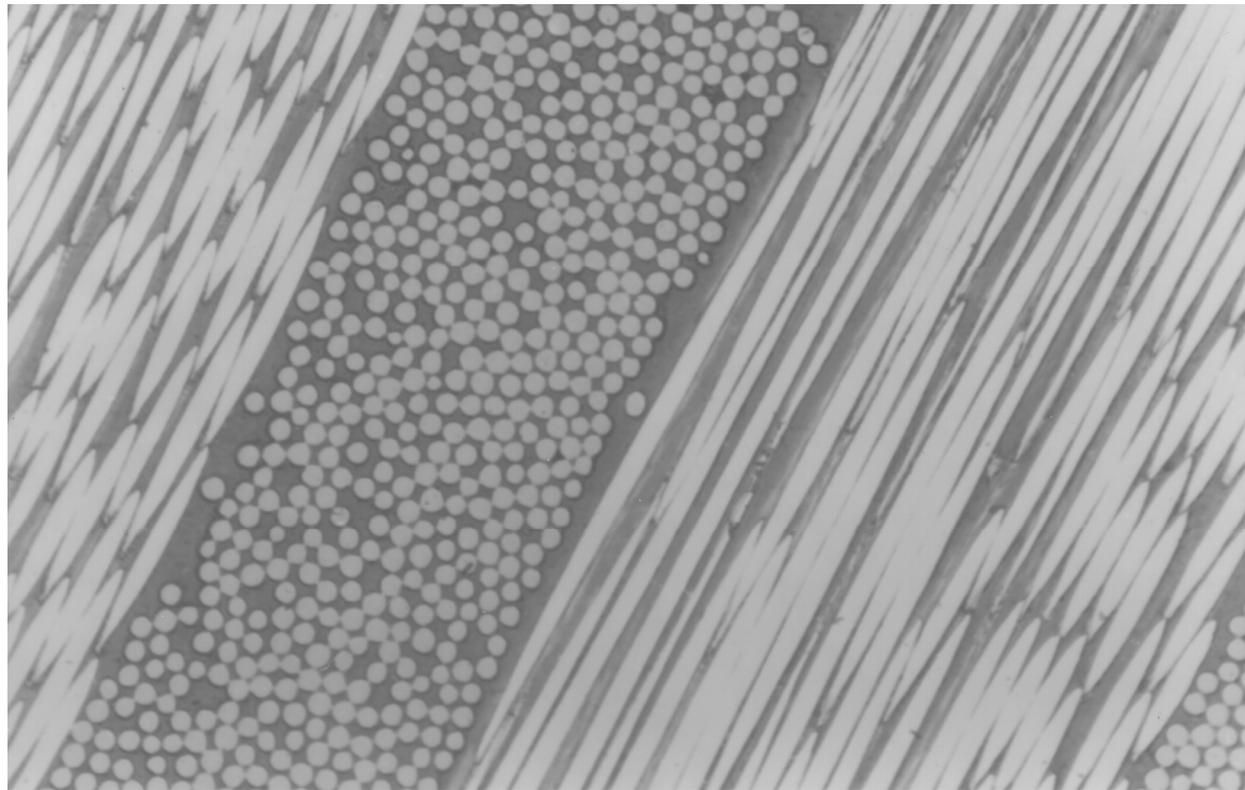
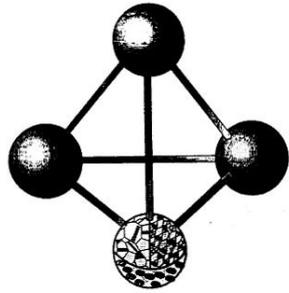


# Materiais Compósitos

Baseado no Cap. 17 do Callister

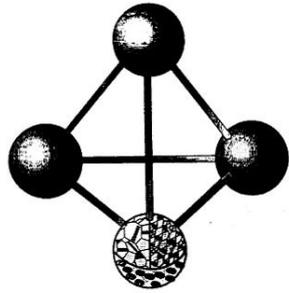


Epoxi-fibra de Carbono, diâmetro de fibra 7  $\mu\text{m}$ . Foto de Gerson Marinucci, IPEN.



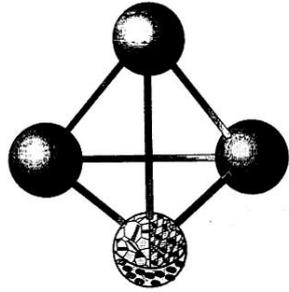
# Compósitos

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



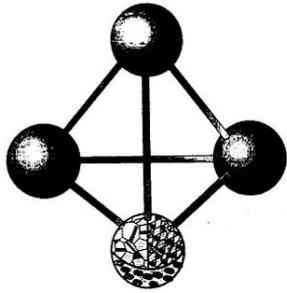
- Essa idéia ainda é empregada hoje – ainda se constrói com tijolos de terra seca reforçada com fibras naturais cortadas (palha) (“adobe”).



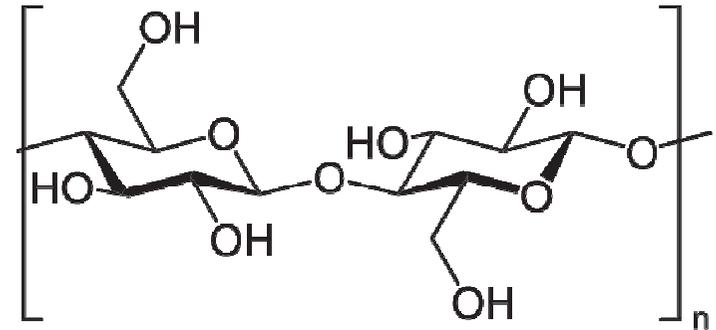


# Exemplos naturais

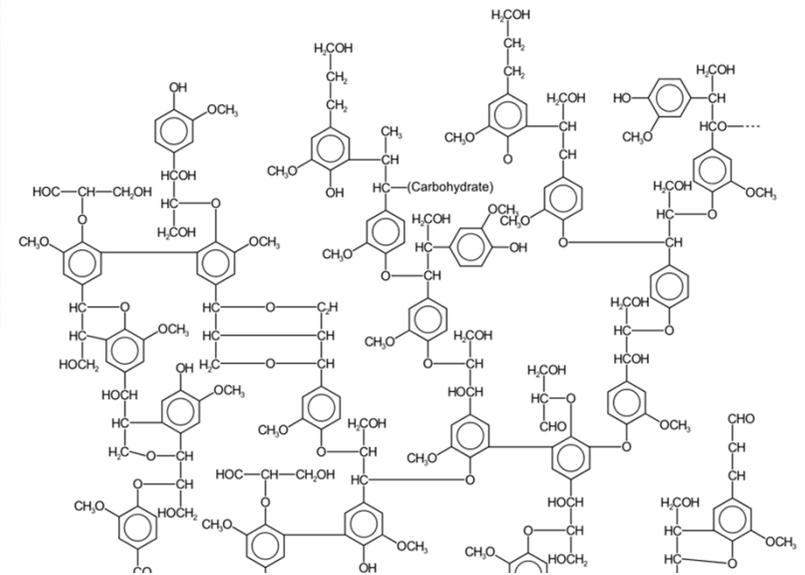
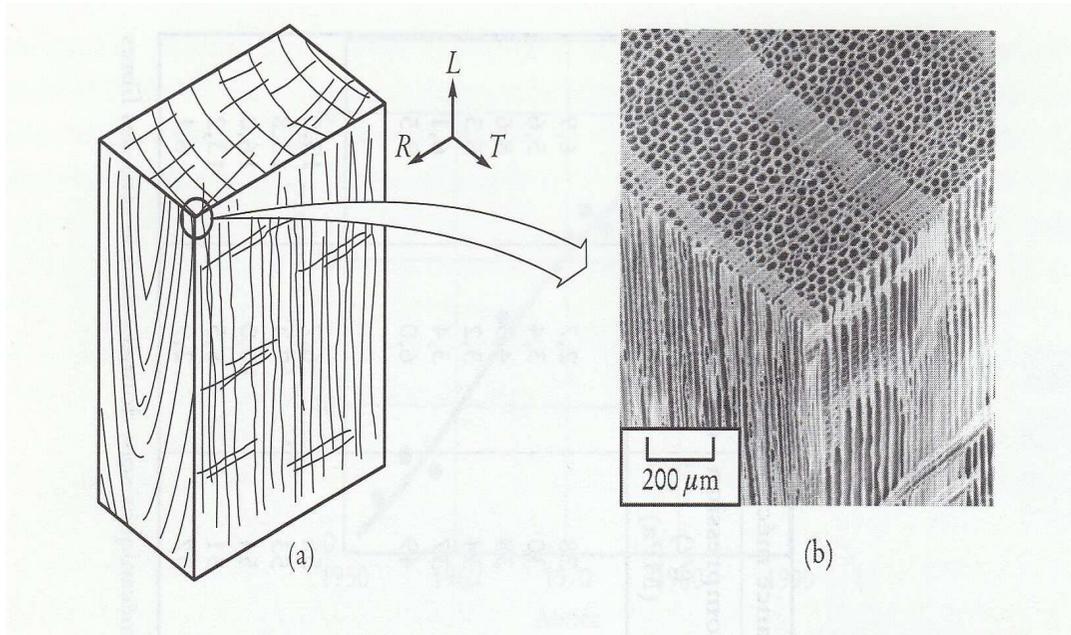
- Ossos
  - colágeno (proteína de elevada resistência, mas mole), junto com apatita (resistente, rígido, mas frágil).
- Madeira
  - fibras de celulose + hemicelulose resistentes e flexíveis, envolvidas por lignina, mais rígida.
- Conchas
  - cristais de carbonato de cálcio (calcita e aragonita), ligados por moléculas orgânicas (proteínas).



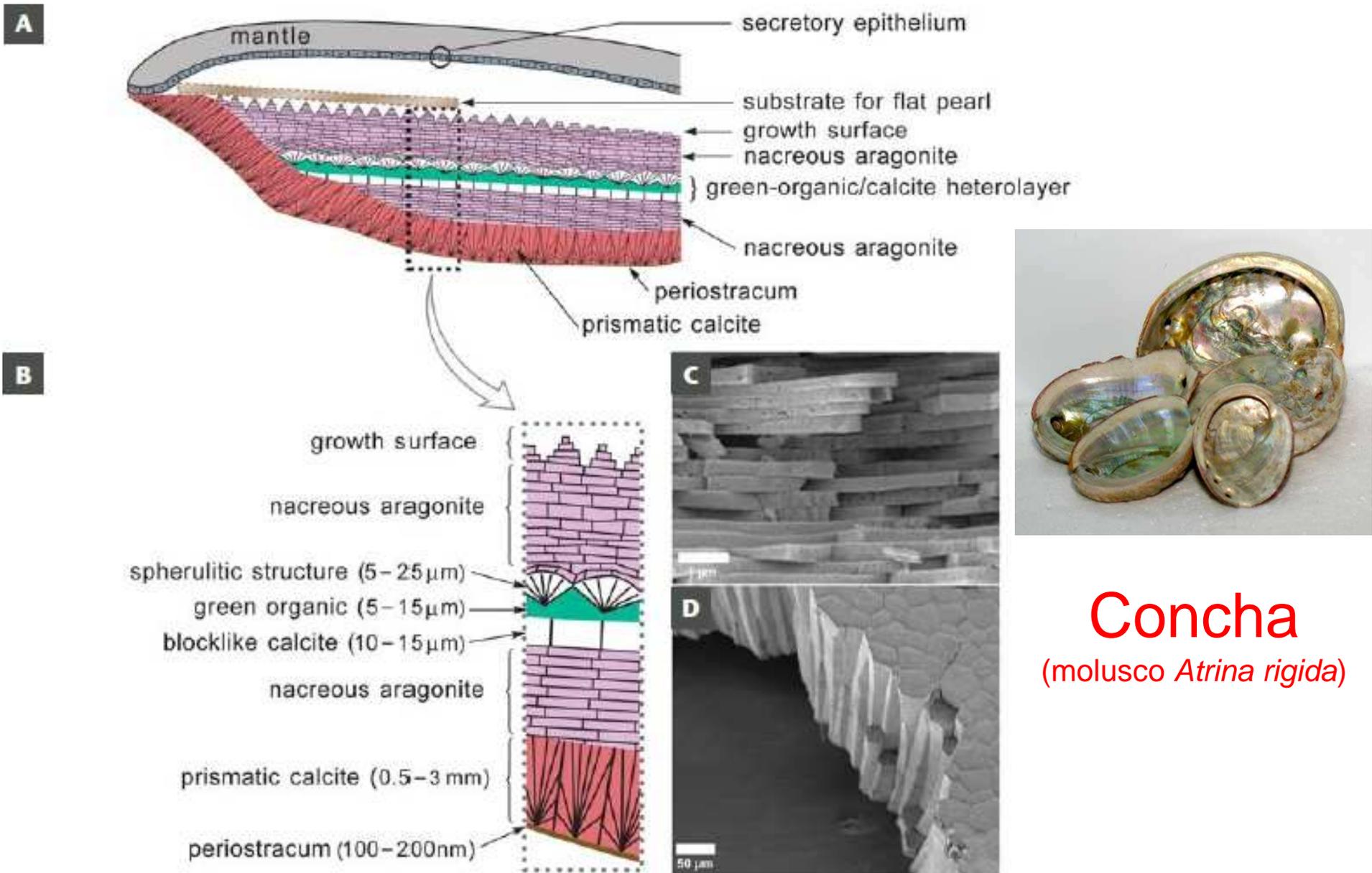
# Madeira



Monômero glicose: celulose



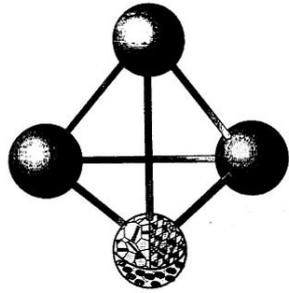
Lignina



**FIGURE 2** Multilayer composites. (A) Schematic (not drawn to scale) of the shell and mantle of the red abalone (*Atrina rigida*). (B) Enlargement of the area outlined in (A) indicating the thickness of shell structures with morphologically and mineralogically distinct forms of  $\text{CaCO}_3$ . The mineral is interlayered with organic matrix that occurs as thin layers and provides substrate to

direct the onset of new layers. COLOR ILLUSTRATION BY ANNE MARIE KRAL, 1995, AND REPRODUCED WITH PERMISSION OF D. MORSE, UCSB. (C) SEM image showing a cross section of interlocking aragonite tablets that comprise the nacreous layer; (D) Prismatic calcitic outer layer of the shell. C AND D COURTESY OF L. ADDADI

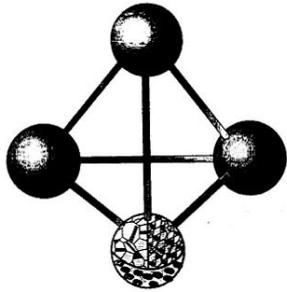
## Concha (molusco *Atrina rigida*)



O Lamborghini Sesto Elemento pesa apenas 999 kg



Novo processo de produção: onde um composto pastoso de fibra de carbono e resina epóxi é injetado a alta pressão em moldes especiais. Este novo material foi chamado de *Forged Composite* (compósito forjado, em alusão aos processos de forjamento de alta pressão em moldes fechados).



# Uso de compósitos está crescendo

Tipos de compósitos:

Materials used in 787 body

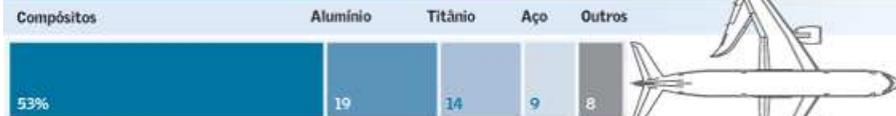
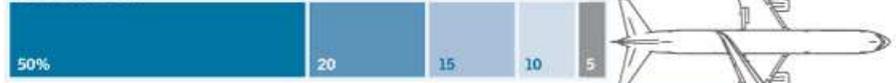
- Fiberglass
- Aluminum
- Carbon laminate composite
- Carbon sandwich composite
- Aluminum/steel/titanium



## Mais leves, rápidos e duráveis

Boeing e Airbus estão ampliando a variedade de materiais usados nos seus aviões

BOEING 787



AIRBUS A350

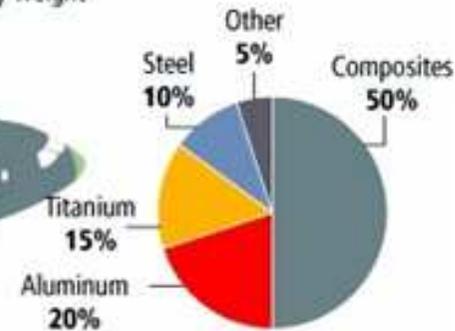
Nota: Percentagens não somam 100 devido a arredondamento

Fuente: As empresas

The Wall Street Journal

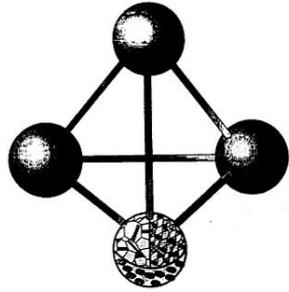
## Total materials used

By weight



By comparison, the 777 uses 12 percent composites and 50 percent aluminum.

Novo Boeing 787 Dreamliner, o primeiro avião comercial a ser construído com **50% de compósitos**.



## Estrutura do compósito

- Compósitos de engenharia costumam ter:

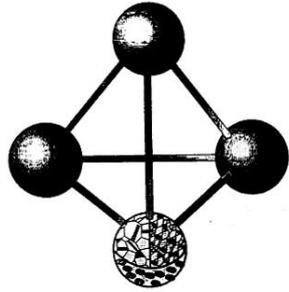
Fase matriz + fase dispersa

Fase matriz (fase contínua):

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

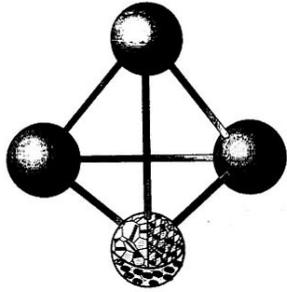
Fase dispersa:

inúmeras possibilidades (*polímeros, cerâmicas, metais, minerais, materiais orgânicos naturais, ...*)



## Relação Estrutura - Propriedades

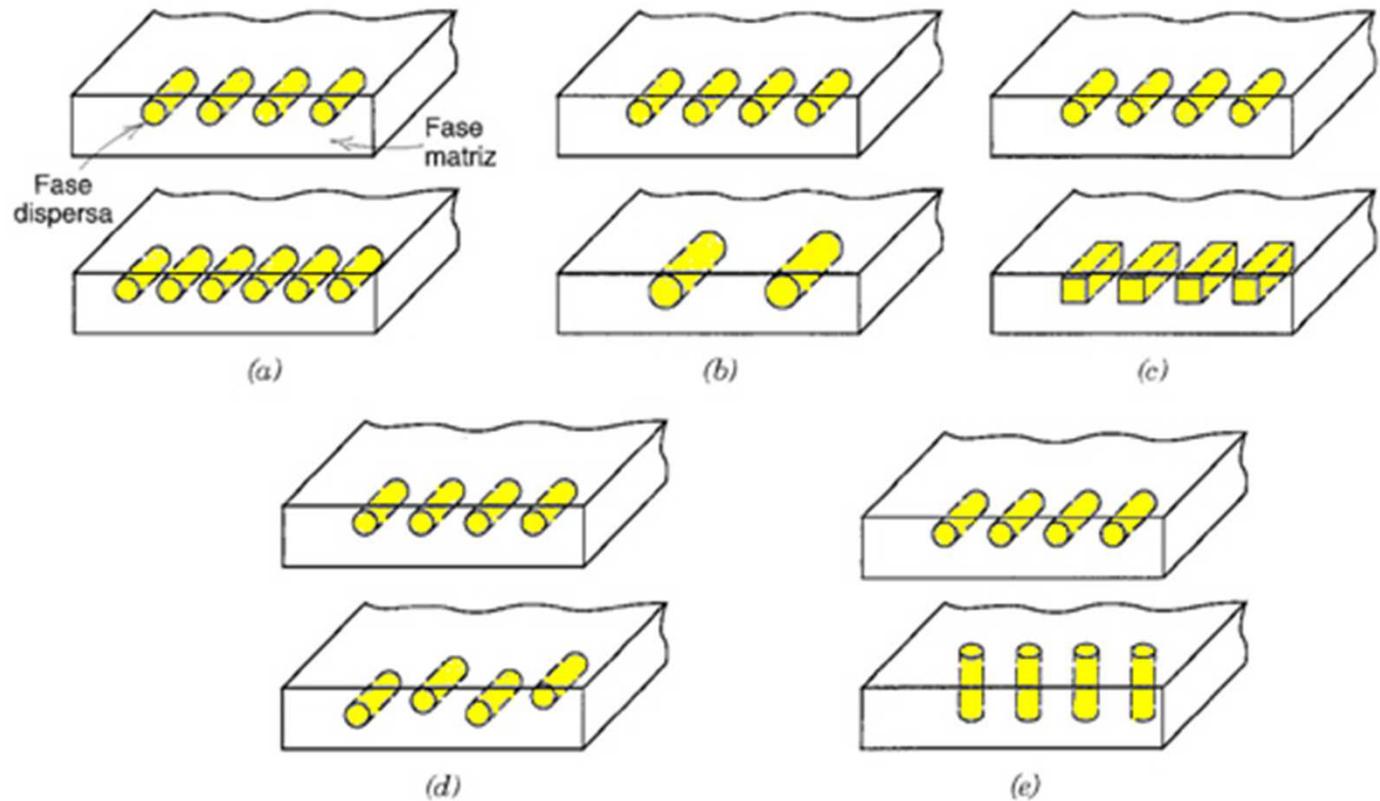
- Propriedades do compósito dependem:
  - das propriedades individuais da fase matriz e da fase dispersa
  - da natureza da interface “fase matriz - fase dispersa”
  - da “geometria” da fase dispersa

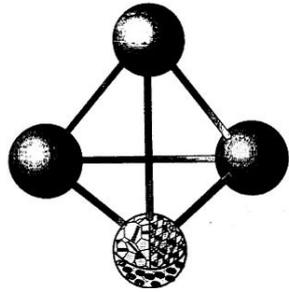


# Estrutura dos Compósitos

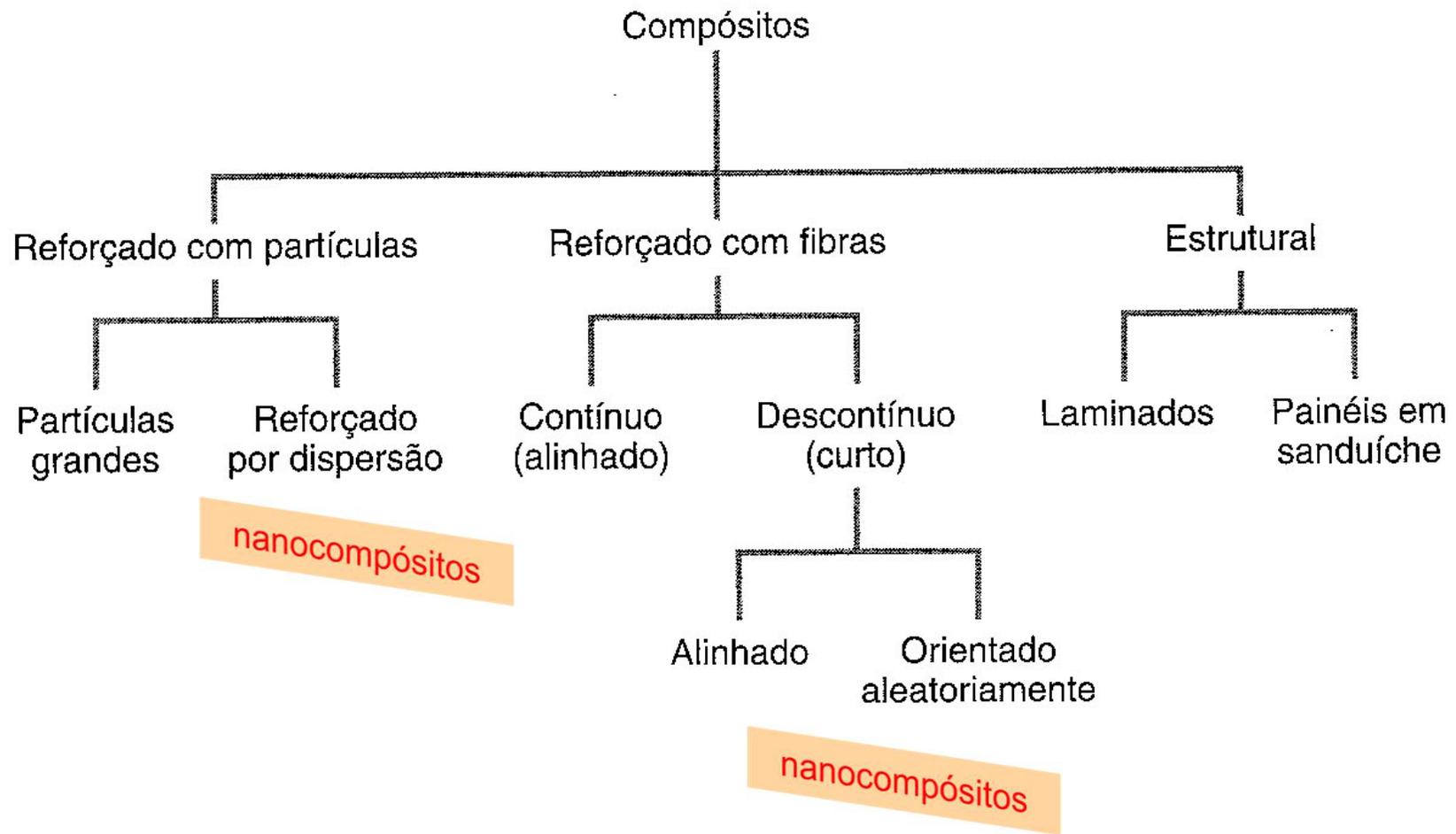
- Propriedades dependem da “geometria” da fase dispersa:

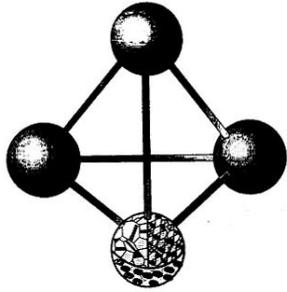
- a) Concentração
- b) Tamanho
- c) Forma
- d) Distribuição
- e) Orientação





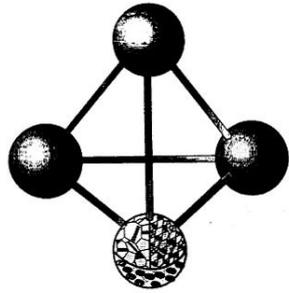
# Classificação dos compósitos





## Fase dispersa

- Partícula : porção de um sólido com dimensões aproximadamente iguais nas três dimensões
- Fibras: são materiais finos e alongados, como filamentos, que podem ser contínuos ou cortados.
- Partículas **grandes**: maiores que  $\sim 1\mu\text{m}$ 
  - Matriz transfere parte da carga à fase dispersa
- Fibras: diâmetros maiores do que  $1\mu\text{m}$



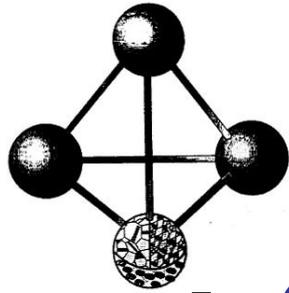
# Nanocompósitos

- **Matriz + carga:**
- **Carga com dimensões nanométricas: 1 a 100 nm - 0,001 a 0,1 μm (nanocarga)**

Aumento de resistência se dá por interações a nível atômico ou molecular.

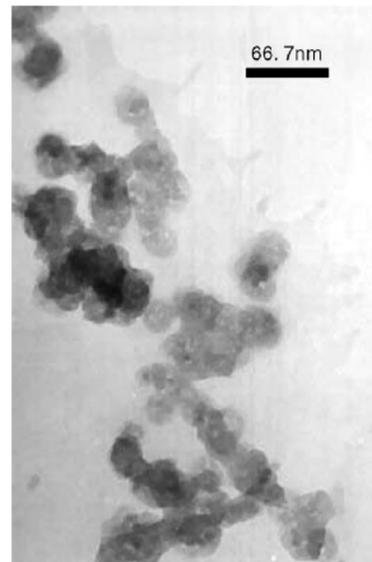
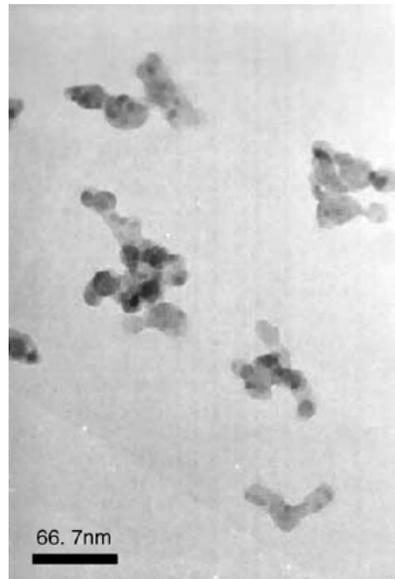
- **Sub-micrométrica: 100 a 1000 nm (0,1 a 1 μm)**

$$1 \text{ nm} = 10 \text{ \AA} = 10^{-9} \text{ m}$$



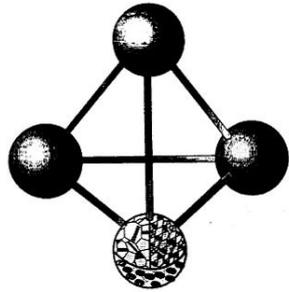
# Nanocompósitos

- Carga inorgânica com dimensões nanométricas: 1 a 100 nm.
  - Negro de fumo (nanocarga)
  - Carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ )



$\text{CaCO}_3$  (Nanotech Science and Technology)

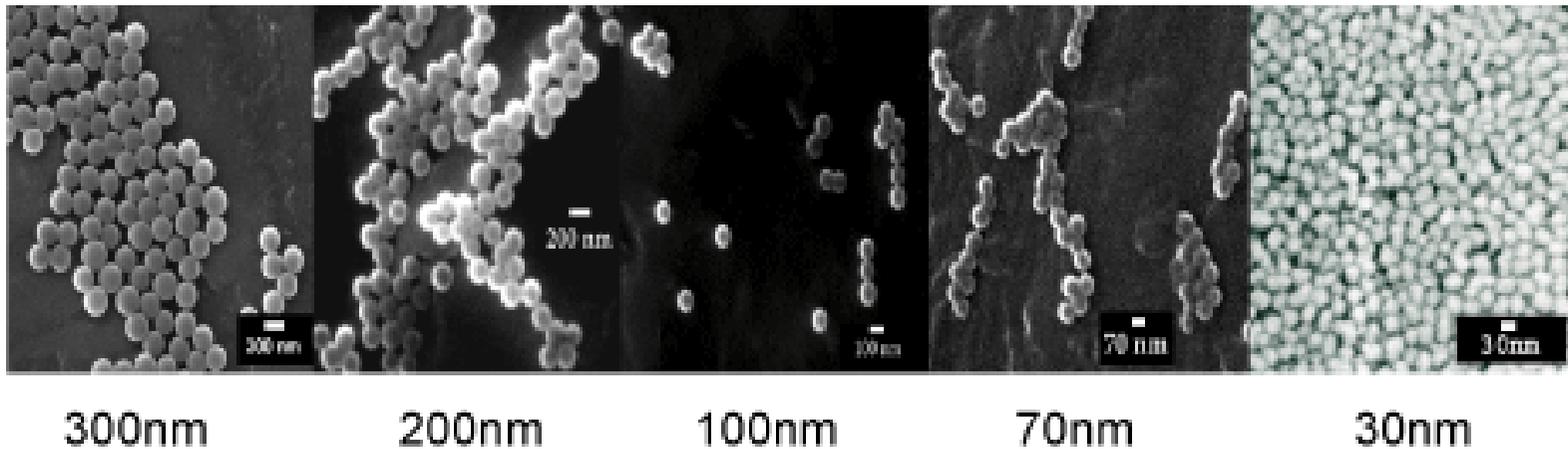
- Novas cargas: melhora de propriedades

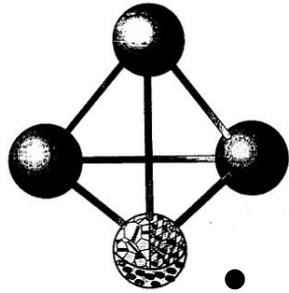


# Nanocompósitos

Nanopartículas: tamanho: de 1 a 100 nm em pelo menos uma das coordenadas.

- 3 dimensões (isodimensionais) → nanopartículas de sílica (sol-gel), negro de fumo, nanopartículas metálicas ...

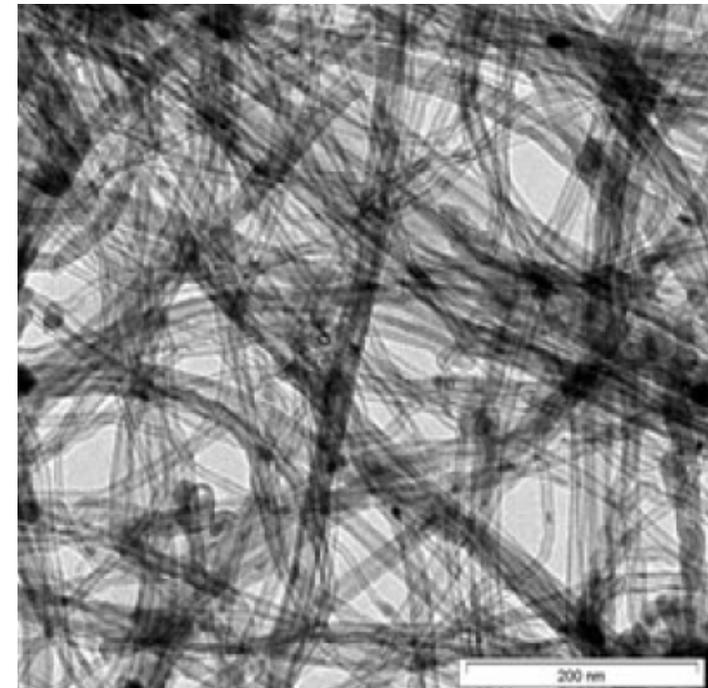
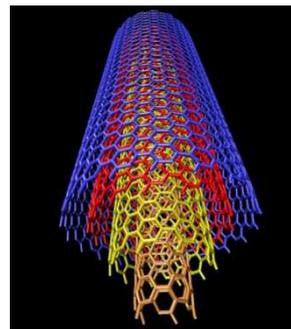
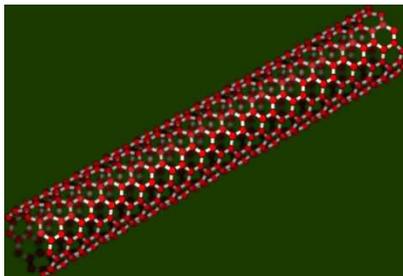
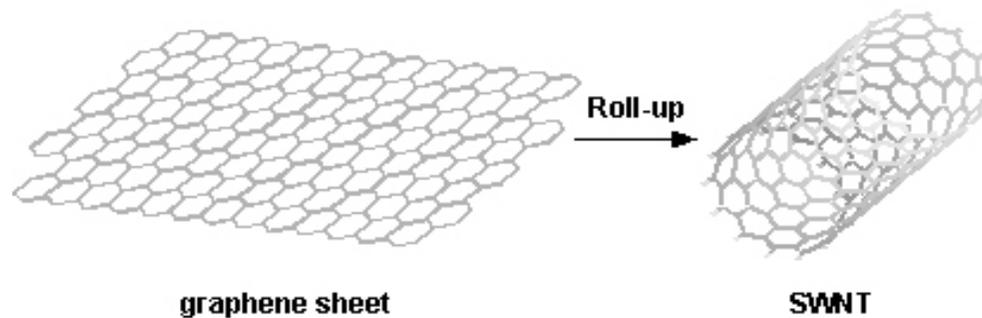




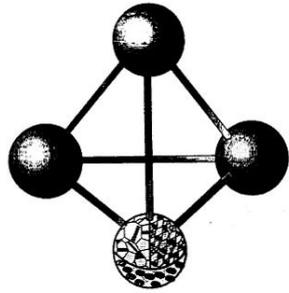
# Nanocompósitos

- 2 dimensões (tubulares / fibrilas):  
nanotubos de carbono

Tubos formados por uma ou mais folhas de grafeno enroladas. Grafeno, uma estrutura pertencente à família dos fulerenos. Trata-se do primeiro fulereno bidimensional. Os elétrons podem se mover a altas velocidades, sofrendo perdas de energia muito pequenas.

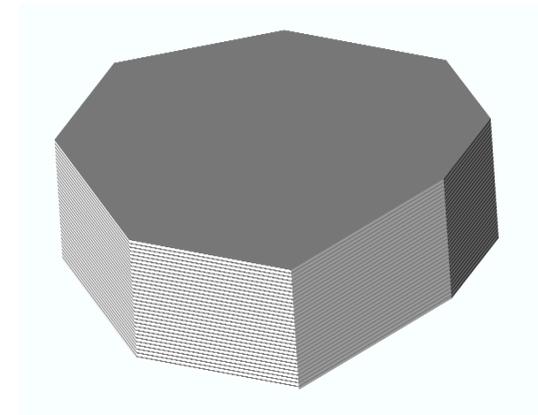
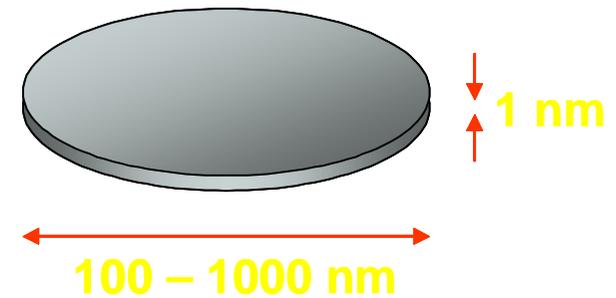
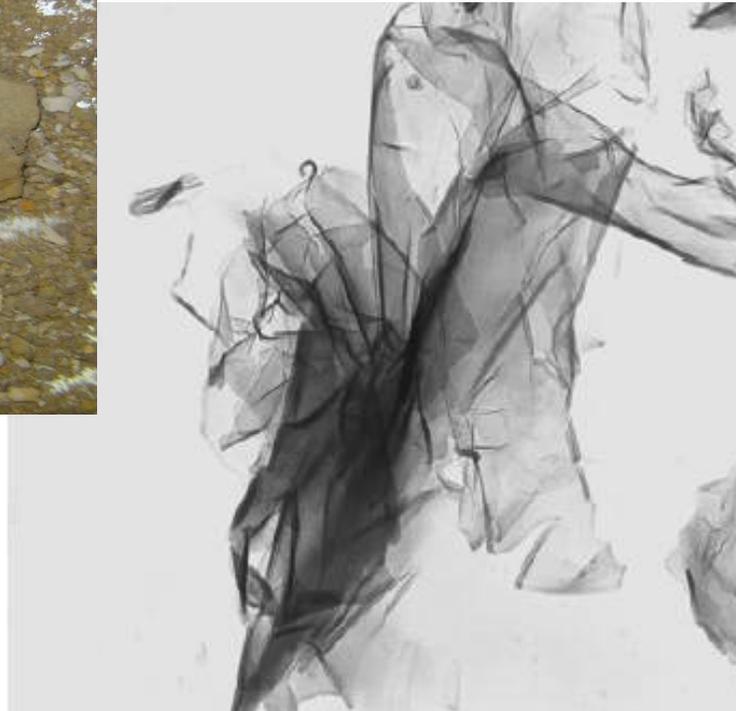


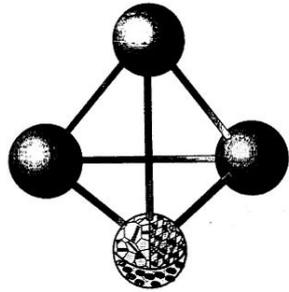
Matriz: Nylon-6  
Reforço: nanotubos de carbono (MET)  
(em desenvolvimento;  
condutividade térmica, resist. mecânica)



# Nanocompósitos

- 1 dimensão (lamelares): silicatos com espessura de alguns nanômetros

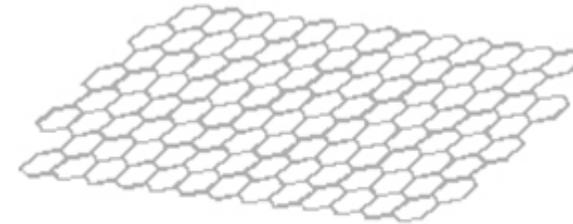




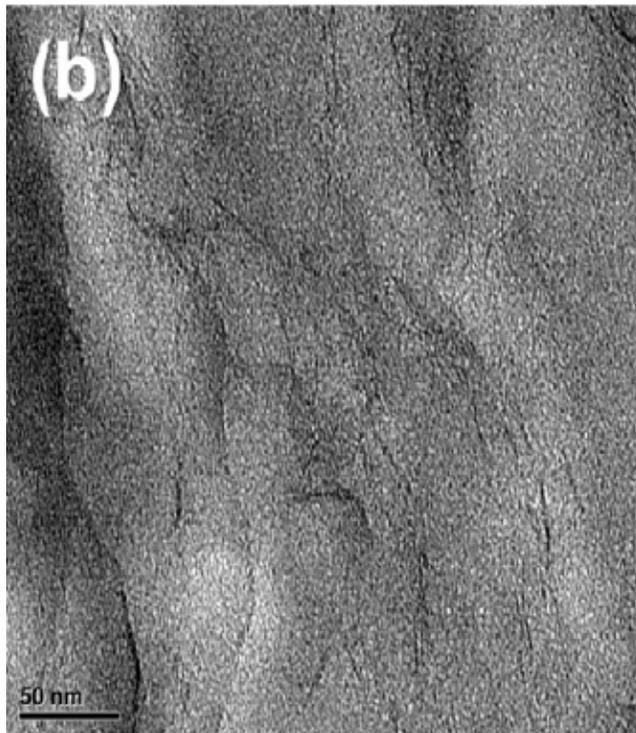
# Nanocompósitos

Nanopartículas:

1 dimensão (lamelares):

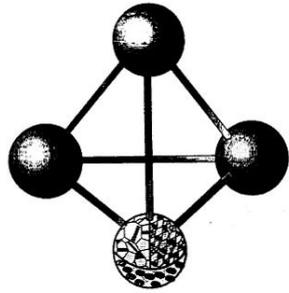


graphene sheet



Grafeno: módulo de elasticidade de 1TPa, condutividade de  $W/(m.K)$ , grande área superficial.  
Compósitos com matriz polimérica: melhorias propriedades elétricas, térmicas, barreira a gases, mecânicas.

TEM de nanocompósitos de PMMA com 2,67% vol de grafeno.  
(Carbon, 50, 2012, 5117-5125)



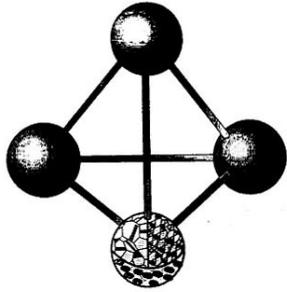
## Compósitos com partículas grandes

- Regra das misturas:
  - Propriedades dependem das frações volumétricas das fases.

Módulo de elasticidade varia entre:

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

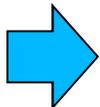
limite inferior  $E_c(l) = \frac{E_m E_p}{V_m E_p + V_p E_m}$

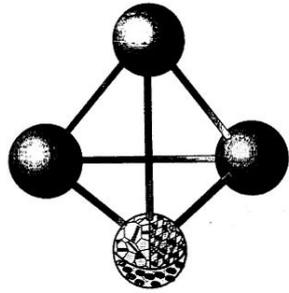


## Relembrando Módulo de elasticidade

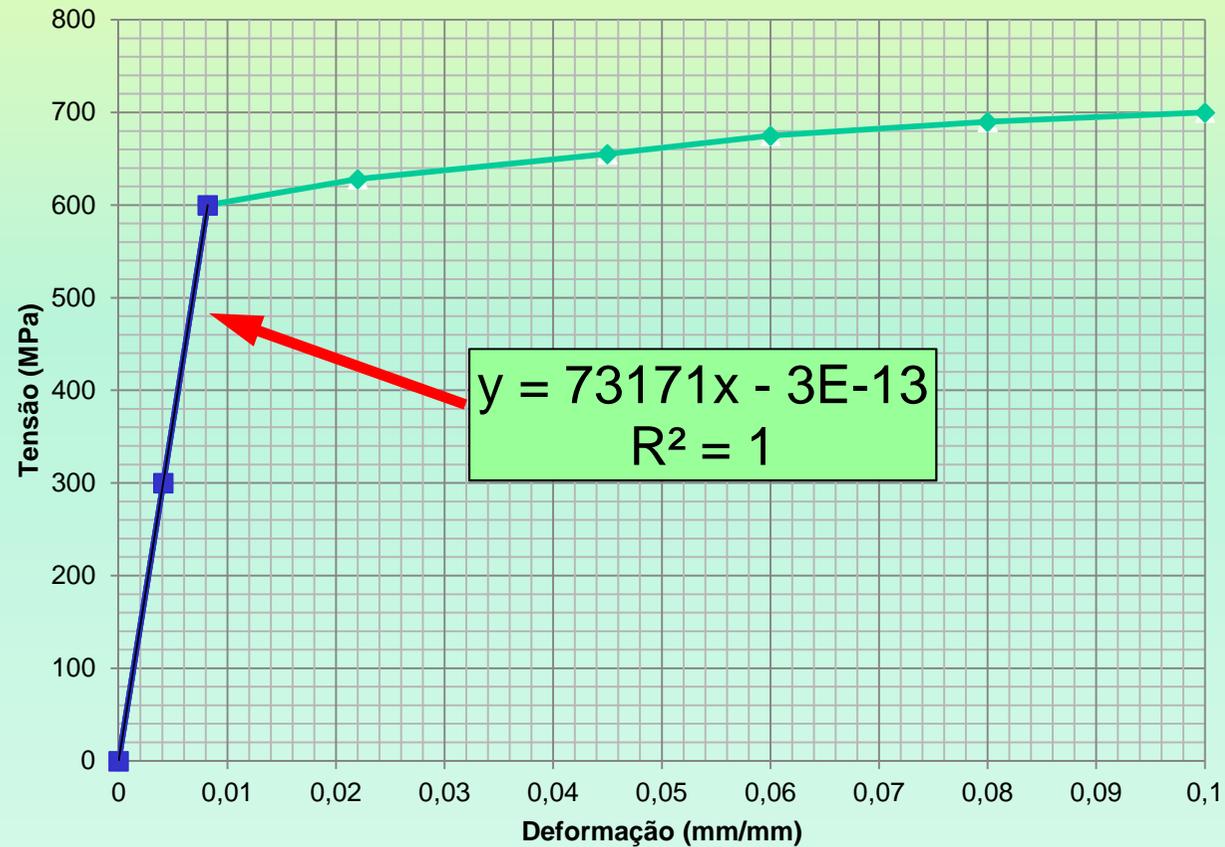
- Calcular o módulo de elasticidade de uma liga de alumínio, com base nos seguintes dados:

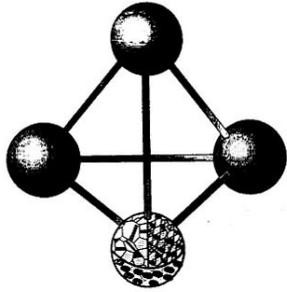
$\sigma$ (MPa)	$\epsilon$
0	0
300	0,0041
600	0,0082
628	0,022
655	0,045
675	0,060
690	0,080
700	0,10





# Relembrando Módulo de elasticidade

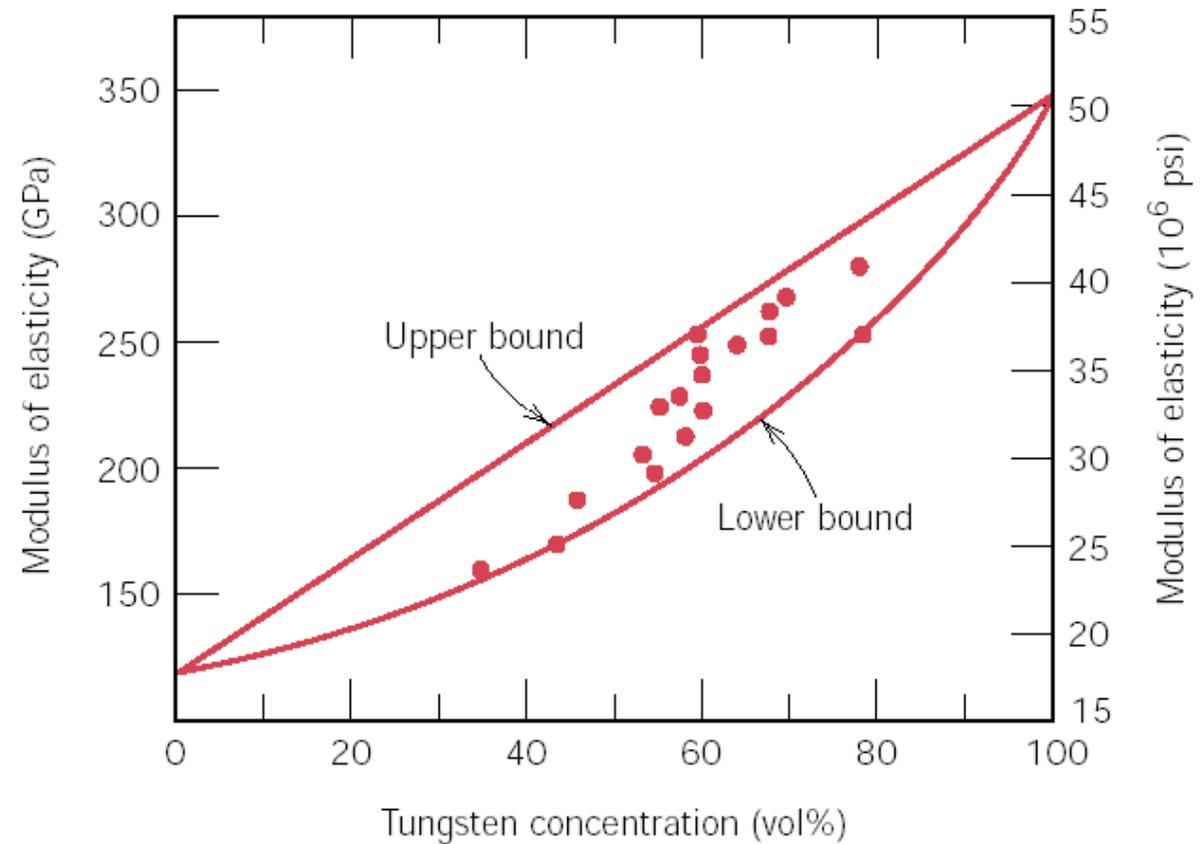


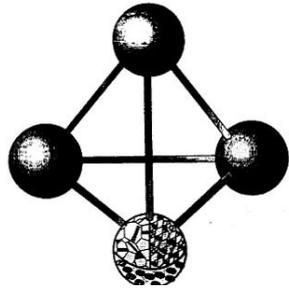


# Regra de misturas

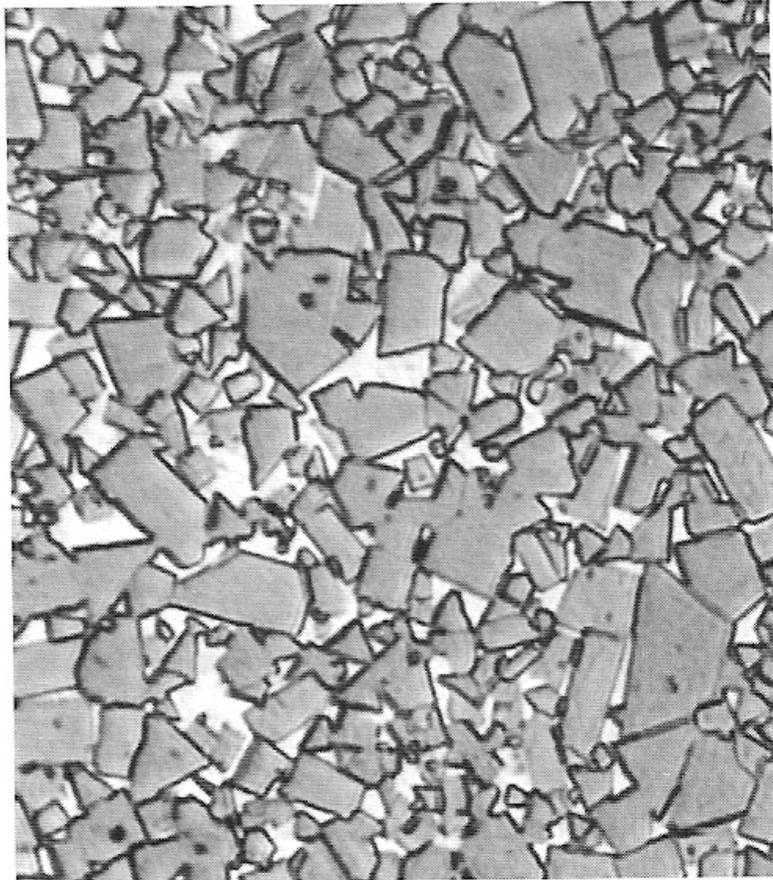
Exemplo:  
partículas de tungstênio  
em cobre

Existem tanto  
limite superior  
quanto limite inferior  
para **E**





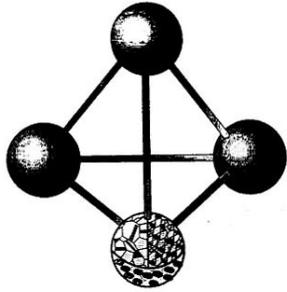
## Exemplo de MMC: broca de metalduro



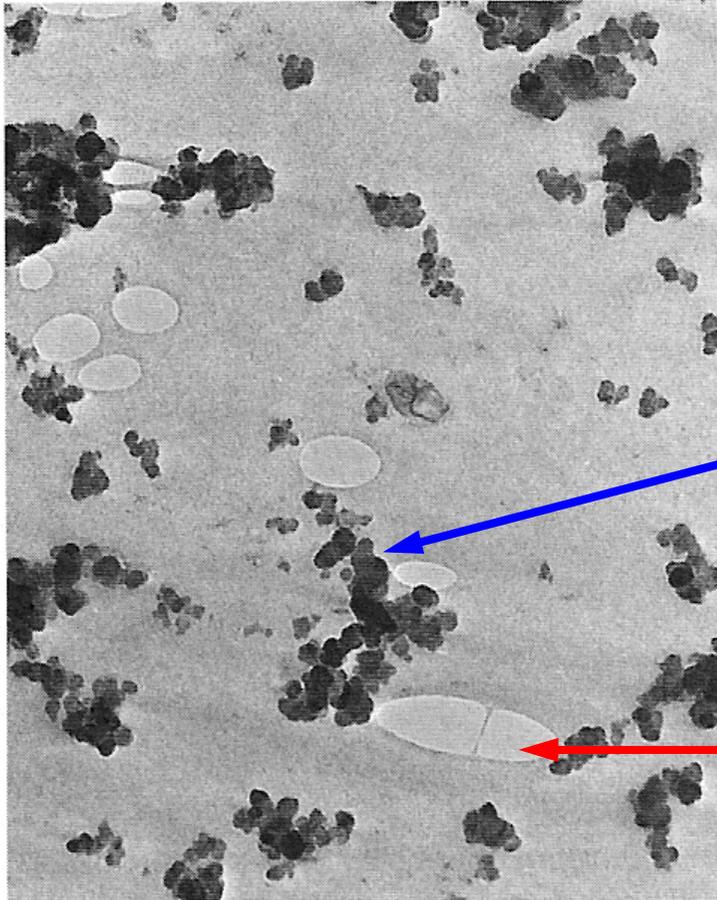
Partículas de WC em matriz de Co (Ni)

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

Partículas medem ~10  $\mu\text{m}$



# Exemplo de PMC: borracha do pneu



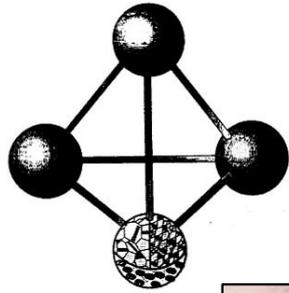
Matriz: elastômero

Partículas: negro de fumo (carbono) (MET)  
(15 a 30%)

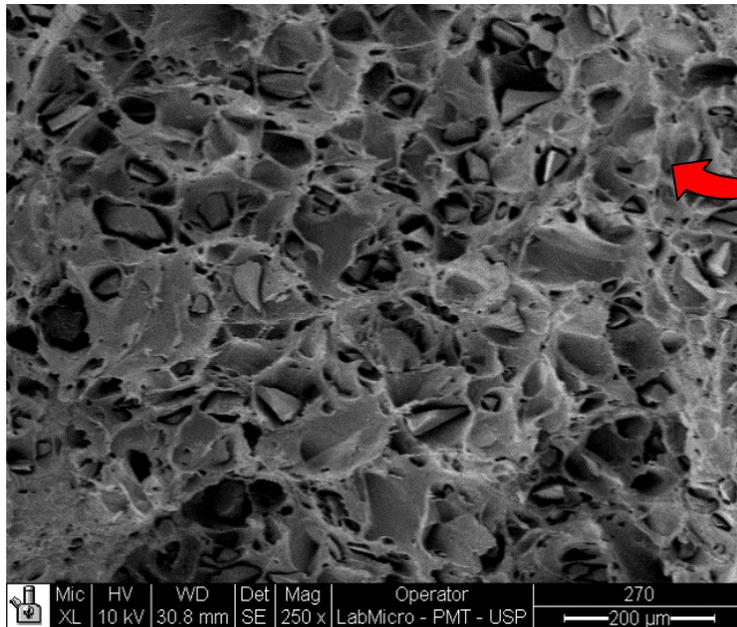
⇒ partículas absorvem UV  
e aumentam resistência mecânica

Partículas de negro de fumo; cada uma  
mede de 20 a 50nm, mas se apresentam  
comumente de forma aglomerada.

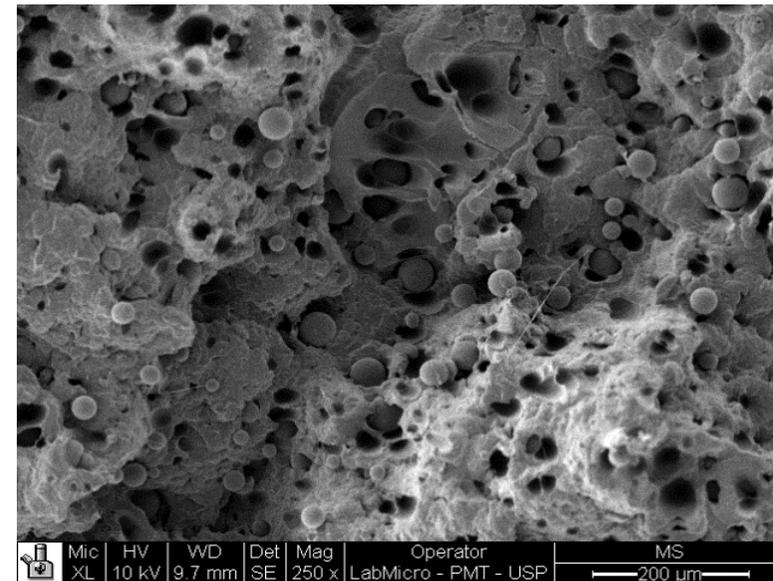
Fase elipsoidal é de água retida na borracha



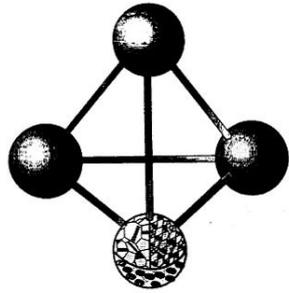
# Exemplo de PMC: Compósitos com Nylon



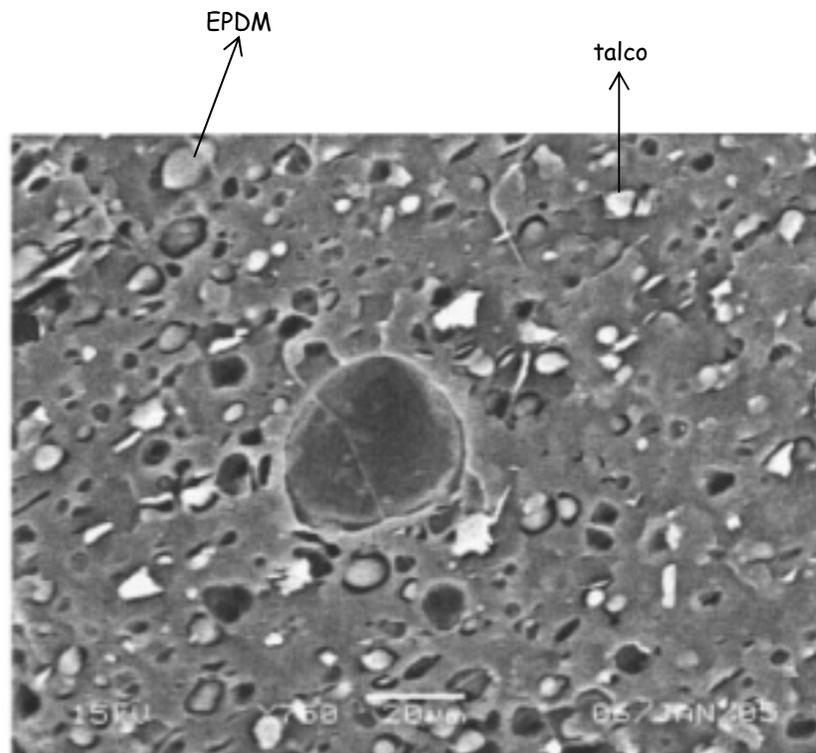
MEV: Nylon-6 + vidro particulado  
(tamanho médio das partículas 38μm (10 a 100μm ).



MEV: Nylon-6 + microesferas de vidro  
(tamanho médio de particulade 60 μm).



# Exemplo de PMC: Compósitos com PP



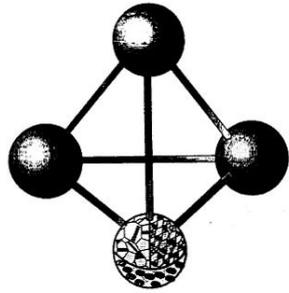
MEV: PP + EPDM + talco

(EPDM: copolímero de etileno-propeno-dieno)

Fonte: Journal of Applied Polymer Science, Vol. 101, 3033–3039 (2006).

Tabela 2 – Propriedades Mecânicas de Polipropileno Modificado com EPDM

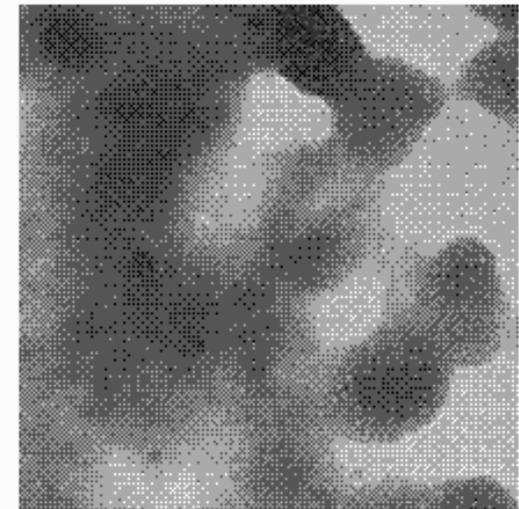
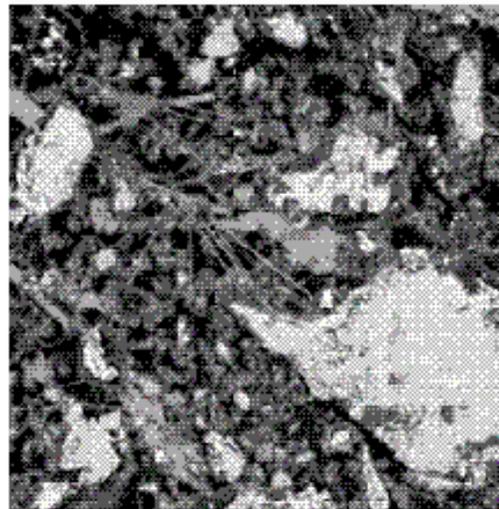
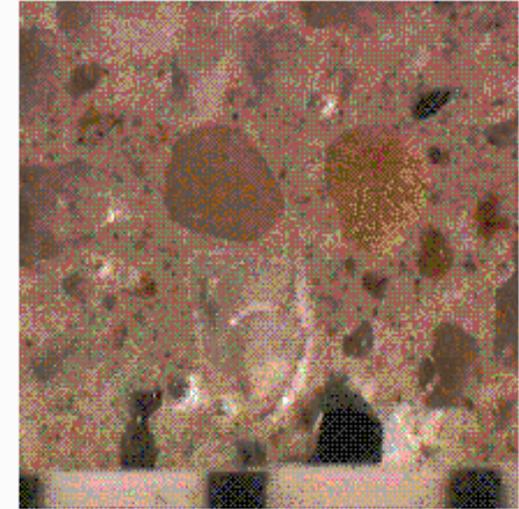
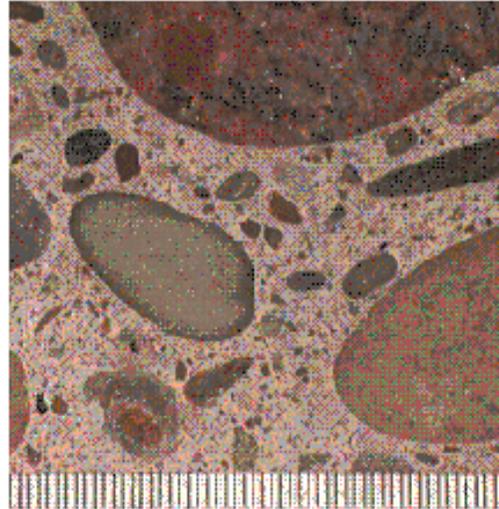
Propriedades	PPcopo	PPcopo + 20% EPDM	PPcopo +C.M +EPDM	PPcopo + F.V. +EPDM
Res Tração (Mpa)	29,0	21,0	16,0	18,0
Mod Flexão (Mpa)	1400,0	900,0	1200,0	1700,0
Res Impact Izod (J/m)				
23° C	85,0	700,0	300,0	300,0
-20° C	25,0	500,0	55,0	90,0
HDT a 1,82 Mpa(o C)	55,0	45,0	55,0	52,0
Contração (%)	1,0-2,0	1,0-2,0	0,8-1,5	0,6-1,2

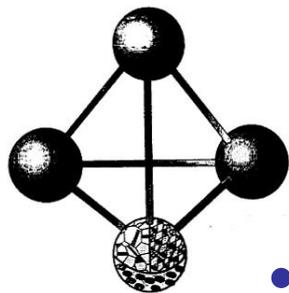


## Exemplo de CMC: concreto

- Matriz: cimento Portland
- Partículas: areia e brita

Clínquer:  
Silicato tricálcico  
 $(\text{CaO})_3\text{SiO}_2$   
Silicato dicálcico  
 $(\text{CaO})_2\text{SiO}_2$   
Aluminato tricálcico  
 $(\text{CaO})_3\text{Al}_2\text{O}_3$   
Ferroaluminato  
tetracálcico  
 $(\text{CaO})_4\text{Al}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$

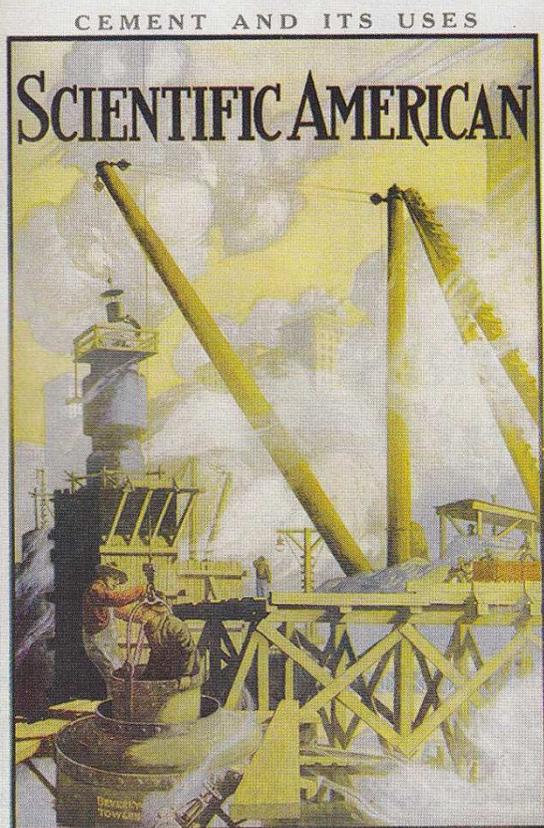




# Concreto Armado

- Armação metálica + concreto

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CIV, Nº 11, 18 DE MARÇO DE 1911



Vol. CIV. No. 11  
March 18, 1911

MUNN & CO., Inc., Publishers  
New York, N. Y.

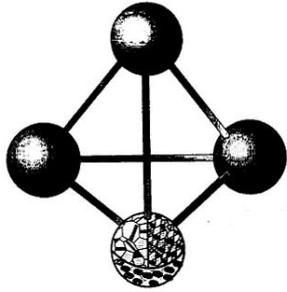
Price  
10 Cents

Março 1911

## Concreto para construção

“Há mais ou menos 15 anos, foram realizadas tentativas para combinar aço e concreto moldando um dentro do outro de forma que o produto resultante fosse altamente resistente não só à compressão, mas também a forças de tensão e flexão. Foram realizadas inúmeras pesquisas experimentais, e desse esforço surgiu o concreto armado moderno. Esse novo produto pode ter aplicação em praticamente todos os tipos de construção (*ver ilustração*), tendo sido fartamente usado na produção de tijolos e blocos de cimento, mas agora invadiu também o setor que se acreditava dominado principalmente pelo ferro e pelo aço.”

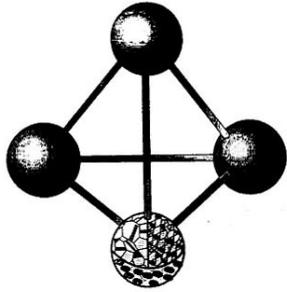
**Concreto armado** delineia a silhueta de cidades americanas, 1911



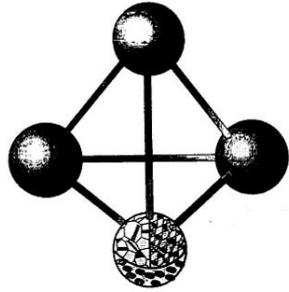
# Compósitos reforçados por dispersão

- Usado nos MMC, quando são necessárias altas resistências em T elevada e resistência à 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  $\text{Al}_2\text{O}_3$ )



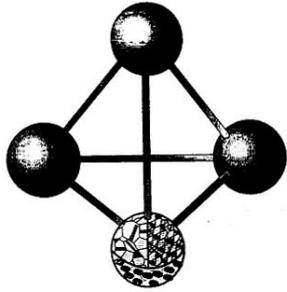


- Fim da primeira aula.
- Ler capítulo 17 do Callister.



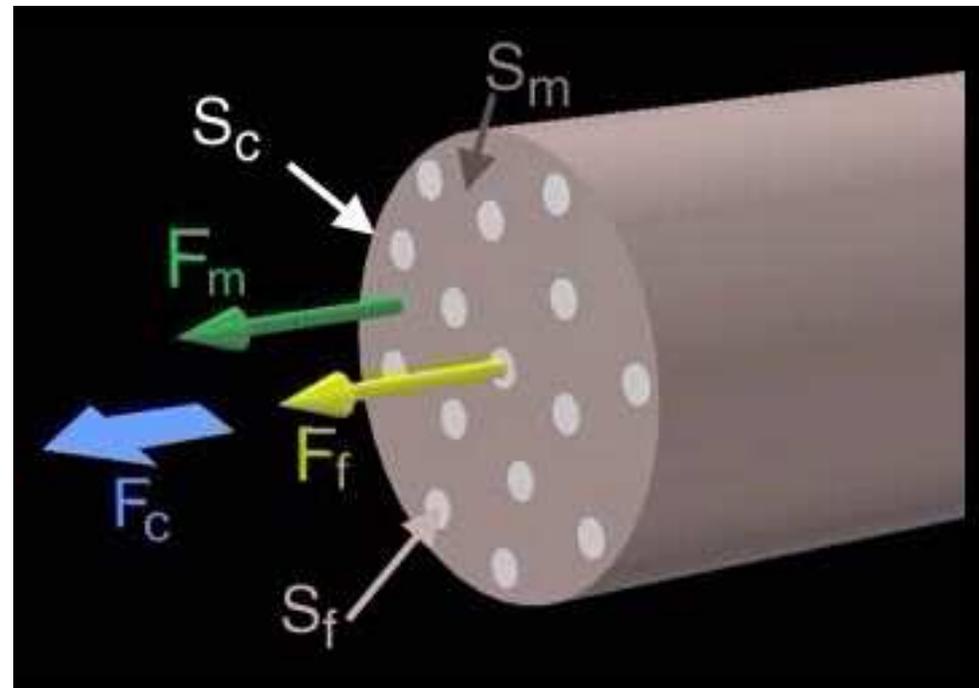
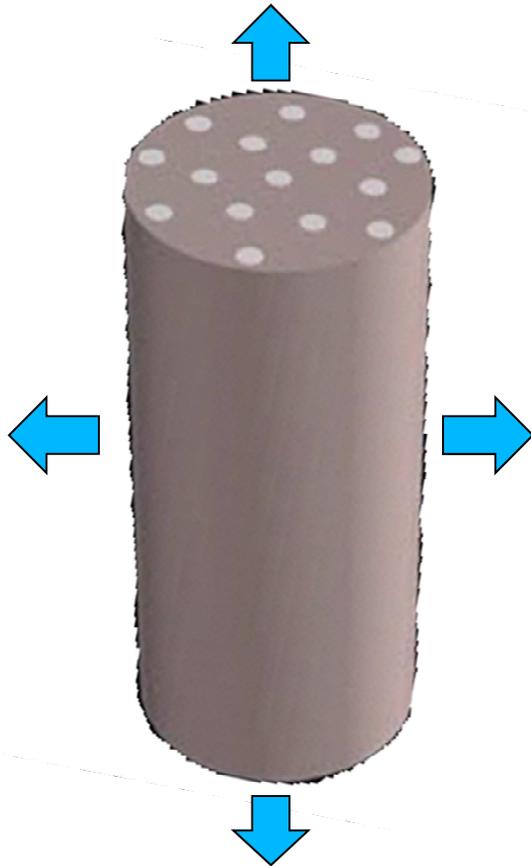
# Compósitos reforçados com fibras

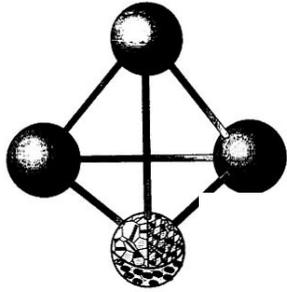
- São os mais comuns.
- Vantagem é alta resistência ou alta rigidez da fibra, aliado à baixa densidade da matriz.
  - Resistência à tração  $\sigma_f$
  - Módulo de elasticidade  $E$
  - Densidade  $d$
  - Resistência específica  $\sigma_f/d$
  - Módulo específico  $E/d$



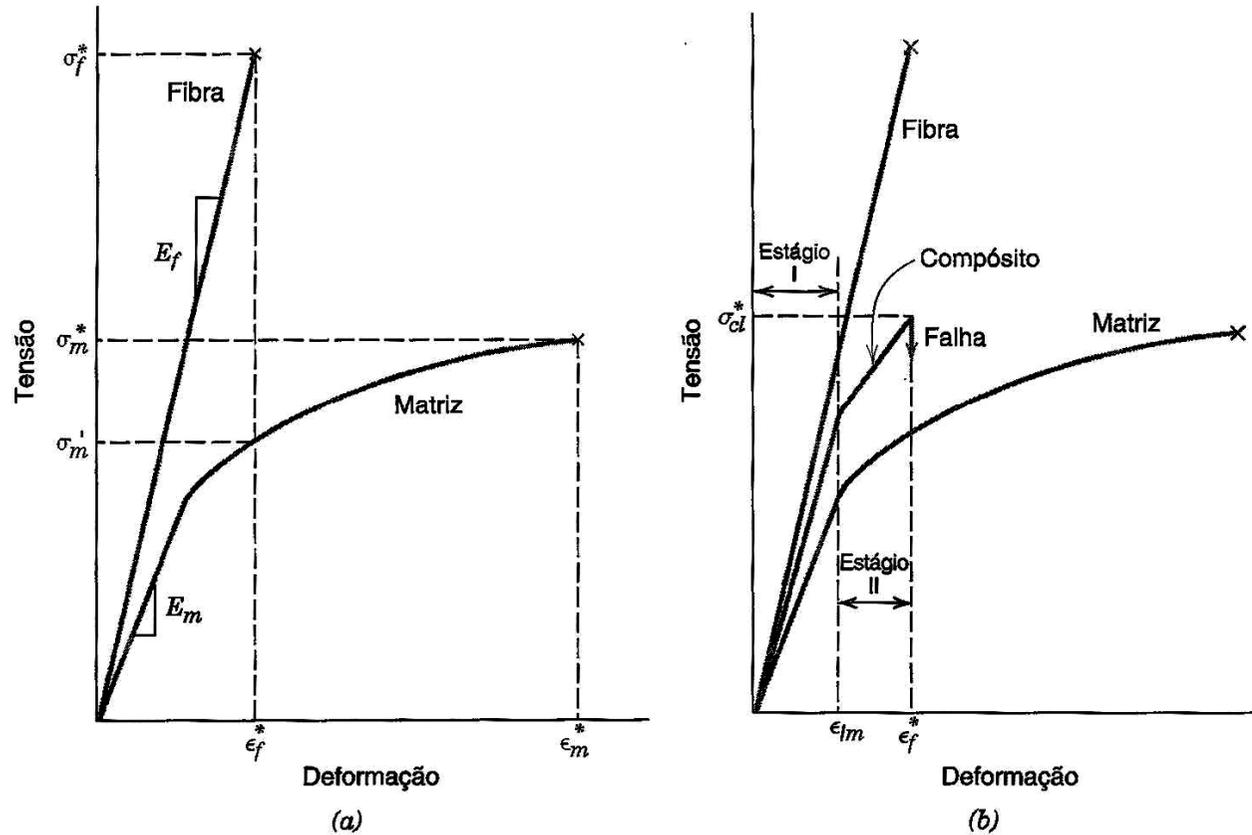
# Fibras contínuas

- 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.





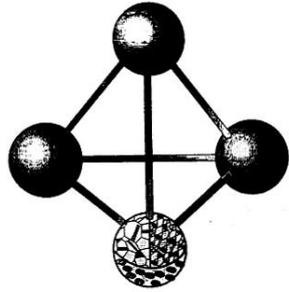
# Carregamento longitudinal em fibras contínuas e alinhadas



**Estágio I:** fibra e matriz deformam elasticamente

**Estágio II:** matriz entra em regime plástico.

Falha em  $\epsilon_f^*$ , mas pode não ser catastrófica



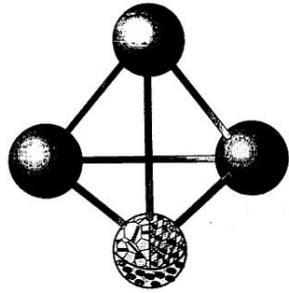
## Cálculo de E do compósito

Para carregamento longitudinal

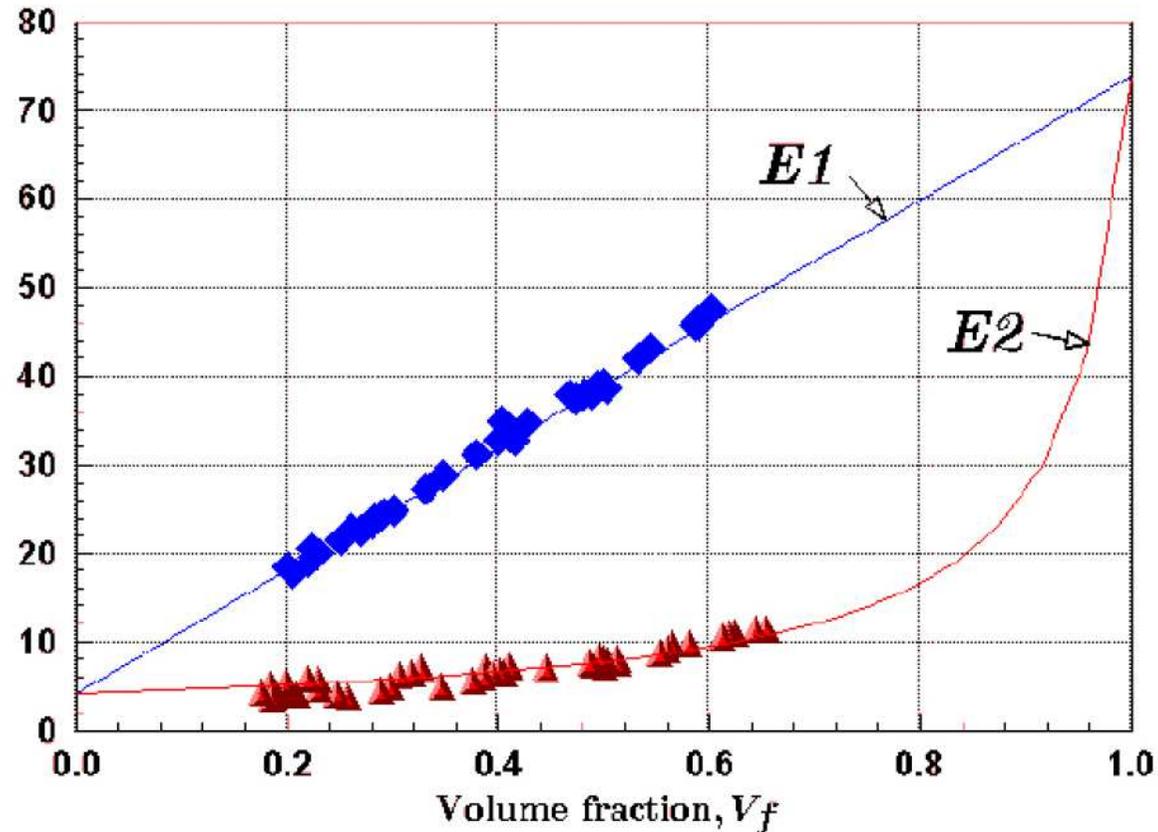
$$E_c(l) = E_m V_m + E_f V_f$$

Para carregamento transversal

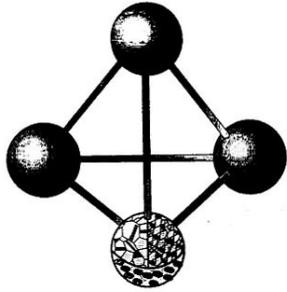
$$E_c(t) = \frac{E_m E_f}{V_m E_f + V_f E_m}$$



## Cálculo de $E$ para compósitos

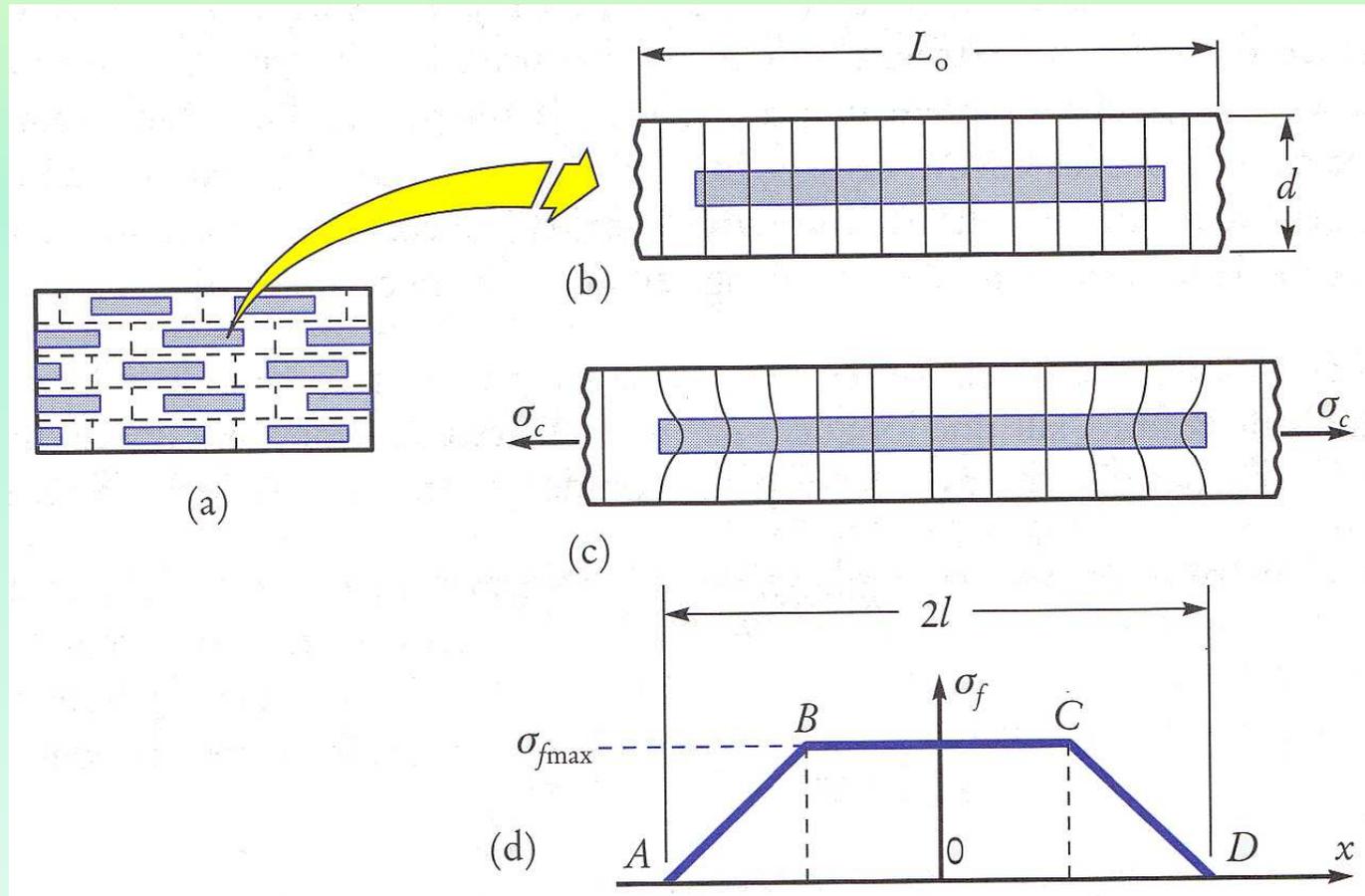


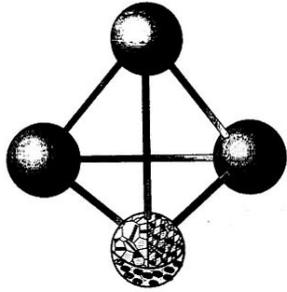
Rule-of-mixtures predictions for longitudinal ( $E_1$ ) and transverse ( $E_2$ ) modulus, for glass-polyester composite ( $E_f = 73.7$  MPa,  $E_m = 4$  GPa). Experimental data taken from Hull (1996).



# Fibras

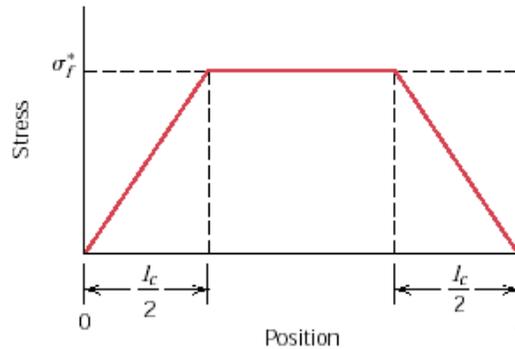
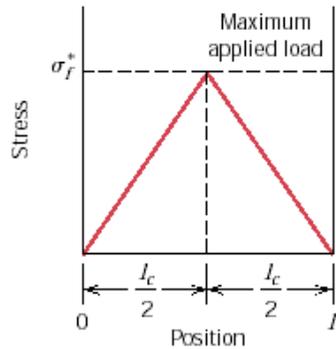
- ⇒ Resistência depende do quanto a carga é transferida para a fibra.
- ⇒ Ligação interfacial entre fibra e matriz cessa na ponta da fibra, deformando a matriz naquela região.



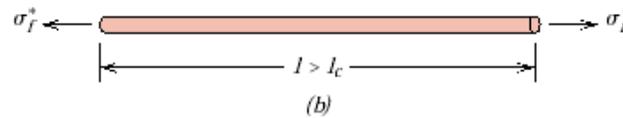
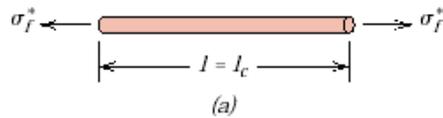


# Fibras

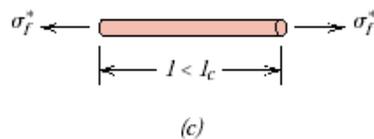
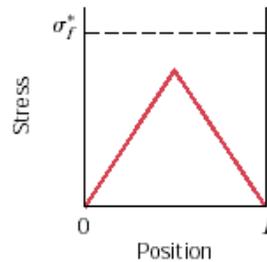
## Influência do comprimento da fibra



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

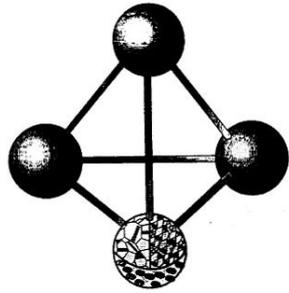


- ⇒  $\sigma_f$  limite de resistencia da fibra
- ⇒  $\tau_c$  resistência ao cisalhamento da interface
- ⇒  $d$  diâmetro da fibra



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”

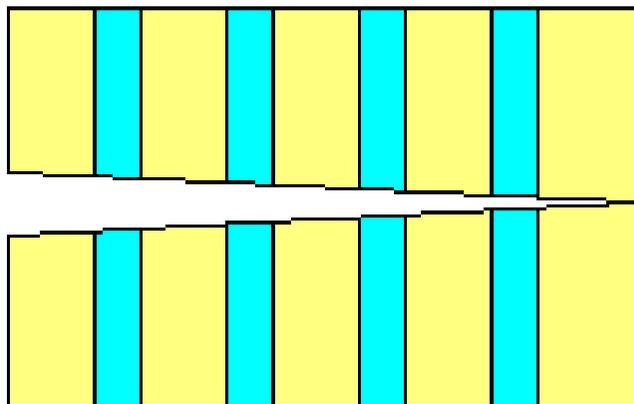


# Influência da interação entre fibra e matriz

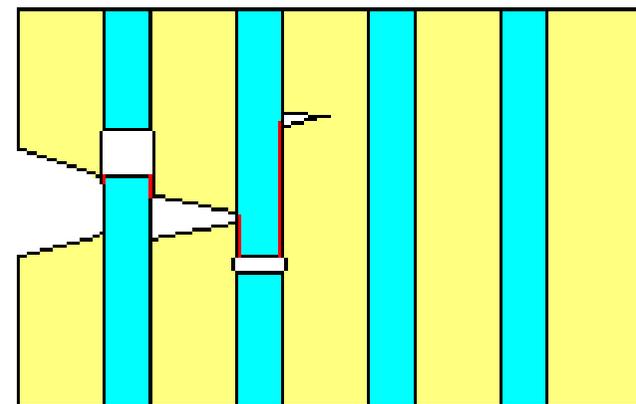
Compósitos reforçados com fibras requerem uma **adesão moderada** entre matriz e fibra :

⇒ 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.

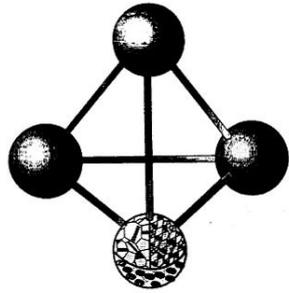
⇒ uma **baixa adesão** resulta em baixa resistência mecânica, mas a energia absorvida na fratura aumenta por dissipação de energia durante o processo de descolamento da fibra (puxamento da fibra – *fiber pullout*)



alta adesão



baixa adesão



# Anisotropia do limite de resistência

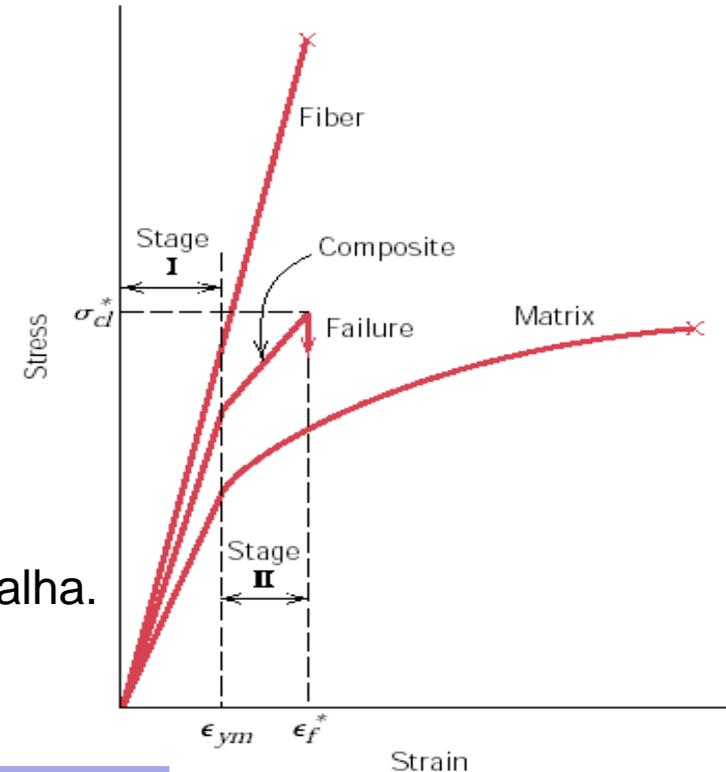
$$\sigma_{cl} = \sigma'_m (1 - V_f) + \sigma_f^* V_f$$

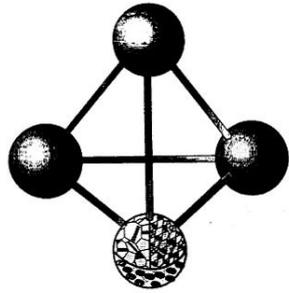
Limite de resistência do compósito na longitudinal (L) pode ser estimado com base no gráfico, mas na transversal (T) é muito menor.

$\sigma_f^*$  : limite de resistência à tração da fibra;  
 $\sigma'_m$  : tensão na matriz no momento em que a fibra falha.

Concentração de fibra 50%

Material	LR tração L (MPa)	LR tração T (MPa)
Vidro-poliéster	700	20
Carbono-epoxi	1000	35
Poliaramida-epoxi	1200	20





# A fase fibra

- 3 classes

- Whiskers

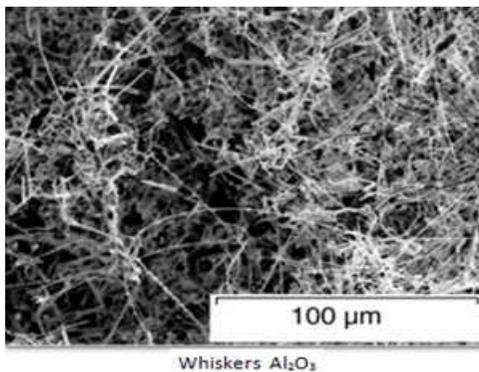
Monocristais, altíssima resistência, caros

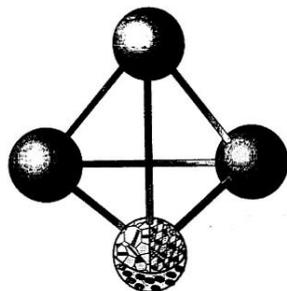
- Fibras

Policristais ou amorfos, finas

- Arames

Diâmetros dezenas de microns  
ex.: arame nos pneus



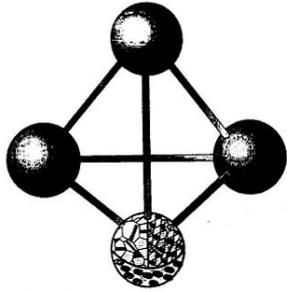


# A fase Fibra

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 (10<sup>6</sup> psi)]</i>	<i>Resistência Específica (GPa)</i>	<i>Módulo de Elasticidade [GPa (10<sup>6</sup> 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 <sup>a</sup>	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

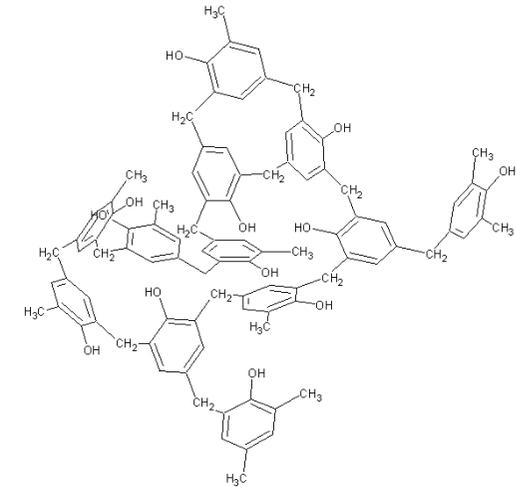
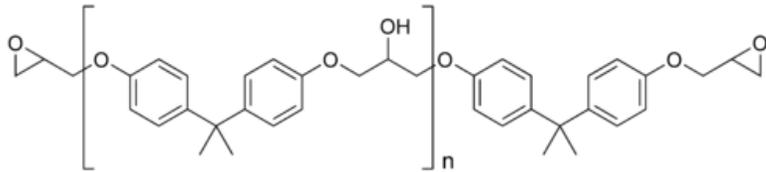
<sup>a</sup>O termo "carbono", em vez de "grafita", é usado para identificar essas fibras, uma vez que elas são compostas por regiões cristalinas de grafita e também por material não-cristalino e áreas com desalinhamento do cristal.



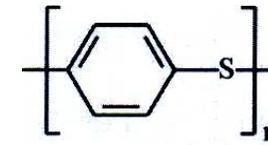
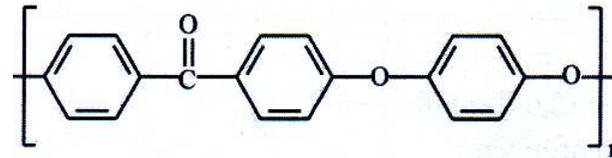
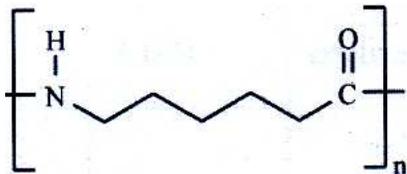
# Compósitos com matriz polimérica

- Matrizes:

- Termorrígidas: Poliésteres e vinil-ésteres,
- Epóxi, fenólicas

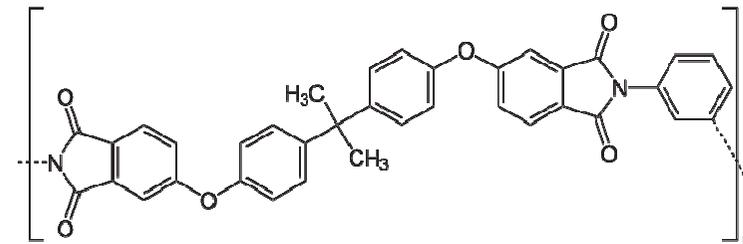


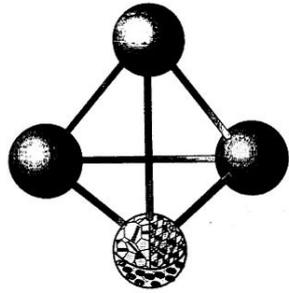
- Termoplásticas: PA, PEEK, PPS, PEI
- (poliamida, polieteretercetona, poli(sulfeto de fenileno), Polieterimida)



- Reforços

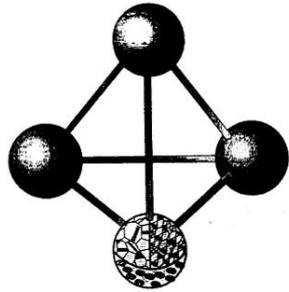
- fibra de vidro (GFRP)
- fibra de carbono (CFRP)
- fibras aramidas (poliaramidas)





# Compósitos de fibra de vidro

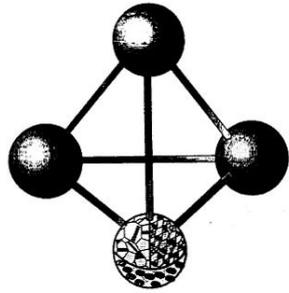
- Vantagens
  - Alto  $\sigma_f^*$  (3500 MPa), barato, inerte
- Usos
  - Carcaças automotivas e marítimas
  - Recipientes de armazenamento
- Limitações
  - Baixa rigidez (70 GPa)
  - $T_{max} < 200^\circ \text{C}$



# Fabricação da fibra de vidro

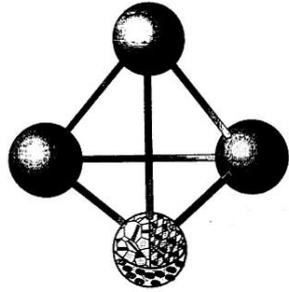
- 55%SiO<sub>2</sub>, 16%CaO, 15%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 10%B<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 4%MgO.
- Diâmetros entre 3 e 20µm.
- Muito sensível a defeitos superficiais da fibra
- São recobertas com capa protetora
- Algumas capas devem ser removidas antes da fabricação do compósito.
- Podem ser usadas na forma de fios e tecidos





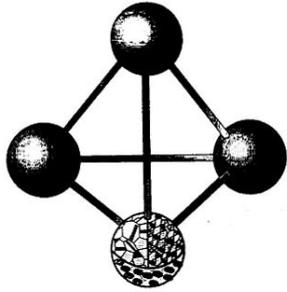
## Compósitos de fibra de carbono

- Vantagens
  - Baixa densidade relativa
  - Alto E (200 a 700GPa)
  - Retêm alto E e alta  $\sigma_f$  em altas T.
  - Inerte a umidade e muito ácidos e solventes.
- Usos
  - Equipamento esportivo, aviação, automotivo.
- Limitações
  - custo



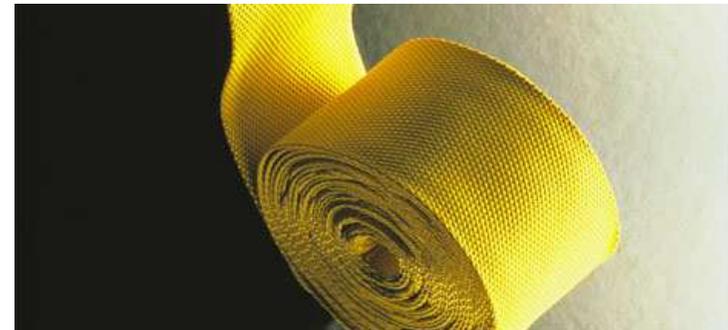
## Fabricação da fibra de carbono

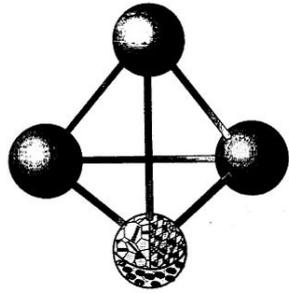
- Fibras de diâmetro 4 a 10 $\mu\text{m}$
- Fibra contém regiões de grafite e regiões não-cristalinas.
- Produzidas a partir de precursores: rayon, poliacrilonitrila e piche.
- Processo afeta E: existem classes de E (padrão, intermediário, alto e ultra alto).



# Compósitos de fibras de poliaramida (“kevlar”)

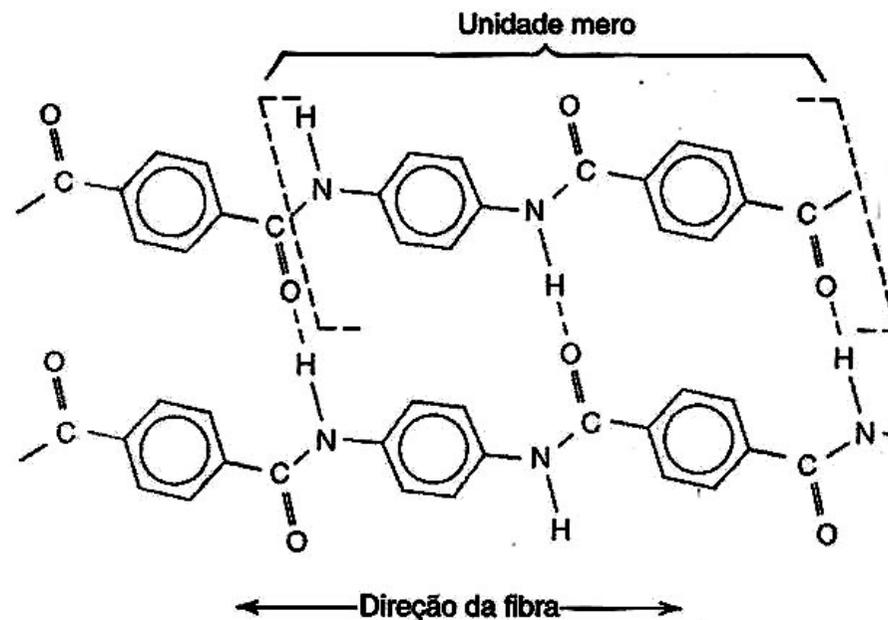
- Vantagens
  - Baixa densidade relativa (1,44)
  - Alta tenacidade
  - Dutilidade permite tecelagem
- Usos
  - Blindagem balística
  - Artigos esportivos, pneus
- Limitações
  - Susceptíveis a ácidos e bases fortes
  - Baixa resistência à compressão
  - Custo (> fibra de vidro)



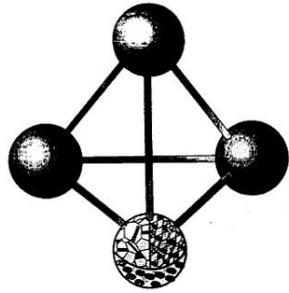


# Fabricação das aramidas

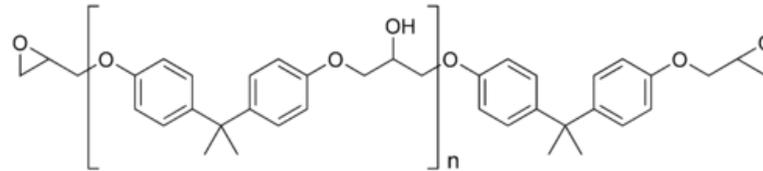
- Poli-parafenileno-tereftalamida
- Moléculas rígidas são alinhadas ao longo da fibra



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



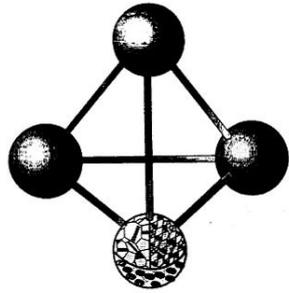
# Comparações entre compósitos de matriz epóxi



**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 <sup>6</sup> psi)]	45 (6,5)	145 (21)	76 (11)
Transversal [GPa (10 <sup>6</sup> 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

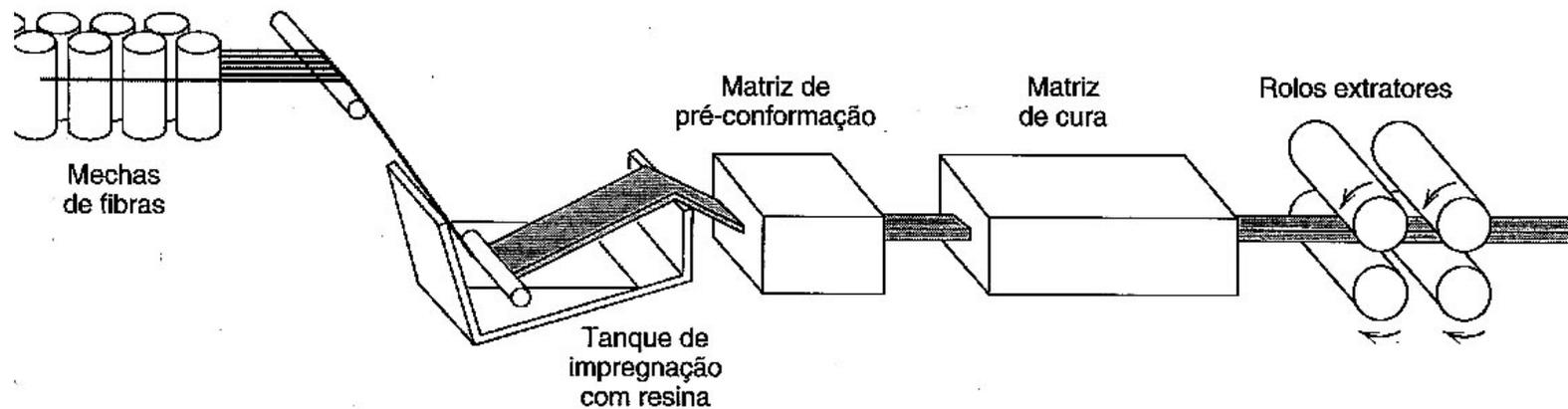
**Fonte:** Adaptado de R. F. Floral e S. T. Peters, "Composite Structures and Technologies", notas de sala de aula, 1989.



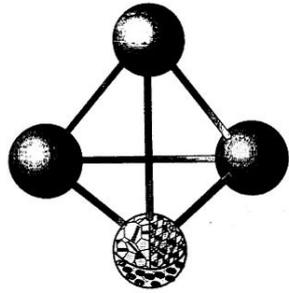
# Processamento de compósitos reforçados com fibras

**Pultrusão: produtos longos e seção transversal constante.  
mechas de fibras**

**Usado com fibras de vidro, carbono e aramidas  
concentração entre 40 e 70% fibras**

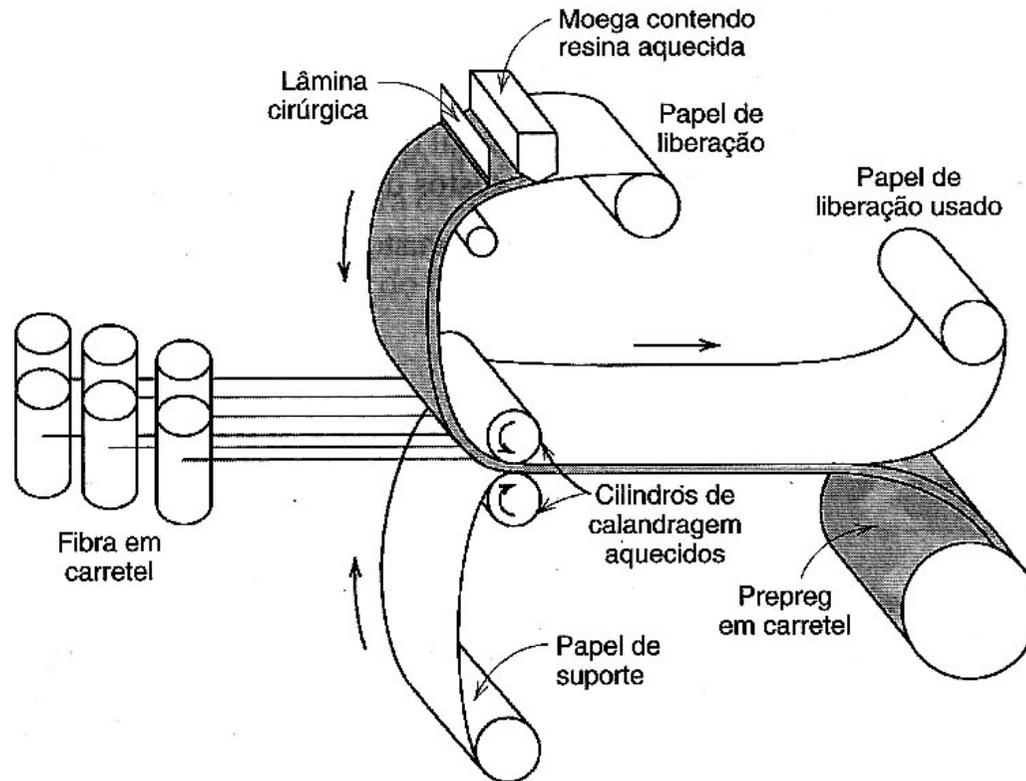


**Fig. 17.12** Diagrama esquemático mostrando o processo de pultrusão.

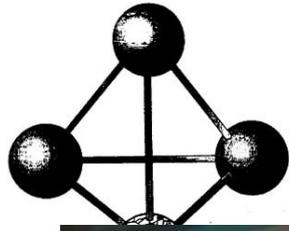


# Processo Prepreg

Fibras contínuas pré-impregnadas com resina parcialmente curada.

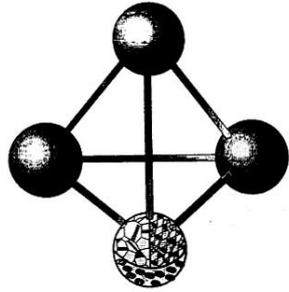


Fitas finas: 0,25mm



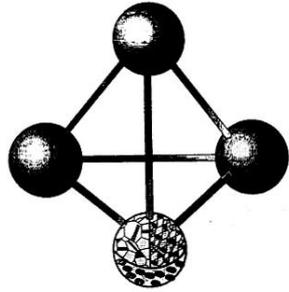
# Prepreg





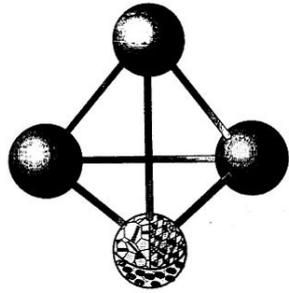
# Literatura

- Capítulo 17 do W. Callister



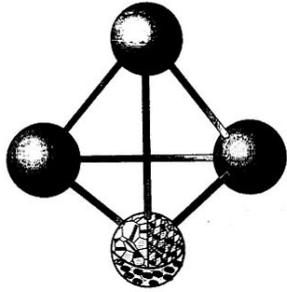
# Sites interessantes

- 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>



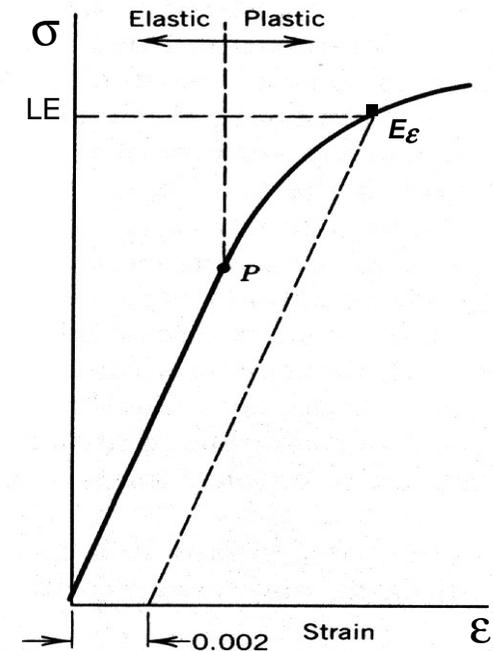
## Conceitos de Tensão e Deformação

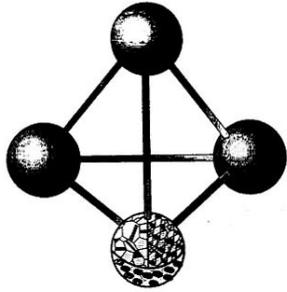
- O comportamento mecânico de um material reflete a relação entre a sua resposta (ou DEFORMAÇÃO) a uma carga (ou TENSÃO) que esteja sendo aplicada sobre um corpo fabricado deste material.
- Algumas propriedades mecânicas importantes são a *resistência*, a *dureza*, a *ductilidade* e a *rigidez*.
- As *deformações* podem ser ELÁSTICAS ou PLÁSTICAS.
- As DEFORMAÇÕES ELÁSTICAS não são permanentes, isto é, são deformações que desaparecem quando a tensão aplicada é retirada. Dito de outra forma, as deformações elásticas são *reversíveis*, sendo resultado da ação de forças conservativas.
- As DEFORMAÇÕES PLÁSTICAS são permanentes, isto é, permanecem após a tensão aplicada ser retirada. Deformações plásticas são *irreversíveis*, sendo acompanhadas por deslocamentos atômicos permanentes.



## Curva Tensão-Deformação

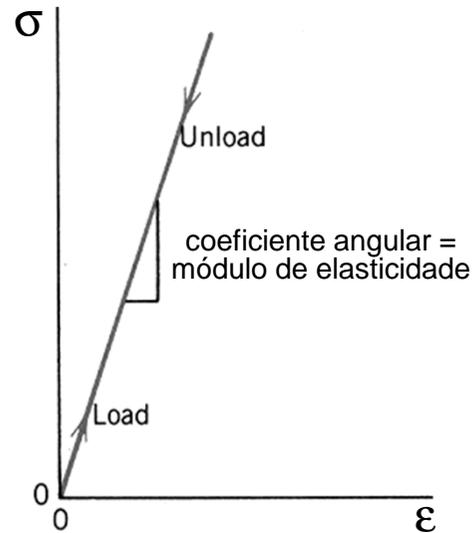
- Em uma escala atômica, a DEFORMAÇÃO ELÁSTICA macroscópica é manifestada como pequenas alterações no espaçamento interatômico e na extensão de ligações interatômicas.
- Para a maioria dos materiais metálicos, as deformações elásticas ocorrem até deformações de  $\sim 0,5\%$ .
- Quando as deformações ultrapassam o limite de proporcionalidade, a relação entre a tensão e a deformação deixa de ser linear (lei de Hooke), produzindo-se deformação permanente, a chamada DEFORMAÇÃO PLÁSTICA.
- Na prática, muitas vezes, é difícil definir a posição do ponto P com precisão. Como consequência, geralmente se define uma TENSÃO LIMITE DE ESCOAMENTO (LE) como sendo a tensão necessária para se produzir uma pequena quantidade de deformação plástica. Para os **metais**, o ponto  $E_\epsilon$  corresponde a uma deformação de engenharia  $\epsilon = 0,002 = 0,2\%$ .





# Deformação Elástica

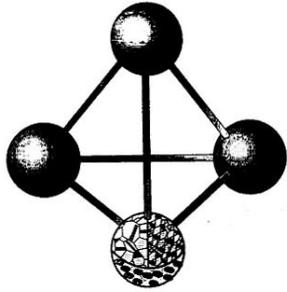
Curva Tensão vs. Deformação



- Define-se o MÓDULO DE ELASTICIDADE como sendo o coeficiente angular da curva  $\sigma$  vs.  $\epsilon$ , na região linear da curva. Como a curva tem origem no ponto (0,0),

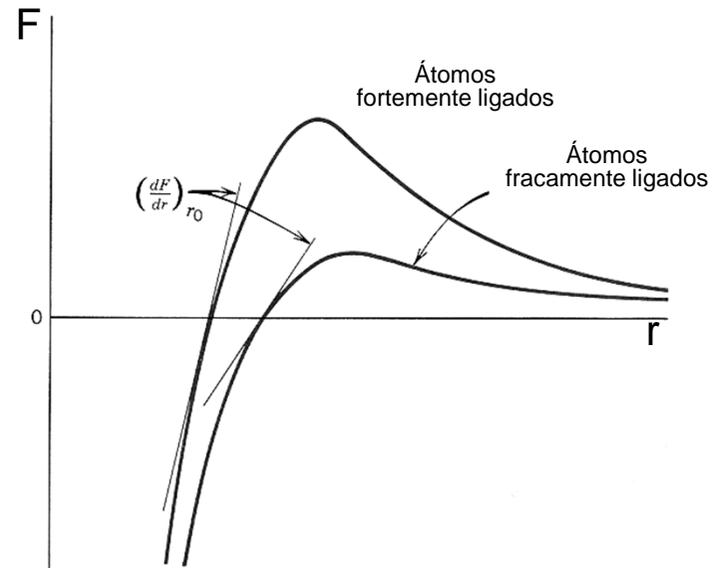
$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

(Lei de Hooke)

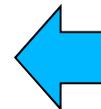


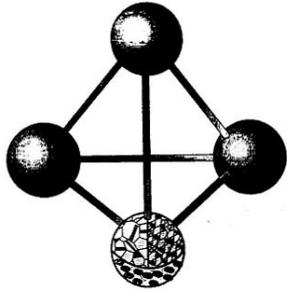
## Deformação Elástica

Força de Ligação vs.  
Distância Interatômica



- O módulo de elasticidade é proporcional ao valor da derivada  $dF/dr$  no ponto  $r = r_0$ .
- O módulo de elasticidade representa uma medida da intensidade das forças de ligação interatômicas.





## Endurecimento em Metais: Precipitação ou Dispersão

- Os precipitados também dificultam o movimento das discordâncias.
- **PRECIPITADOS INCOERENTES:** não existe continuidade entre os planos cristalinos do precipitado e os da matriz, e as discordâncias terão que se curvar entre os precipitados → MECANISMO DE OROWAN

Mecanismo de Orowan para a interação de discordâncias com partículas incoerentes.

