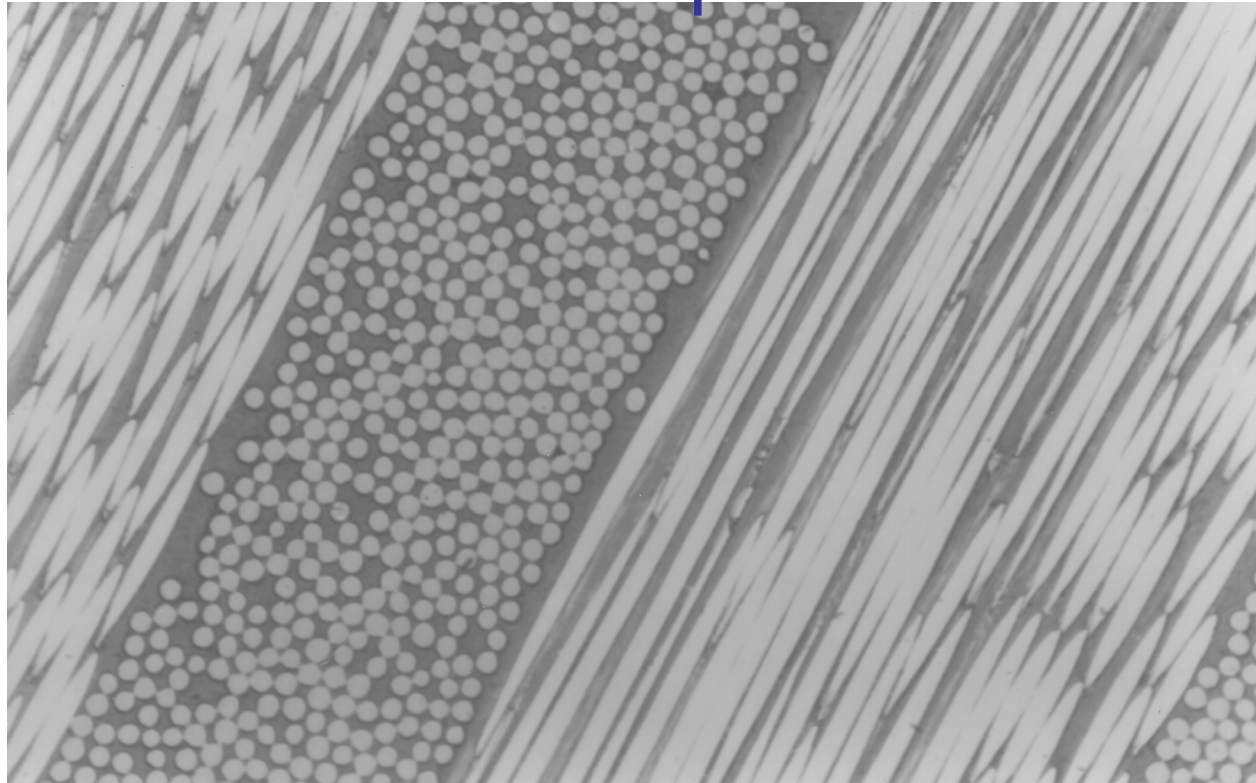


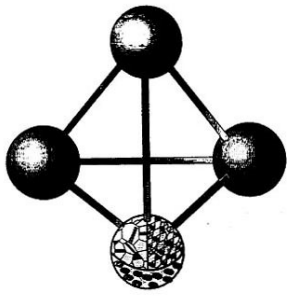
Materiais Compósitos

Autor: Fernando Landgraf

Baseado no Cap. 17 do Callister.

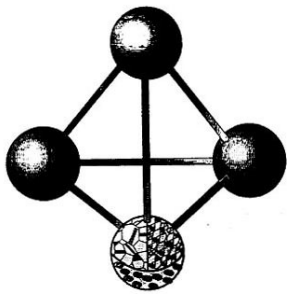


Epoxi-fibra de Carbono, diâmetro de fibra 7 μm . Foto de Gerson Marinucci, IPEN.

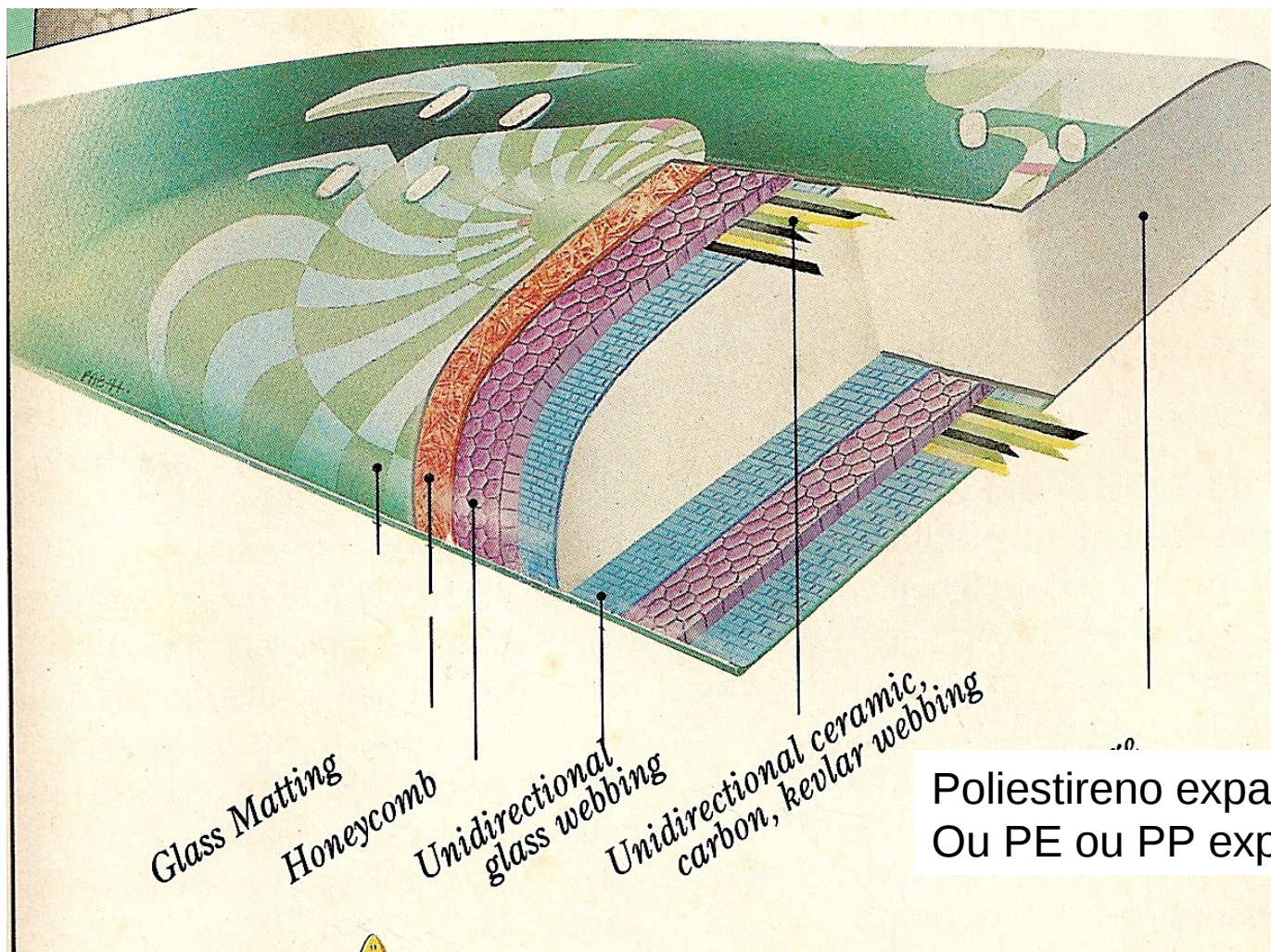


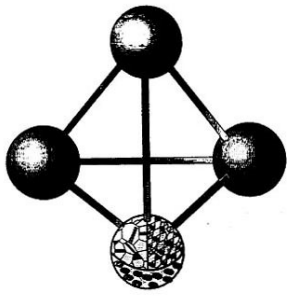
Compósitos

- **Princípio da ação combinada:** Material multifásico cujas propriedades sejam uma combinação benéfica (**sinergia**) das propriedades das duas ou mais fases que o constituem.



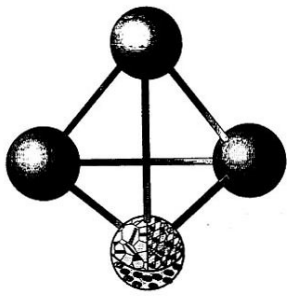
Prancha de windsurf é um compósito





Exemplos naturais

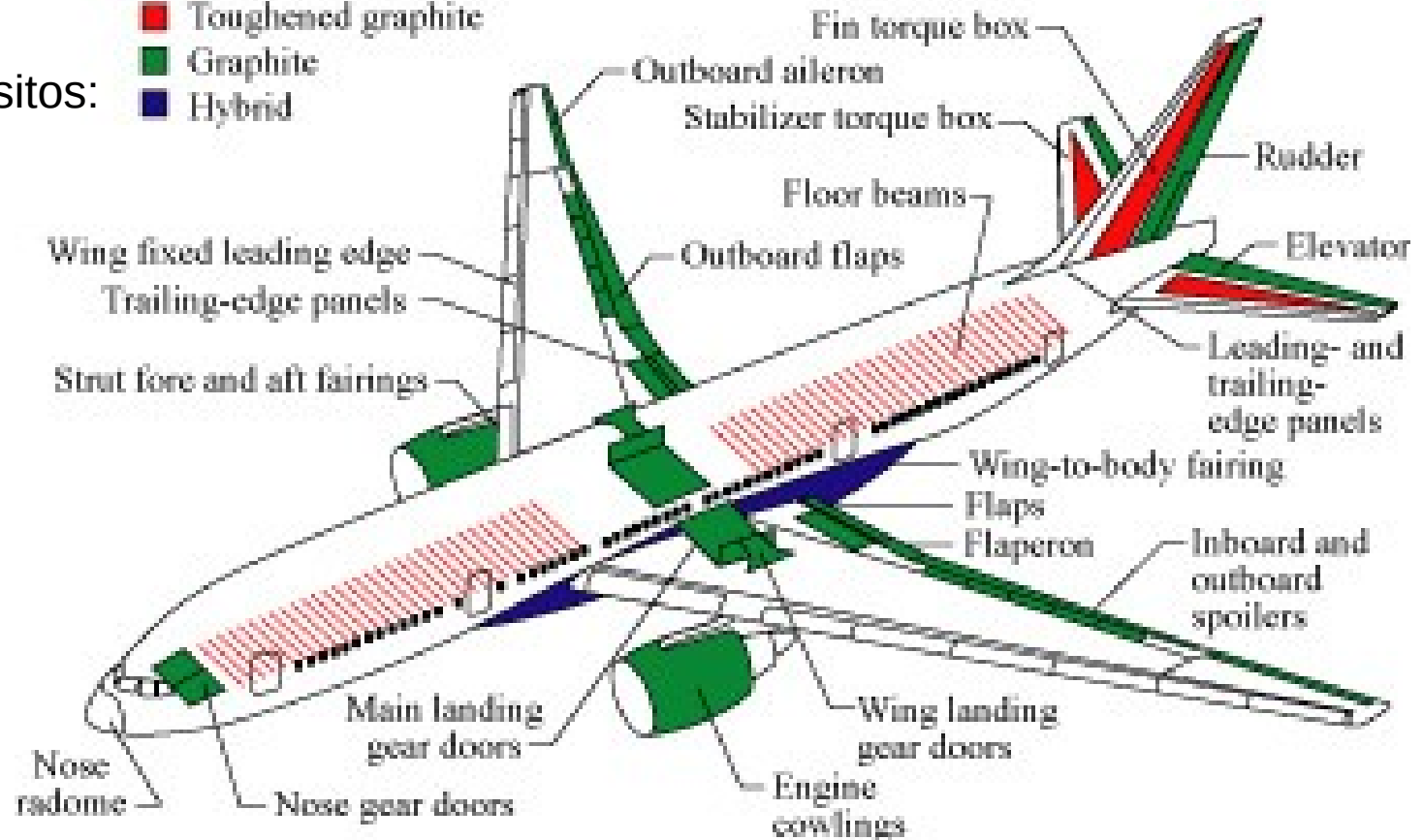
- Ossos
 - colágeno, (proteína forte mas mole), junto com apatita (resistente, rígido, mas frágil)
- Madeira
 - fibras de celulose resistentes e flexíveis, envolvidas por lignina, mais rígida.



Uso de compósitos está crescendo

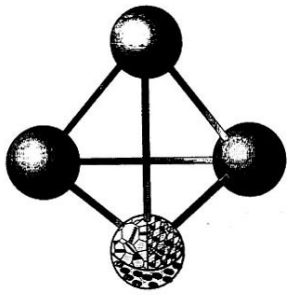
Tipos de compósitos:

- Toughened graphite
- Graphite
- Hybrid



admite-se que o Boeing 777 tenha 10% do peso em materiais compósitos

<http://oea.larc.nasa.gov/PAIS/Concept2Reality/composites.html>



Estrutura do compósito

- Compósitos de engenharia costumam ter

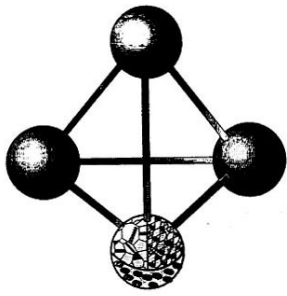
Fase matriz + fase dispersa

Fase matriz:

polímero (PMC), cerâmica (CMC) ou metal (MMC)

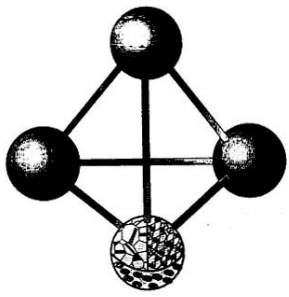
Fase dispersa:

inúmeras possibilidades



Relação estrutura - propriedade

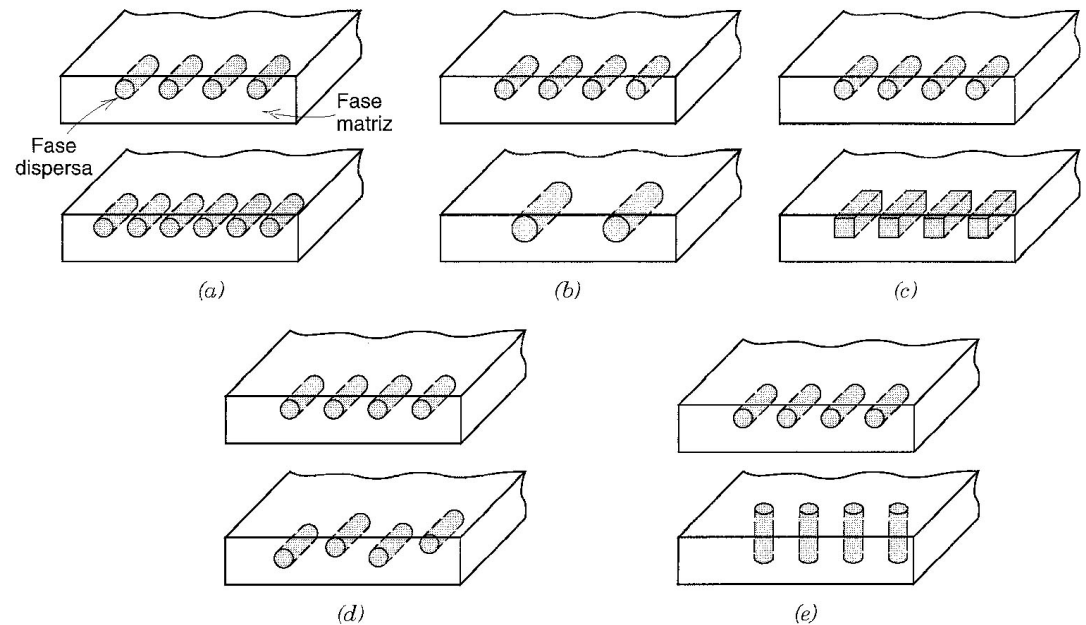
- Propriedades do compósito dependem:
 - propriedades da fase matriz e da fase dispersa
 - Da natureza da interface matriz-fase dispersa
 - Da geometria da fase dispersa

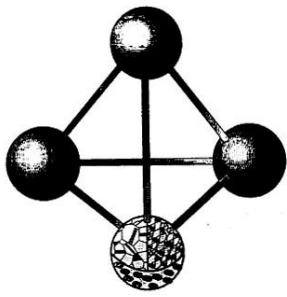


Estrutura dos compósitos

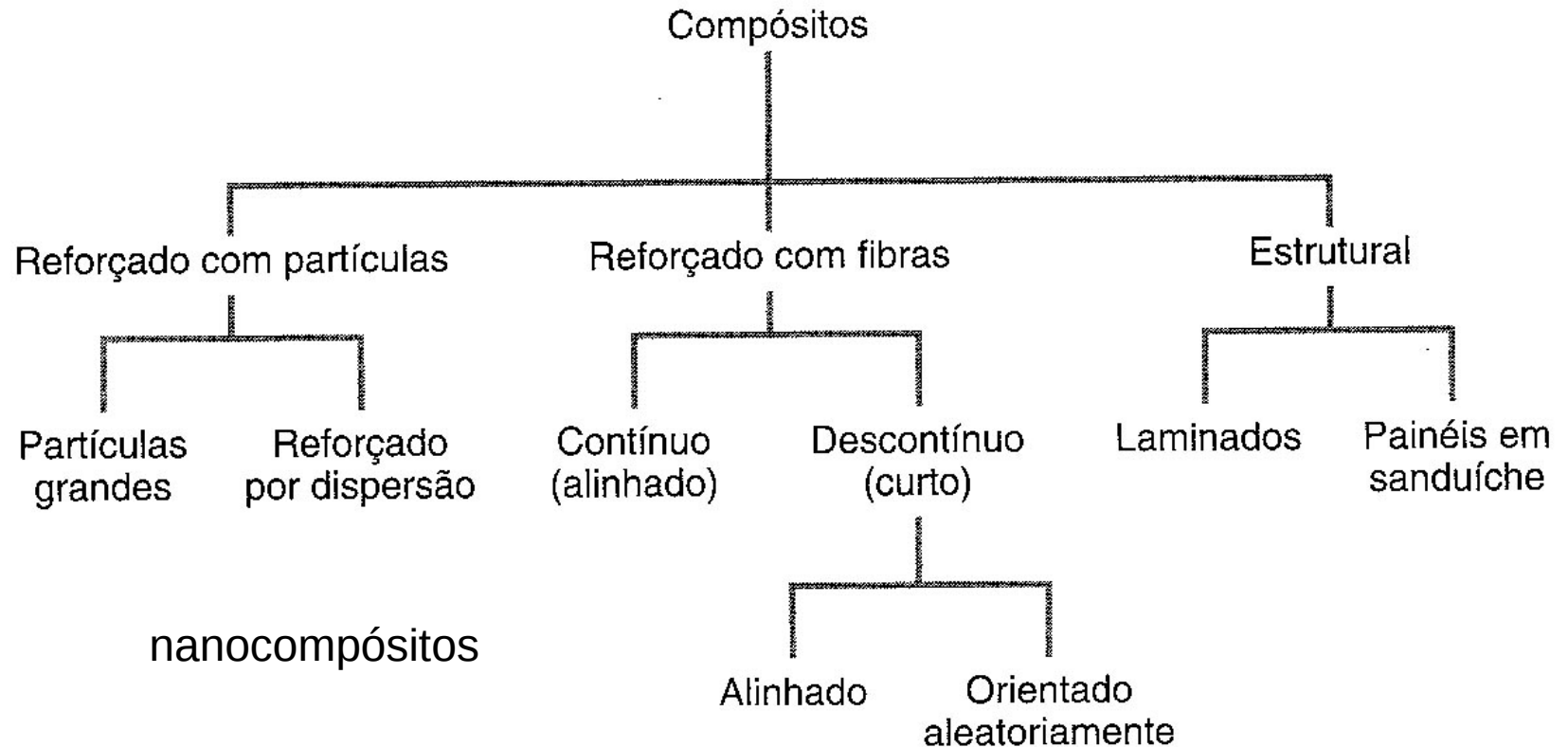
- Propriedades dependem da geometria da fase dispersa

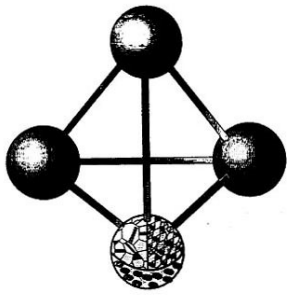
- Concentração (a)
- Tamanho (b)
- Forma (c)
- Distribuição (d)
- Orientação (e)





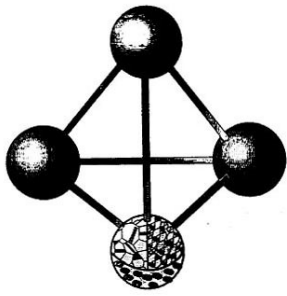
Classificação dos compósitos





Compósitos reforçados com partículas

- Partículas grandes: maiores que $\sim 1\mu\text{m}$
 - Matriz transfere parte da carga à fase dispersa
- Dispersão: $\sim 0,01$ a $0,1 \mu\text{m}$
 - Aumento de resistência se dá por interações a nível atômico ou molecular (assunto do tópico 3).



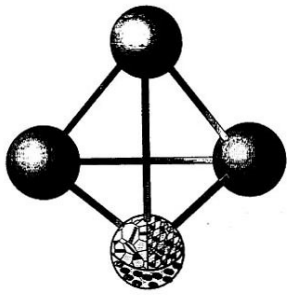
Compósitos com partículas grandes

- Regra das misturas:
 - Propriedade dependem das frações volumétricas das fases

Módulo de elasticidade varia entre

Limite superior $E_c(u) = E_m V_m + E_p V_p$

Limite inferior $E_c(l) = \frac{E_m E_p}{V_m E_p + V_p E_m}$

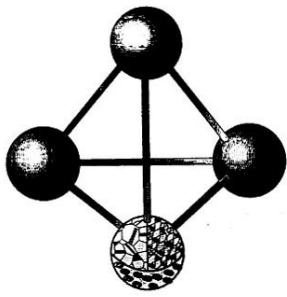


Relembrando

Módulo de elasticidade

- Calcular o módulo de elasticidade de uma liga de alumínio, com base nos seguintes dados:

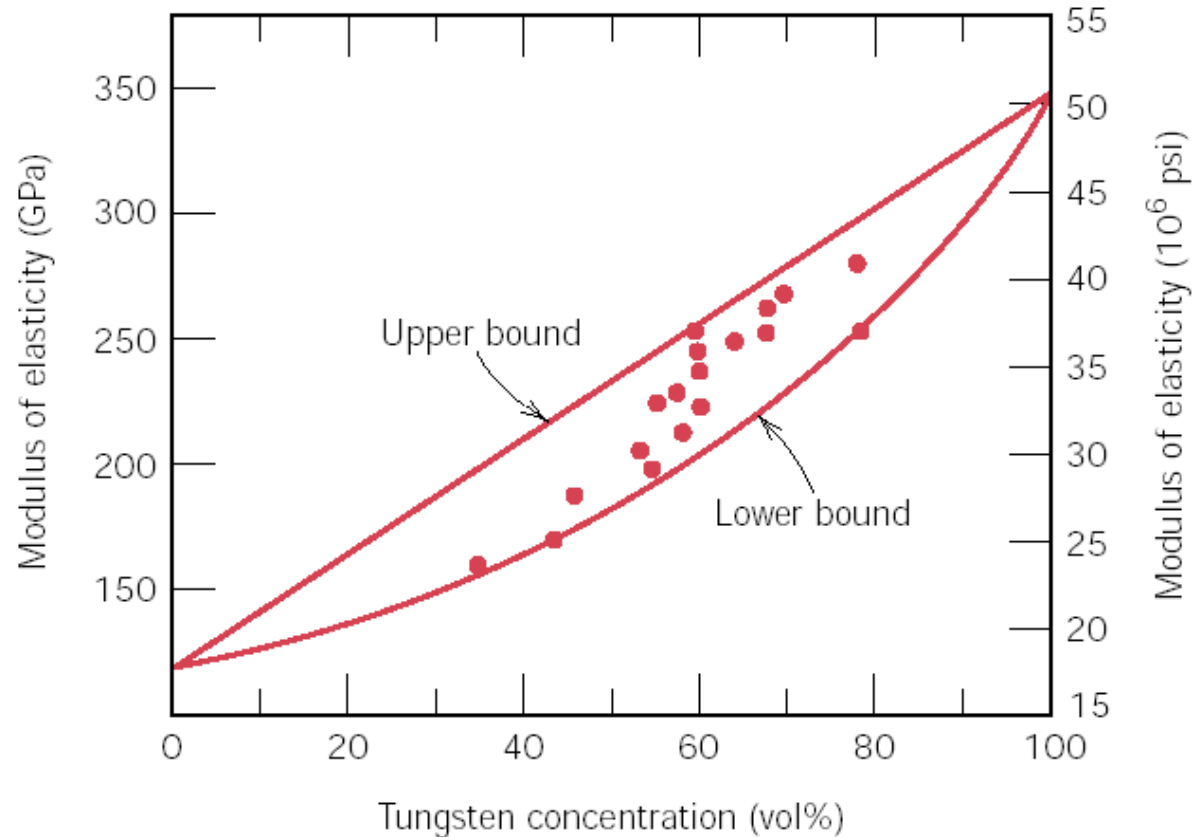
σ (MPa)	ε
0	0
300	0,0041
600	0,0082
700	0,10

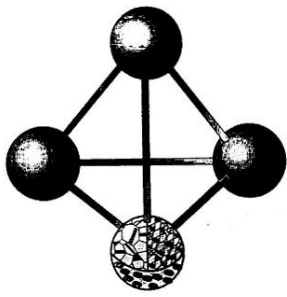


Regra de misturas

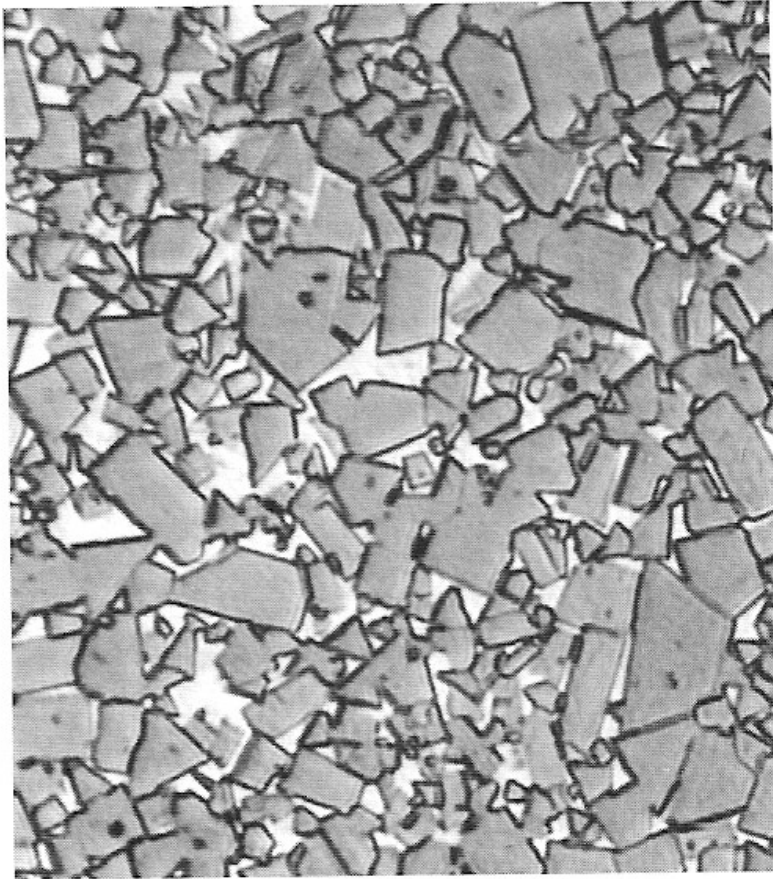
Partículas de W
Em cobre:

Existe limite superior
E limite inferior
Para E

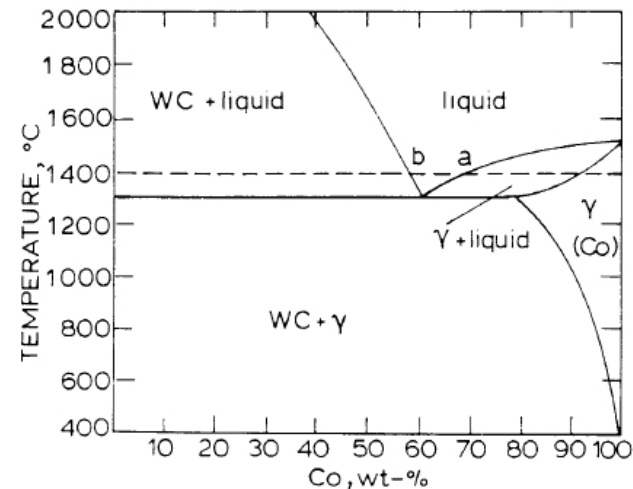




Exemplo de MMC: broca de metalduro

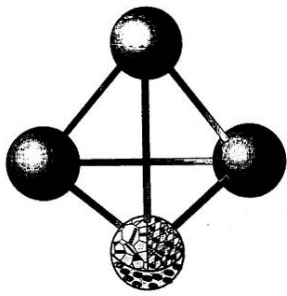


WC confere a dureza e a resistência ao desgaste necessários ao corte de concreto. Cobalto confere tenacidade.

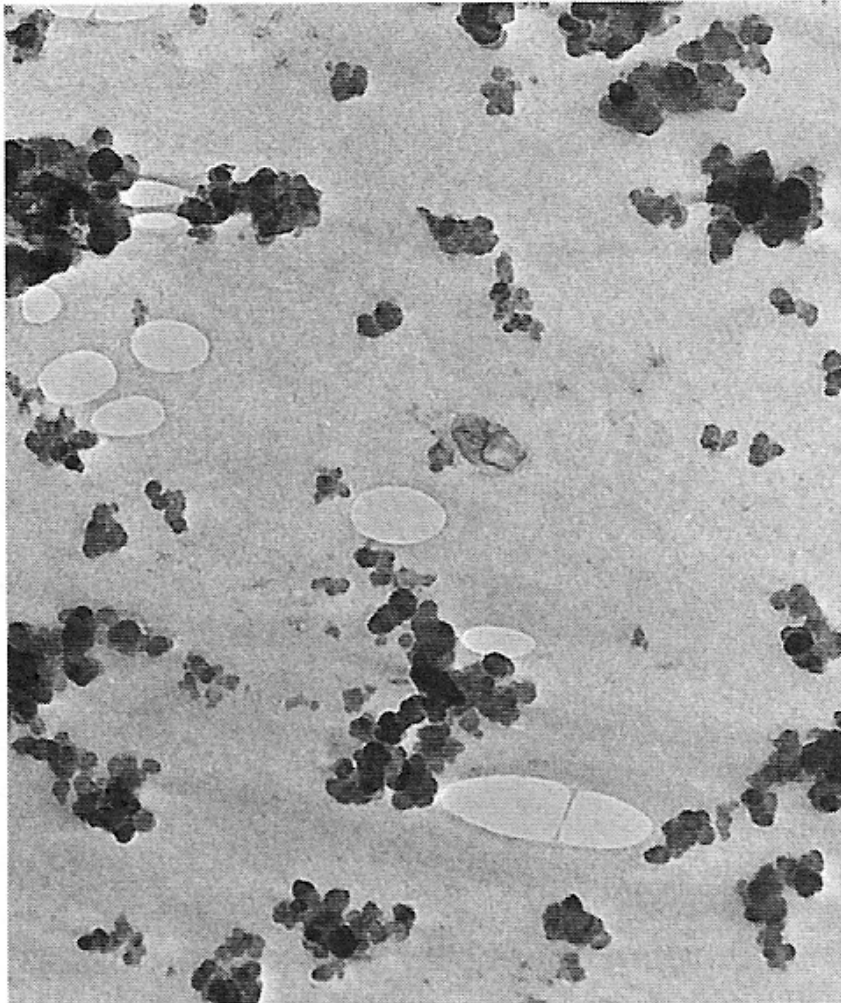


Partículas de WC em matriz de Co, MO

Partículas medem ~10 μm



Exemplo de PMC: borracha do pneu



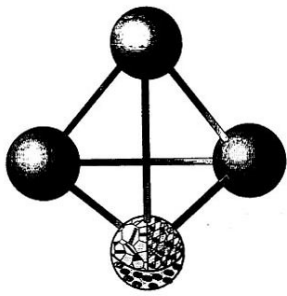
Matriz: elastômero

Partículas: negro de fumo (carbono), MET

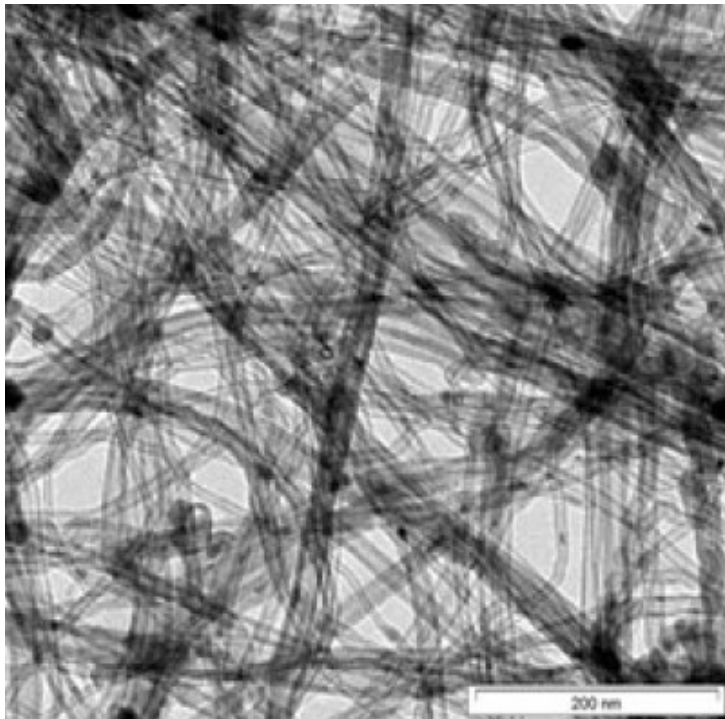
partículas filtram UV
e aumentam resistência mecânica

Partículas de negro de fumo
cada uma mede de 20 a 50nm, mas
ocorrem aglomeradas.

Fase elipsoidal é bolsão de água na borracha



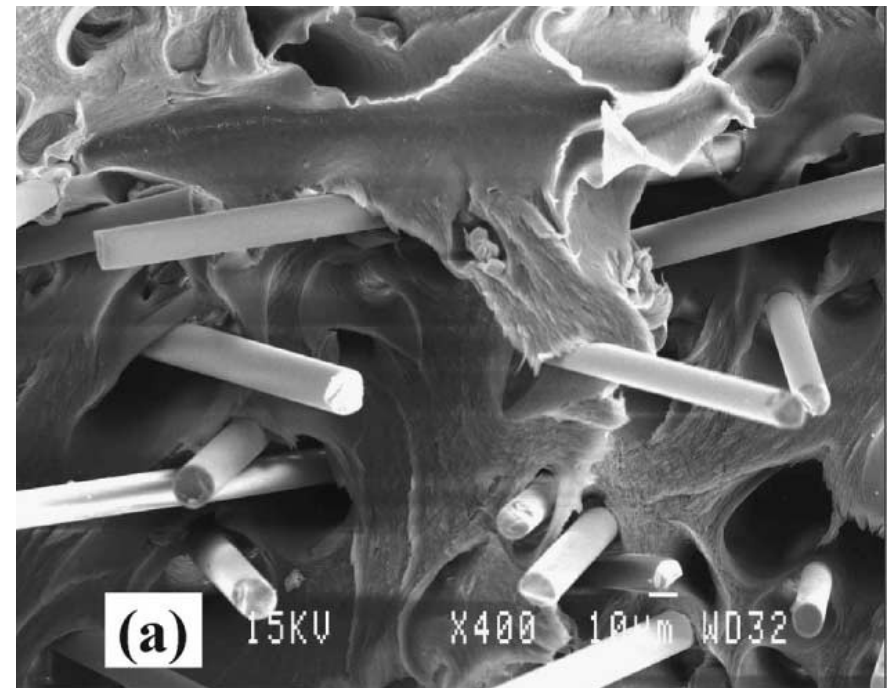
Exemplo de PMC: Compósitos com Nylon

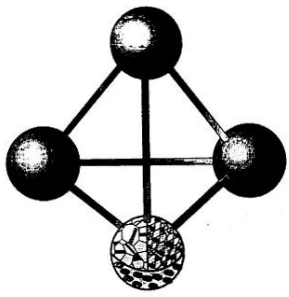


Matriz: Nylon-6
Reforço: nanotubos de carbono, MET
(em desenvolvimento,
condutividade térmica, resist. mecânica)



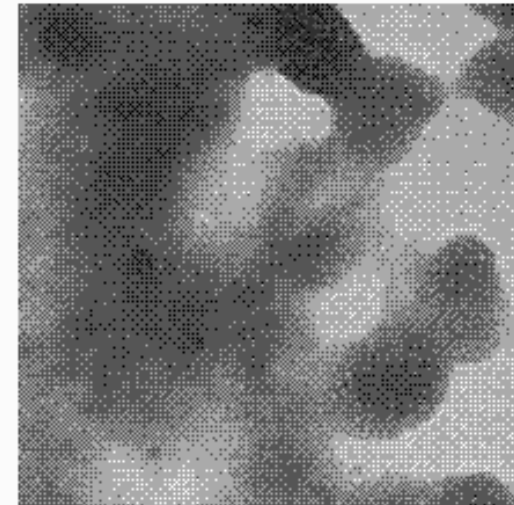
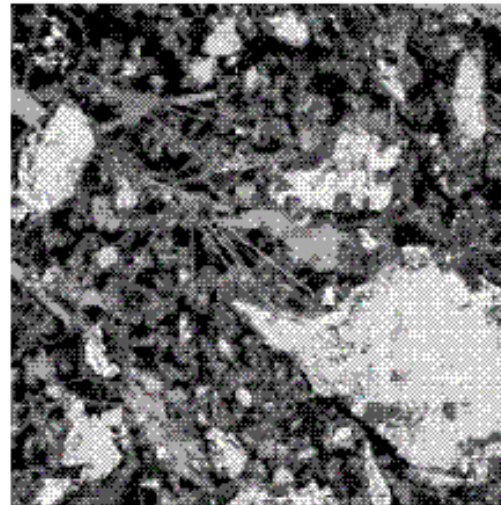
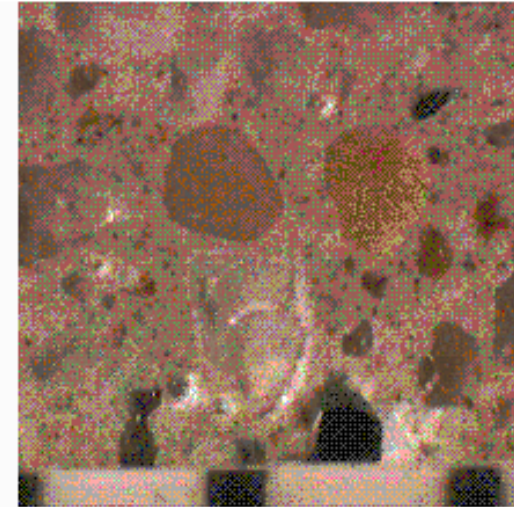
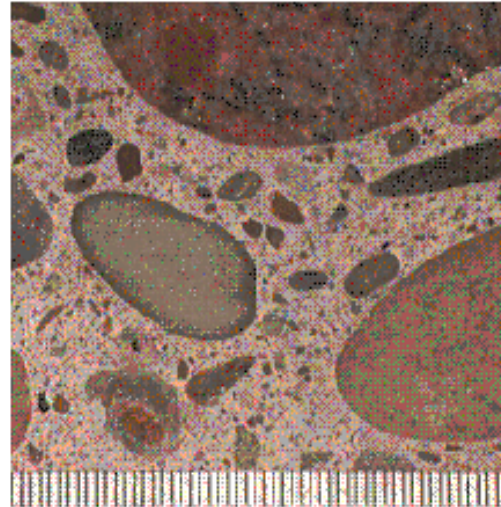
Matriz: Nylon-6,6 + SEBS-g-MA
Reforço: fibra de vidro, MEV
(aplicação automobilística)

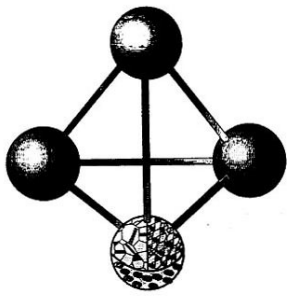




Exemplo de CMC: concreto

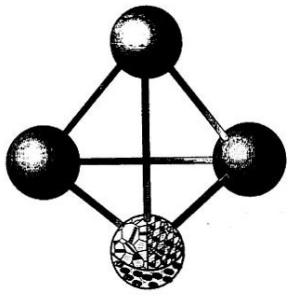
- Matriz: cimento + água
- Partículas: areia e brita



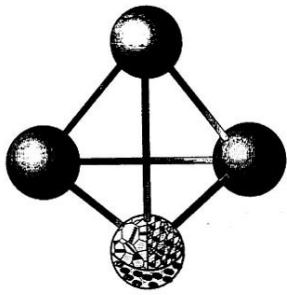


Compósitos reforçados por dispersão

- Usado nos MMC, quando é necessária alta resistência em alta T, fluência (indústria espacial)
- chamados de ODS- Oxide Dispersion Strengthened:
 - Adição de óxidos finos
 - 3% de óxido de tório em Ni: é o níquel TD
 - Alumina em alumínio (sinterização de pós de alumínio cobertos por camada de Al_2O_3)

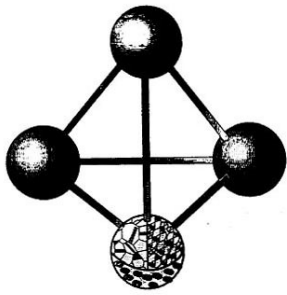


- Fim da primeira aula.
- Ler capítulo 17 do Callister.



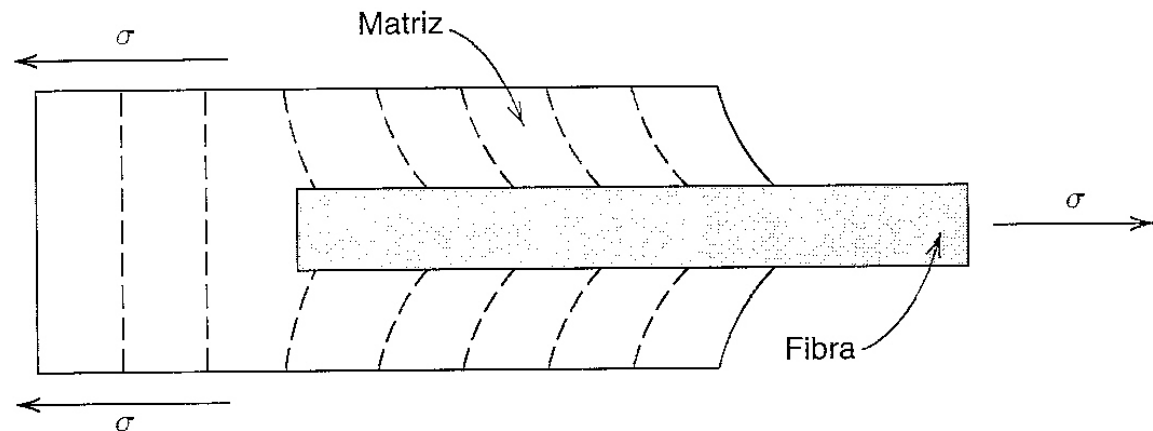
Compósitos reforçados com fibras

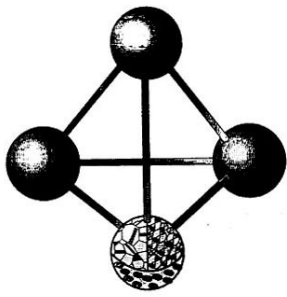
- São os mais comuns.
- Vantagem é alta resistência ou alta rigidez da fibra, aliado à baixa densidade da matriz.
 - Resistência a tração σ_f
 - Módulo de elasticidade E
 - Densidade relativa d
 - Resistência específica σ_f/d
 - Módulo específico E/d



Influência do comprimento da fibra

Resistência depende do quanto a carga é transferida para a fibra
Ligação interfacial entre fibra e matriz cessa na ponta da fibra,
Deformando a matriz naquela região.

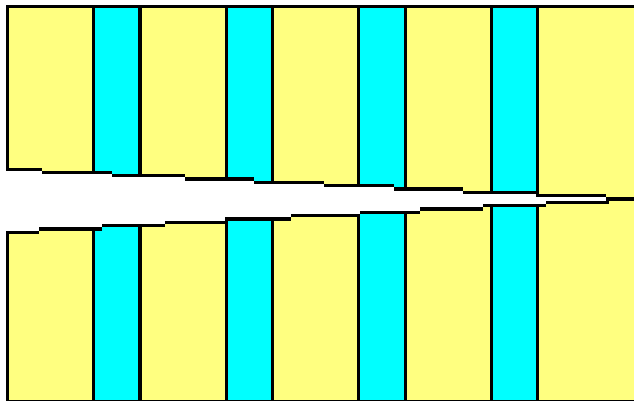




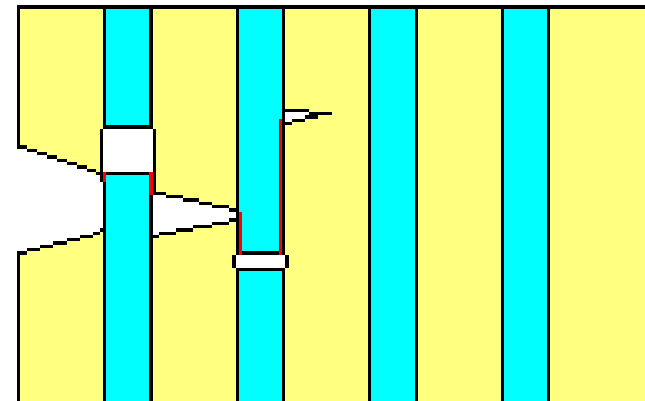
Influência do comprimento da fibra

Compósitos reforçados com fibras requerem uma adesão moderada entre matriz e fibra :

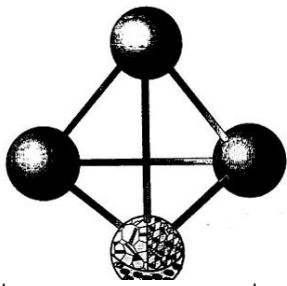
- uma alta adesão entre as duas fases confere boa resistência mecânica pela transferência eficiente de carga da matriz para as fibras, porém o material torna-se frágil.
- uma baixa adesão resulta em baixa resistência mecânica, mas a energia absorvida na fratura (tópico 3) aumenta por dissipação de energia durante o processo de descolamento da fibra (puxamento da fibra – fiber pullout)



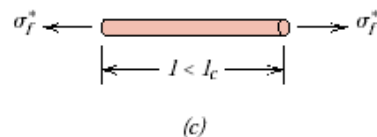
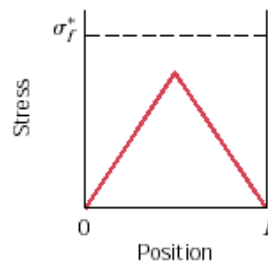
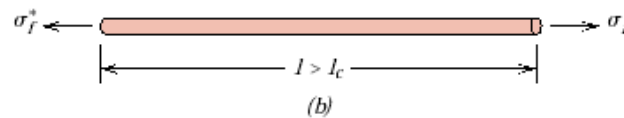
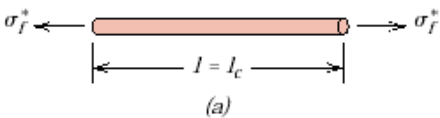
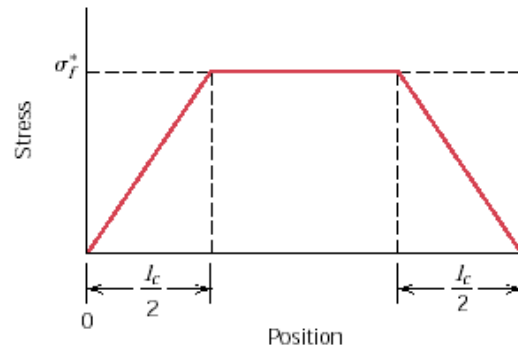
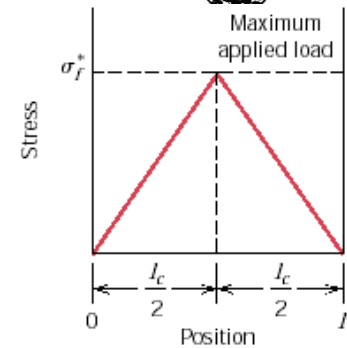
alta adesão



baixa adesão



Influência do comprimento da fibra



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

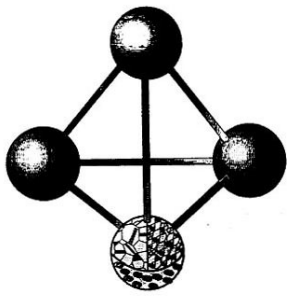
. σ_f limite de resistencia da fibra

. τ_c resistência ao cisalhamento da interface

. d diâmetro da fibra

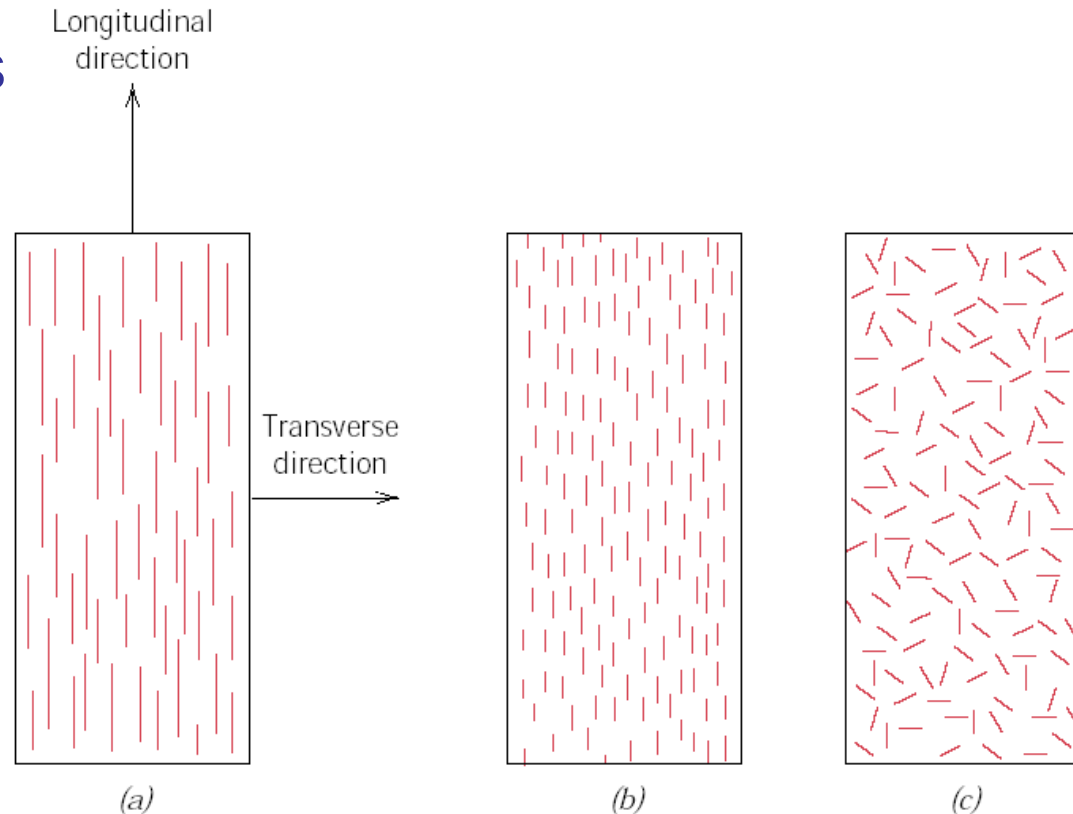
Em compósitos com fibra de vidro ou carbono,
 $\ell_c \sim 1\text{mm}$ para $d \sim 1\mu\text{m}$

“Fibras contínuas” : $\ell > 15 \ell_c$
 Se não, “fibras curtas”

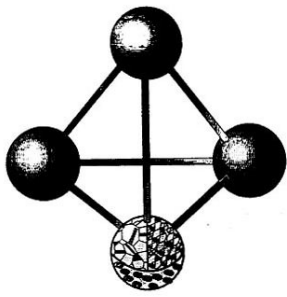


Fibras contínuas

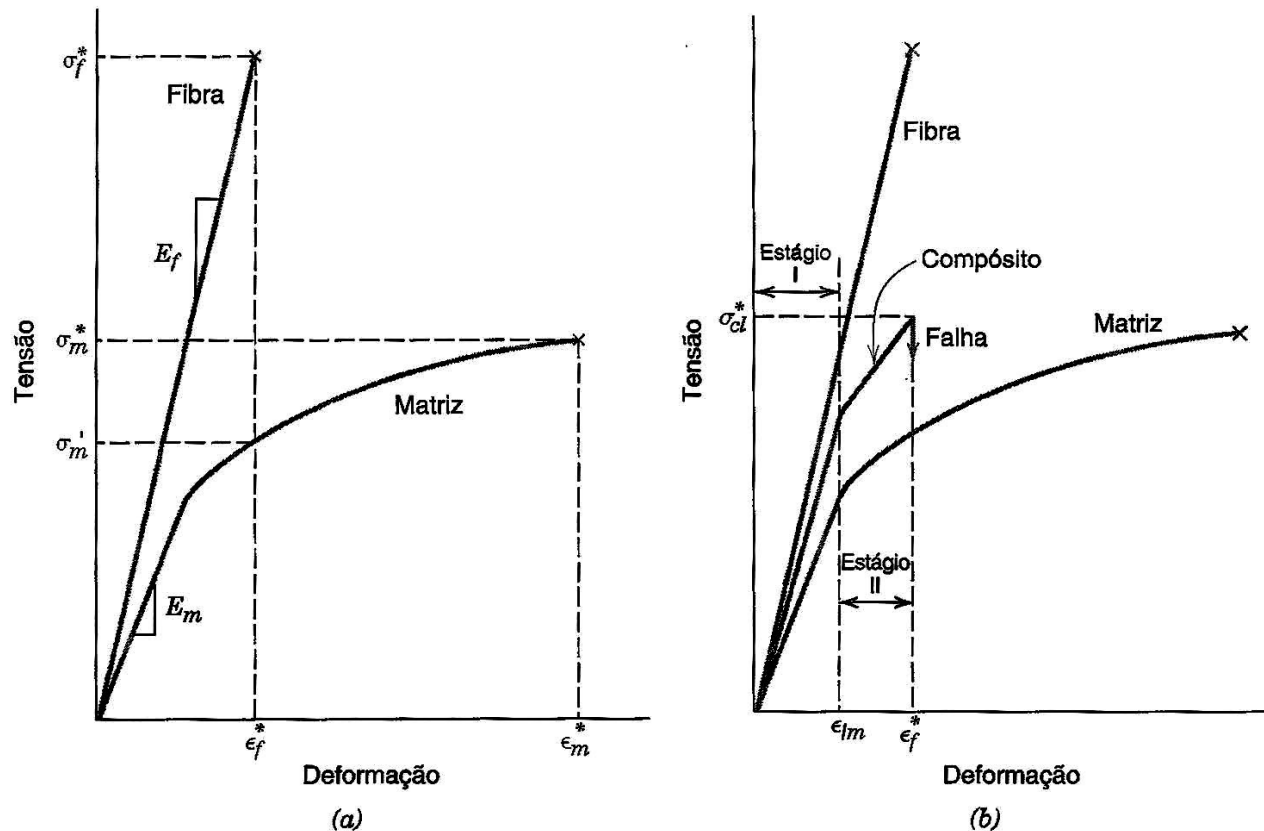
- Quando o processo de fabricação garante que as fibras fiquem alinhadas, surge a **anisotropia** das propriedades:
- Propriedades dependem da direção em que aplico carga, em relação à direção das fibras



Fibra curta: alinhada ou aleatória



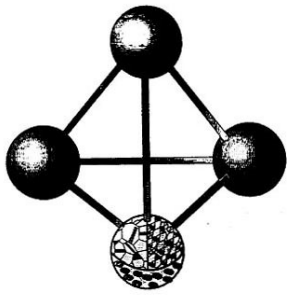
Carregamento longitudinal em fibras contínuas e alinhadas



Estágio I: fibra e matriz escoam elasticamente

Estágio II: matriz entra em regime plástico.

Falha em ϵ_f^* mas pode não ser catastrófico



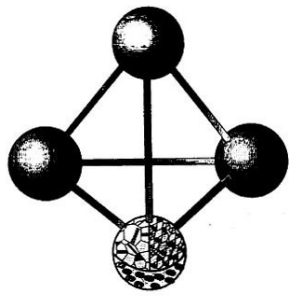
Cálculo de E do compósito,

para carregamento longitudinal

$$E_c(l) = E_m V_m + E_f V_f$$

Para carregamento na transversal

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



Exercício 2

1. A Figura 1 representa duas configurações possíveis de carregamento em compósitos reforçados por fibra: longitudinal (a) e transversal (b). Deduza para cada caso a relação entre o módulo de Young do compósito na configuração longitudinal ($E_{||}$) e transversal ($E_{\perp}$) em função das propriedades do reforço (E_f) e da matriz (E_m) e de suas respectivas frações volumétricas (V_f e V_m):

$$E_{||} = V_f E_f + V_m E_m \quad (1a)$$

e

$$\frac{1}{E_{\perp}} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \quad (1b)$$

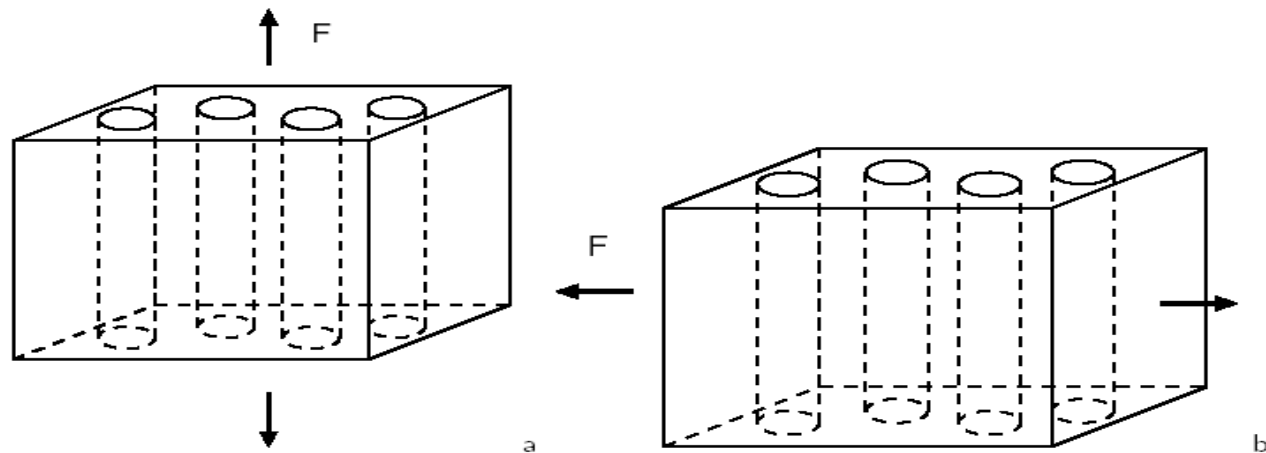
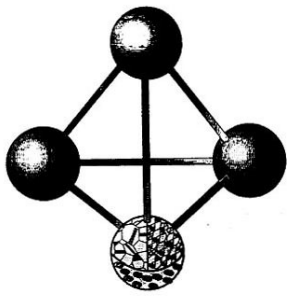


Figura 1: Modos de carregamento de compósitos reforçados por fibras contínuas. (a) longitudinal e (b) transversal.

- No primeiro caso considere que as deformações são idênticas na matriz e na fibra (condição de isodeformação, *isostrain*), no segundo, que as tensões são idênticas na matriz e na fibra (condição de isotensão, *isostress*).

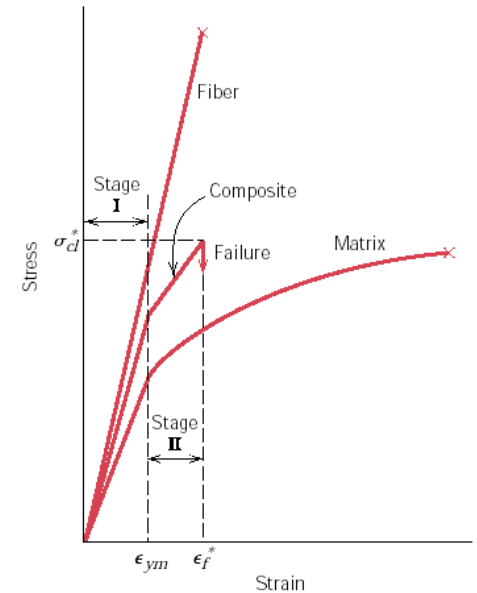
Considerar que fração de área = fração de volume



Anisotropia do limite de resistência

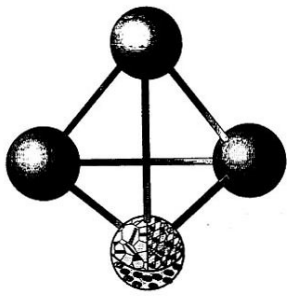
$$\sigma_{cl} = \sigma'_m (1 - V_f) + \sigma_f V_f$$

Limite de resistência do compósito na longitudinal
Pode ser estimado com base no gráfico,
Mas na transversal é muito menor.



Concentração de fibra 50%

material	LR tração L (MPa)	LR tração T (MPa)
Vidro-poliester	700	20
Carbono-epóxi	1000	35
poliamida-epóxi	1200	20

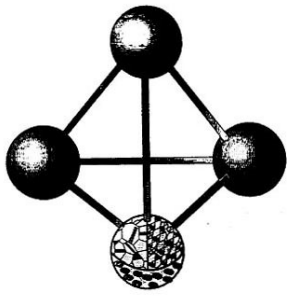


Exercício 17.11 (Callister)

- Quer-se produzir um compósito com fibras contínuas e alinhadas, tal que ela consista em 30% volume de fibras aramida e 70% volume de uma matriz a base de policarbonato (PC); as características mecânicas desses dois materiais são:
- | Material | E (GPa) | LR (MPa) |
|----------------|---------|----------|
| Fibras aramida | 131 | 3600 |
| Policarbonato | 2,4 | 65 |

Ainda, a tensão sobre a matriz de PC, quando as fibras aramida falham, é de 45MPa.

Para esse compósito, calcule o limite de resistência à tração longitudinal



A fase fibra

- 3 classes

- Whiskers

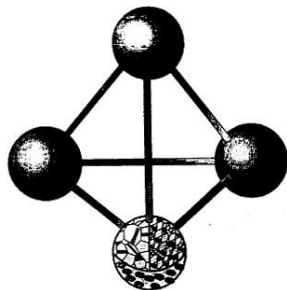
Monocristais, altíssima resistência, caros

- Fibras

Policristais ou amorfos, finas

- arames

Diâmetros dezenas de microns
ex.: arame nos pneus

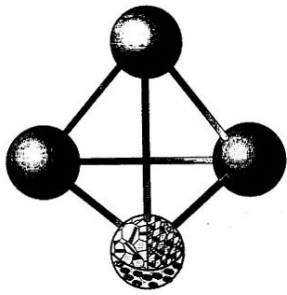


A fase Fibra

Tabela 17.4 Características de Diversos Materiais Usados para Reforço com Fibras

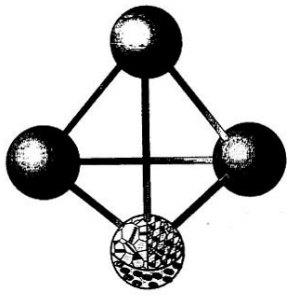
<i>Material</i>	<i>Densidade Relativa</i>	<i>Limite de Resistência à Tração [GPa (10⁶ psi)]</i>	<i>Resistência Específica (GPa)</i>	<i>Módulo de Elasticidade [GPa (10⁶ psi)]</i>	<i>Módulo Específico (GPa)</i>
<i>Úsqueres</i>					
Grafita	2,2	20 (3)	9,1	700 (100)	318
Nitreto de silício	3,2	5-7 (0,75-1,0)	1,56-2,2	350-380 (50-55)	109-118
Óxido de alumínio	4,0	10-20 (1-3)	2,5-5,0	700-1500 (100-220)	175-375
Carbeto de silício	3,2	20 (3)	6,25	480 (70)	150
<i>Fibras</i>					
Óxido de alumínio	3,95	1,38 (0,2)	0,35	379 (55)	96
Aramida (Kevlar 49)	1,44	3,6-4,1 (0,525-0,600)	2,5-2,85	131 (19)	91
Carbono ^a	1,78-2,15	1,5-4,8 (0,22-0,70)	0,70-2,70	228-724 (32-100)	106-407
Vidro E (<i>E-Glass</i>)	2,58	3,45 (0,5)	1,34	72,5 (10,5)	28,1
Boro	2,57	3,6 (0,52)	1,40	400 (60)	156
Carbeto de silício	3,0	3,9 (0,57)	1,30	400 (60)	133
UHMWPE (Spectra 900) (Polietileno com Peso Molecular Ultra-Alto)	0,97	2,6 (0,38)	2,68	117 (17)	121
<i>Arames Metálicos</i>					
Aço de alta resistência	7,9	2,39 (0,35)	0,30	210 (30)	26,6
Molibdênio	10,2	2,2 (0,32)	0,22	324 (47)	31,8
Tungstênio	19,3	2,89 (0,42)	0,15	407 (59)	21,1

^aO termo “carbono”, em vez de “grafita”, é usado para identificar essas fibras, uma vez que elas são compostas por regiões cristalinas de grafita e também por material não-cristalino e áreas com desalinhamento do cristal.



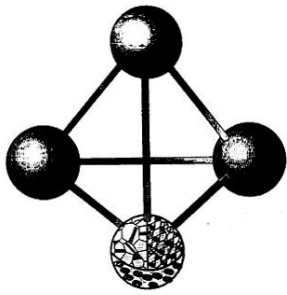
Compósitos com matriz polimérica

- Matrizes:
 - Termorígidas: Poliésteres e vinil-ésteres, Epóxi, fenólicas
 - Termoplásticas: PA, PEEK, PPS, PEI
 - (poliamida, polieteretercetona, poli(sulfeto de fenileno), Polieterimida)
- Reforços
 - fibra de vidro (GFRP)
 - fibra de carbono (CFRP)
 - fibras aramidas (poliaramidas)



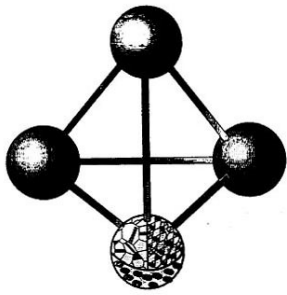
Compósitos de fibra de vidro

- Vantagens
 - Alto σ_f^* (3500 MPa), barato, inerte
- Usos
 - Carcaças automotivas e marítimas
 - Recipientes de armazenamento
- Limitações
 - Baixa rigidez (70 GPa)
 - $T_{max} < 200^\circ \text{ C}$



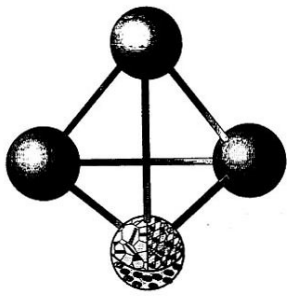
Fabricação da fibra de vidro

- 55%SiO₂, 16%CaO, 15%Al₂O₃, 10%B₂O₅ e 4%MgO.
- Diâmetros entre 3 e 20µm.
- Muito sensível a defeitos superficiais da fibra
- Exposição da fibra à atmosfera normal deteriora superfície
- São recobertas com capa protetora
- Algumas capas devem ser removidas antes da fabricação do compósito.
- Podem ser usadas na forma de fios, mantas e tecidos (ver amostras)



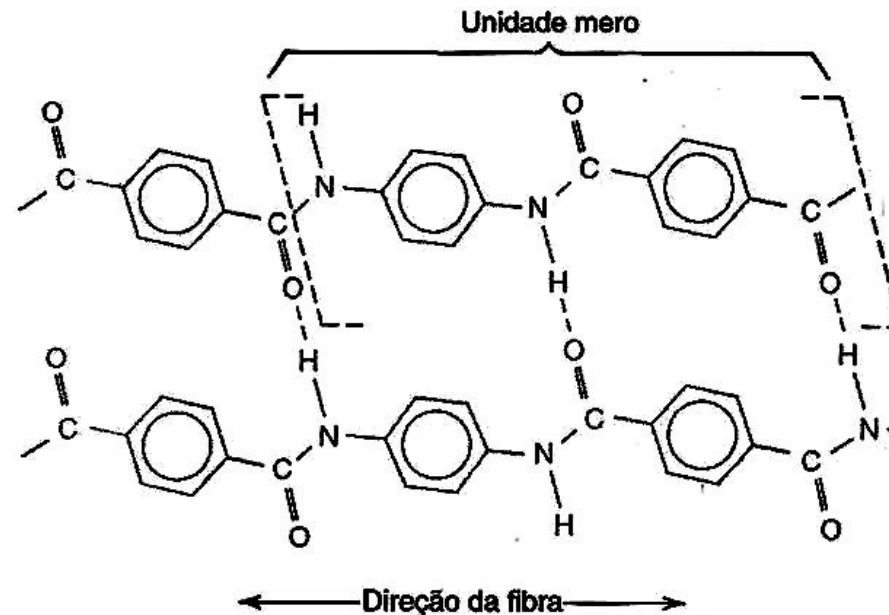
Compósitos de fibras aramida ("kevlar")

- Vantagens
 - Baixa densidade relativa (1,44)
 - Alta tenacidade
 - Dutilidade permite tecelagem
- Usos
 - Blindagem balística
 - Artigos esportivos, pneus
- Limitações
 - Susceptíveis a ácidos e bases fortes
 - Baixa resistência à compressão
 - Custo (> fibra de vidro)

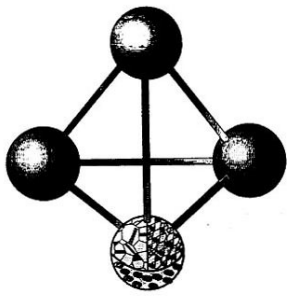


Fabricação das aramidas

- Poli-parafenileno-tereftalamida
- Moléculas rígidas são alinhadas ao longo da fibra



Ligações secundárias fortes e arquitetura com anéis benzênicos entre cadeias adjacentes conferem rigidez à fibra

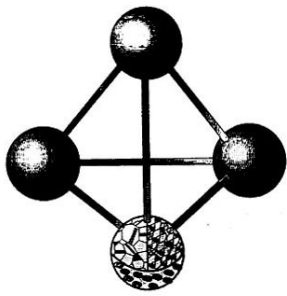


Comparações entre compósitos de matriz epóxi

Tabela 17.5 Propriedades de Compósitos com Matriz de Epóxi Reforçados com Fibras Contínuas e Alinhadas de Vidro, Carbono e Aramidas nas Direções Longitudinal e Transversal. Em Todos os Casos a Fração Volumétrica da Fibra é de 0,60

<i>Propriedade</i>	<i>Vidro</i> [<i>Vidro E (E-Glass)</i>]	<i>Carbono</i> (<i>Alta Resistência</i>)	<i>Aramida</i> (<i>Kevlar 49</i>)
Densidade relativa	2,1	1,6	1,4
Módulo de tração			
Longitudinal [GPa (10 ⁶ psi)]	45 (6,5)	145 (21)	76 (11)
Transversal [GPa (10 ⁶ psi)]	12 (1,8)	10 (1,5)	5,5 (0,8)
Limite de resistência à tração			
Longitudinal [MPa (ksi)]	1020 (150)	1240 (180)	1380 (200)
Transversal [MPa (ksi)]	40 (5,8)	41 (6)	30 (4,3)
Deformação no limite de resistência à tração			
Longitudinal	2,3	0,9	1,8
Transversal	0,4	0,4	0,5

Fonte: Adaptado de R. F. Floral e S. T. Peters, “Composite Structures and Technologies”, notas de sala de aula, 1989.



Processamento de compósitos reforçados com fibras

Pultrusão: produtos longos e seção transversal constante.

mechas de fibras

Usado com fibras de vidro, carbono e aramidas

concentração entre 40 e 70% fibras

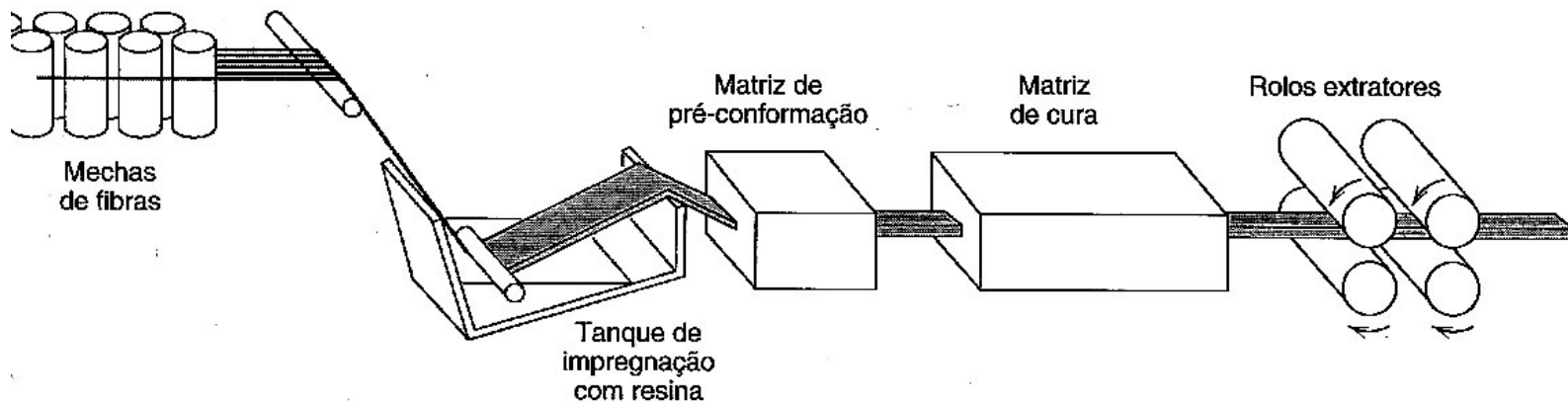
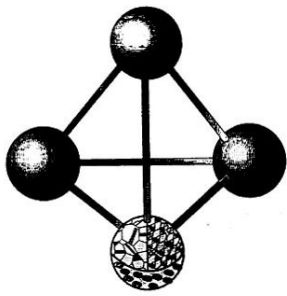
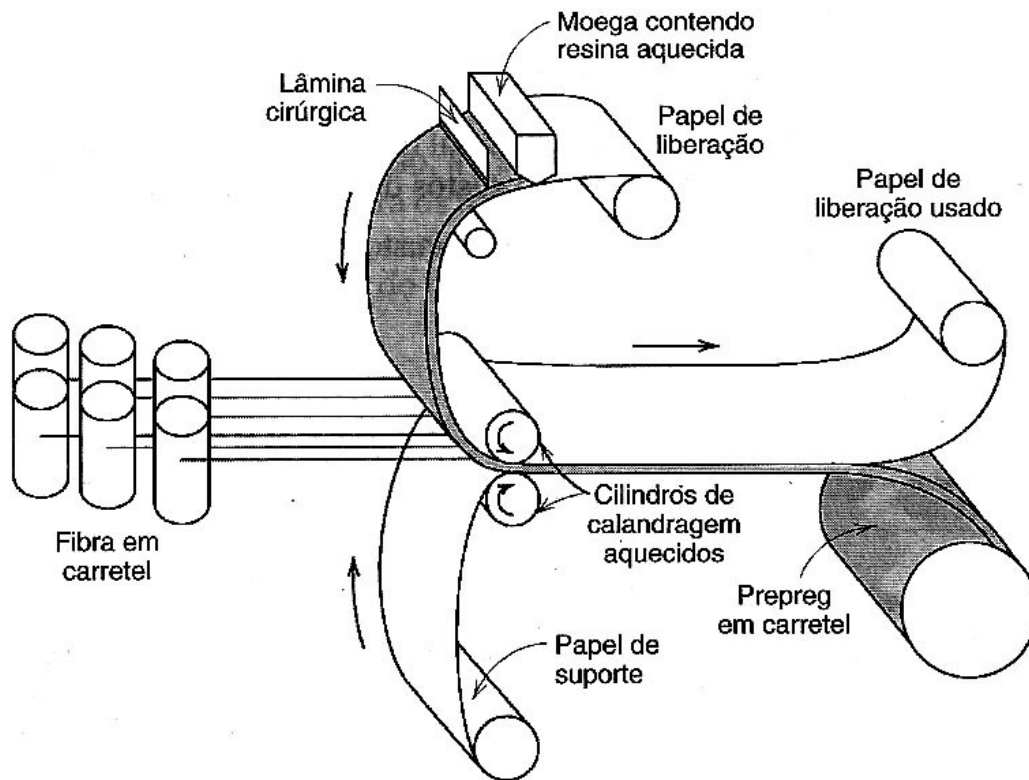


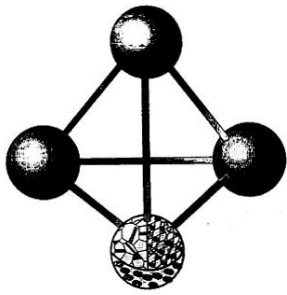
Fig. 17.12 Diagrama esquemático mostrando o processo de pultrusão.



Processo Prepreg

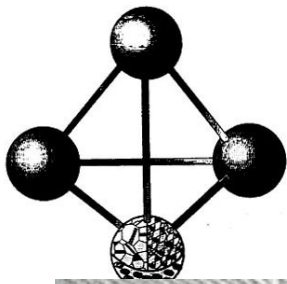
Fibras contínuas pré-impregnadas com resina parcialmente curada.



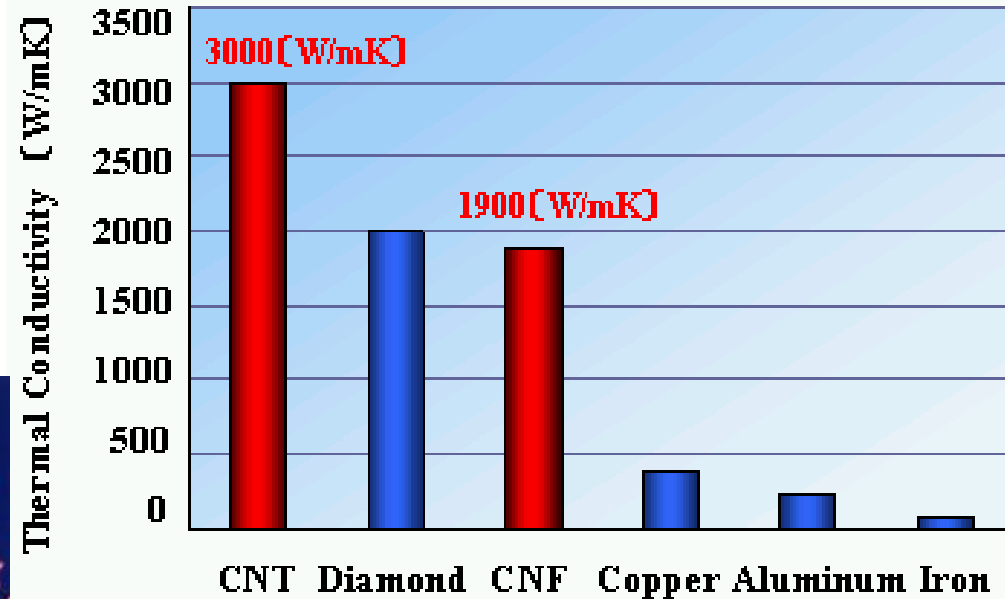
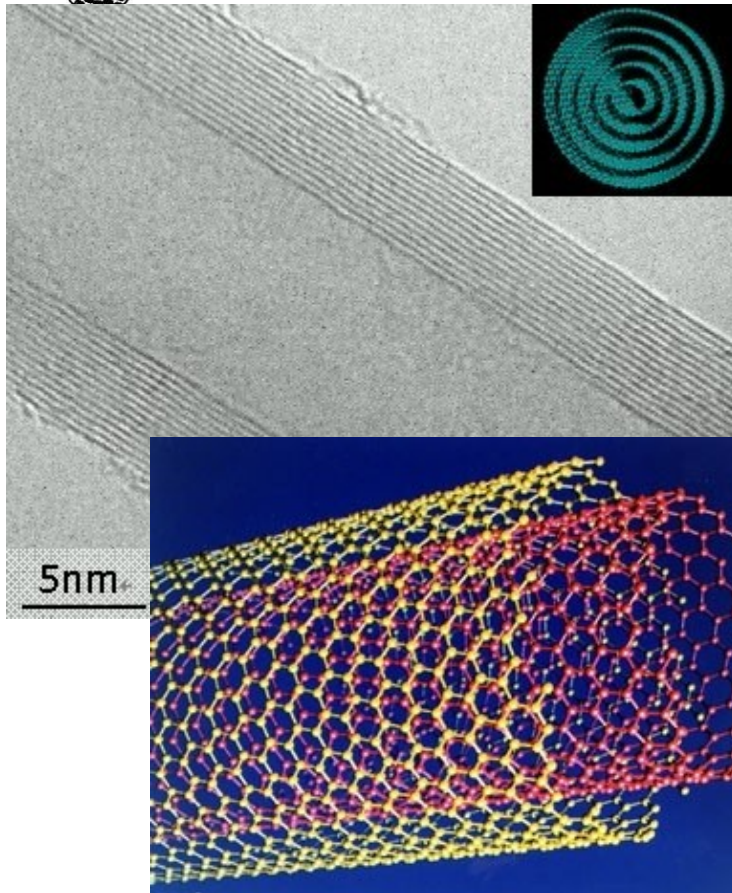


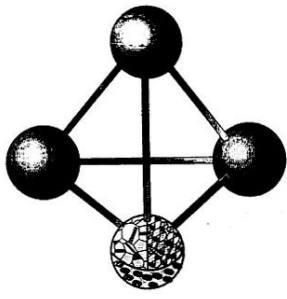
Outras aplicações de compósitos

- Elétricas
 - Cabo de cobre reforçado com aço
- Magnéticas
 - Pó de ferro em matriz isolante polimérica (aplicação nobre: imã de geladeira)
- Térmicas
 - Nanotubos de carbono



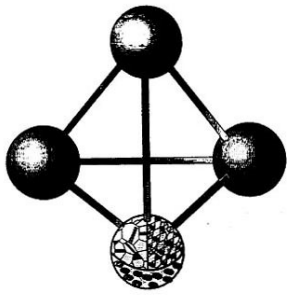
Nanotubos de carbono





Literatura

- Capítulo 17 do W. Callister



Sites interessantes

- Amostras na aula: <http://www.hurner.com.br>
- Notícias: <http://www.compositesnews.com/>
- Ass. Bras. Mat. Compósitos:
<http://www.abmaco.org.br/>
- <http://www.jeccomposites.com/>
- Nanotubos:
<http://depts.washington.edu/polylab/cn.html>
- Saint Gobain: <http://www.sgva.com/>
- <http://oea.larc.nasa.gov/PAIS/Concept2Reality/composites.html>