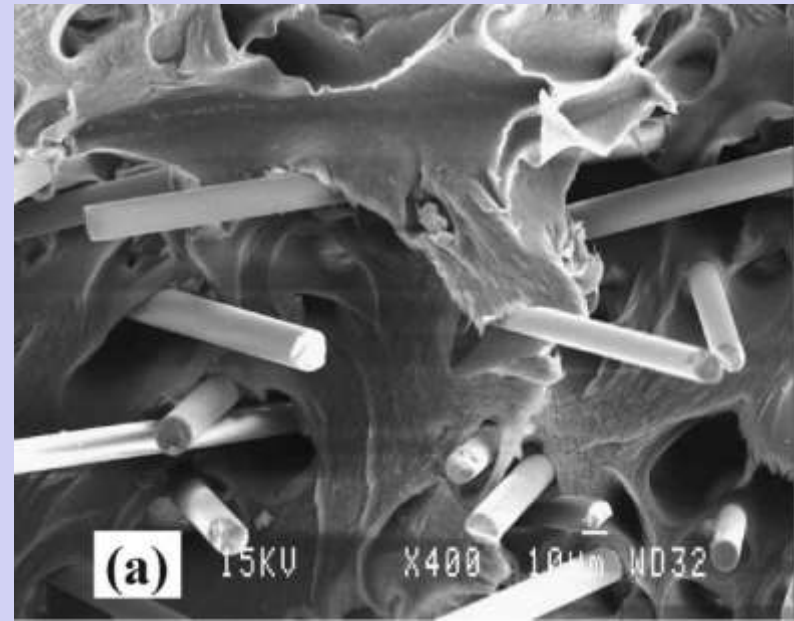
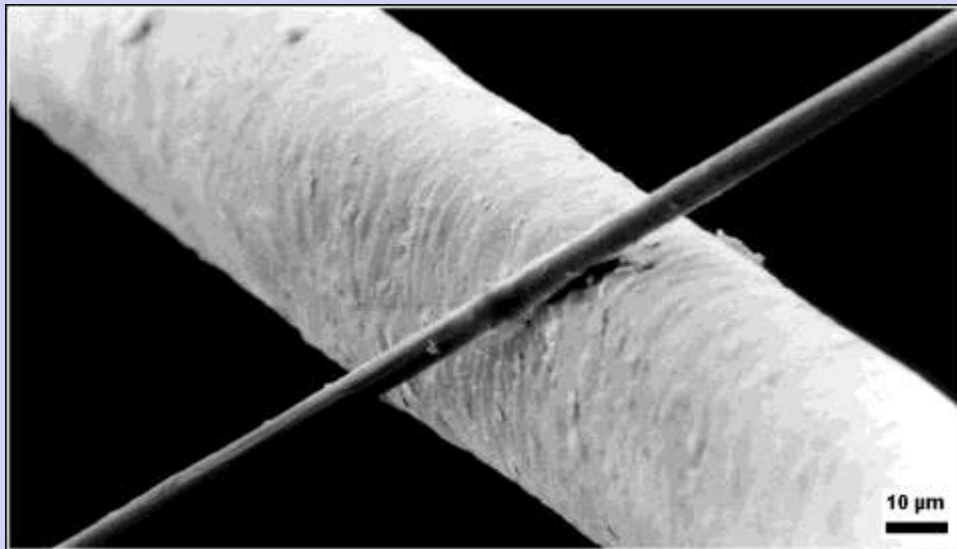


Resina epoxi /fibra de carbono (superfície de fratura).

Fonte: Department of Materials Science and Metallurgy, University of Cambridge



Nylon-6,6 / SEBS-g-MA / fibra de vidro



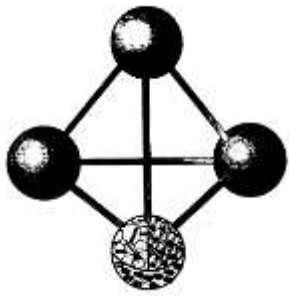
Fibra de carbono usada para reforço, comparada com cabelo humano...

Fonte: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=350295>

# Unidade 19

## Materiais Compósitos

PMT 3100 - Fundamentos de Ciência e Engenharia dos Materiais  
2º semestre de 2018



# Compósitos

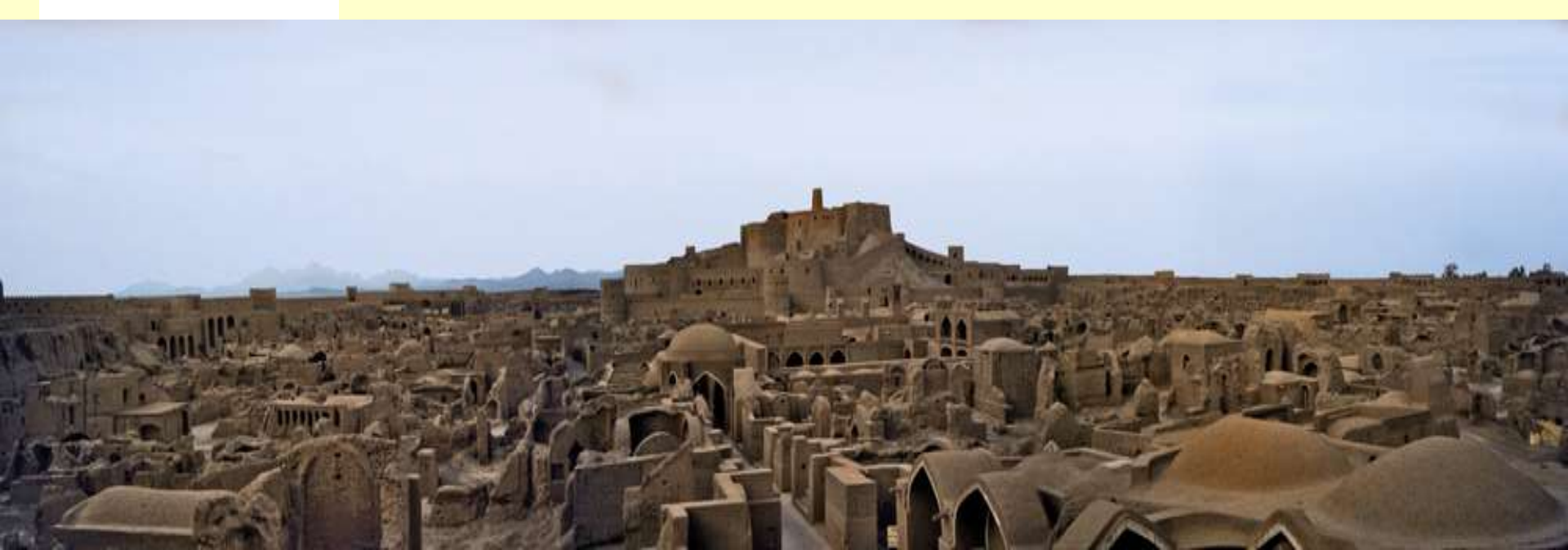
## Princípio da Ação Combinada

- **COMPÓSITO:** *Material multifásico cujas propriedades constituem uma combinação benéfica (**sinergia**) das propriedades das duas ou mais fases que o constituem.*

**Sinergia:** deriva do grego **synergía**, cooperação **syn**, juntamente com **érgon**, trabalho. É definida como o efeito ativo e retroativo do trabalho ou esforço coordenado de vários subsistemas na realização de uma tarefa complexa ou função, também denominado de ação combinada.

- A idéia de usar fibras (*no caso, fibras vegetais*) como elemento reforçador de um material é antiga, tendo ocorrido em diversas civilizações antigas:
  - *Egípcios*
  - *Civilizações pré-colombianas (incas, maias)*
  - *Índios brasileiros*
- Essa idéia ainda é empregada hoje – casas ainda são construídas com tijolos de terra seca reforçada com fibras naturais (palha) → **“adobe”**.





*A cidadela de Bam, na província iraniana de Kerman: a maior estrutura do mundo em adobe, datando de pelo menos 500 a.C.*

*Foi extremamente afetada pçor um terremoto em 2003, e atualmente encontra-se em processo de reconstrução*

# Construções Atuais em Adobe



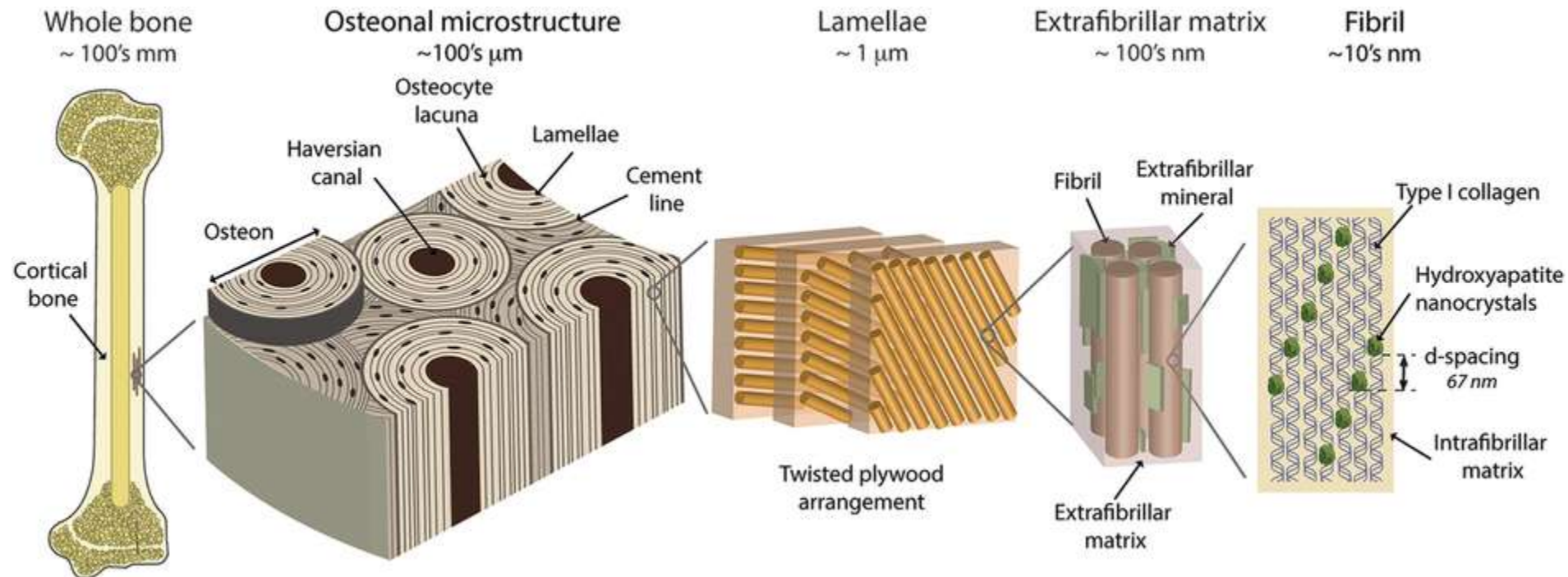
Fonte: PublicDomain,  
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1545245>



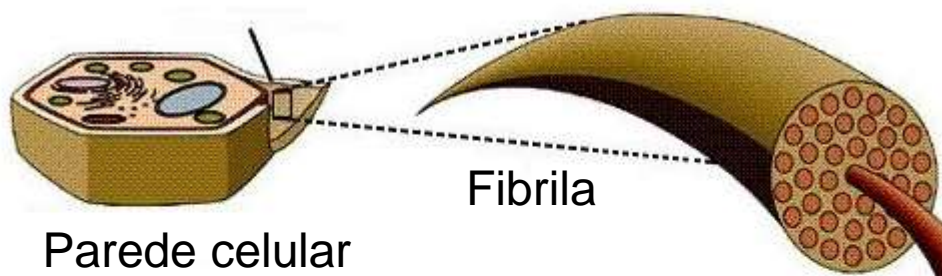
# COMPÓSITOS: Exemplos Naturais

- Ossos

- colágeno (proteína de elevada resistência, mas macia), junto com o mineral hidroxiapatita (resistente, rígido, mas frágil).



# Madeira



Parede celular

Fibrila

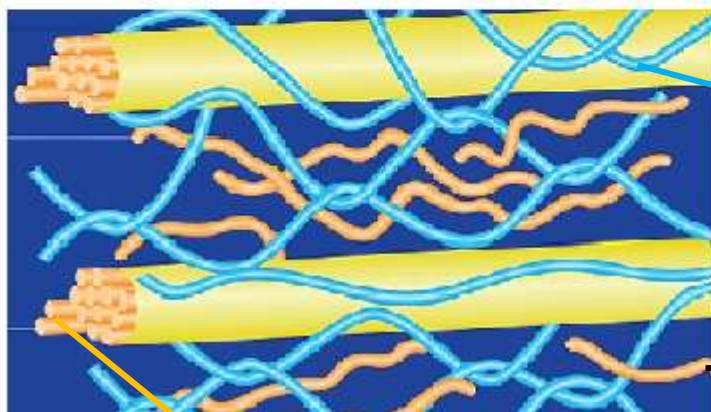
*fibras de **celulose** : resistentes e flexíveis*

+

***hemicelulose** : pouco resistente e hidrolisável*

+

*envolvidas por **lignina**, mais rígida*



Micro-fibrila

## Hemicelulose

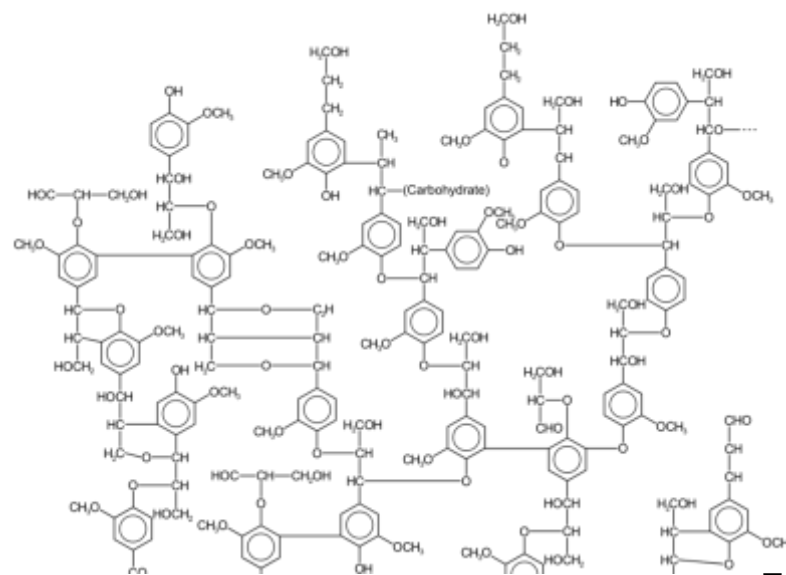
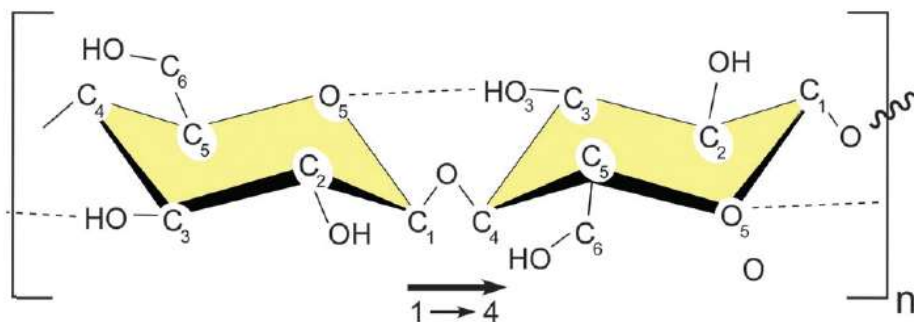
Hemicelulose é um polímero de baixa massa molar composto por polisacarídeos, que podem ser lineares ou ramificados e amorfos.

## Lignina

Macromolécula tridimensional amorfa

## Celulose

formada por unidades de D-glucose ( $C_6H_{10}O_5$ ) ligadas entre si covalentemente através do átomo de oxigênio na posição  $\beta$ -1,4



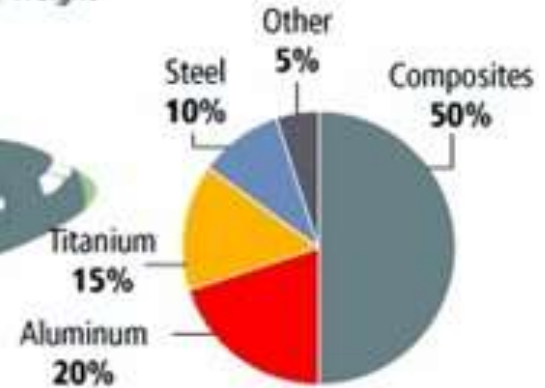
## Materials used in 787 body

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



## Total materials used

By weight



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

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

## Mais leves, rápidos e duráveis

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

### BOEING 787



Compósitos  
de  
Engenharia



# Estrutura de um Compósito

- Compósitos → **Fase Matriz** + **Fase Dispersa**
- Compósitos de Engenharia tem:

**Fase matriz** (*Fase Contínua*):

Polímero → **PMC**

Cerâmica → **CMC**

Metal → **MMC**

**Fase dispersa**

Muitas possibilidades : *polímeros, cerâmicas, metais, minerais, materiais orgânicos naturais, ...*

METALS AND ALLOYS:

steels,  
aluminium alloys,  
copper & brasses,  
titanium, etc.

metal-filled plastics  
(particulate and fibre fill)

metal-matrix composites,  
ceramic-matrix composites,  
(including ordinary reinforced  
concrete and steel-fibre rein-  
forced concrete)

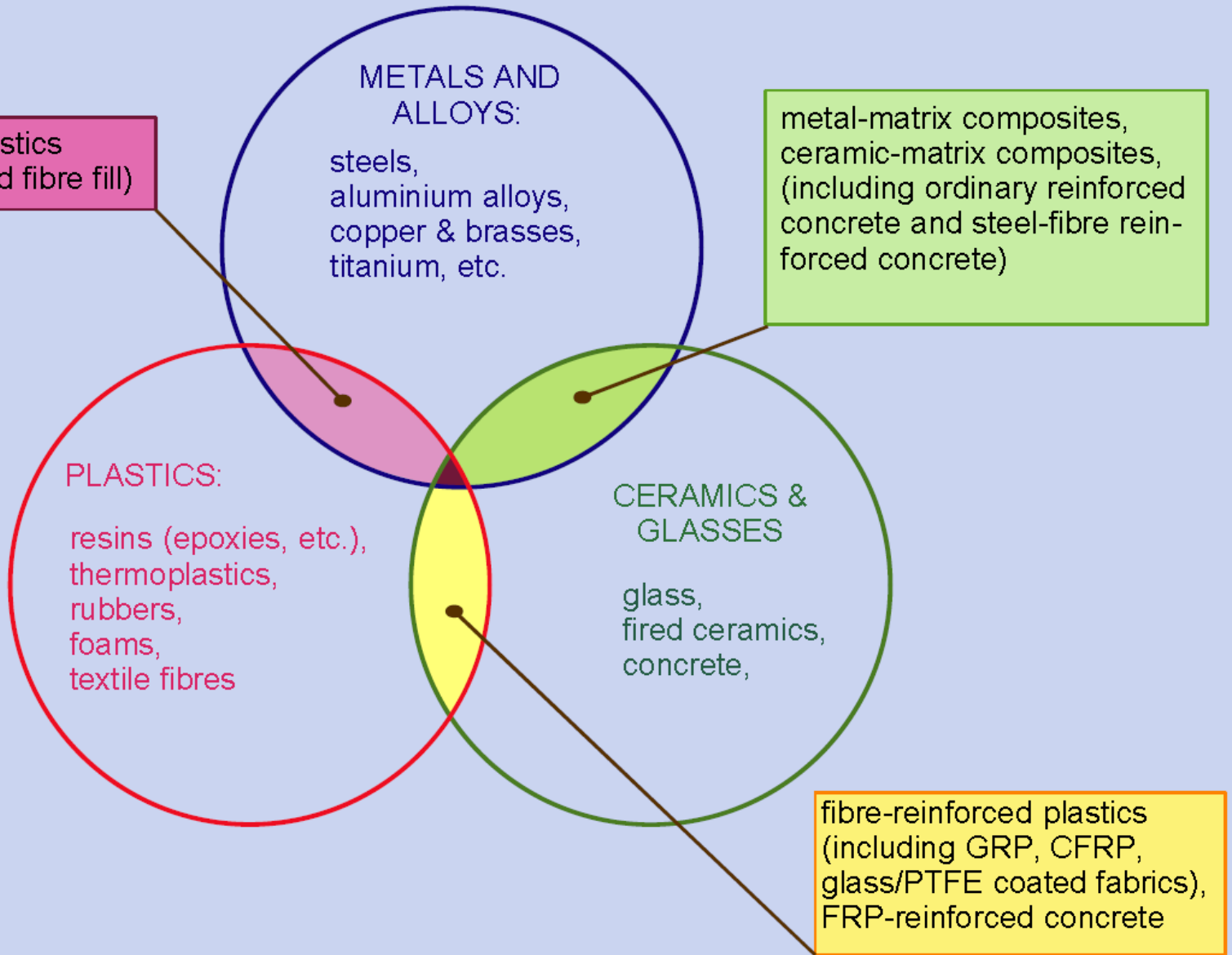
PLASTICS:

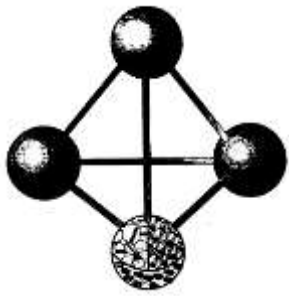
resins (epoxies, etc.),  
thermoplastics,  
rubbers,  
foams,  
textile fibres

CERAMICS & GLASSES

glass,  
fired ceramics,  
concrete,

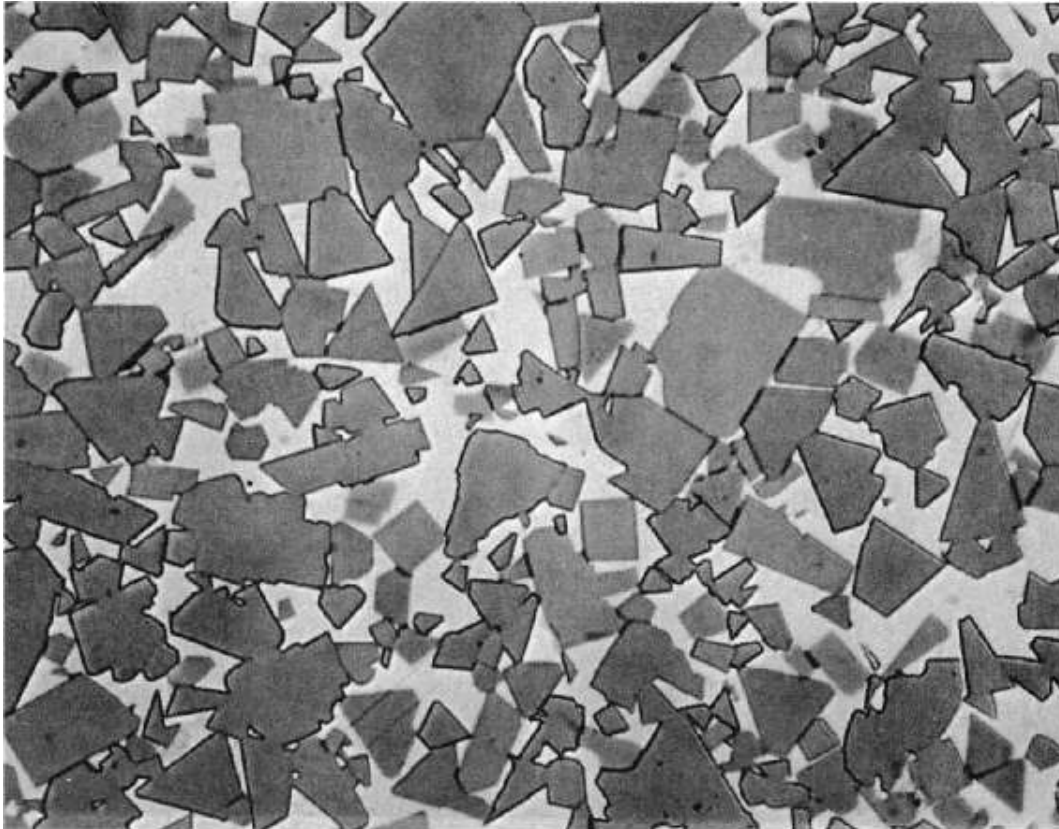
fibre-reinforced plastics  
(including GRP, CFRP,  
glass/PTFE coated fabrics),  
FRP-reinforced concrete



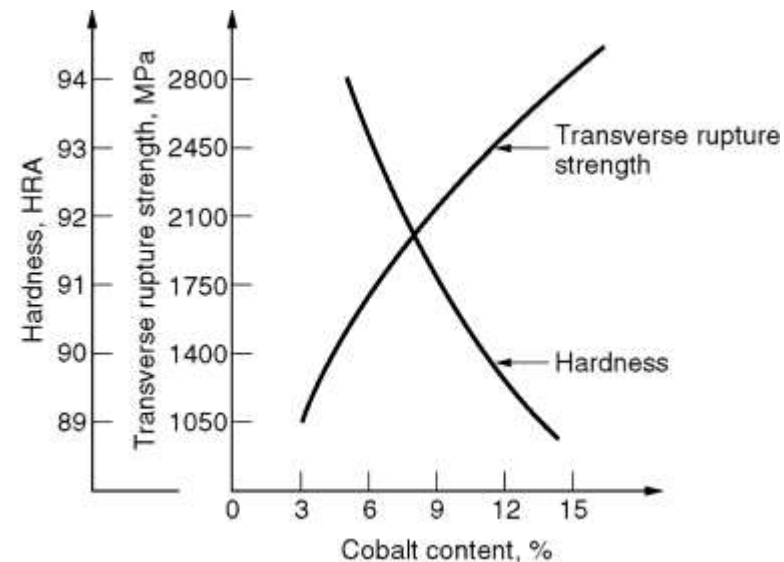
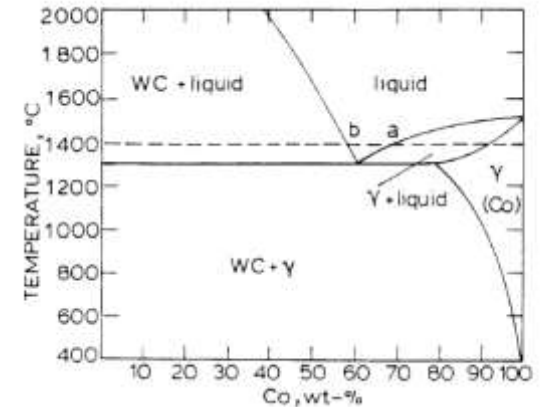


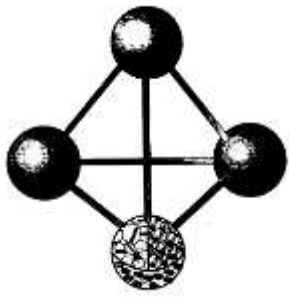
# Exemplo de MMC Broca de Metal Duro

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



Micrografia (aumento aproximado de 1.000 vezes) de um composto de matriz metálica: contendo 85% WC e 15% Co. (photo: Kennametal Inc.)

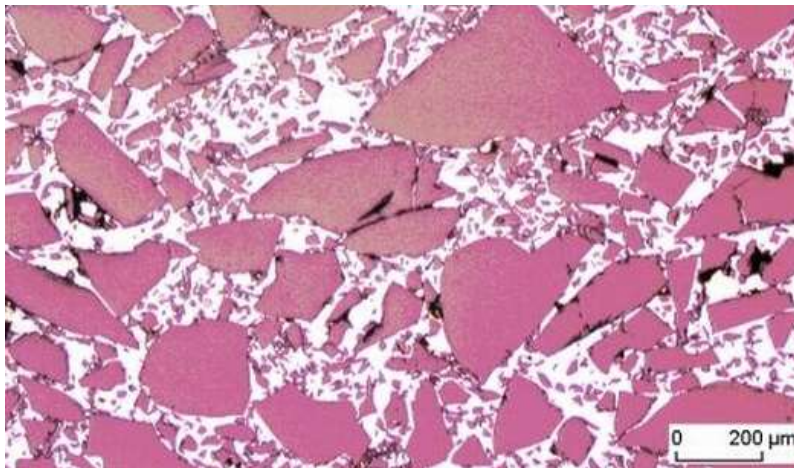




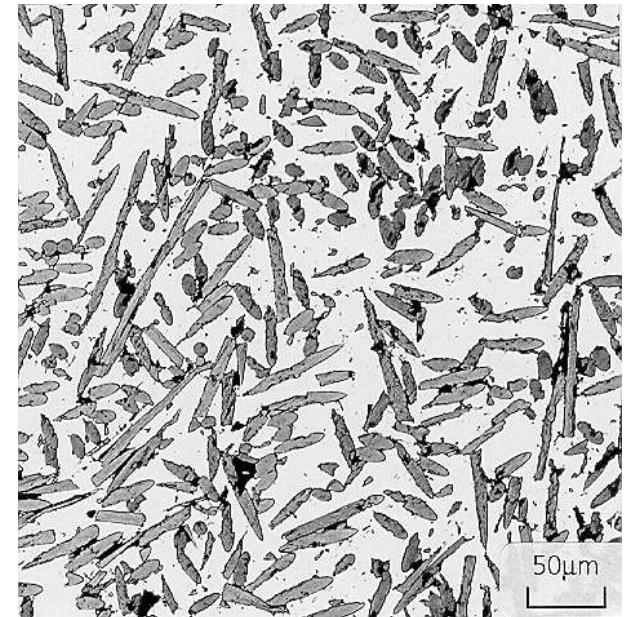
# Exemplo de MMC

## “Cermets”

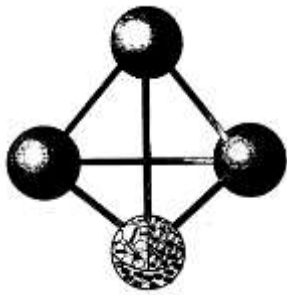
- “**Cermets**” → compostos por carbeto tais como carbeto de titânio (TiC), carbeto de tungstênio (WC) e carbeto de cromo ( $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ). Carbeto de tântalo (TaC) é menos comum.
- A matriz é composta por um metal : cobalto ou níquel (... *podendo também ser de Al, Ti, Mg, Fe, Cu*).



Compósito de SiC em matriz de alumínio. (70% de volume)

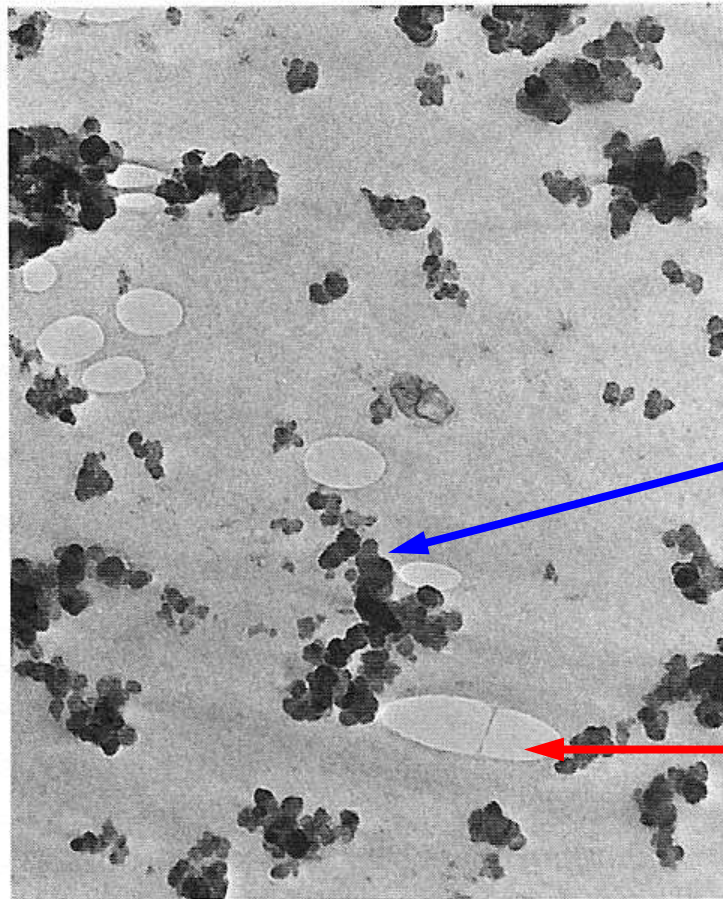


Compósito de fibras de carbono (Chopped) em matriz de cobre.



# Exemplo de PMC

## Pneu

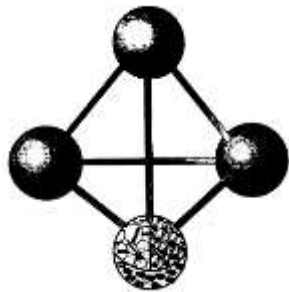


**Matriz:** elastômero (borracha)  
**Partículas:** negro de fumo (carbono)  
(quantidade: 15 a 30%)

⇒ partículas absorvem UV  
e aumentam resistência mecânica

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

Fase elipsoidal: pequenas bolhas de ar  
na borracha



# Exemplo de PMC

## Compósitos com matriz de PP

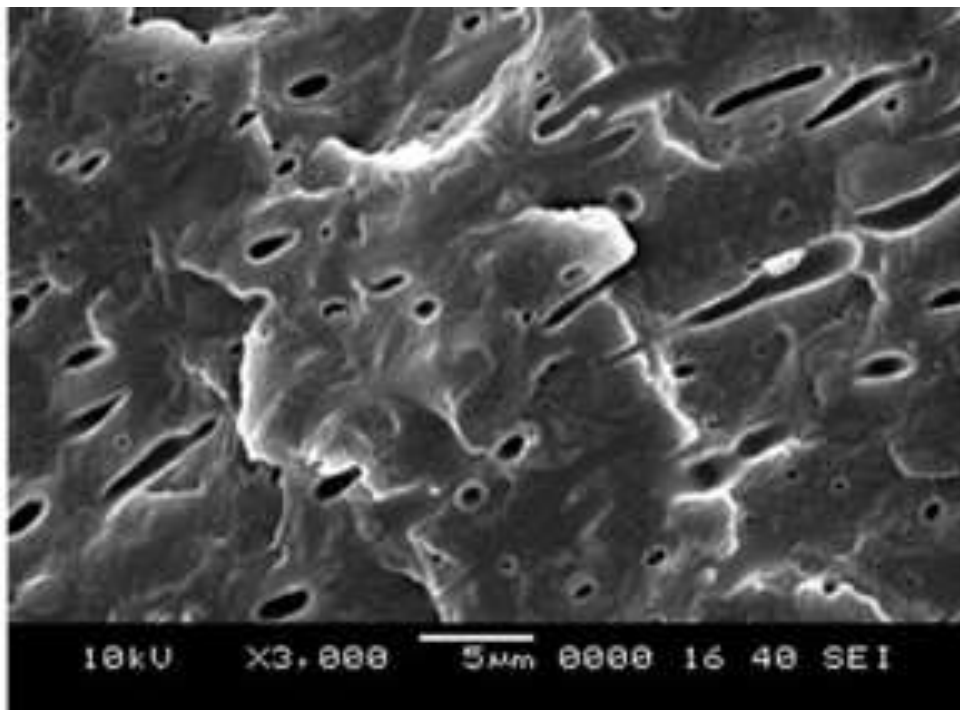


Imagem de MEV de superfície de fratura de compósito  
PP + EPDM + talco  
(EPDM: copolímero de etileno-propeno-dieno)

Tabela 2 – Propriedades Mecânicas de Polipropileno Modificado com EPDM

| Propriedades          | PPcopo  | PPcopo +<br>20%<br>EPDM | PPcopo<br>+C.M<br>+EPDM | PPcopo<br>+ F.V.<br>+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**

**C<sub>3</sub>S** → *silicato tricálcico*  $(CaO)_3 \cdot SiO_2$

**C<sub>2</sub>S** → *silicato dicálcico*  $(CaO)_2 \cdot SiO_2$

**C<sub>3</sub>A** → *aluminato tricálcico*  $(CaO)_3 \cdot Al_2O_3$

**C<sub>4</sub>AF** → *ferroaluminato tetracálcico*  
 $(CaO)_4 \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$

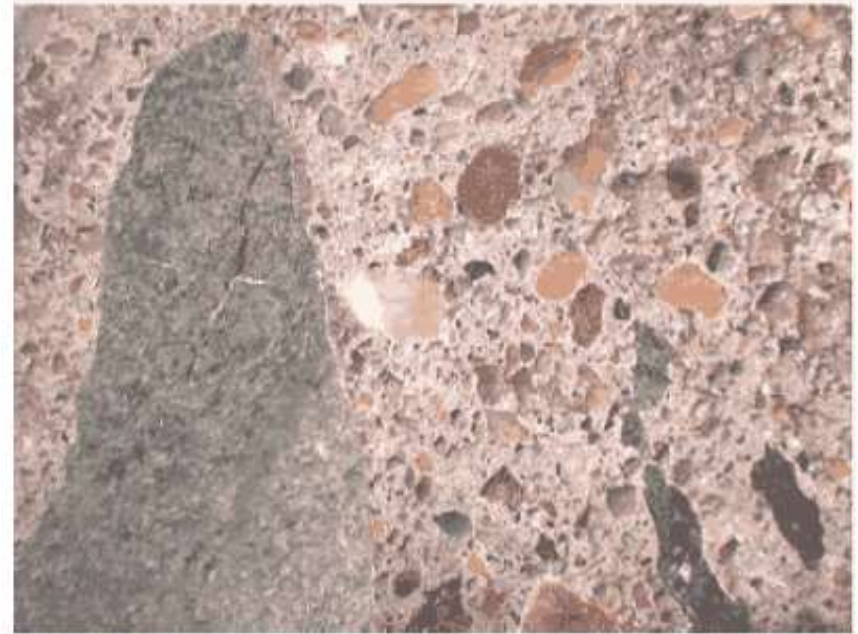
## **Fases Hidratadas** *(algumas...)*

**CSH** → silicatos de cálcio hidratados

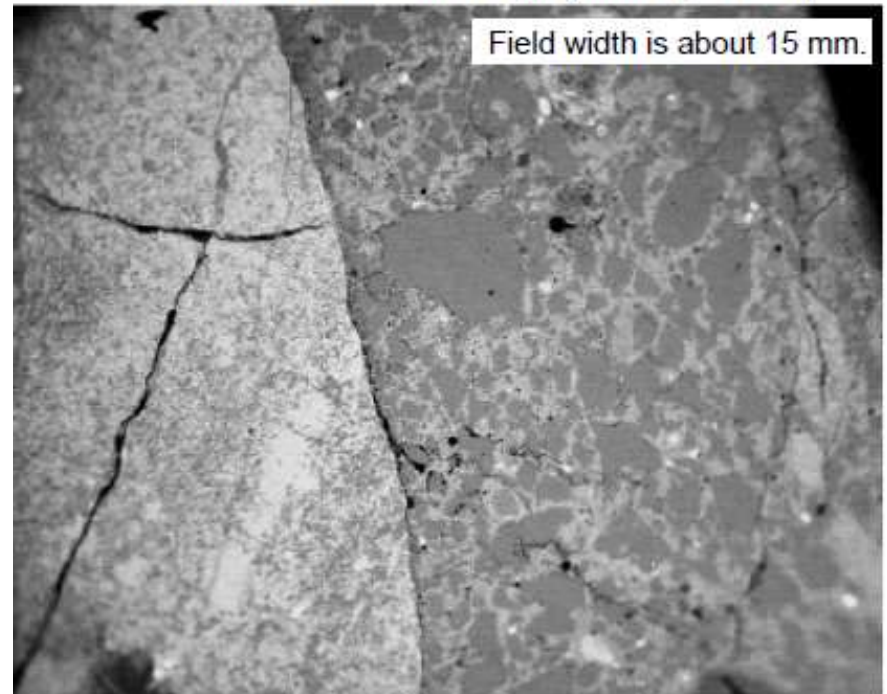
**CH** → Portlandita ( hidróxido de cálcio  
 $Ca(OH)_2$  )

**Etringita**, de fórmula geral  $C_6A\bar{S}_3H_{32}$  →  
sulfoaluminato de cálcio,  
 $(CaO)_6 \cdot Al_2O_3 \cdot (SO_3)_3 \cdot 32H_2O$

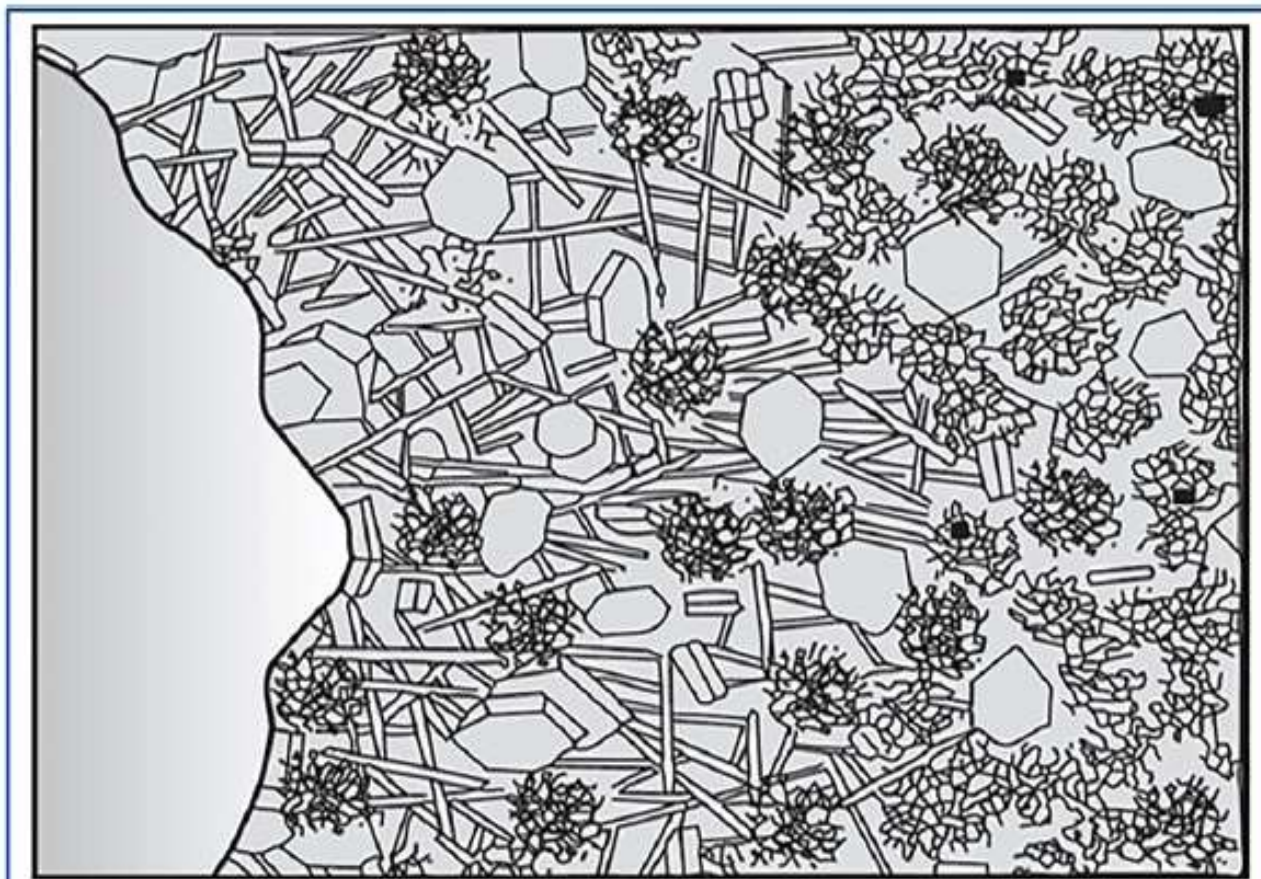
Stereomicroscopic image.



Backscattered electron image (same specimen)



## Representação esquemática da região interfacial em concreto



Aggregate

Interfacial  
transition zone

Bulk  
cement paste

C-S-H



CH

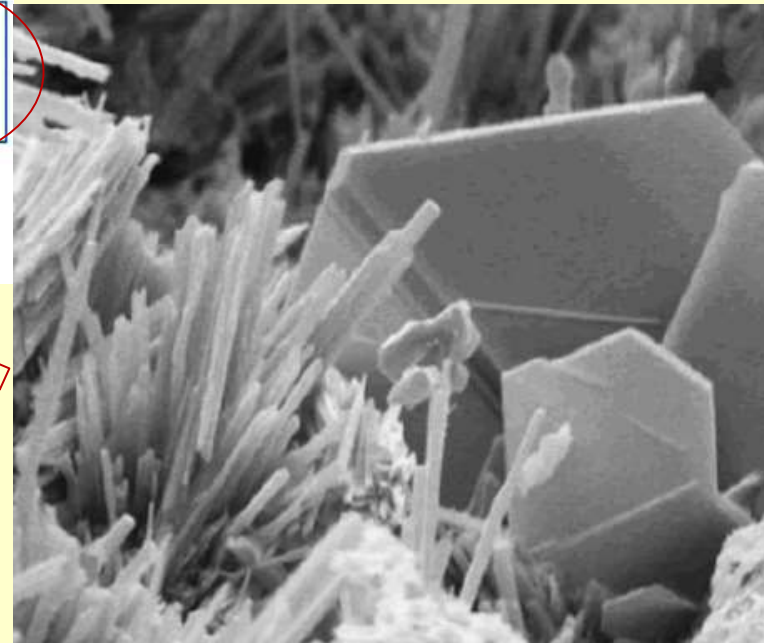
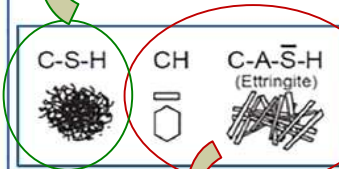
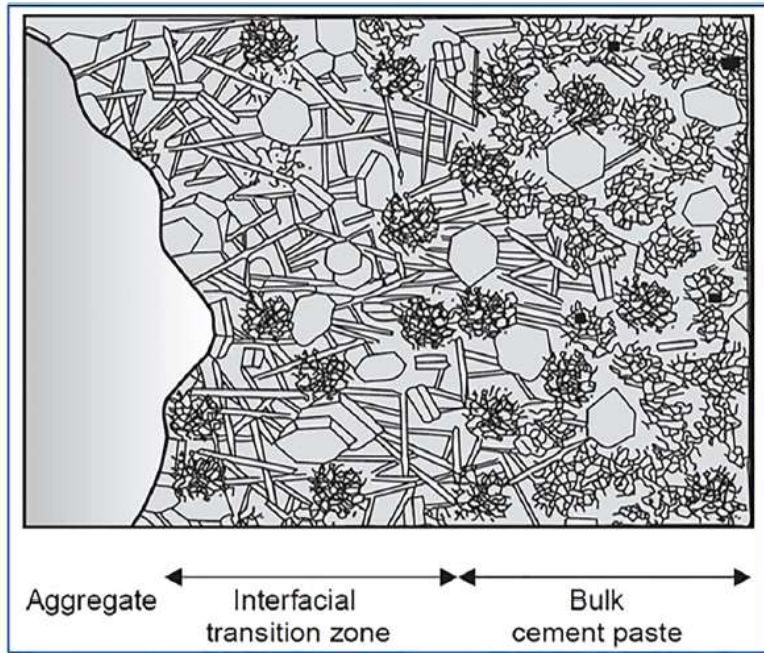
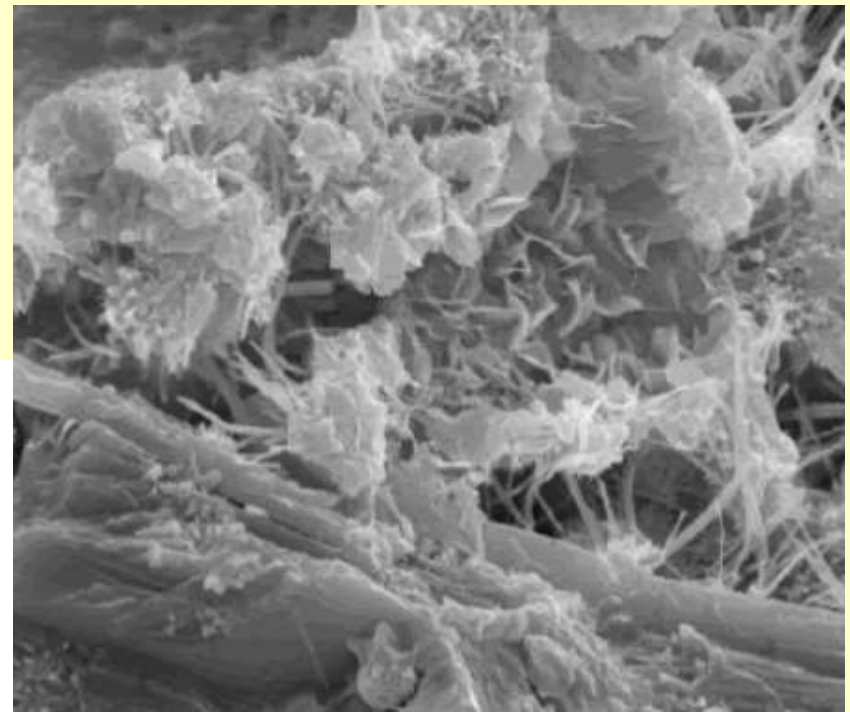


C-A-S-H  
(Ettringite)





MEV  
CSH e Etringita



MEV  
Portlandita e Etringita

**Fontes:**

**Esquema:** <https://www.intechopen.com/books/high-performance-concrete-technology-and-applications/microstructure-of-concrete>

**MEVs:**

<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrast ructure/pavements/pccp/04150/chapt14.cfm>

# Concreto Armado

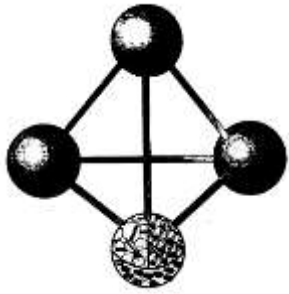


Março 1911

## 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.”

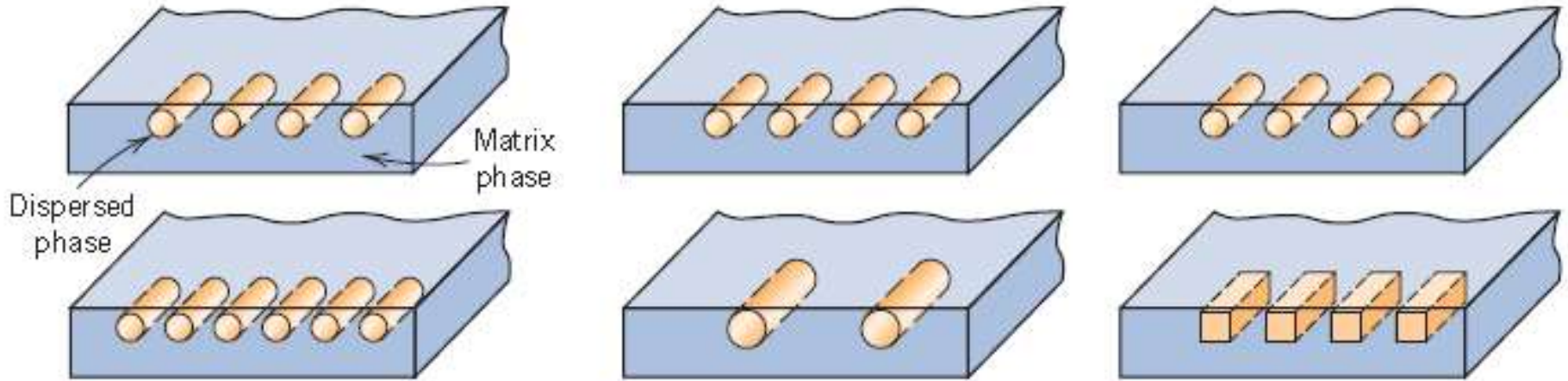
**Concreto armado** delinea a silhueta de cidades americanas, 1911



## Relação Estrutura - Propriedades

- As propriedades do compósito dependem:
  - das *propriedades individuais*, tanto da **fase matriz**, quanto da **fase dispersa**
  - da natureza da *interface* entre a **fase matriz** e a **fase dispersa**
  - da “*geometria*” da **fase dispersa**

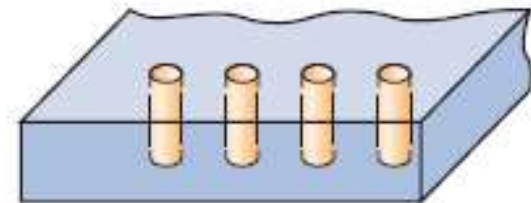
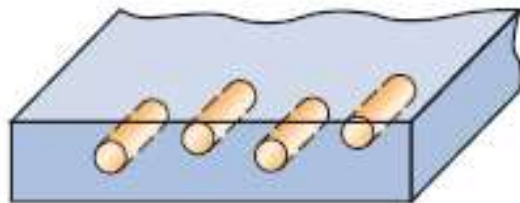
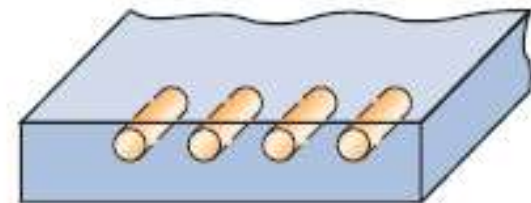
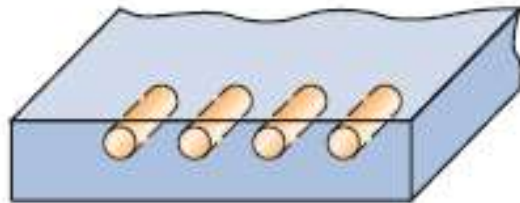
# Propriedades dependem da “geometria” das fases dispersas



*Concentração*

*Tamanho*

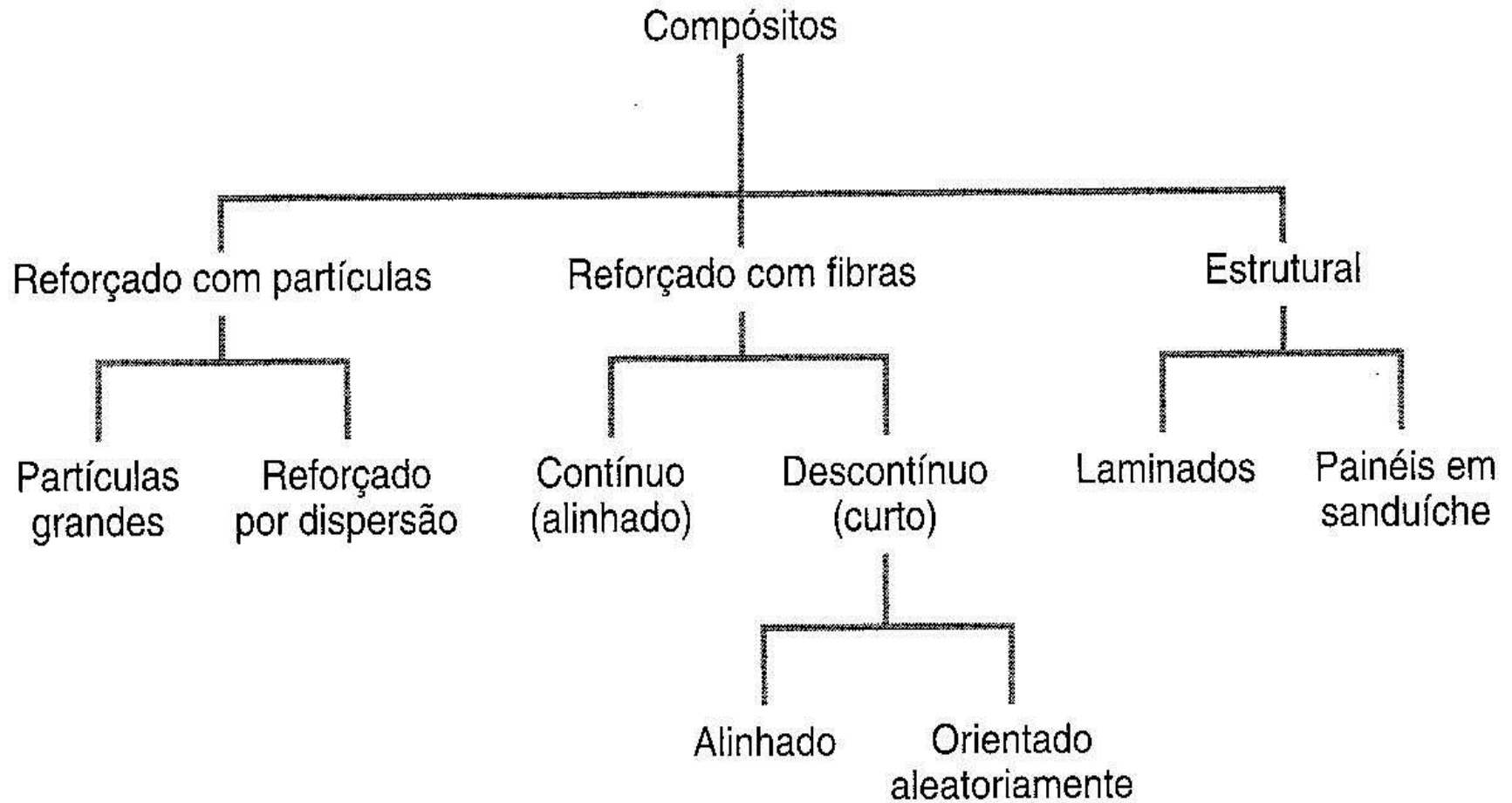
*Forma*



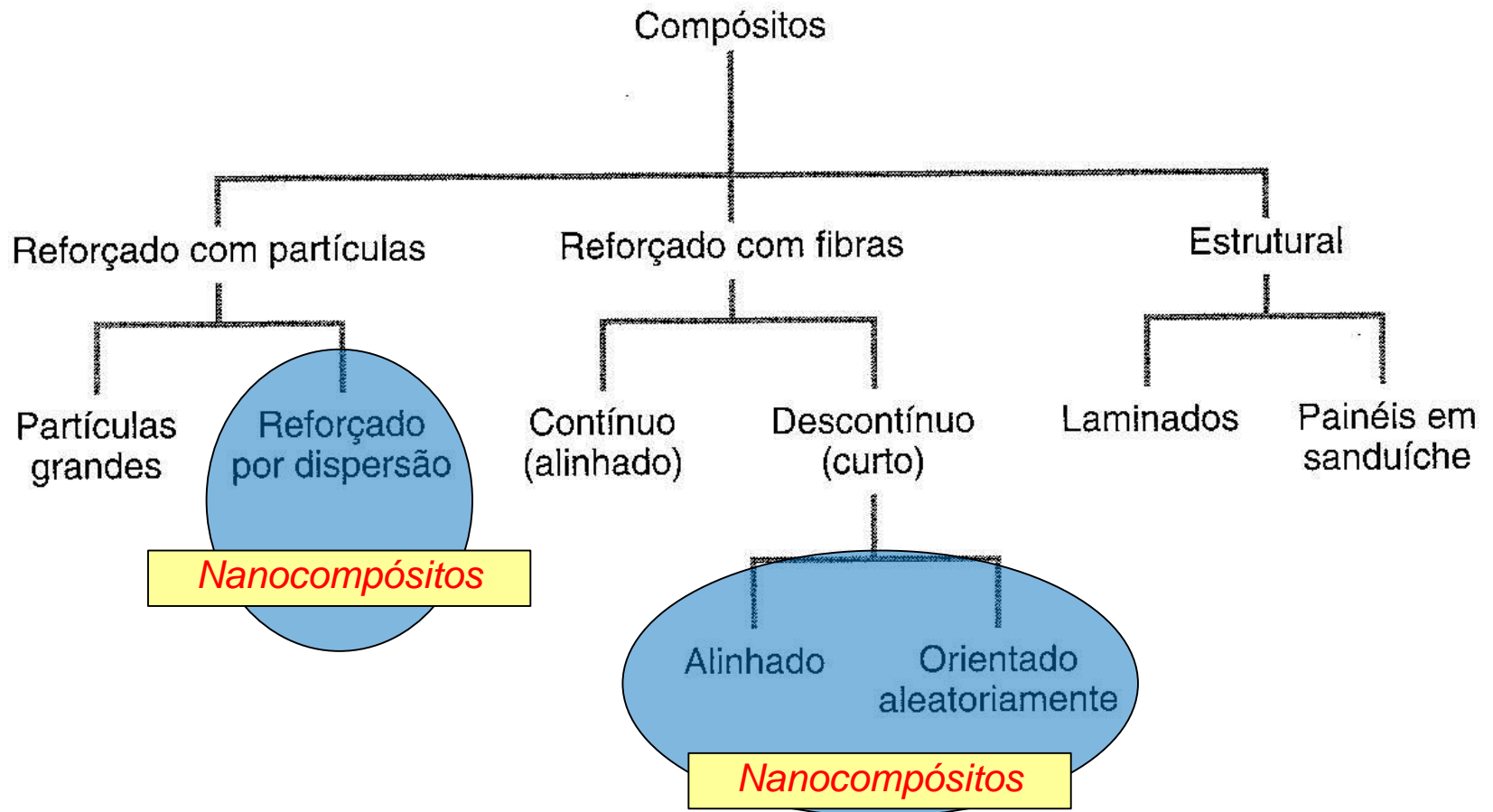
*Distribuição*

*Orientação*

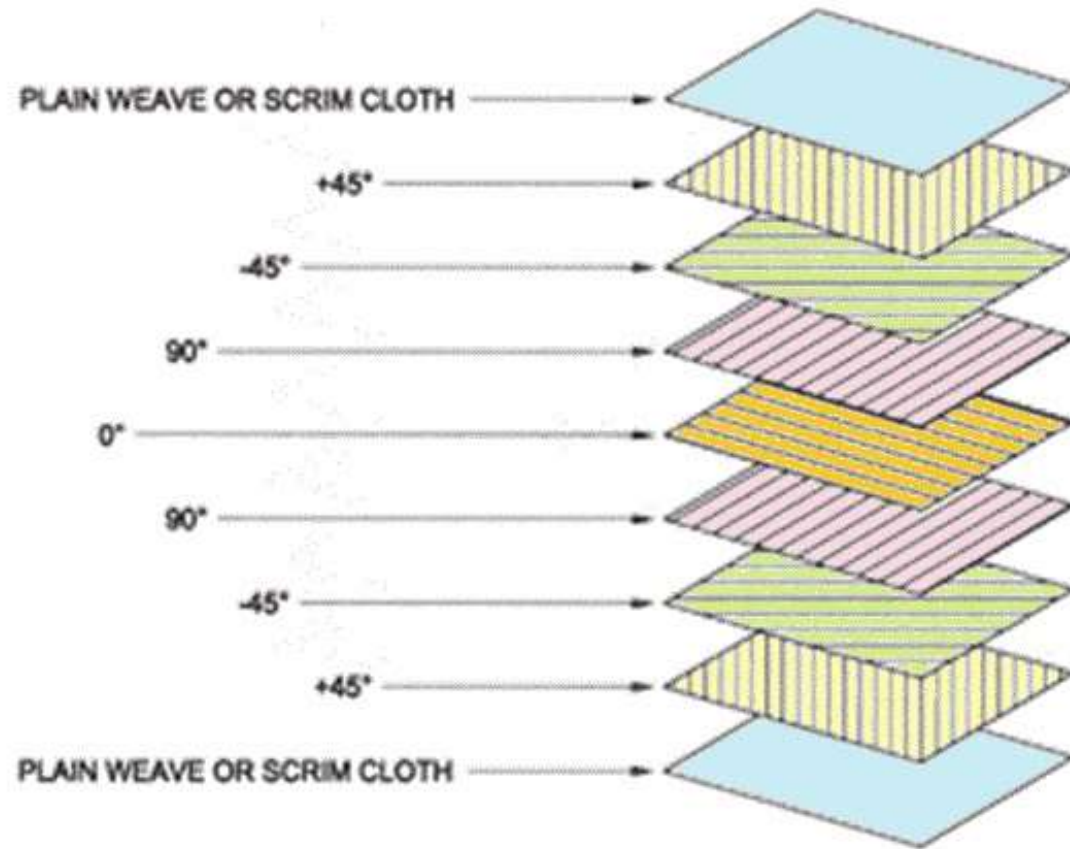
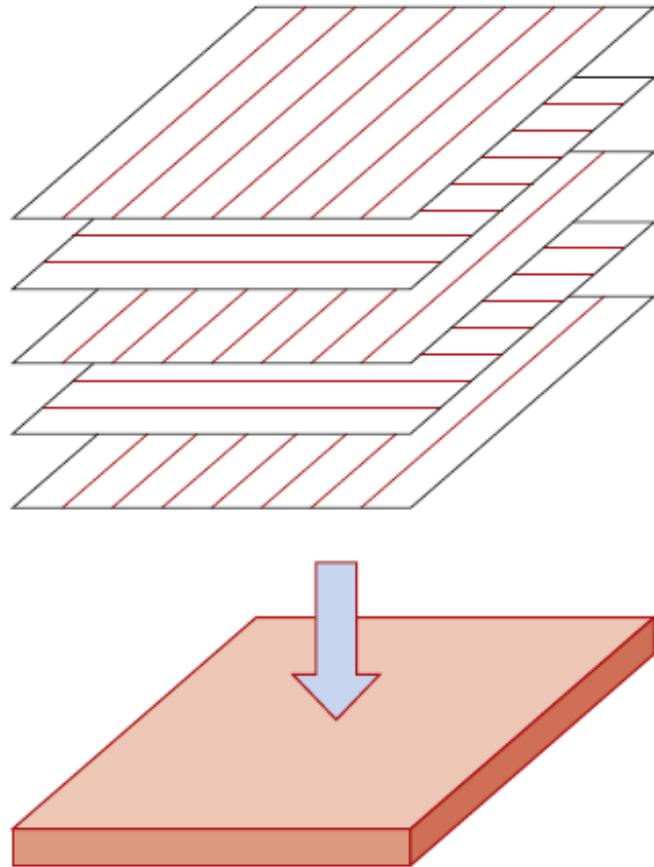
# Uma Classificação dos Materiais Compósitos



# Uma Classificação dos Materiais Compósitos



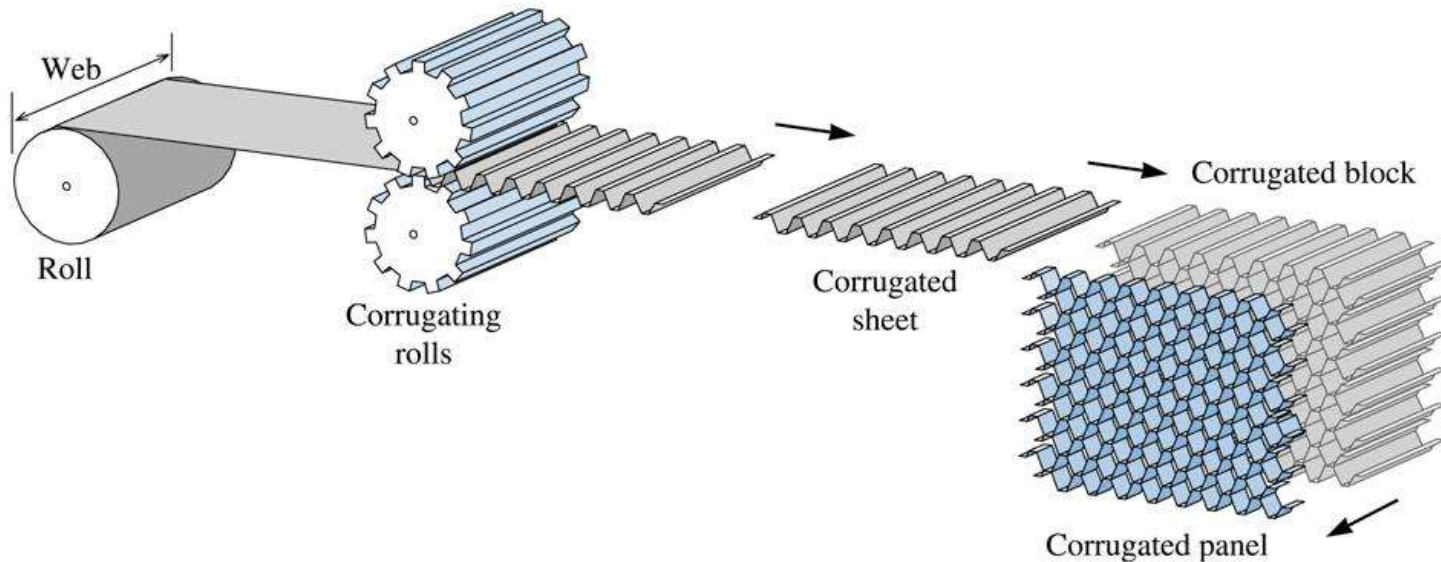
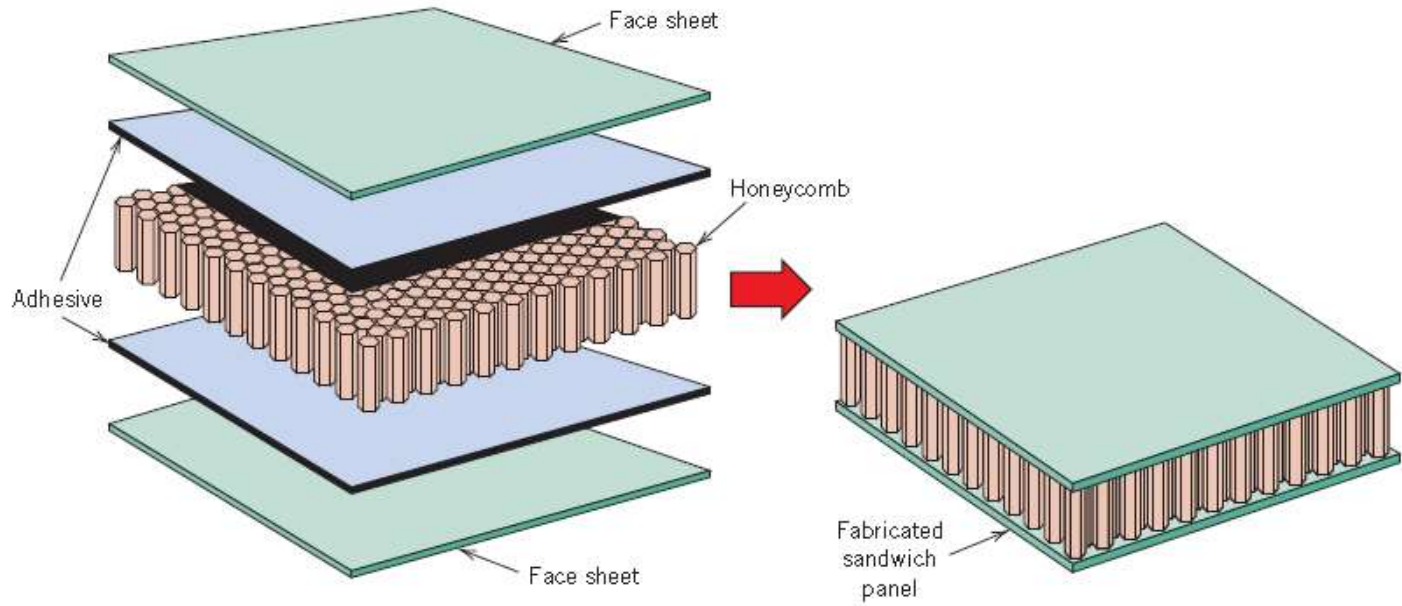
## Laminados e Painéis em “Sanduíche”



Lâminas de material com propriedades anisotrópicas (por exemplo, madeira).

A “soma” das lâminas, coladas em diferentes direções, resulta em um material “isotrópico”.

Laminados e Painéis em Sanduíche





# Fase Dispersa

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

# Nanocompósitos

Carga Sub-Micrométrica

→ 100 a 1000 nm (0,1 a 1 $\mu$ m)

Carga com dimensões nanométricas

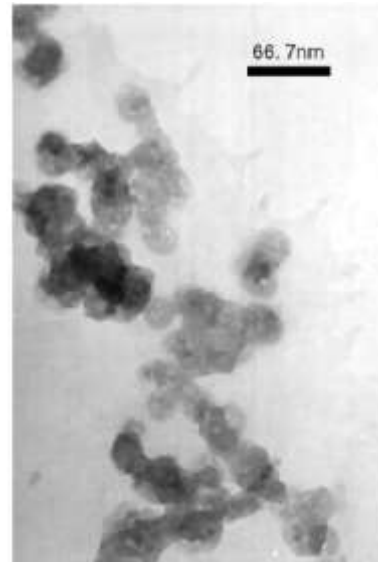
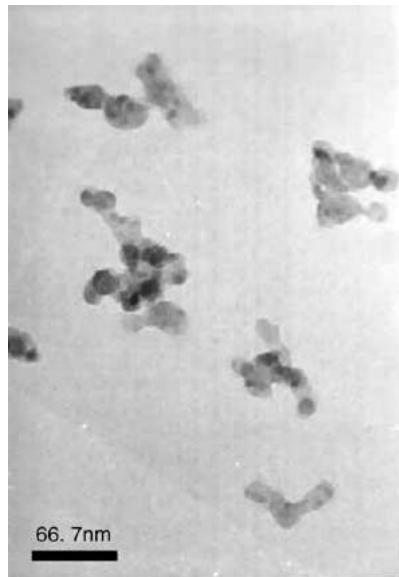
→ 1 a 100 nm - 0,001 a 0,1  $\mu$ m (nanocarga)

*Aumento de resistência se dá por interações a nível atômico ou molecular entre a carga e a matriz → **nas interfaces***

...relembrando: 1 nm = 10 Å = 10<sup>-9</sup> m

# Nanocompósitos

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

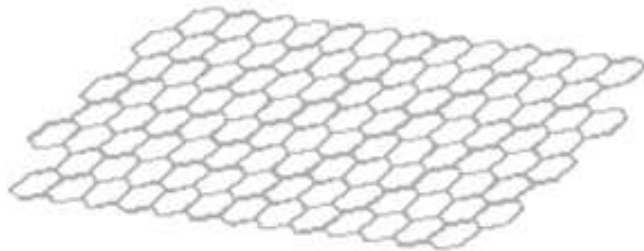


$\text{CaCO}_3$  (Nanotech Science and Technology)

- *Novas cargas: melhoria de propriedades*

# Exemplo de Nanocompósito

## Nanopartícula



graphene sheet

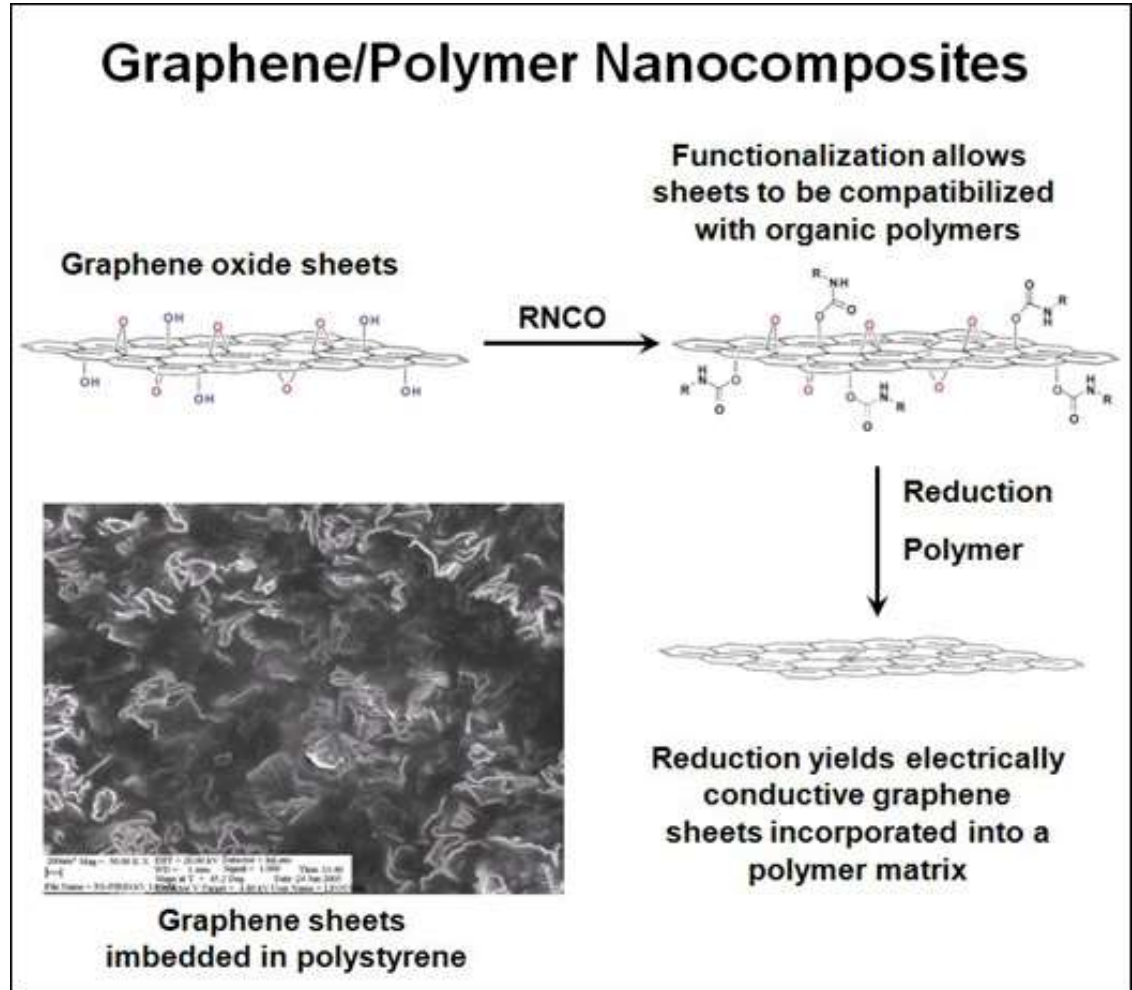
### Grafeno

Módulo de elasticidade de 1TPa.

Compósitos com matriz polimérica

→ melhorias em propriedades:

- *Elétricas*
- *Térmicas*
- *Barreira a gases*
- *Mecânicas*



# Compósitos Reforçados por Dispersão

- Usado nos MMC, quando são necessárias altas resistências em temperatura elevada e resistência à fluência (exemplo de uso: indústria aeroespacial)
- Chamados de **ODS** – *Oxide Dispersion Strengthened*
  - Adição de óxidos finos
    - 3% de óxido de tório em Ni: é o níquel TD (*“Thoria Dispersed”*)
    - Alumina em alumínio (sinterização de pós de alumínio cobertos por camada de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

# Compósitos Reforçados com Fibras

- A classe dos compósitos reforçados com fibras é a classe de compósitos que mais tem aumentado de importância e de volume de produção.
- A vantagem de inserção de fibras é decorrente da sua baixa densidade, alta resistência mecânica e elevado módulo de elasticidade, aliados à baixa densidade da matriz.

## Ganhos nas seguintes Propriedades

$\sigma_f$  → Resistência à Tração

$E$  → Módulo de Elasticidade

$d$  → Densidade

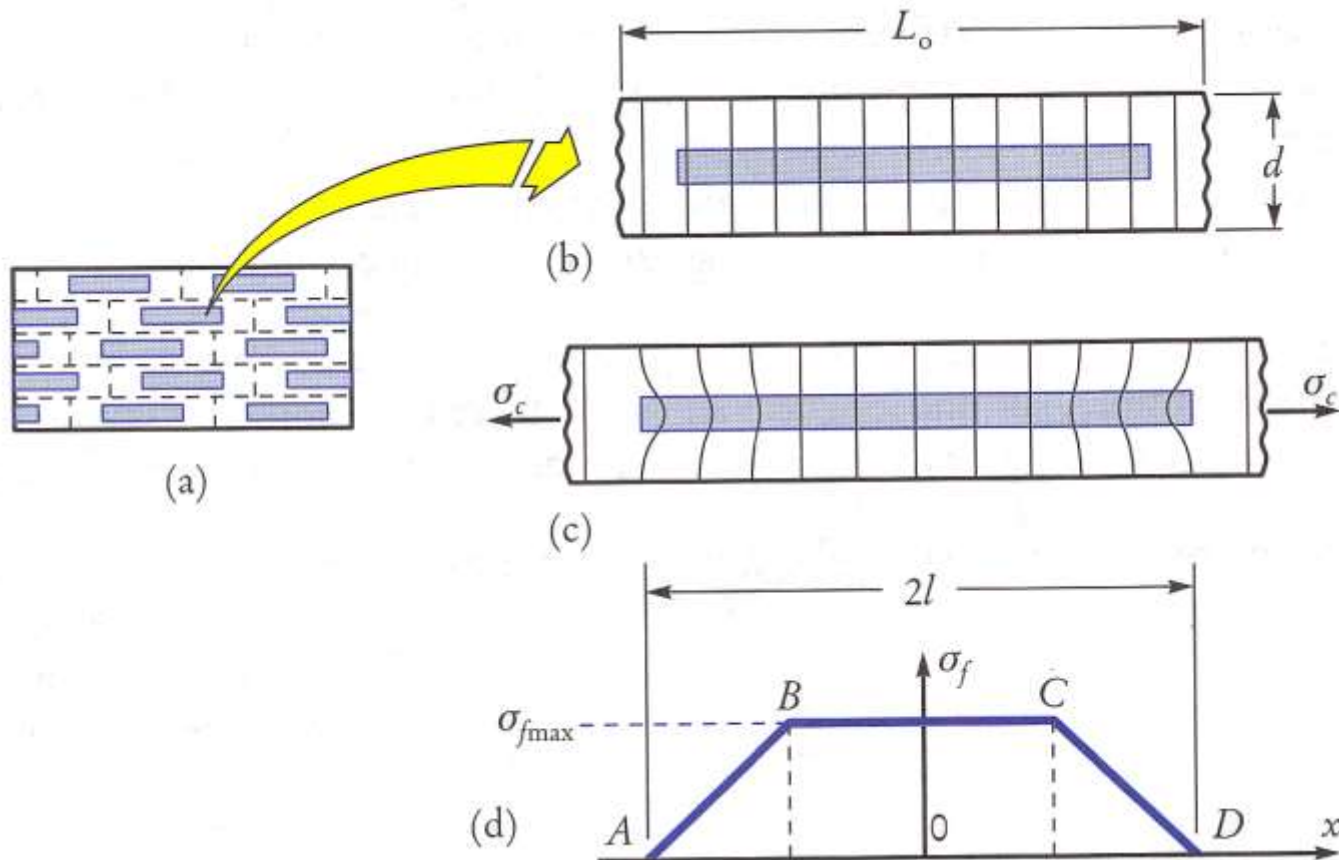
$\frac{\sigma_f}{d}$  → Resistência específica

$\frac{E}{d}$  → Módulo específico

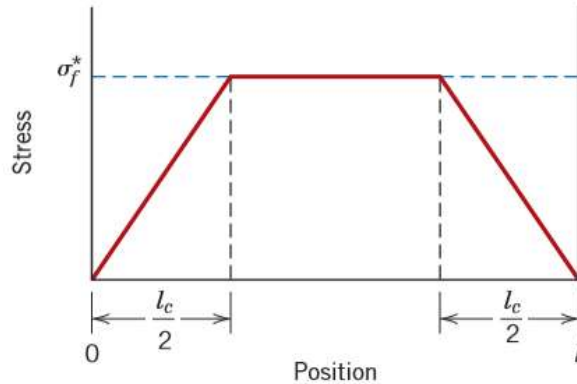
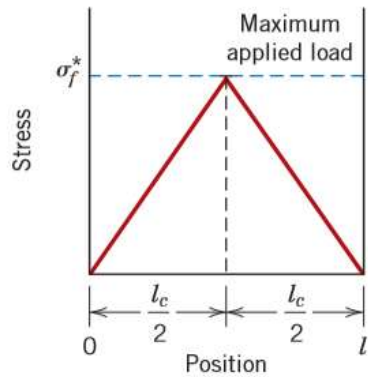
# Fibras

⇒ Resistência depende do quanto a carga é transferida da matriz para a fibra.

⇒ Ligação interfacial entre fibra e matriz cessa na ponta da fibra, deformando a matriz naquela região.



# Influência do Comprimento da Fibra

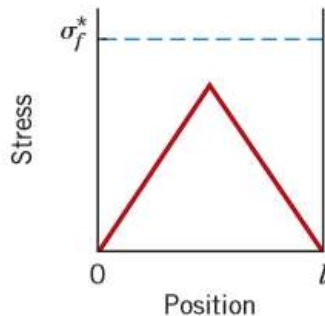
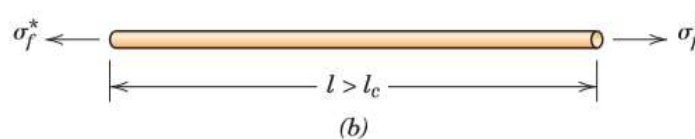
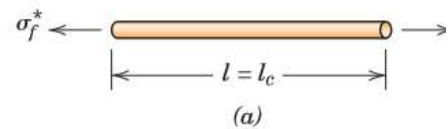


$$l_c = \frac{\sigma_f^* d}{2\tau_c}$$

⇒  $\sigma_f^*$  → limite de resistência da fibra

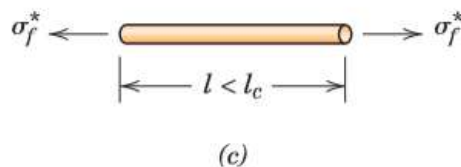
⇒  $\tau_c$  → resistência da interação fibra-matriz (ou tensão limite de escoamento por cisalhamento da matriz – o que for menor)

⇒  $d$  → diâmetro da fibra



$$l_c = \text{comprimento crítico}$$

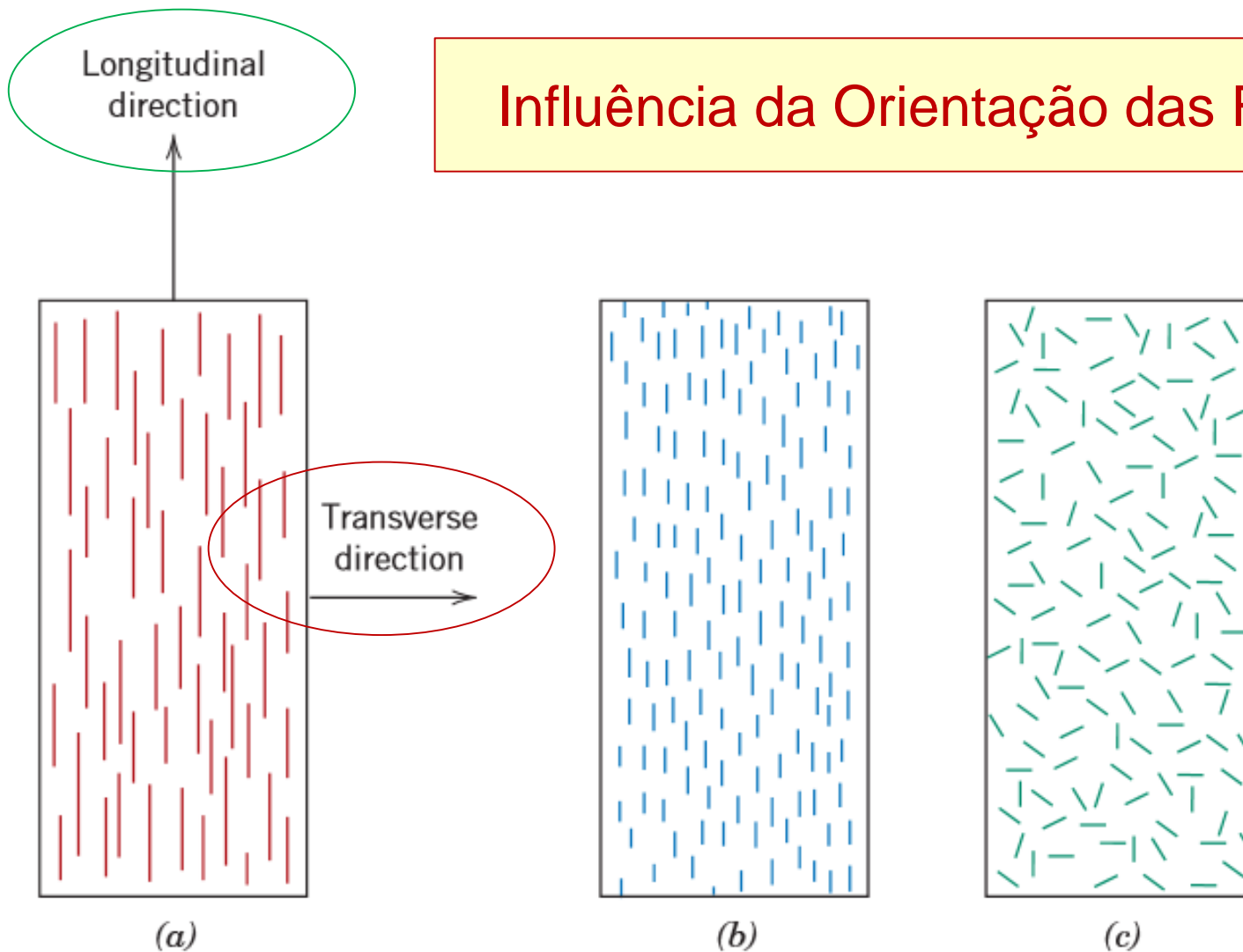
Em compósitos com fibra de vidro ou carbono,  
 $l_c \sim 1\text{mm}$  (para  $l_c$  entre 20 e 150 x  $d$ )



**“Fibras contínuas” :  $l > 15 l_c$**   
 ...caso contrário, são “fibras curtas ou descontínuas”



## Influência da Orientação das Fibras



(a) *Fibras contínuas e alinhadas*

(b) *Fibras curtas ou descontínuas e alinhadas*

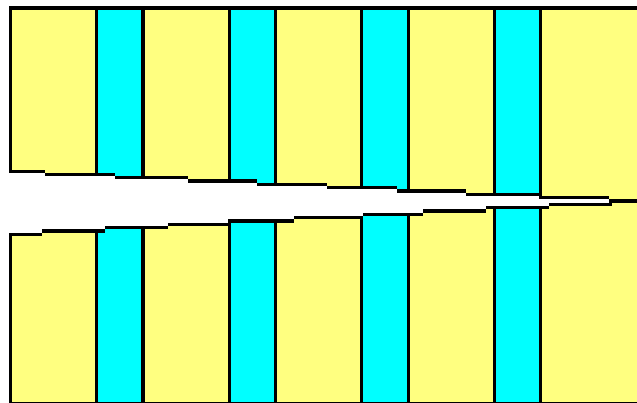
(c) *Fibras curtas ou descontínuas com orientação randômica*

## Influência da interação entre fibra e matriz

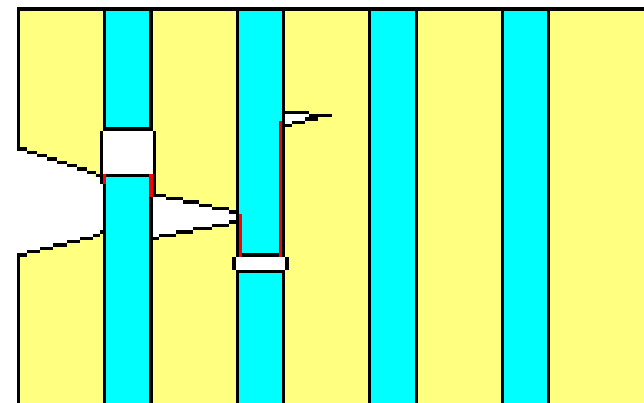
Compósitos reforçados com fibras requerem uma **adesão moderada entre matriz e fibra**.

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



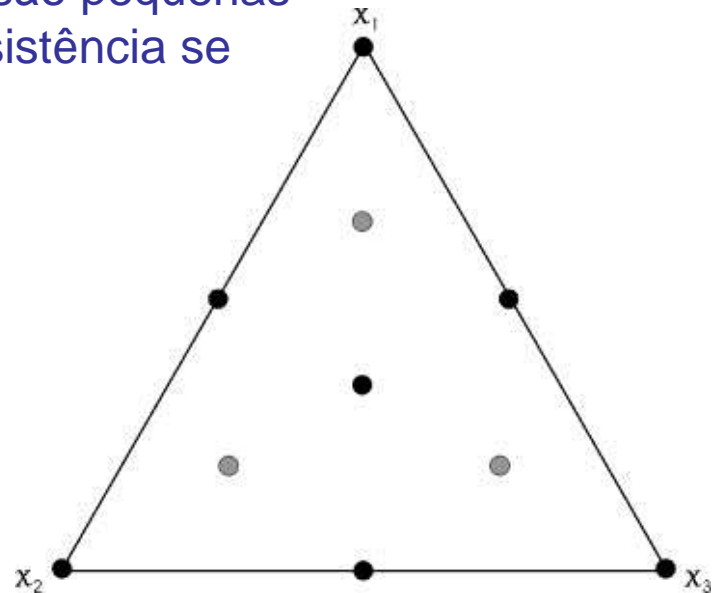
baixa adesão

# Propriedades Mecânicas dos Compósitos

- O comportamento mecânico dos materiais compósitos depende de vários fatores, porém, sempre estão relacionados com as características da matriz e da carga (fibras ou particulados).
- No caso de materiais compósitos contendo partículas dispersas - **partículas grandes, acima de 1 micrometro** ( $1\ \mu\text{m}$ ) - o efeito das partículas dispersas na matriz pode ser descrito pela regra das misturas, que descreve o comportamento mecânico em função da concentração (*dada em fração volumétrica*) das fases presentes.
- Quando as partículas são grandes, a matriz transfere parte da carga para a fase dispersa. Porém, quando as partículas são pequenas (**nanométricas**,  $< 100\ \text{nm}$ ) o aumento da resistência se dá por fenômenos atômicos ou moleculares.

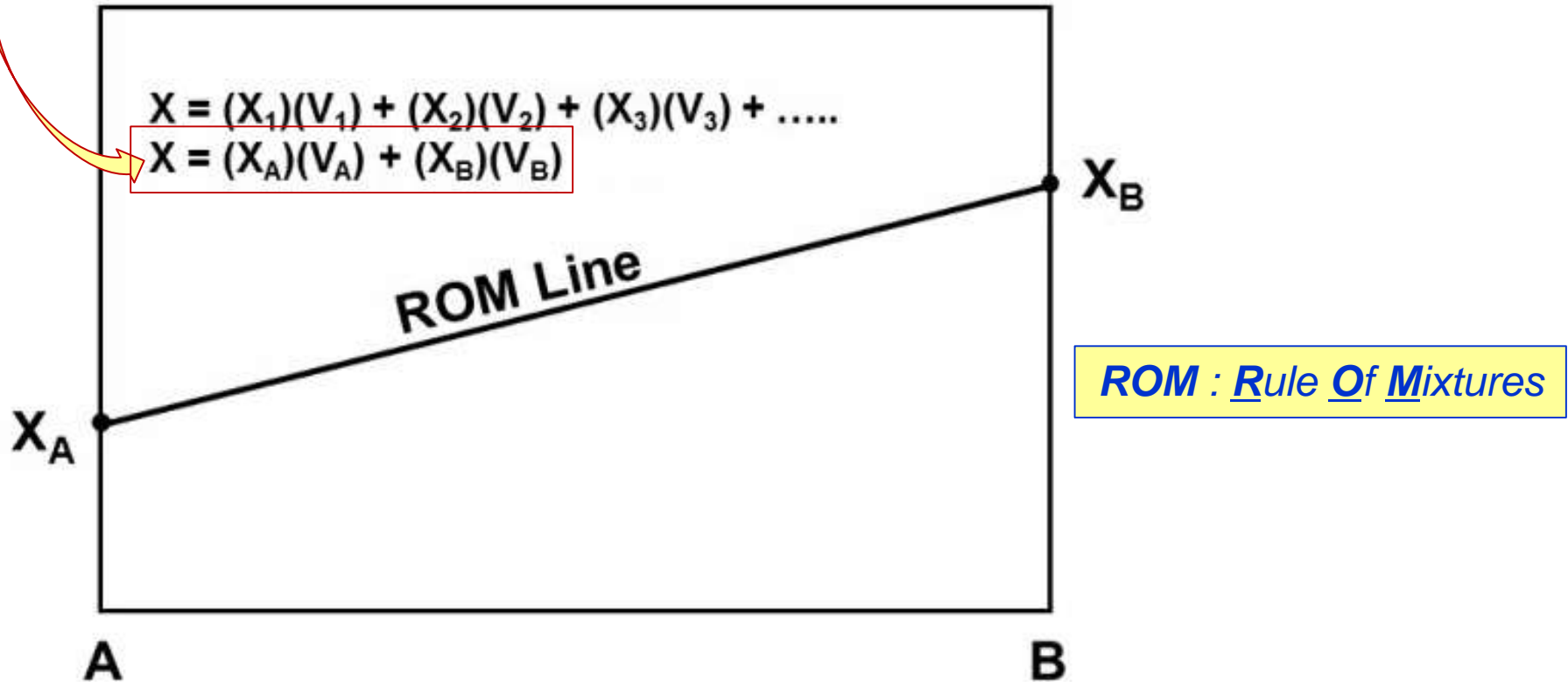
**Partículas Grandes**  
**Regra das misturas (3 componentes)**

$$X = (X_1)(V_1) + (X_2)(V_2) + (X_3)(V_3)$$



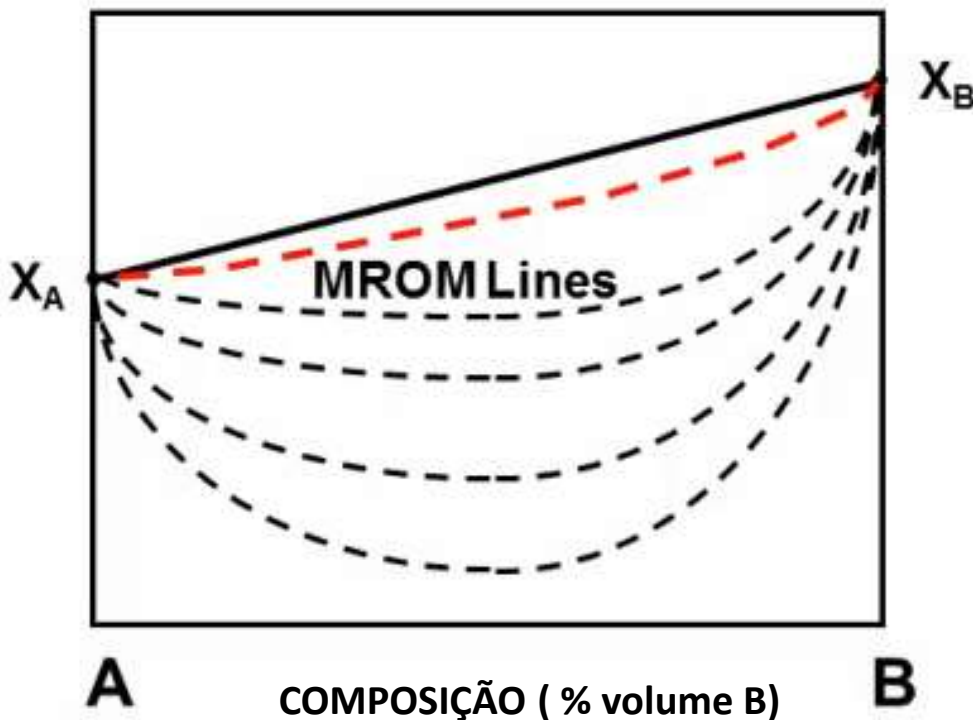
# Regra das misturas (**ROM**) → *o todo é igual a soma das partes*

Sistema binário: A e B com suas propriedades:  $X_A$  e  $X_B$



Regra das misturas modificada (**MRROM**) → o todo é igual a soma das partes incluindo efeitos das interfaces, defeitos, ... (= os desvios da idealidade)

$$X = (X_1)(V_1)(I_1) + (X_2)(V_2)(I_2) + (X_3)(V_3)(I_3) + \dots + (\text{efeito dos defeitos})$$



$X_{A,B, \dots N}$  = Propriedade  
 $V_{1,2, \dots N}$  = Volume  
 $I_{1,2, \dots N}$  = Interfaces

Propriedades ( $X_A, X_B, \dots X_N$ , dependem de:

- Composição das fases;
- Interfaces de ligação;
- Defeitos das interfaces;
- Arranjo das fases, etc.

**MRROM : Modified Rule Of Mixtures**

# Compósitos com Partículas Grandes

## **REGRA DAS MISTURAS PODE SER APLICADA**

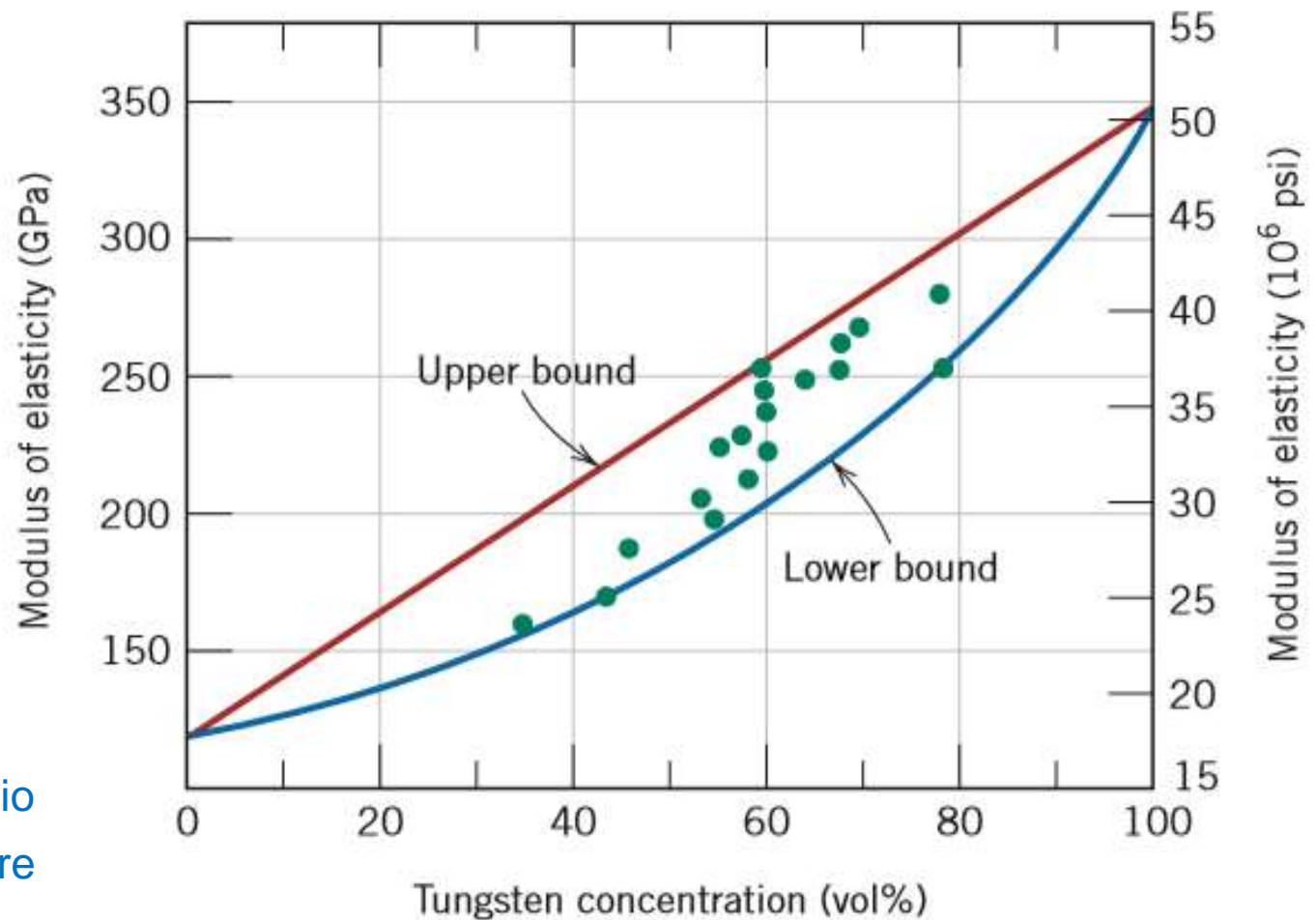
Propriedades → dependem das **frações volumétricas das fases.**

Módulo de Elasticidade (E) varia entre:

$$\textit{limite superior} \rightarrow E_c(u) = E_m V_m + E_p V_p$$

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

*Exemplo*  
 Partículas de tungstênio  
 em uma matriz de cobre



*Existem tanto  
 um limite superior  
 (“upper bound”) quanto um  
 limite inferior (“lower bound”)  
 para o módulo de  
 elasticidade **E***

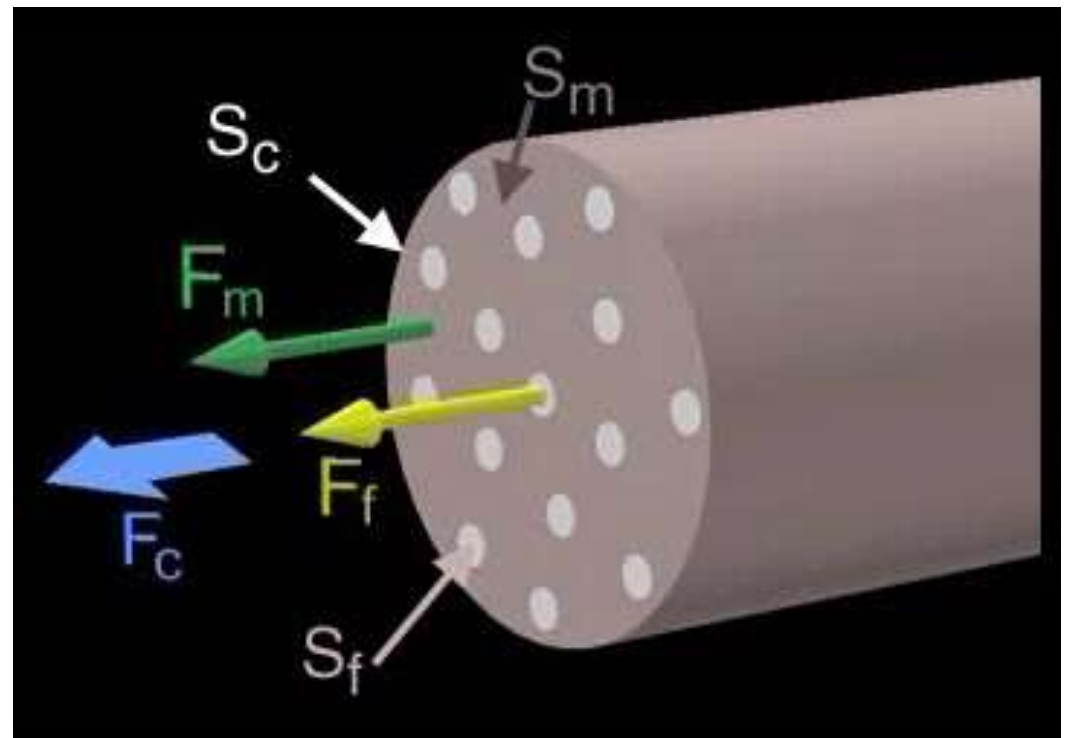
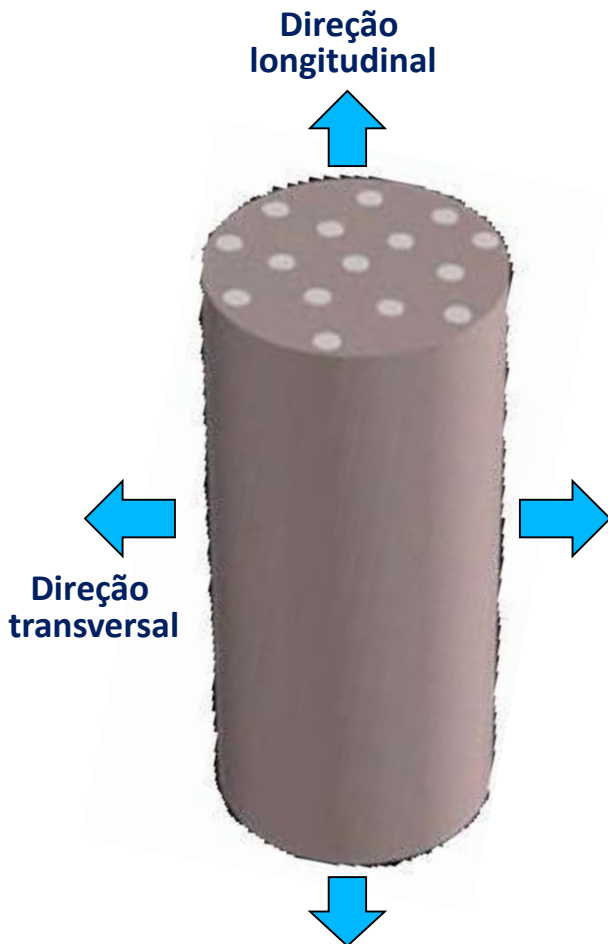
Módulo de Elasticidade (E) varia entre:

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

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

# Fibras Contínuas

- Quando o processo de fabricação garante que as fibras fiquem alinhadas, surge a **anisotropia** das propriedades → propriedades dependem da direção em que a carga é aplicada em relação à direção das fibras.

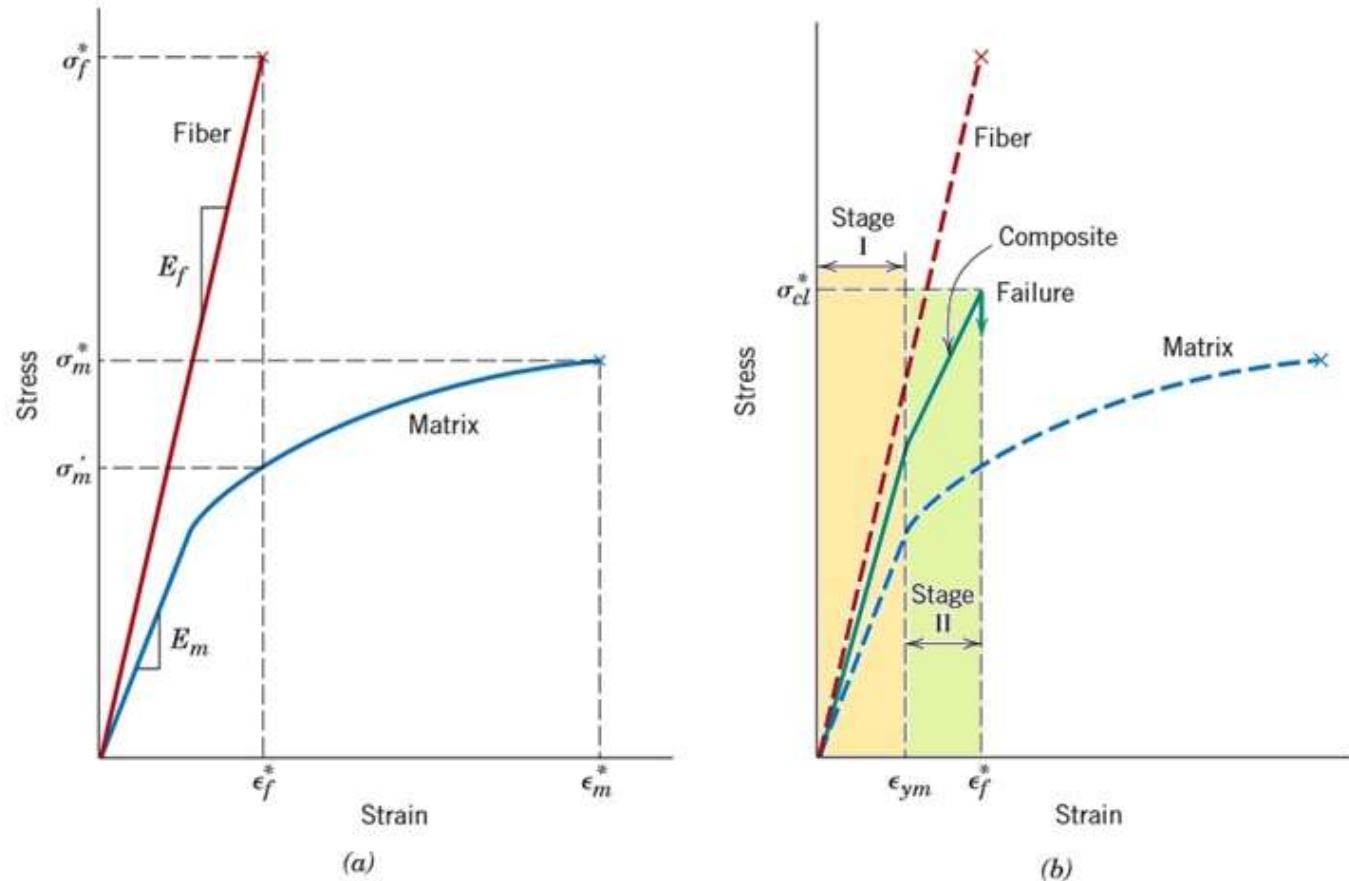
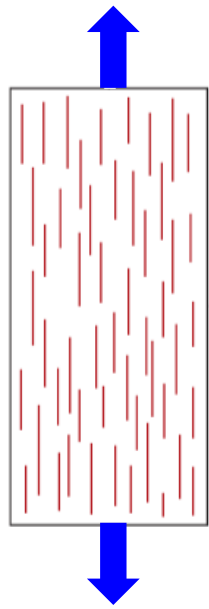


## LEGENDA

$F_c$  – força suportada pelo compósito;  $F_m$  – força suportada pela matriz;  $F_f$  – força suportada pela fibra;  $S_c$  – seção transversal da matriz;  $S_f$  – seção transversal da fibra.



# Carregamento Longitudinal em Compósitos com Fibras Contínuas e Alinhadas

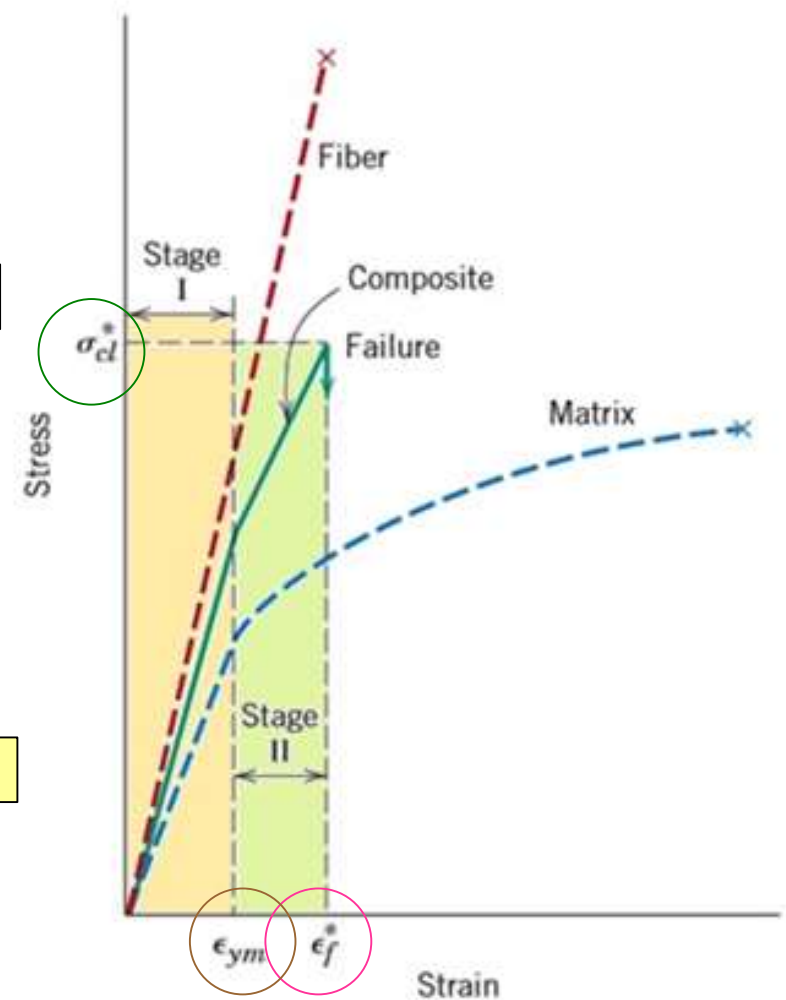
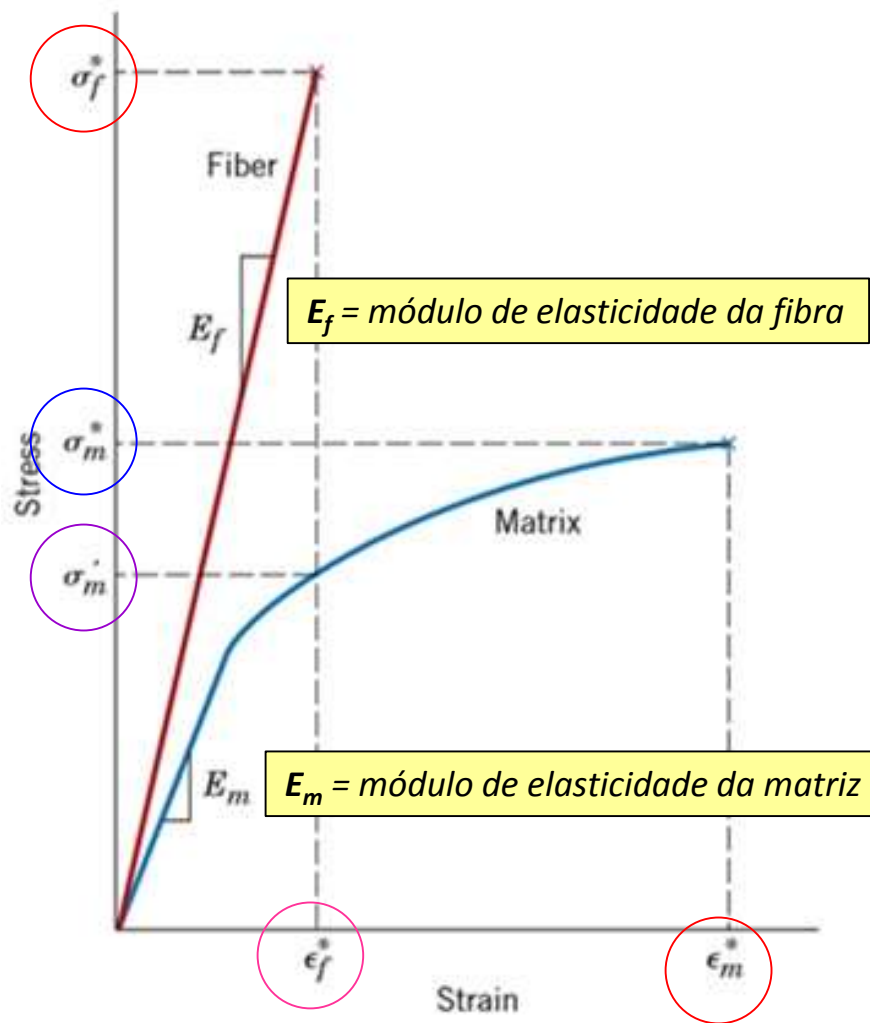


Representação esquemática de curvas Tensão versus Deformação de Engenharia para compósito com matriz dúctil e fibra frágil

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

**Estágio II** → **matriz** entra em regime de **deformação plástica**

Em  $\epsilon_f^*$ , as fibras começam a fraturar, mas o compósito não apresenta falha catastrófica.



- $\sigma_f^*$  → tensão de ruptura da fibra
- $\sigma_m^*$  → tensão de ruptura da matriz
- $\sigma_m'$  → tensão na matriz na deformação de ruptura da fibra ( em  $\epsilon_f^*$  )
- $\sigma_{cl}^*$  → tensão de ruptura do compósito

- $\epsilon_f^*$  → deformação total na ruptura (igual, na fibra e no compósito)
- $\epsilon_m^*$  → deformação total da matriz isolada
- $\epsilon_{ym}$  → deformação no início da deformação plástica ( = limite de escoamento longitudinal) da matriz

# Cálculo do Módulo de Elasticidade E

## Compósitos com fibras contínuas e alinhadas



Para carregamento longitudinal  
(estado de *isodeformação*)

$$\varepsilon_{c,l} = \varepsilon_m = \varepsilon_f$$

$$E_{cl} = E_m V_m + E_f V_f$$

ou

$$E_{cl} = E_m (1 - V_f) + E_f V_f$$

# Comportamento elástico dos compósitos: Carregamento Longitudinal (*estado de isodeformação*)

- Considerando-se um carregamento realizado na direção do alinhamento das fibras contínuas, podemos escrever que:

Lembrando que:  
 $\sigma = F/A$  e  $E = \sigma/\varepsilon$

$$F_{c,l} = F_m + F_f \quad ; \text{ então:}$$

$$\sigma_{c,l} A_{c,l} = \sigma_m A_m + \sigma_f A_f \quad - \text{ dividindo pela área da sessão transversal } A_c \text{ temos:}$$

$\sigma_{c,l} = \sigma_m (A_m/A_c) + \sigma_f (A_f/A_c)$  - onde  $(A_m/A_c)$  e  $(A_f/A_c)$  são respectivamente a fração em área das fases de matriz e de fibras, que podem ser aproximados pelas suas frações volumétricas  $V_m$  e  $V_f$ , onde  $V_m = A_m/A_c$  e  $V_f = A_f/A_c$ . Assim, temos:

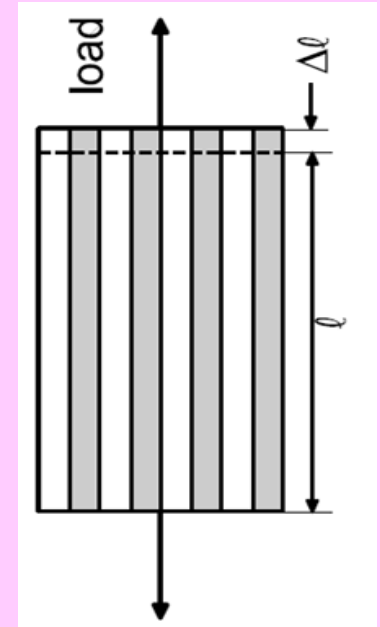
$$\sigma_{c,l} = \sigma_m V_m + \sigma_f V_f$$

Estado de deformação homogênea e equivalente, temos  $\varepsilon_c = \varepsilon_m = \varepsilon_f$ ; dividindo cada termo da equação pela deformação chegamos em:

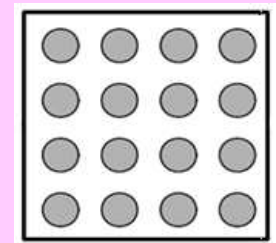
$$E_{c,l} = E_m V_m + E_f V_f \quad - \text{ l: longitudinal;}$$

$$E_{c,l} = E_m(1-V_f) + E_f V_f$$

Módulo de elasticidade para compósitos contendo fibras longas e alinhadas sob carregamento na direção **longitudinal**



$$V_f + V_m = 1$$



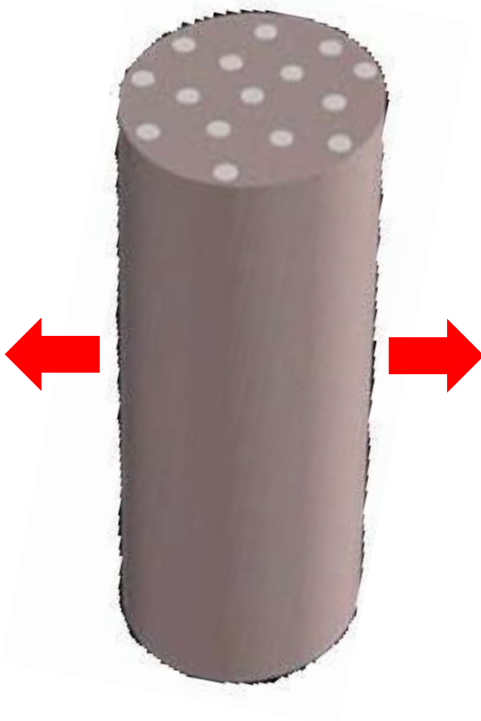
Sessão transversal

# Cálculo do Módulo de Elasticidade E

## Compósitos com Fibras Contínuas e Alinhadas

Para carregamento transversal  
(estado de *isotensão*)

$$\sigma_{c,t} = \sigma_m = \sigma_f$$



The diagram shows a cylindrical composite material with a matrix and fibers. Two red arrows point horizontally towards and away from the cylinder, representing transverse loading. The top surface of the cylinder is dotted, indicating the presence of fibers.

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

# Comportamento elástico dos compósitos: carregamento transversal (*estado de isotensão*)

No carregamento transversal, temos:

$$\sigma_c = \sigma_m = \sigma_f = \sigma \text{ (estado de mesma tensão).}$$

Temos também que:

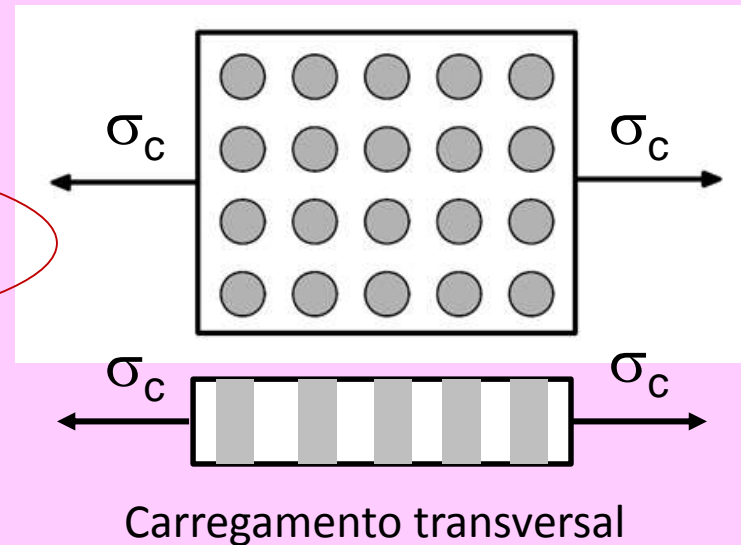
$$\varepsilon_c = \varepsilon_m V_m + \varepsilon_f V_f \text{ então:}$$

$$\sigma/E_c = \sigma V_m/E_m + \sigma V_f/E_f, \text{ dividindo ambos os lados por } \sigma, \text{ temos:}$$

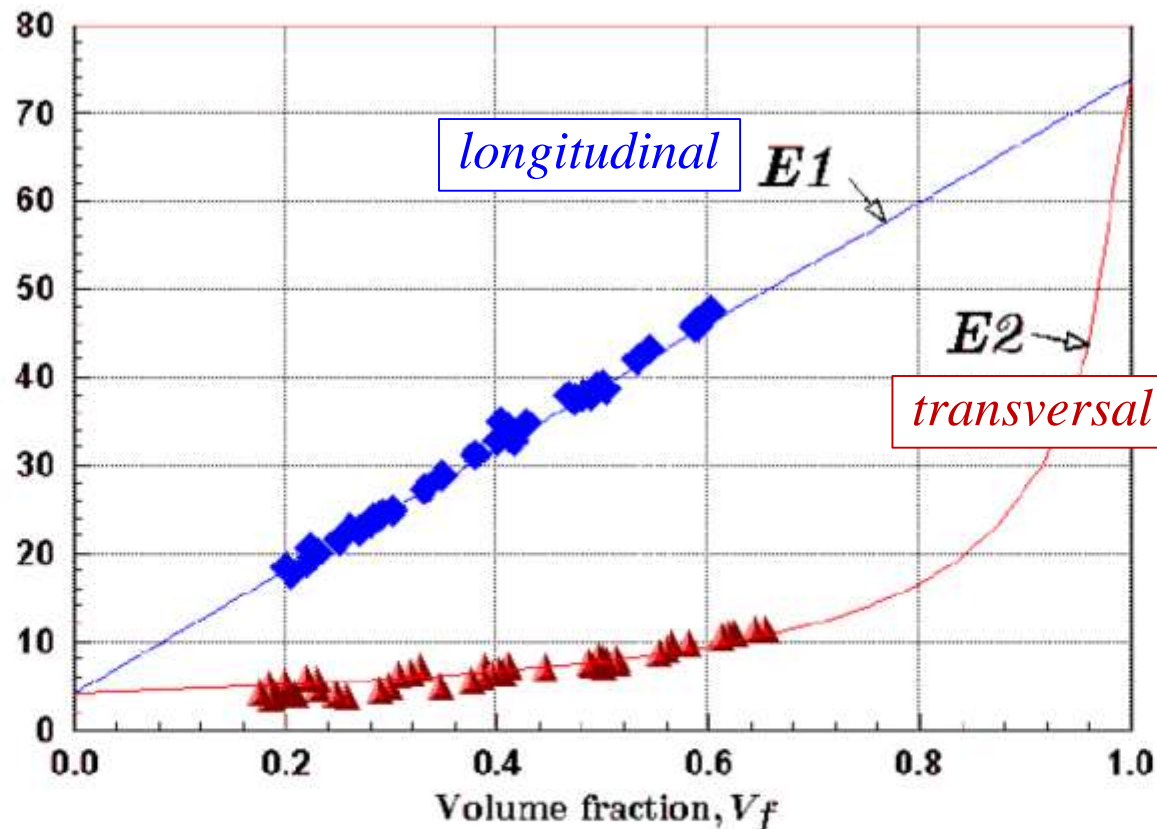
$$1/E_{ct} = (V_m/E_m) + (V_f/E_f)$$

$$E_{c,t} = \frac{E_m \cdot E_f}{V_m \cdot E_f + V_f \cdot E_m} = \frac{E_m \cdot E_f}{(1 - V_f) \cdot E_f + V_f \cdot E_m}$$

Módulo de elasticidade para compósitos contendo fibras longas e alinhadas sob carregamento na direção **transversal**



# Módulo de Elasticidade E em compósitos com fibras contínuas e alinhadas



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).

# Limite de Resistência Compósito com Fibra Alinhada e Contínua

$\sigma_{c,l}^*$  = Limite de resistência do compósito na direção longitudinal (L)  
(a fibra falha antes da matriz, com menor deformação)

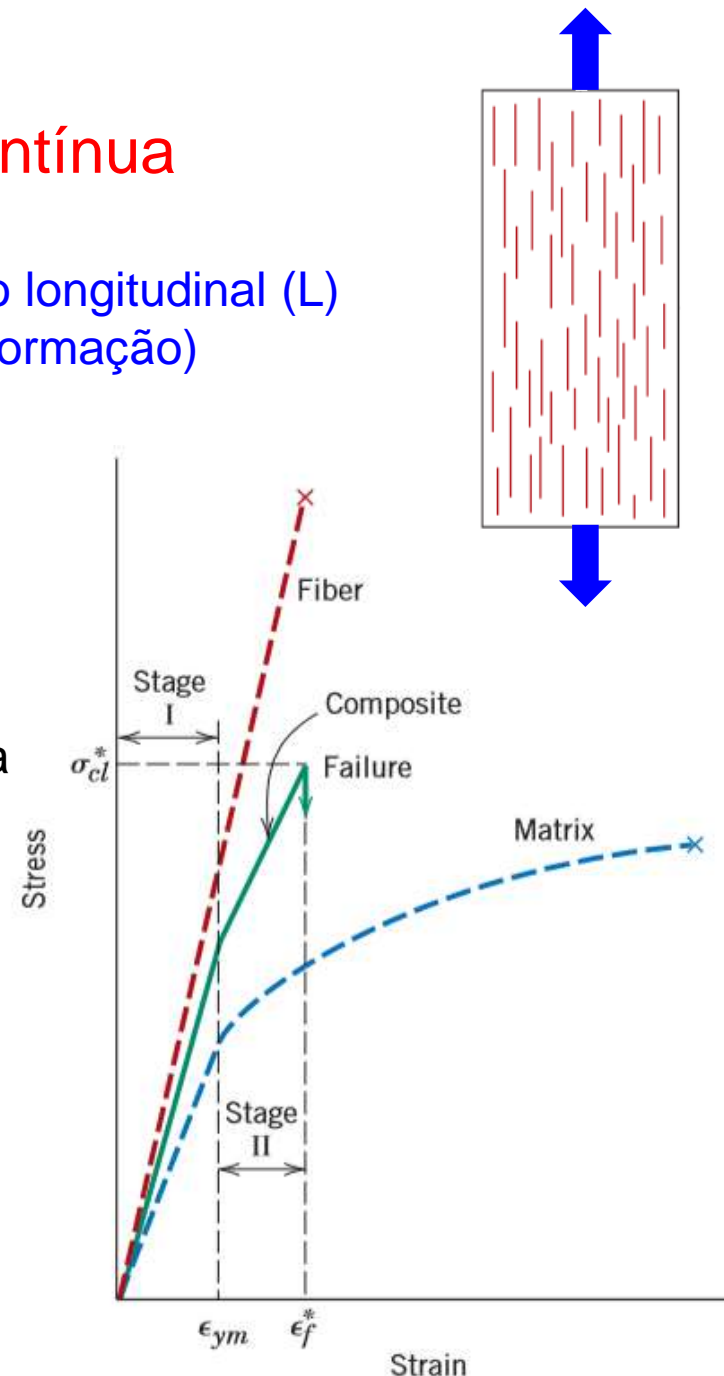
$$\sigma_{c,l}^* = \sigma_f^* \cdot V_f + \sigma'_m (1 - V_f)$$

$\sigma_f^*$  : limite de resistência à tração da fibra

$\sigma'_m$  : tensão na matriz no momento em que a fibra falha

*Concentração de fibra 50%*

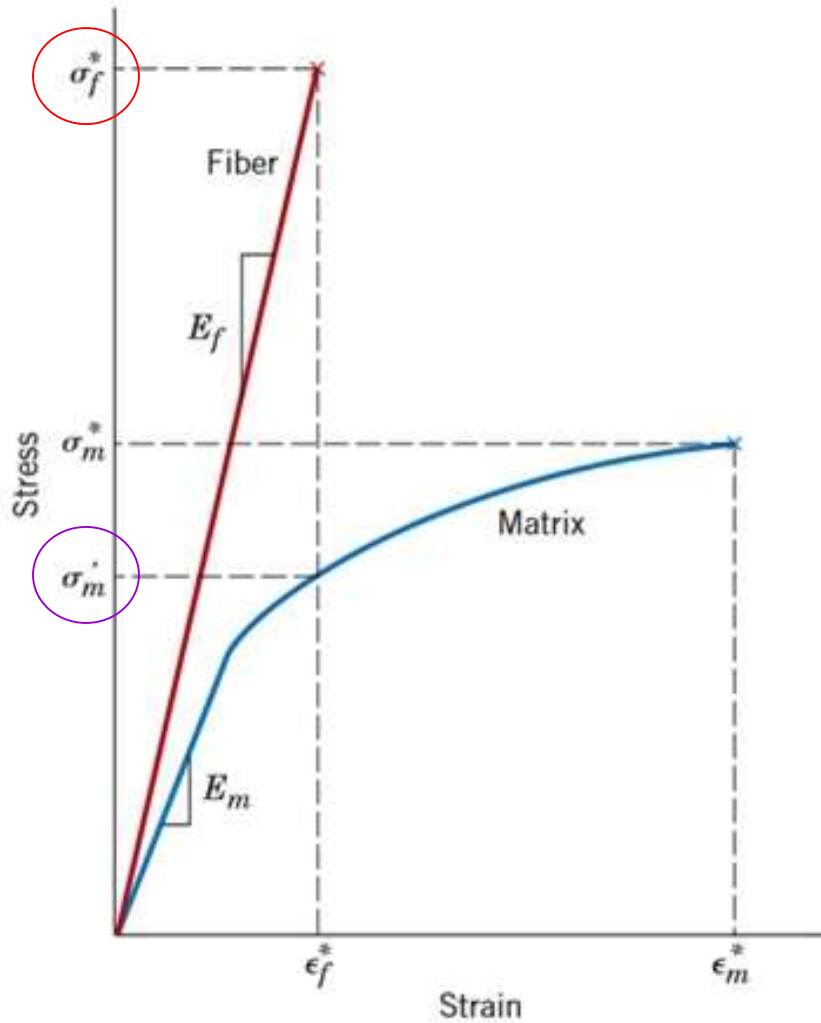
| Compósito         | LR tração L (MPa) | LR tração T (MPa) |
|-------------------|-------------------|-------------------|
| Vidro-poliéster   | 700               | 20                |
| Carbono-epoxi     | 1000              | 35                |
| Poliaramida-epoxi | 1200              | 20        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



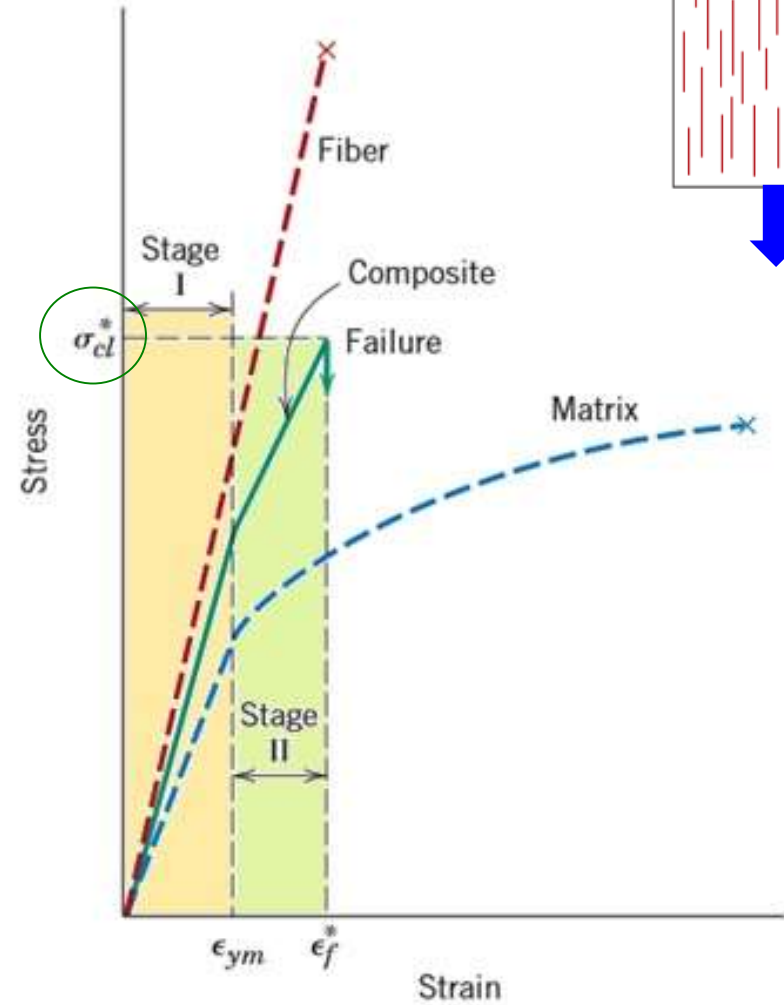


$\sigma_{c,l}^*$  = Limite de resistência do compósito na direção longitudinal (L)  
 (a fibra falha antes da matriz, com menor deformação)

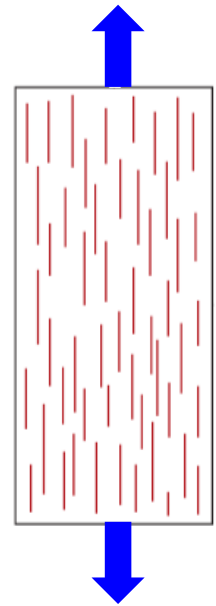
$$\sigma_{c,l}^* = \sigma_f^* \cdot V_f + \sigma_m'(1 - V_f)$$



(a)



(b)



## Longitudinal Tensile Strength

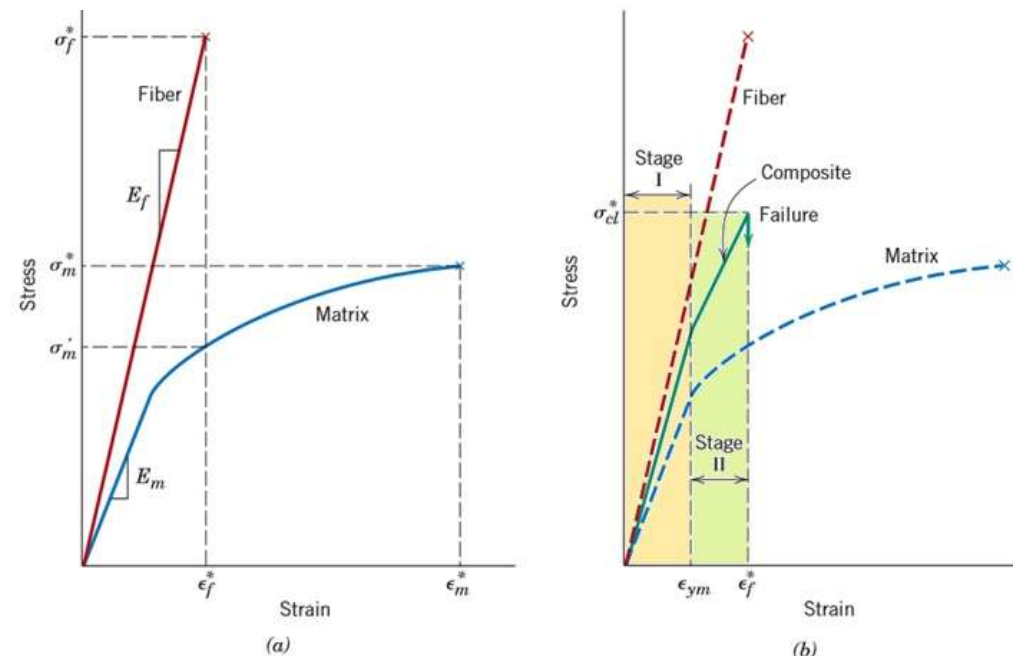
We now consider the strength characteristics of continuous and aligned fiber-reinforced composites that are loaded in the longitudinal direction. Under these circumstances, strength is normally taken as the maximum stress on the stress-strain curve, Figure 16.9*b*; often this point corresponds to fiber fracture, and marks the onset of composite failure. Table 16.1 lists typical longitudinal tensile strength values for three common fibrous composites. Failure of this type of composite material is a relatively complex process, and several different failure modes are possible. The mode that operates for a specific composite will depend on fiber and matrix properties, and the nature and strength of the fiber-matrix interfacial bond.

If we assume that  $\epsilon_f^* < \epsilon_m^*$  (Figure 16.9*a*), which is the usual case, then fibers will fail before the matrix. Once the fibers have fractured, the majority of the load that was borne by the fibers is now transferred to the matrix. This being the case, it is possible to adapt the expression for the stress on this type of composite, Equation 16.7, into the following expression for the longitudinal strength of the composite,  $\sigma_{cl}^*$ :

$$\sigma_{cl}^* = \sigma_m' (1 - V_f) + \sigma_f^* V_f \quad (16.17)$$

Here  $\sigma_m'$  is the stress in the matrix at fiber failure (as illustrated in Figure 16.9*a*) and, as previously,  $\sigma_f^*$  is the fiber tensile strength.

## Carregamento Longitudinal em Compósitos com Fibras Contínuas e Alinhadas



# Compósito com Fibra Alinhada e Descontínua

Limite de resistência do compósito na direção longitudinal (L)  
Com distribuição uniforme de fibras com  $l > l_c$

$$\sigma_{c,l}^* = \sigma_f^* \cdot V_f \cdot \left(1 - \frac{l_c}{2l}\right) + \sigma'_m(1 - V_f)$$

Limite de resistência do compósito na direção longitudinal (L)  
Com distribuição uniforme de fibras com  $l < l_c$

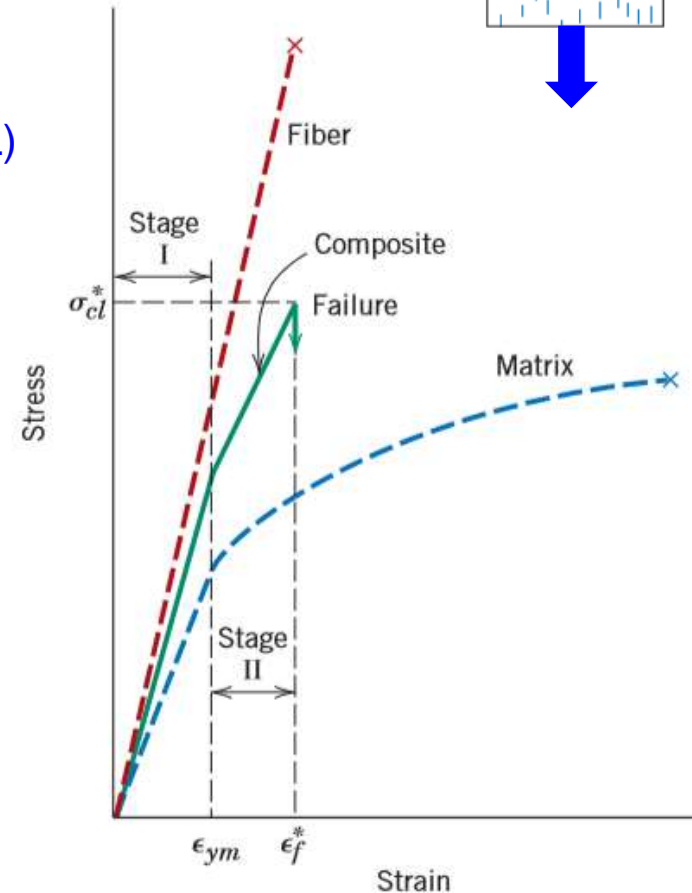
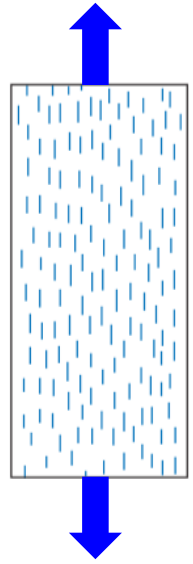
$$\sigma_{c,l}^* = V_f \cdot \left(\frac{l \cdot \tau_c}{d}\right) + \sigma'_m(1 - V_f)$$

$\sigma_f^*$ : limite de resistência à tração da fibra;

$\sigma'_m$ : tensão na matriz no momento em que a fibra falha.

$\tau_c$ : resistência da ligação fibra-matriz (ou tensão limite de escoamento por cisalhamento da matriz – o que for menor)

$d$ : diâmetro da fibra



## Discontinuous and Aligned Fiber Composites

Even though reinforcement efficiency is lower for discontinuous than for continuous fibers, discontinuous and aligned fiber composites (Figure 16.8b) are becoming increasingly more important in the commercial market. Chopped glass fibers are used most extensively; however, carbon and aramid discontinuous fibers are also employed. These short fiber composites can be produced having moduli of elasticity and tensile strengths that approach 90% and 50%, respectively, of their continuous fiber counterparts.

For a discontinuous and aligned fiber composite having a uniform distribution of fibers and in which  $l > l_c$ , the longitudinal strength ( $\sigma_{cd}^*$ ) is given by the relationship

$$\sigma_{cd}^* = \sigma_f^* V_f \left(1 - \frac{l_c}{2l}\right) + \sigma_m'(1 - V_f) \quad (16.18)$$

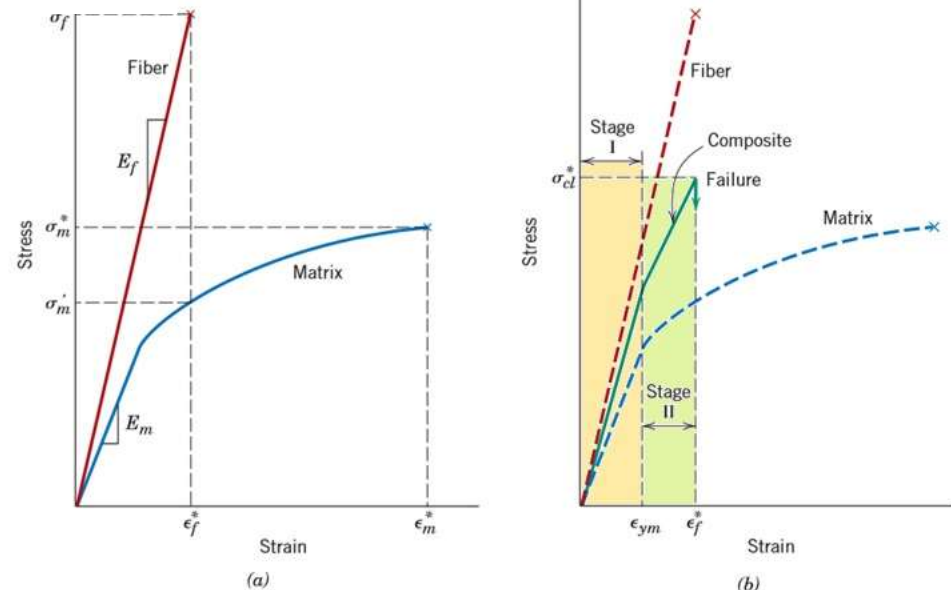
where  $\sigma_f^*$  and  $\sigma_m'$  represent, respectively, the fracture strength of the fiber and the stress in the matrix when the composite fails (Figure 16.9a).

If the fiber length is less than critical ( $l < l_c$ ), then the longitudinal strength ( $\sigma_{cd}^*$ ) is given by

$$\sigma_{cd}^* = \frac{l\tau_c}{d} V_f + \sigma_m'(1 - V_f) \quad (16.19)$$

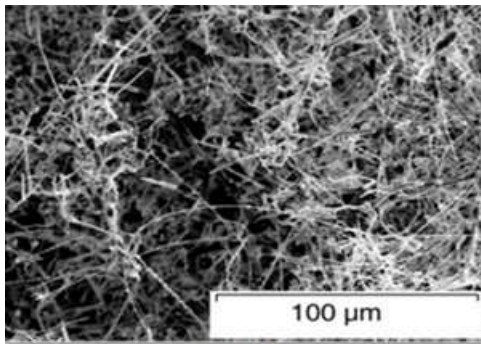
where  $d$  is the fiber diameter and  $\tau_c$  is the smaller of either the fiber–matrix bond strength or the matrix shear yield strength.

## Carregamento Longitudinal em Compósitos com Fibras Alinhadas e Descontínua



# A Fase Fibra

- 3 classes
  - **Whiskers** Monocristais, alta razão comprimento / diâmetro, altíssima resistência, caros
  - **Fibras** Policristais ou amorfos, diâmetro pequeno  
Diâmetro de dezenas de microns
  - **Arames**



Whiskers Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



**Characteristics of Several Fiber-Reinforcement Materials**

| <i>Material</i>       | <i>Specific Gravity</i> | <i>Tensile Strength</i><br>[GPa (10 <sup>6</sup> psi)] | <i>Specific Strength</i><br>(GPa) | <i>Modulus of Elasticity</i><br>[GPa (10 <sup>6</sup> psi)] | <i>Specific Modulus</i><br>(GPa) |
|-----------------------|-------------------------|--|-----------------------------------|---|----------------------------------|
| <b>Whiskers</b>       |                         |  |                                   |   |                                  |
| Graphite              | 2.2                     | 20<br>(3)  | 9.1                               | 700<br>(100)  | 318                              |
| Silicon nitride       | 3.2                     | 5–7<br>(0.75–1.0)                                      | 1.56–2.2                          | 350–380<br>(50–55)  | 109–118                          |
| Aluminum oxide        | 4.0                     | 10–20<br>(1–3)   | 2.5–5.0                           | 700–1500<br>(100–220)                                       | 175–375                          |
| Silicon carbide       | 3.2                     | 20<br>(3)  | 6.25                              | 480<br>(70)   | 150                              |
| <b>Fibers</b>         |                         |  |                                   |   |                                  |
| Aluminum oxide        | 3.95                    | 1.38<br>(0.2)  | 0.35                              | 379<br>(55)   | 96                               |
| Aramid (Kevlar 49™)   | 1.44                    | 3.6–4.1<br>(0.525–0.600)                               | 2.5–2.85                          | 131<br>(19)   | 91                               |
| Carbon <sup>a</sup>   | 1.78–2.15               | 1.5–4.8<br>(0.22–0.70)                                 | 0.70–2.70                         | 228–724<br>(32–100)   | 106–407                          |
| E-glass               | 2.58                    | 3.45<br>(0.5)  | 1.34                              | 72.5<br>(10.5)  | 28.1                             |
| Boron                 | 2.57                    | 3.6<br>(0.52)  | 1.40                              | 400<br>(60)   | 156                              |
| Silicon carbide       | 3.0                     | 3.9<br>(0.57)  | 1.30                              | 400<br>(60)   | 133                              |
| UHMWPE (Spectra 900™) | 0.97                    | 2.6<br>(0.38)  | 2.68                              | 117<br>(17)   | 121                              |
| <b>Metallic Wires</b> |                         |  |                                   |   |                                  |
| High-strength steel   | 7.9                     | 2.39<br>(0.35)   | 0.30                              | 210<br>(30)   | 26.6                             |
| Molybdenum            | 10.2                    | 2.2<br>(0.32)  | 0.22                              | 324<br>(47)   | 31.8                             |
| Tungsten              | 19.3                    | 2.89<br>(0.42)   | 0.15                              | 407<br>(59)   | 21.1                             |

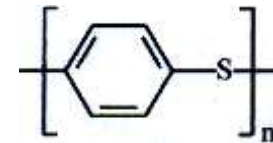
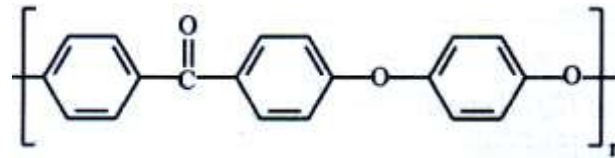
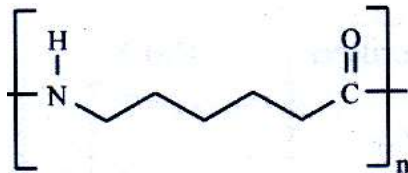
<sup>a</sup> The term “carbon” instead of “graphite” is used to denote these fibers, since they are composed of crystalline graphite regions, and also of noncrystalline material and areas of crystal misalignment.

A Fase  
Fibra

# Compósitos com Matriz Polimérica

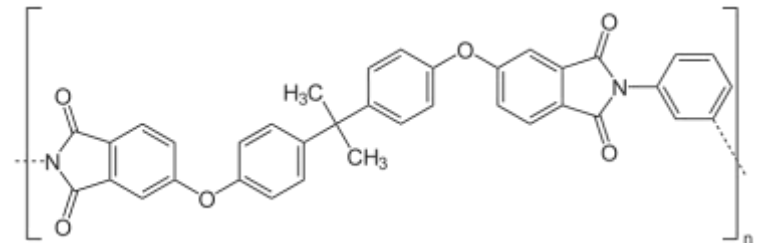
- Matrizes:

- 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)



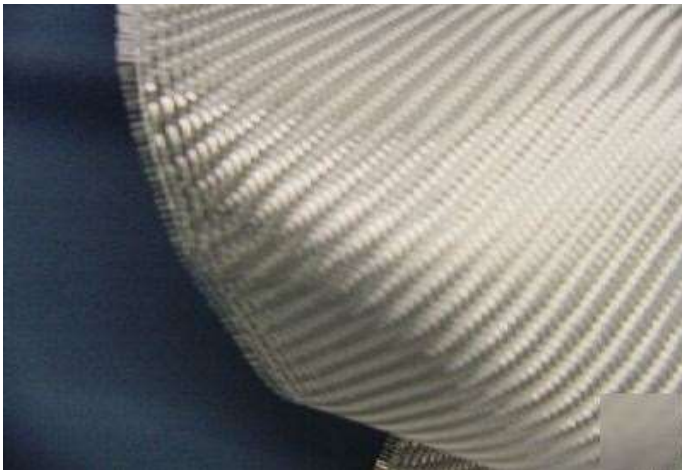
# Compósitos de Matriz Polimérica e Fibra de Vidro

- Vantagens
  - Alto  $\sigma_f^*$  (3500 MPa), barato, inerte
- Usos
  - Carrocerias automotivas e carenagens marítimas
  - Recipientes de armazenamento
- Limitações
  - Baixa rigidez (70 GPa)



# Fibra de Vidro

- Composição da fibra: 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 uma capa protetora
- Algumas capas devem ser removidas antes da fabricação do compósito
- Podem ser usadas na forma de fios e tecidos



# Compósitos de Matriz Polimérica e 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

# Fibra de Carbono

- Fibras de diâmetro 4 a 10 $\mu$ m
- Fibra contém também regiões de grafita e regiões não-cristalinas
- Produzidas a partir de precursores: rayon, poliacrilonitrila e piche
- Processo afeta o módulo de elasticidade E: existem materiais com várias classes de módulos E  $\rightarrow$  padrão, intermediário, alto e ultra alto

# Indústria Automobilística: Lamborghini (“Sesto Elemento”)

O Sesto Elemento pesa apenas 999 kgf



Novo processo de produção: onde um composto pastoso de fibra de carbono e epoxi que é injetado a alta pressão em moldes especiais, com liberdade de forma. Este novo material foi chamado de *ForgedComposite* (compósito forjado, em alusão aos processos de forjamento de alta pressão em moldes fechados).

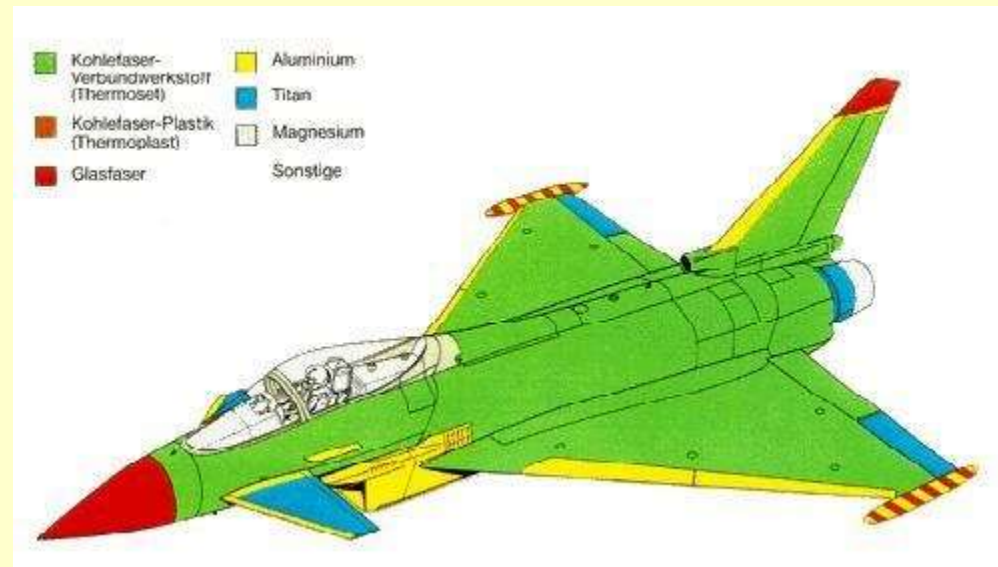
# Indústria aeroespacial & defesa: Caça Typhoon (Europa)



O caça europeu Typhoon (Eurofighter) possui estrutura leve e em sua construção são empregados mais de **82% de compósitos** reforçados com fibra de carbono e **12% de fibra de vidro**. A vida estimada da aeronave é de 6.000 horas de voo.

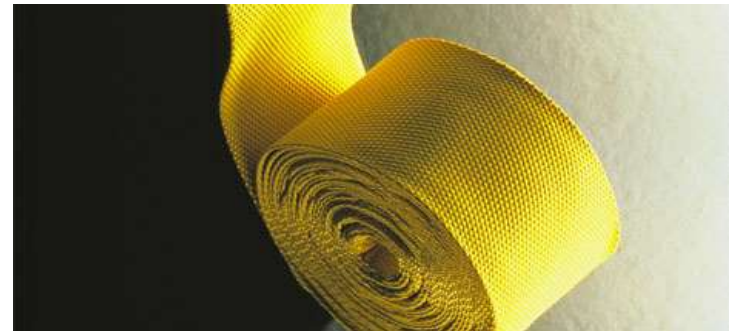


Assento ejetável:  
partes estruturais  
em fibra de carbono.

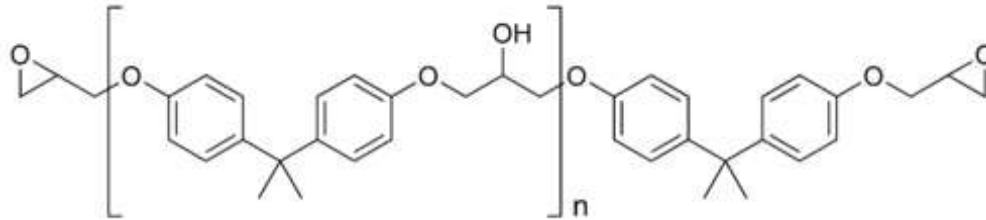


# Compósitos de Fibras de Poliamida ("kevlar")

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

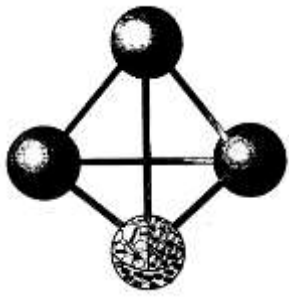


# Comparações entre Compósitos de Matriz Epóxi com Fibra Contínua ou Alinhada



| <i>Property</i>                          | <i>Glass<br/>(E-glass)</i> | <i>Carbon<br/>(High Strength)</i> | <i>Aramid<br/>(Kevlar 49)</i> |
|--|----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| Specific gravity                         | 2.1                        | 1.6                               | 1.4                           |
| Tensile modulus                          |                            |                                   |                               |
| Longitudinal [GPa (10 <sup>6</sup> psi)] | 45 (6.5)                   | 145 (21)                          | 76 (11)                       |
| Transverse [GPa (10 <sup>6</sup> psi)]   | 12 (1.8)                   | 10 (1.5)                          | 5.5 (0.8)                     |
| Tensile strength                         |                            |                                   |                               |
| Longitudinal [MPa (ksi)]                 | 1020 (150)                 | 1240 (180)                        | 1380 (200)                    |
| Transverse [MPa (ksi)]                   | 40 (5.8)                   | 41 (6)                            | 30 (4.3)                      |
| Ultimate tensile strain                  |                            |                                   |                               |
| Longitudinal                             | 2.3                        | 0.9                               | 1.8                           |
| Transverse                               | 0.4                        | 0.4                               | 0.5                           |

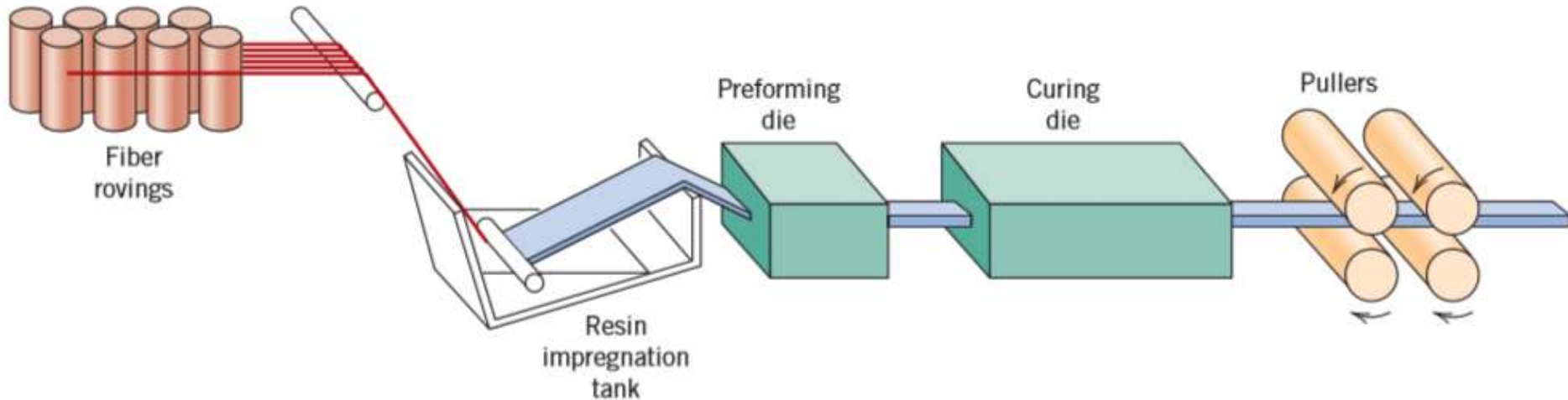
**Source:** Adapted from R. F. Floral and S. T. Peters, “Composite Structures and Technologies,” tutorial notes, 1989.



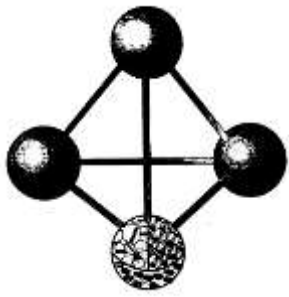
# Processamento de compósitos reforçados com fibras

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

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

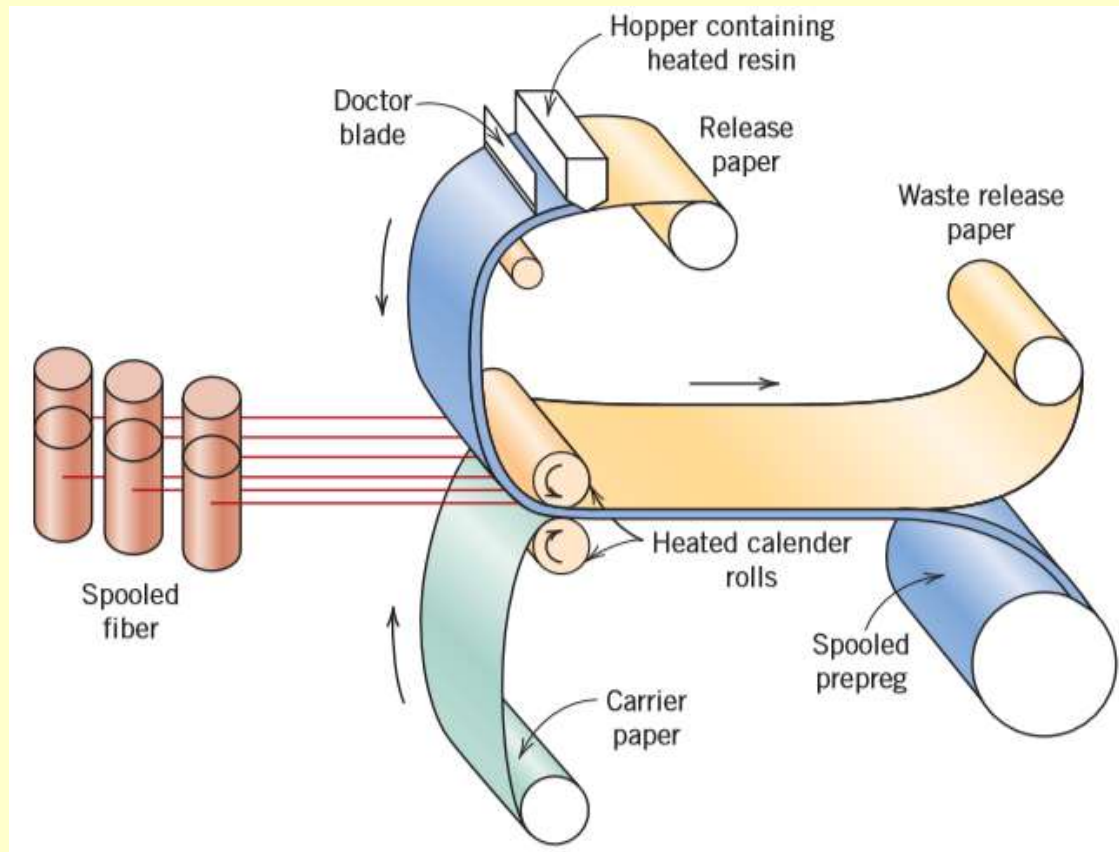






# Processo “Prepreg”

Fibras contínuas pré-impregnadas com resina parcialmente curada.



Fitas finas: 0,08 -0,25mm  
Com 35 a 45% em volume  
de resina

# “Prepreg”





*...uma perspectiva no futuro...*



**nature  
materials**

**REVIEW ARTICLE**

PUBLISHED ONLINE: 26 OCTOBER 2014 | DOI: 10.1038/NMAT4089

# Bioinspired structural materials

Ulrike G. K. Wegst<sup>1\*</sup>, Hao Bai<sup>2</sup>, Eduardo Saiz<sup>3</sup>, Antoni P. Tomsia<sup>2</sup> and Robert O. Ritchie<sup>2,4\*</sup>

Natural structural materials are built at ambient temperature from a fairly limited selection of components. They usually comprise hard and soft phases arranged in complex hierarchical architectures, with characteristic dimensions spanning from the nanoscale to the macroscale. The resulting materials are lightweight and often display unique combinations of strength and toughness, but have proven difficult to mimic synthetically. Here, we review the common design motifs of a range of natural structural materials, and discuss the difficulties associated with the design and fabrication of synthetic structures that mimic the structural and mechanical characteristics of their natural counterparts.

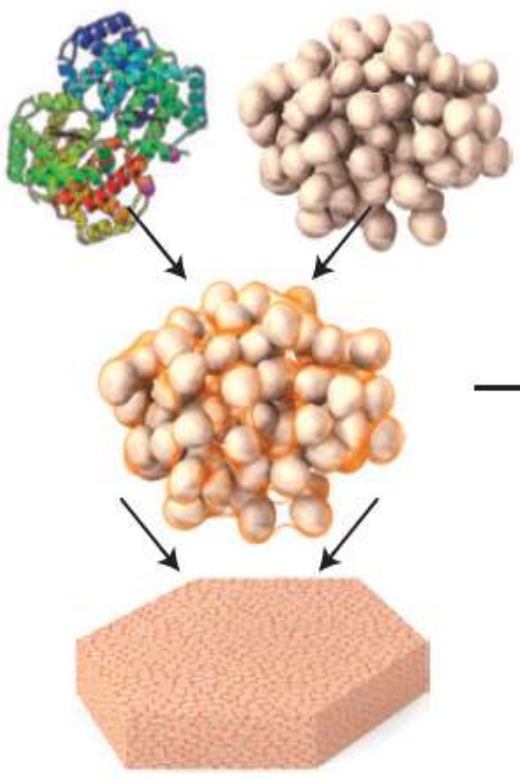


| The hierarchical structure of nacre.



Proteins + chitin

~30 nm grains



Breaking of mineral bridges



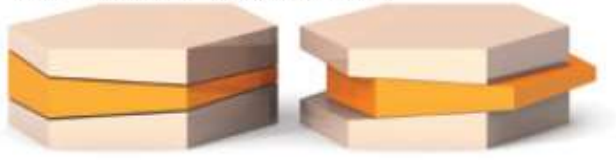
Inelastic shearing resisted by nano-asperities

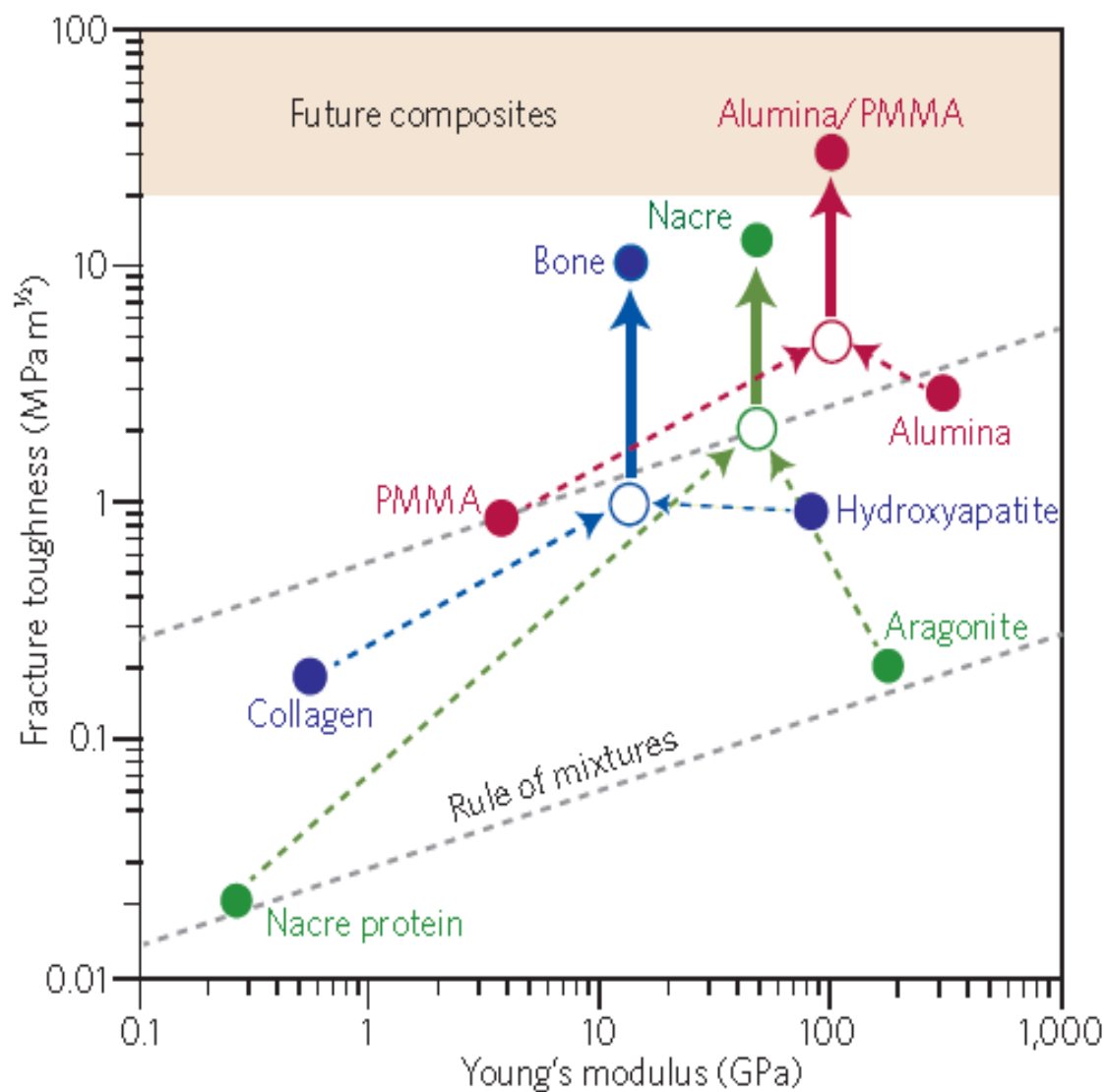


Organic layer acting as viscoelastic glue



Tablet interlocking during sliding





projections for natural and synthetic materials.

## *...finalizando* : **Materiais Compósitos**

- Ao final do estudo dos conteúdos desta Unidade você deve ser capaz de:
  - listar alguns materiais compósitos naturais.
  - descrever brevemente a estrutura de compósitos de engenharia.
  - listar e dar exemplos dos tipos de compósitos de engenharia que existem, classificados em termos da natureza química tanto da matriz, quanto da fase dispersa.
  - apresentar uma classificação de materiais compósitos, em termos das características dos tipos de reforço.
  - definir o que são : materiais compósitos laminados; nanocompósitos.
  - definir o que são compósitos reforçados por fibras e discutir brevemente a influência de algumas variáveis (tamanho das fibras; orientação as fibras em relação às cargas aplicadas; interação fibra-matriz) nas propriedades mecânicas de compósitos de matriz polimérica.
  - descrever o comportamento mecânico de compósitos de matriz polimérica com fibras contínuas e alinhadas quando submetidos tanto a carregamento longitudinal, quanto a carregamento transversal, e relacionar esses comportamentos com a regra das misturas.
  - discutir brevemente as características e aplicações das seguintes fibras empregadas em compósitos de engenharia: fibra de vidro, fibra de carbono e kevlar.

## Referências

- **Callister, W.D.** Materials Science and Engineering: An Introduction. 7<sup>th</sup> Ed. Wiley. 2008. Cap.16 .
- **Shackelford, J.F.** Ciência dos Materiais. 6<sup>a</sup> Ed. Pearson. 2008. Cap. 14 .