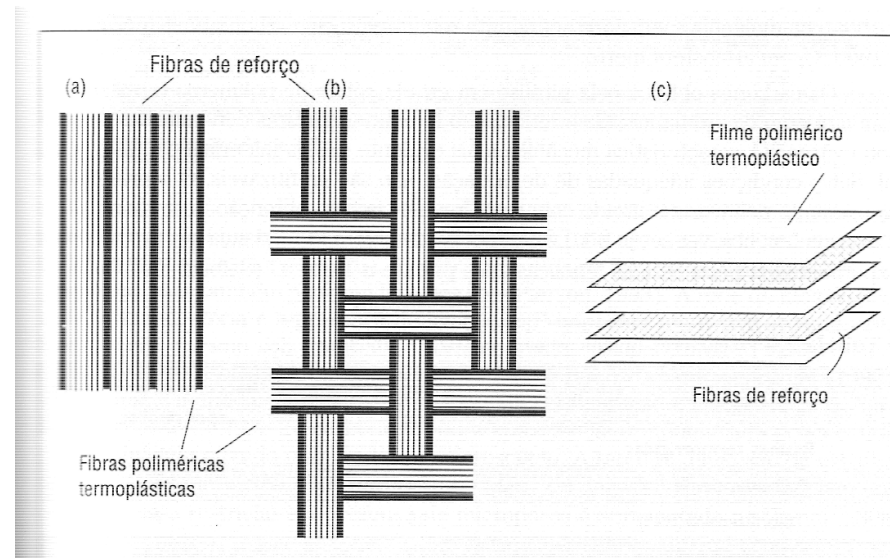


(rompidas facilmente por um aumento de temperatura)

- 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



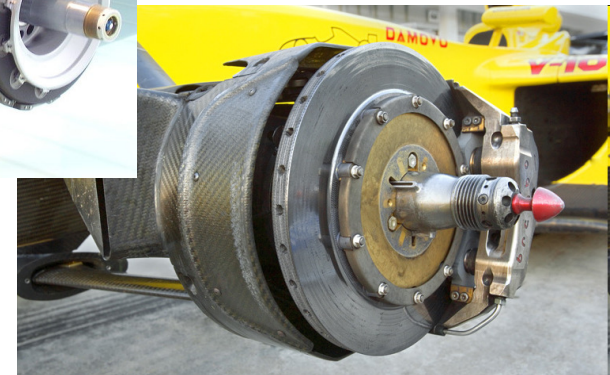
Formação Pré-formas

2.2 Matrizes Cerâmicas e Carbonosas

2.2.1 Matrizes de Carbono

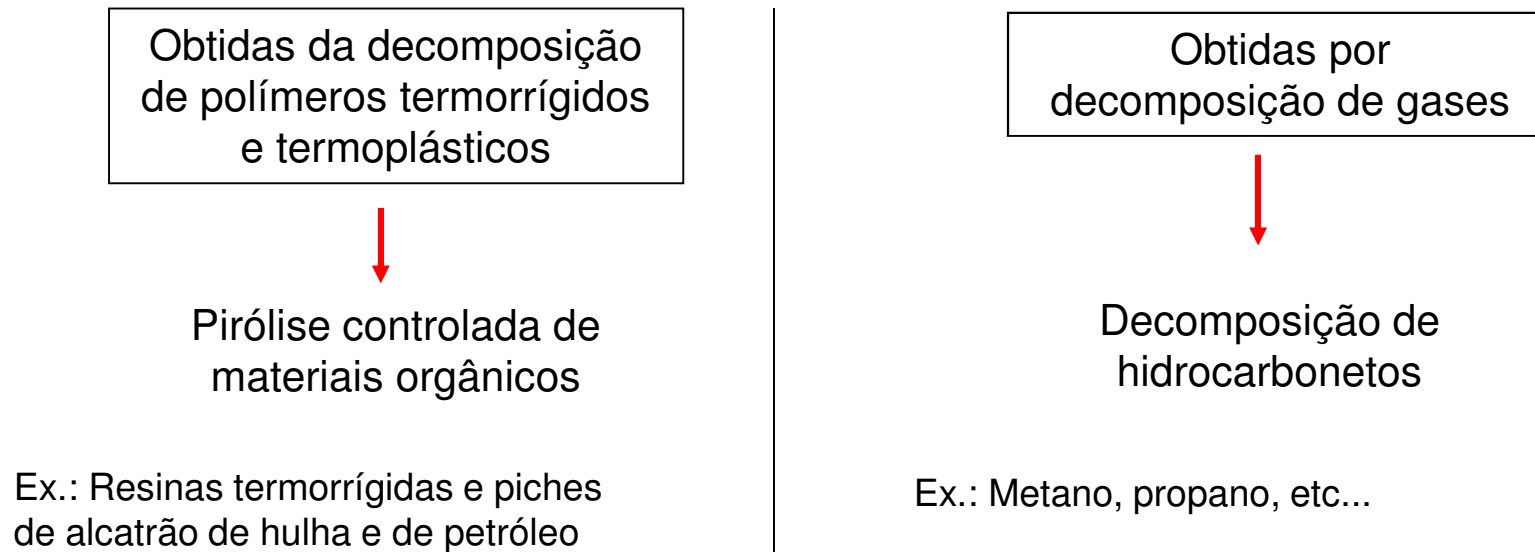
➡ Materiais a base de carbono possuem grande interesse na indústria por

- 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)

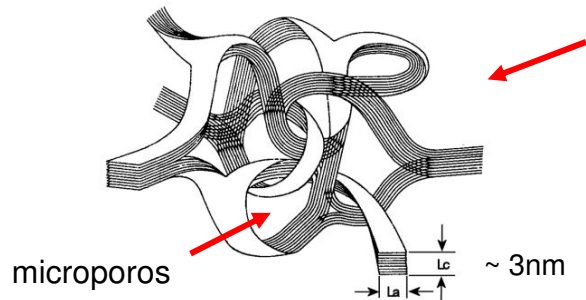
Utilização em materiais de estrutura aeroespacial e biocompatíveis com tecidos moles e duros

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

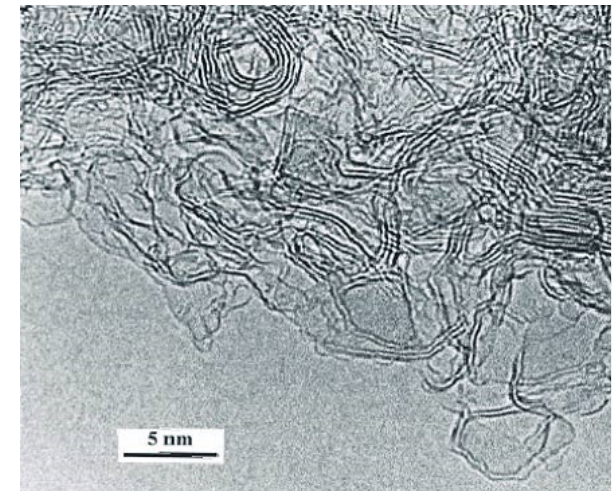
• Matéria prima mais utilizada: Resina Fenólica

• 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

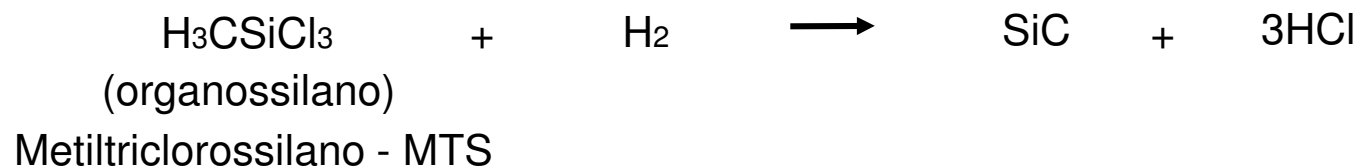
- Prensagem e sinterização de pós de SiC particulado
- Infiltração química em fase vapor (CVD)
- Pirólise polimérica de organossilanos

⇒ 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 ₂ O, Al ₂ O ₃ , MgO, SiO ₂	1000	90
Li ₂ O, Al ₂ O ₃ , MgO, SiO ₂ , Nb ₂ O ₅	1200	90
MgO, Al ₂ O ₃ , SiO ₂	1200	–
CaO, Al ₂ O ₃ , SiO ₂	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:

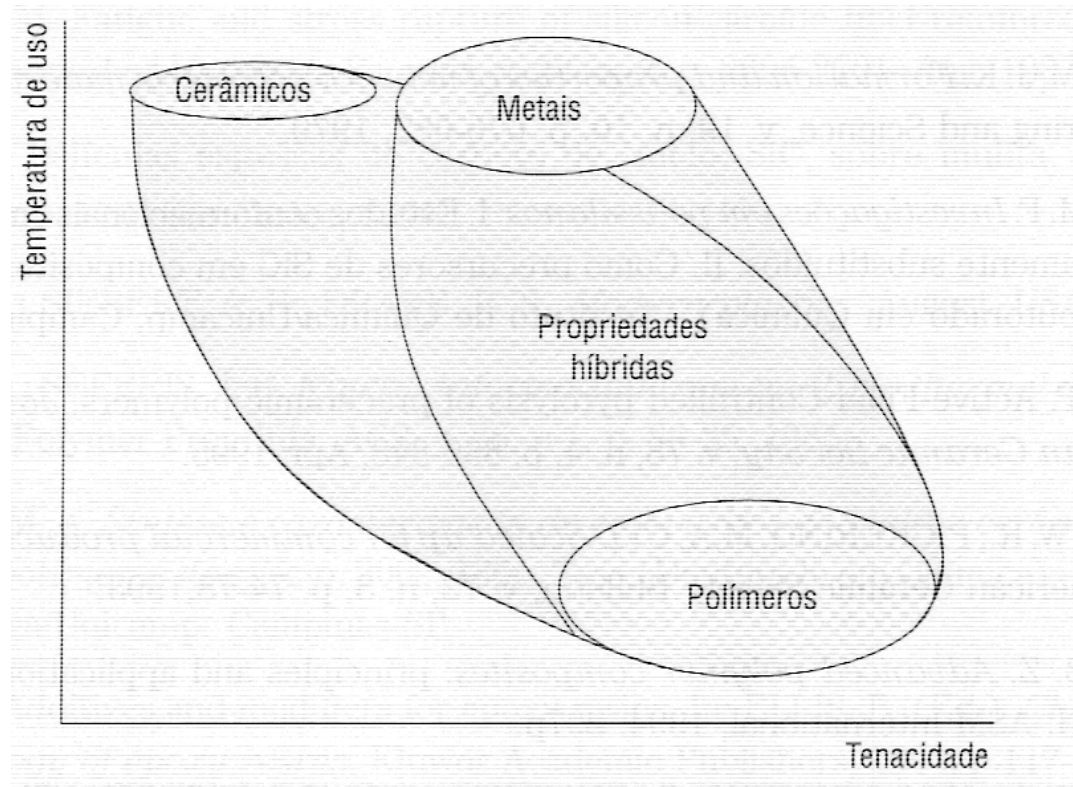


- aglutinar e distribuir reforços ou;
- transferir carregamentos ou tensões aplicadas ao compósitos entre estes reforços.

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

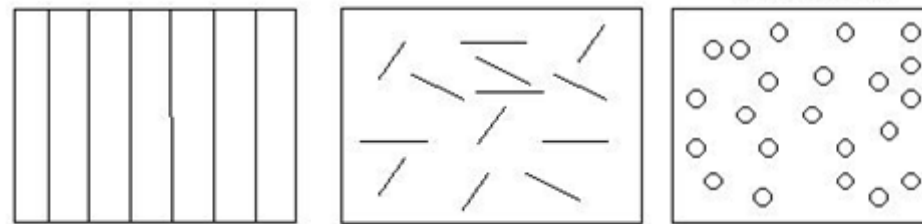
3.2 Cargas

3.3 Outras

Reforços para Compósitos

⇒ resistência a carregamentos mecânicos

⇒ geralmente apresentados na forma de:



Fibras contínuas

Fibras curtas

Partículas

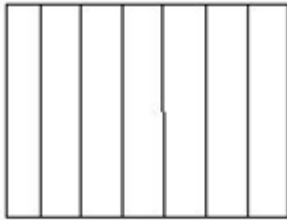
(obtidos por)

- fiação por fusão
- fiação úmido
- fiação a seco

- moagem



Exemplos:

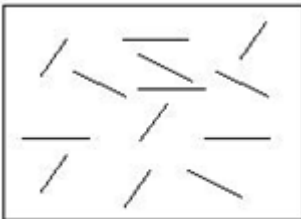


Fibras contínuas



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

...

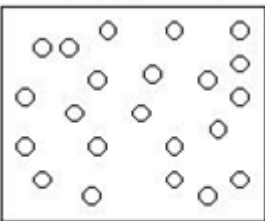


Fibras curtas



- 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)

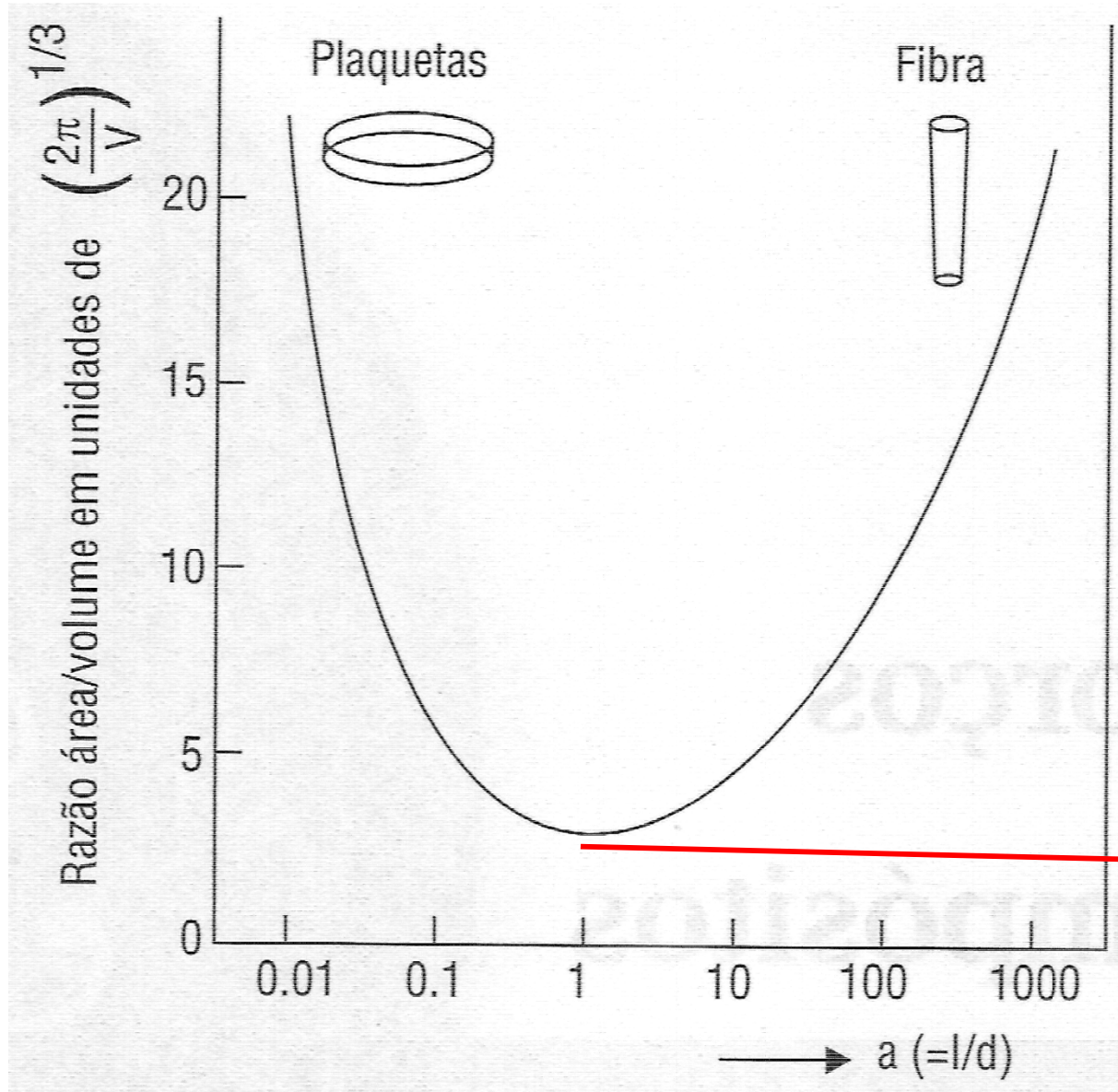
↓ ou seja



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)



partícula de
formato esférico

3.1.1 Fibras de Vidro

→ Mais utilizada em compósitos de matriz polimérica

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

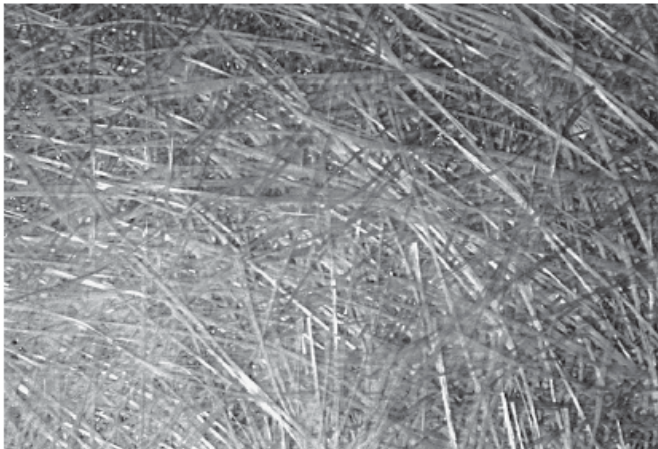


Figura 14.1 Fibras de vidro a serem usadas como reforço em um compósito de fibra de vidro. (Cortesia da Owens-Corning Fiberglas Corporation.)

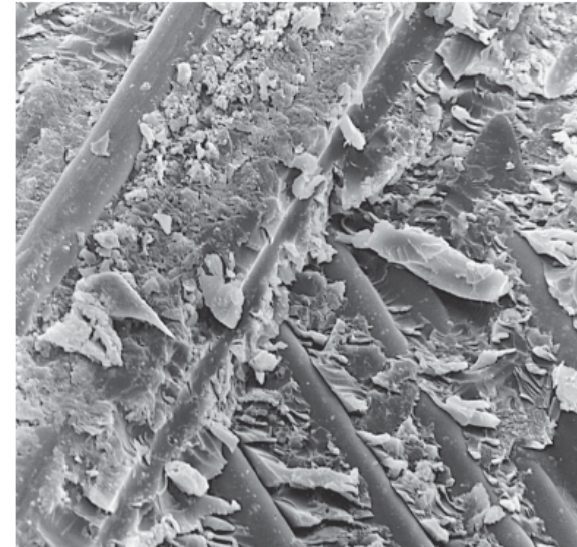


Figura 14.2 O reforço de fibra de vidro em um compósito de fibra de vidro é claramente visto em uma imagem de microscópio eletrônico de varredura de uma superfície de fratura. (Cortesia da Owens-Corning Fiberglas Corporation.)

→ 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 ^a (% p)								
		SiO ₂	(Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃)	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	B ₂ O ₃	TiO ₂	ZrO ₂
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.

^a 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 ^a	Características e aplicações
Termofixo	
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)
Termoplástico	
Náilon 66	Menos comuns, ductilidade especialmente boa
Policarbonato	
Poliestireno	

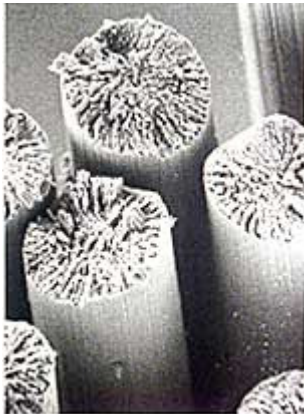
Fonte: Dados de L. J. Broutman e R. H. Krock (eds.), *Modern Composite Materials*, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Co., Inc., 1967, Capítulo 13.

^a 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



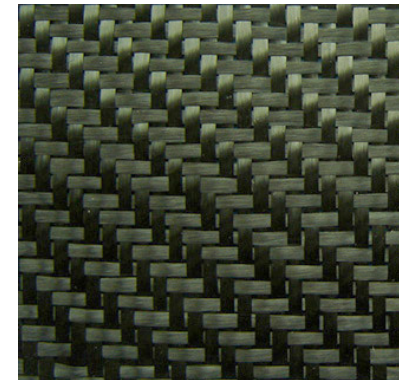
X1,500



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)

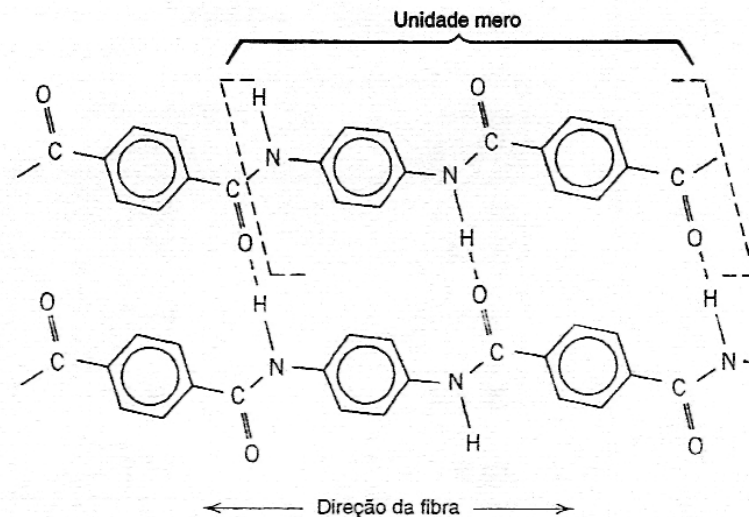
3.1.3 Fibras Poliméricas

→ 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



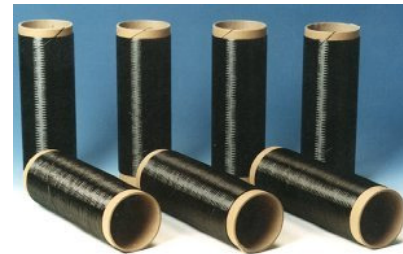
3.1.4 Fibras Cerâmicas

→ 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 (Al_2O_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)

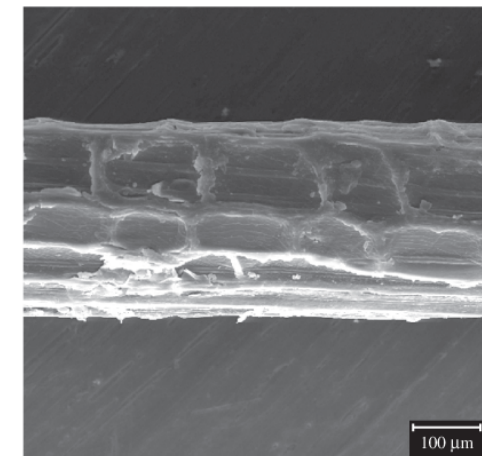
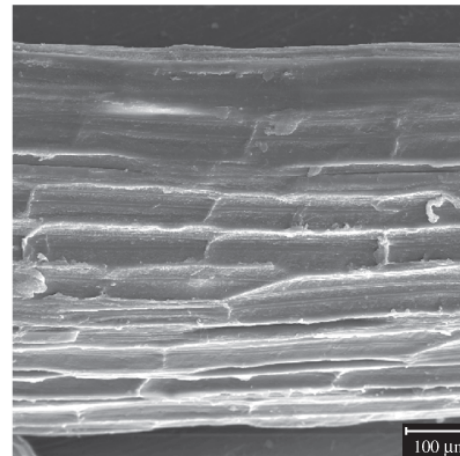
- Material que se destaca é o Asbestos (fibra mineral) por apresentar valores elevados de resistência e rigidez



- 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 μm)



- 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



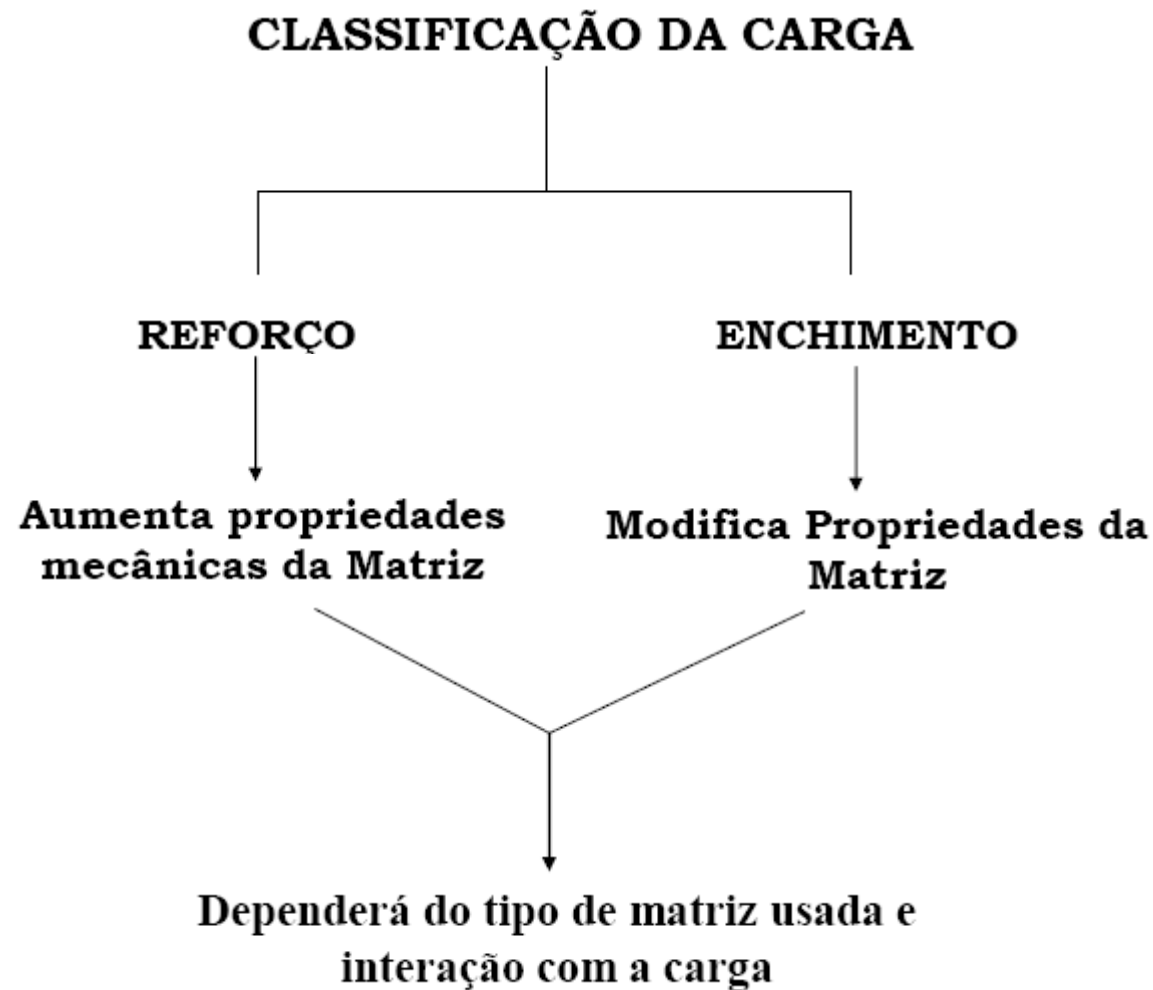
Materiais para reforço na forma de partículas é significativamente maior que na forma de fibras

- 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.



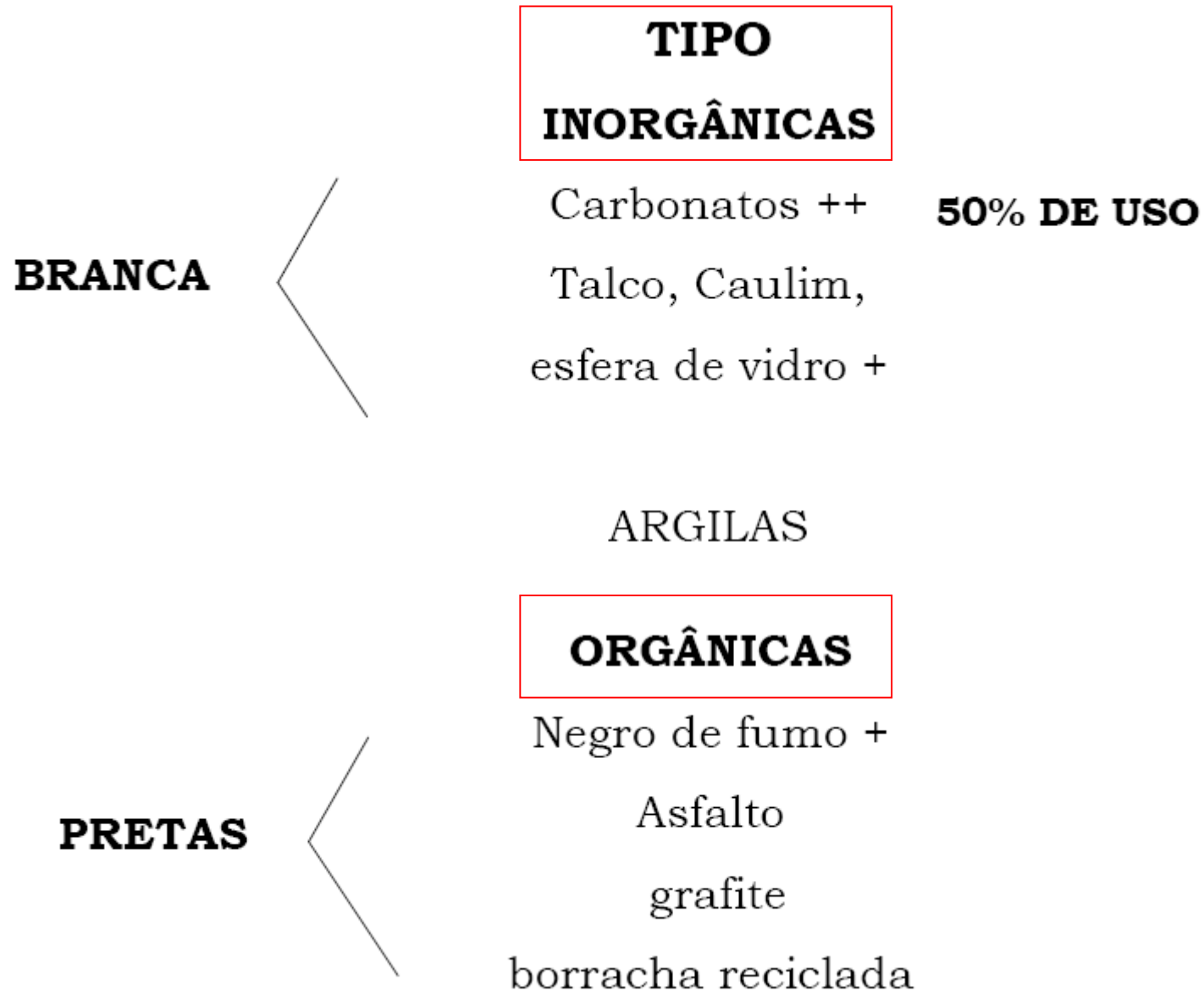
Exemplos de enchimento/reforço:

- 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

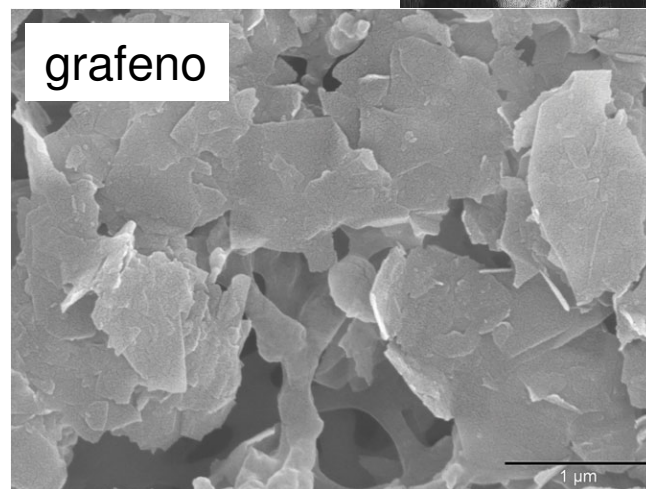
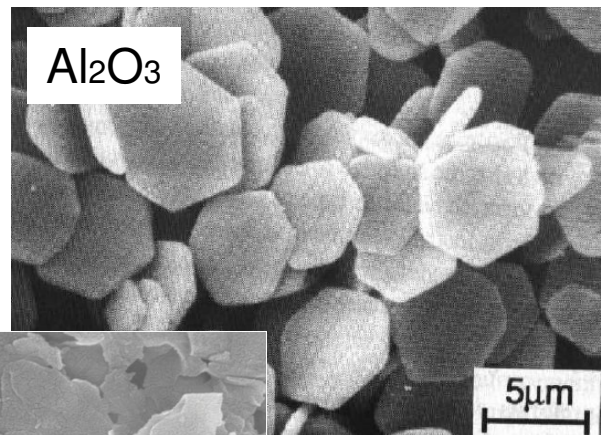
→ Principais cargas particuladas usadas em polímeros



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 μm diâmetro e 50 a 200 μm 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 (Al_2O_3).

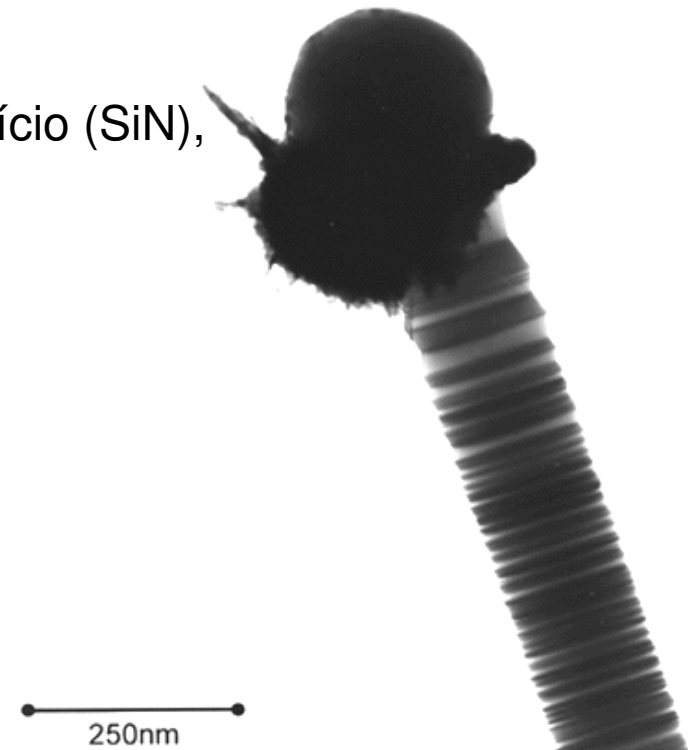
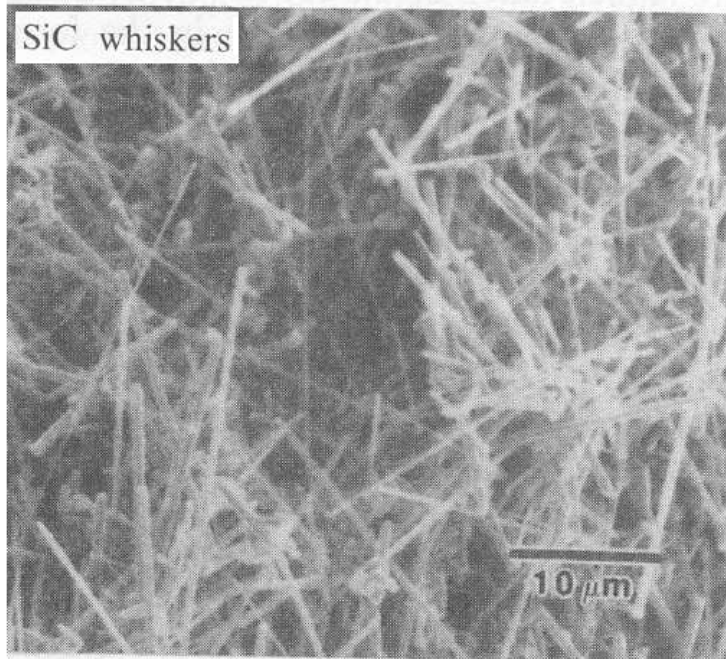


Figura 2: Micrografia de MET de um whisker desenvolvido pelo processo VLS.
[Figure 2: TEM micrograph showing a whisker grown by VLS process].

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

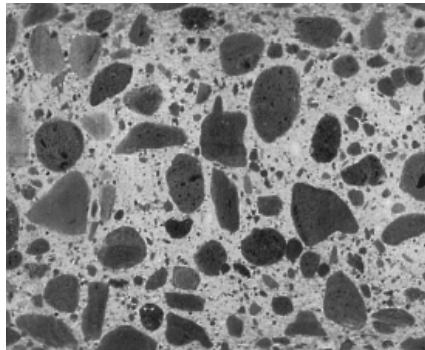
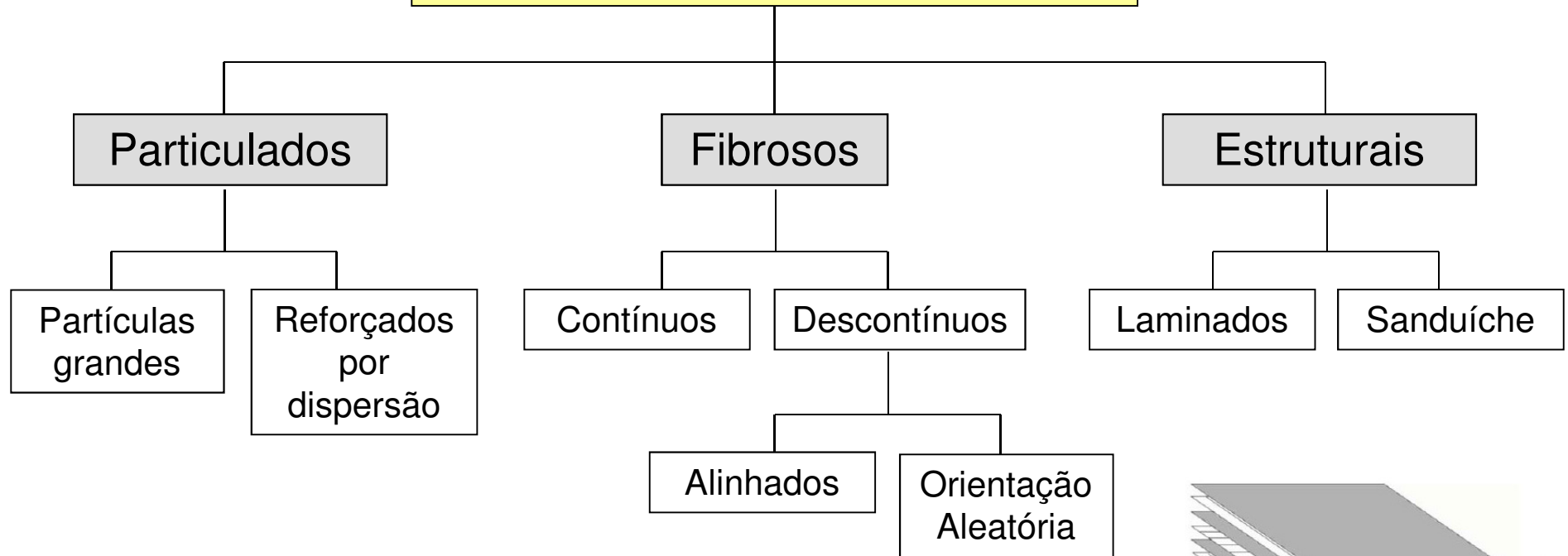
- polimérica
- metálica
- cerâmica
- carbonosa

Fase Reforço
(enchimento)

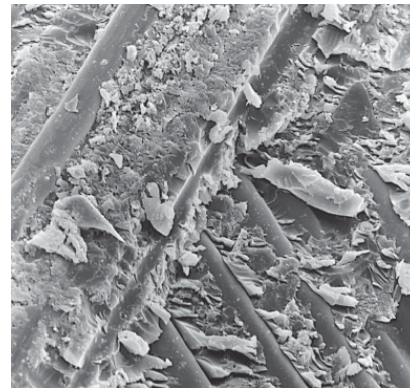
- responsável pela resistência a carregamentos mecânicos

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

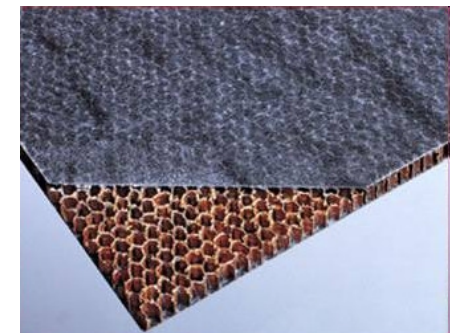
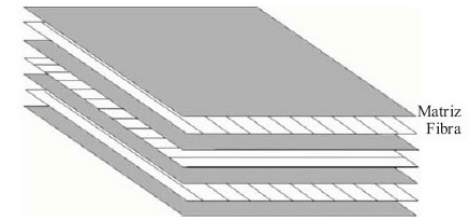
Materiais Compósitos



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 μm** , não apresentando extremidades livres ao longo de seu comprimento (fiados ou em fibras individuais)

Monofilamentos

Semelhantes às contínuas, com diâmetros **superiores a 100 μm** (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 μm**

Whiskers

Monocristais alongados com diâmetro **inferior a 1 μm**

Partículas

Reforços praticamente **equiaxiais**, podendo ser mono ou policristalinas (**esféricas, angulares, formato de placas**) dimensões **superiores a 1 μm**

Dispersóides

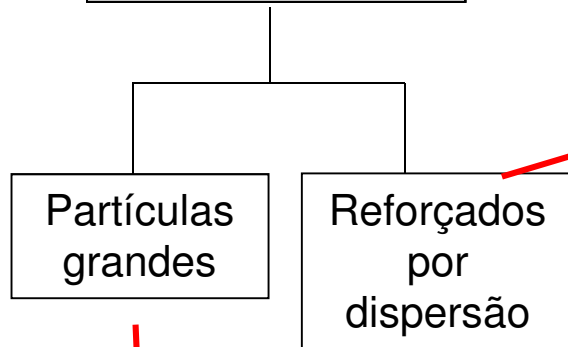
Semelhantes às **partículas**, de dimensões **inferiores a 1 μm**

Plaquetas

Reforços planares de espessura **inferiores a 1 μm**

Particulados

Podem ser re-processados



Pequenas partículas (diâmetros 0,01 a 0,1 μm)

- 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

(**ThO₂** + ligas de Ni = aumenta a resistência a alta T)

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

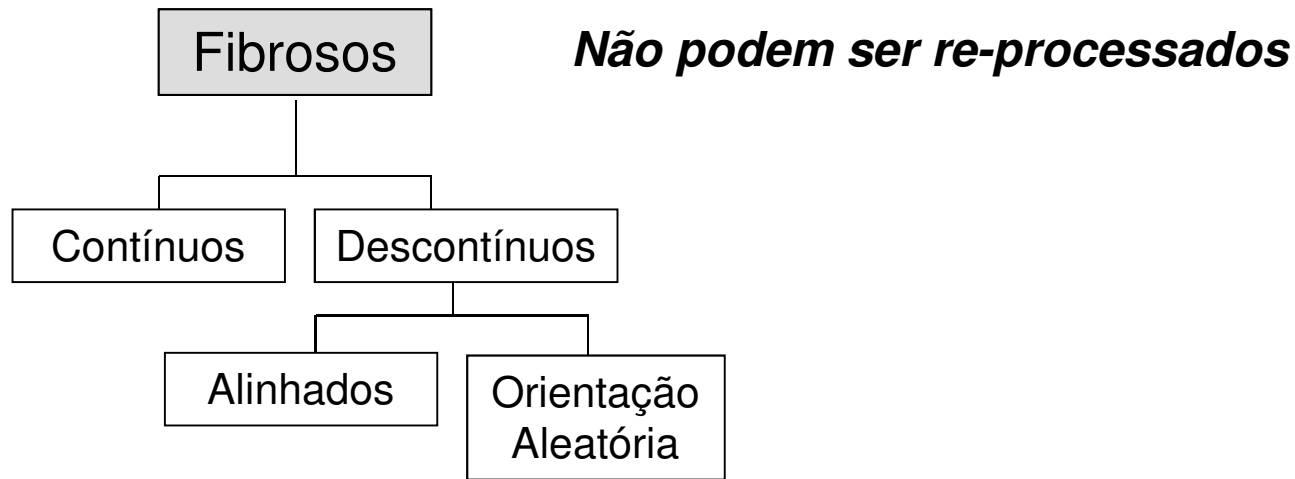
- Interações entre as partículas e a matriz não são ao nível atômico ou molecular, ou seja, as solicitações mecânicas são distribuídas pela matriz e pelo reforço.
- A resistência da interface partícula/matriz é muito importante



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_c**) que permite uma melhora efetiva da propriedade mecânica do compósito (+ diâmetro e + a ligação fibra matriz).

Ex.: fibra de vidro ou carbono **L_c** ~ 1mm

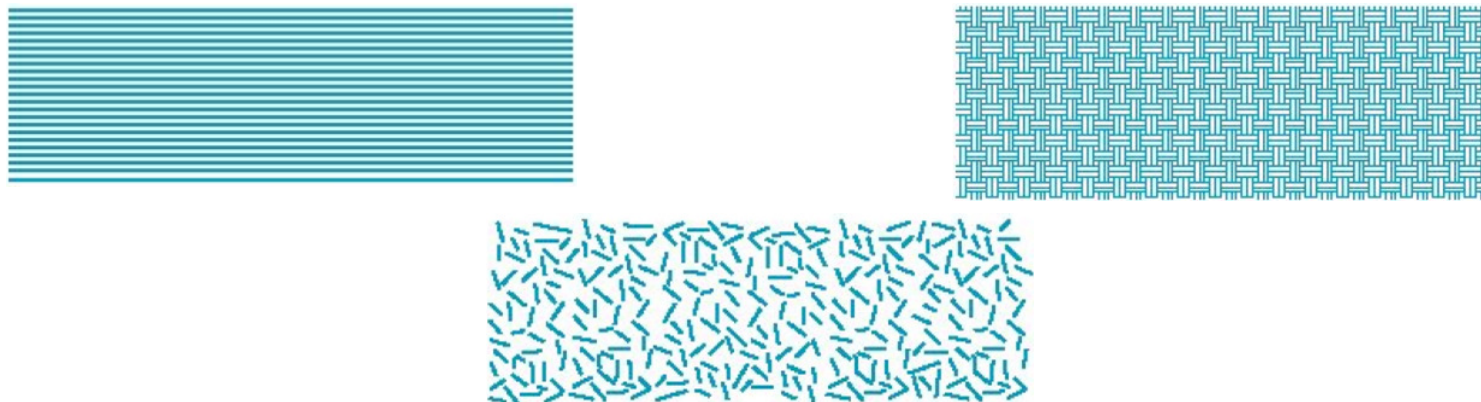
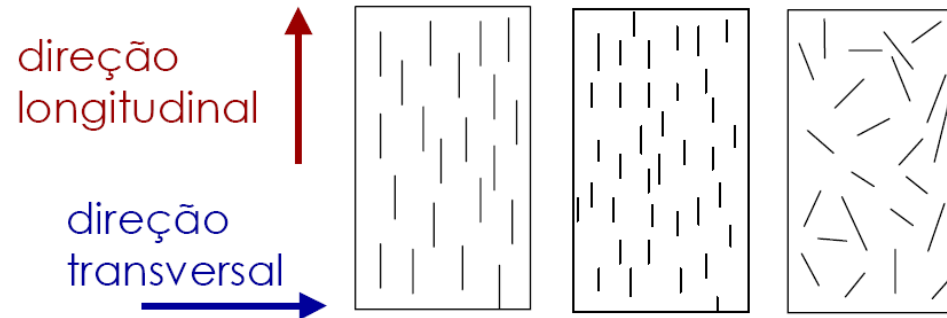
se $L \gg L_c$: fibras contínuas

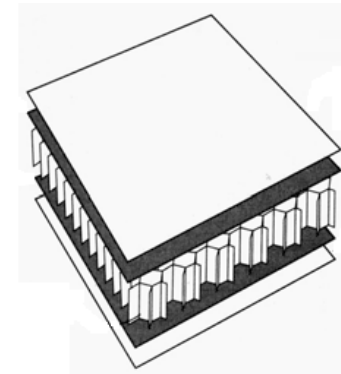
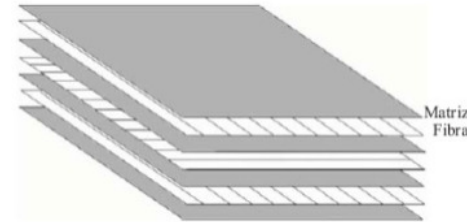
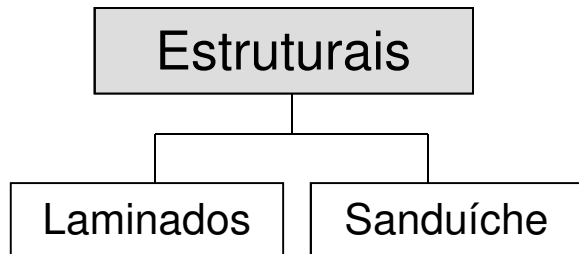
se $L < L_c$: fibras descontínuas ou curtas (pequeno reforço!)

- 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)





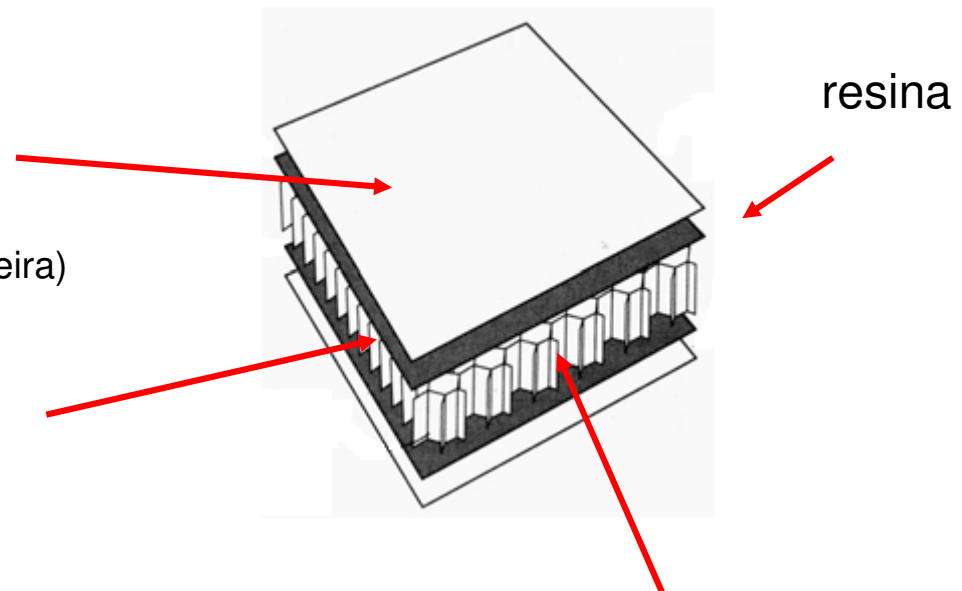
- materiais homogêneos + materiais compósitos
- propriedades dependem além dos constituintes, do projeto geométrico
- painéis em sanduíche

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
Metal	combinação de metais imiscíveis	"Cermets"	elastômero + fibra, material de fricção
Cerâmico	<i>Cermets</i> , TiC, TiCN, Carbonetos cementados (p/ ferramentas) metais reforçados por fibras	Al ₂ O ₃ reforçada por SiC ferramentas p/ corte BN cúbico	resinas reforçadas por fibra de vidro
Polímero			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, Al_2O_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.

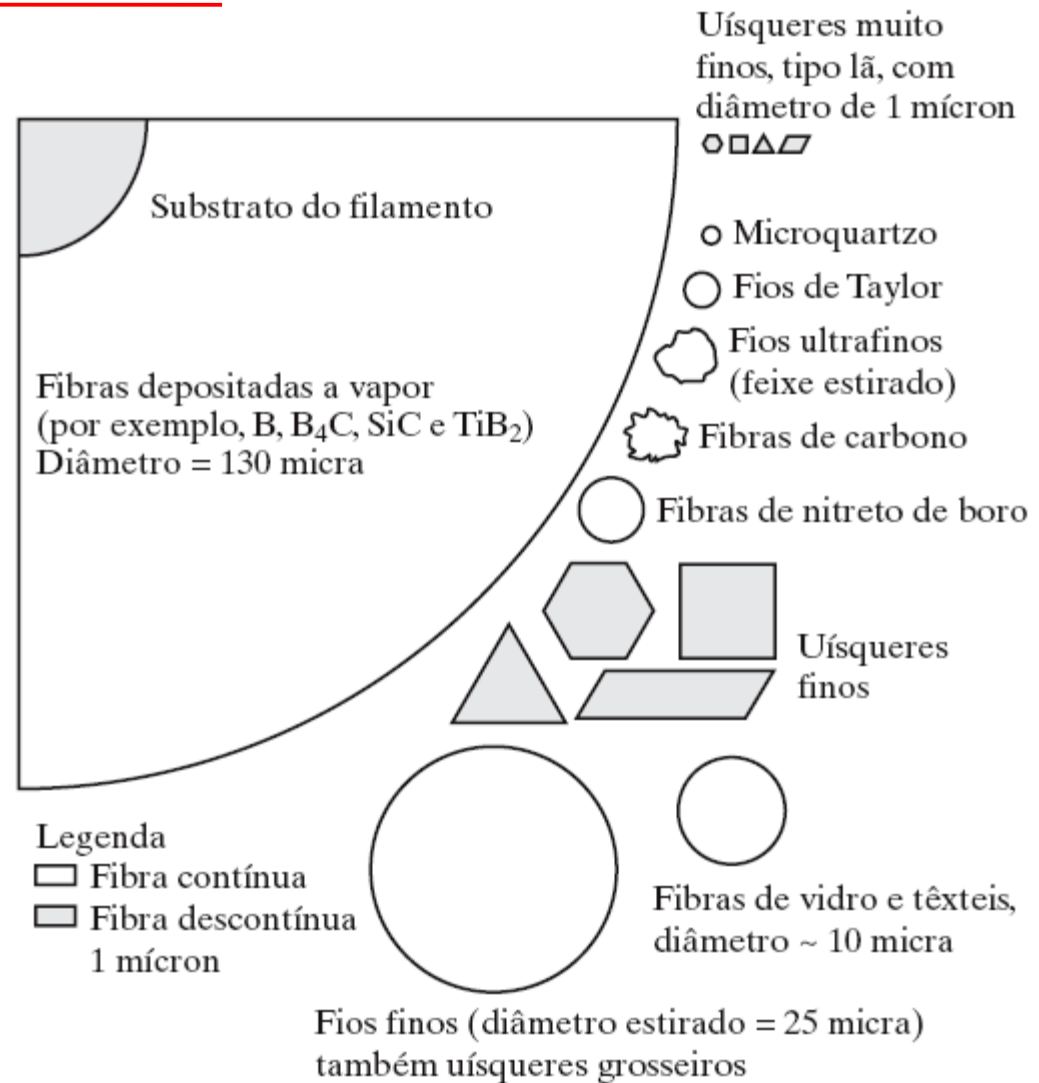
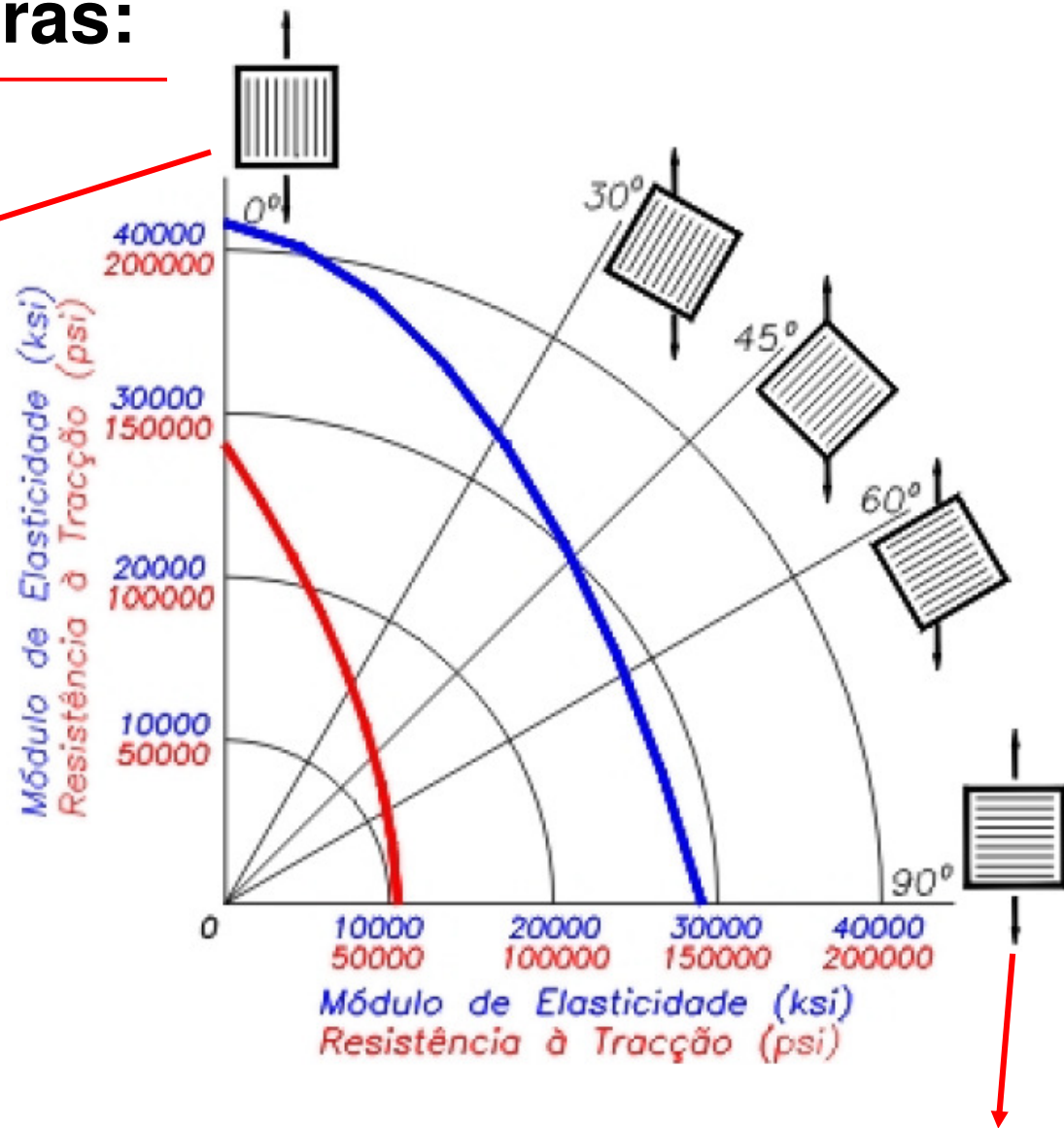


Figura 14.4 Áreas relativas da seção transversal e formas de uma grande variedade de fibras de reforço. (De L. J. Broutman e R. H. Krock (eds.), *Modern Composite Materials*, Massachusetts:

Orientação das Fibras:

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



- Resistência mínima na direção perpendicular.

Propriedade específicas da Matriz:

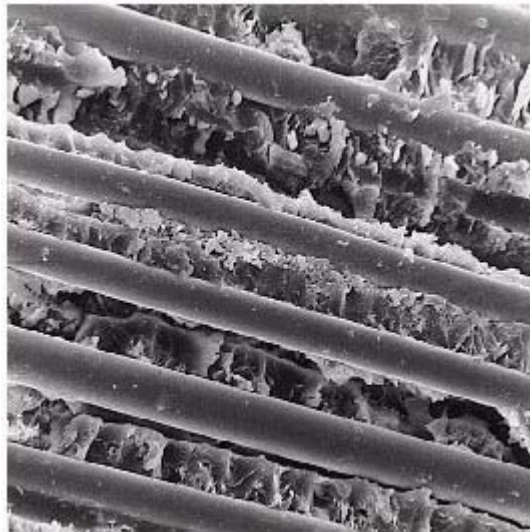
- Matrizes poliméricas têm, em geral, baixa resistência e baixo ponto de fusão;
- Matrizes metálicas têm maior resistência e maior ponto de fusão, mas são mais pesadas;
- Podem ser usadas matrizes cerâmicas para resistência e temperatura extremamente elevadas, perdendo-se tenacidade.

Ligação Matriz X Fibra (interface):

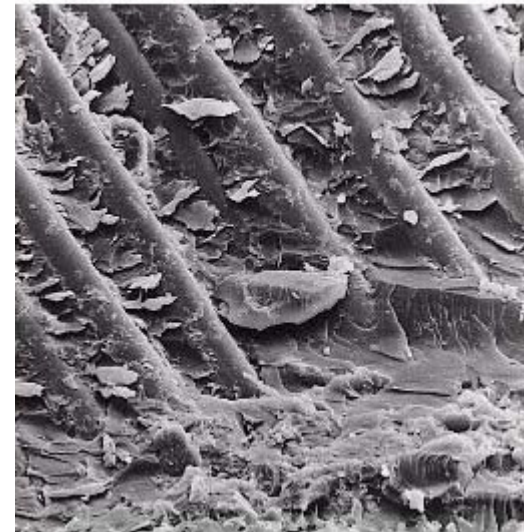
- Caso não haja boa aderência da matriz à fibra, a distribuição de esforços não será eficiente;
- O coeficiente de expansão térmica entre fibra e matriz deve ser muito semelhante (valores próximos, de mesma ordem de grandeza).
- Revestimento aumentam a aderência;

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**