

**USP**



ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

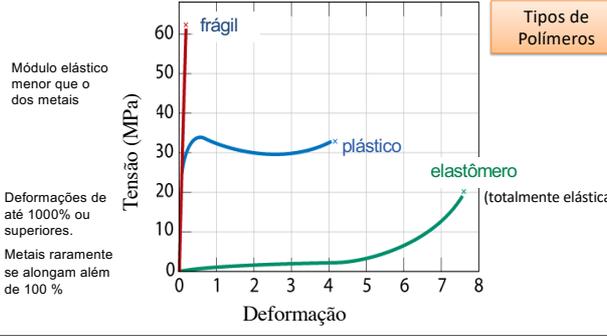
**DISCIPLINA:**  
ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS II (SMM 0194)

PROFA. COLAB. DRA. JULIANA MARA PINTO DE ALMEIDA  
[julianamara@ifsc.usp.br](mailto:julianamara@ifsc.usp.br) SALA 35646  
CV: <http://lattes.cnpq.br/7830925338249360>

1

Last Class

COMPORTAMENTO TENSÃO X DEFORMAÇÃO



Tipos de Polímeros

2

Last Class

MECANISMO DE DEFORMAÇÃO

Termoplástico

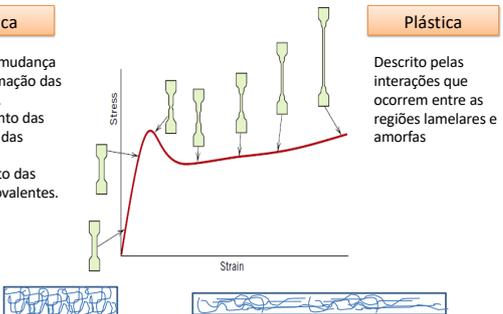
polímero hipotético semicristalino

**Elástica**

Envolve a mudança da conformação das moléculas. Alongamento das cadeias e estiramento das ligações covalentes.

**Plástica**

Descrito pelas interações que ocorrem entre as regiões lamelares e amorfas



3

Last Class

Fatores que afetam as

PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS POLÍMEROS

↑ Temperatura

Taxa de deformação ↓

↑ Massa molecular

↑ Grau de cristalinidade

Natureza química do ambiente (umidade, solventes, etc.)

↓ Módulo de elasticidade

↓ Limite de resistência a tração

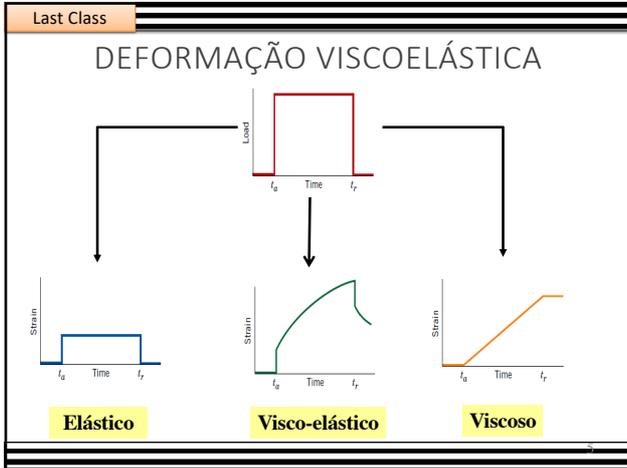
↑ Ductilidade

↑  $LRT = LRT_{\infty} - A/M_n$

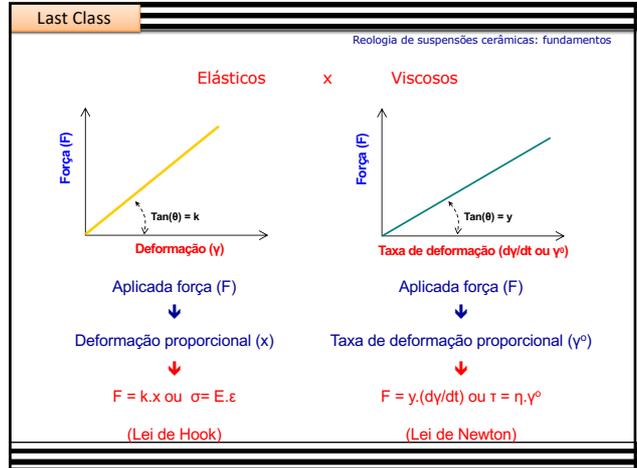


↑ Módulo de tração / Fragilidade

4



5



6

Baseado nas aulas dos Profs. Dr. Rafael Salomão Antonio Carvalho

AULA 6 – COMPÓSITOS

7

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

**Exemplos**

Macro Nano

Fonte: Biodegradable Polymeric Nanocomposite, 2015

8

**MADEIRA:**

*fibras de celulose : resistentes e flexíveis*  
+  
*hemicelulose : pouco resistente e hidrolisável*  
+  
*envolvidas por lignina, mais rígida*

**Exemplos**

The diagram shows a cross-section of a tree trunk on the left, which is magnified into a 3D model of wood fibers on the right. The fibers are represented as blue bundles. Labels indicate 'Lignin' (green), 'Hemicelulose' (yellow), and 'Cellulose' (blue). A red circle highlights the fiber bundle structure.

9

**COMPÓSITOS** **Definição**

Introdução: definição generalista

• União de fases / com propriedades distintas / com o objetivo de maximizar uma ou mais propriedades específicas / separadas por uma interface / mais ou menos bem definida.

- União de fases: Fase = diferenças na organização atômica ou molecular
  - Au + Ag = 1 fase (ampla faixa de solubilidade mútua) Não é!
  - Fibras de PP misturadas com PP fundido = 2 fases (mesmo material mas com diferenças de estrutura e orientação molecular) É!
- Propriedades distintas: não faz muito sentido unir coisas iguais . . .
- Maximizar propriedades específicas: ↓ custo ↑ rigidez, por exemplo
- Interface: região de transição (de composição, estrutura ou propriedade)
- Mais ou menos bem definida: plano (bem definida) ou volume (interfase)

10

**COMPÓSITOS** **Componentes**

Introdução: componentes dos materiais compósitos

**Matrix (Fase contínua):** em maior porcentagem volumétrica, cujas propriedades se deseja modifica

**Fase dispersa:** em menor quantidade volumétrica, modificadora das propriedades da matriz

**Volume de ação da fase dispersa:** fração volumétrica de fase dispersa aparente

**Região interfacial:** transição entre matriz e fase dispersa

The diagram shows a 3D cube representing a composite material. A blue cylinder is inserted vertically through the center of the cube. Red arrows point from text labels to the corresponding parts of the diagram: the matrix (the surrounding space), the dispersed phase (the cylinder), and the interface (the surface between the cylinder and the matrix).

11

**COMPÓSITOS** **Componentes**

Introdução: componentes dos materiais compósitos

**MATRIZ**

**(Fase contínua)**  
 Polímero → PMC (Polymer-Matrix Composite)  
 Cerâmica → CMC (Ceramic-Matrix Composite)  
 Metal → MMC (Metal-Matrix Composite)

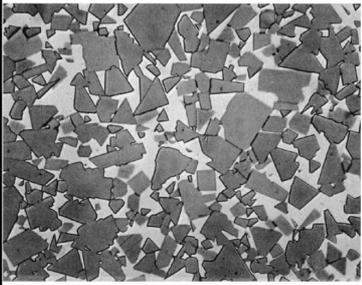
**REFORÇO**

**(Fase dispersa)**  
 Muitas possibilidades: polímero, cerâmica, metal, minerais, materiais orgânicos naturais...

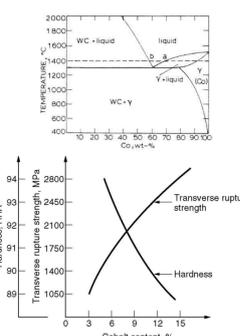
12

### MMC – CERMET

**Cerâmica + metal**



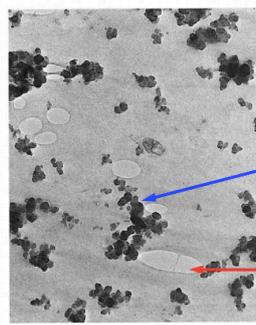
WC: dureza e resistência ao desgaste  
Co: tenacidade.



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

13

### PMC - PNEU



**Matriz:** elastômero  
**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 50nm, mas se apresentam comumente de forma aglomerada.

Fase elipsoidal: pequenas bolhas de ar na borracha

14

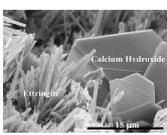
### CMC - CONCRETO (Brita + Areia + Cimento + Água)

**Concreto x Cimento**



Brita ou agregados (basalto ou sílica) + areia grossa e fina (sílica)

REFORÇO



Cimento Portland (silicato de cálcio)

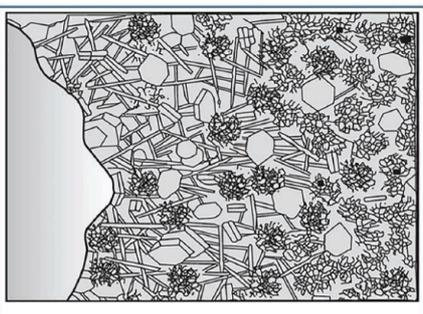
MATRIZ

**C clínquer**  
 $C_3S$  → silicato tricálcico  $(CaO)_3SiO_2$   
 $C_2S$  → silicato dicálcico  $(CaO)_2SiO_2$   
 $C_3A$  → aluminato tricálcico  $(CaO)_3Al_2O_3$   
 $C_4AF$  → ferroaluminato tetracálcico  $(CaO)_4Al_2O_3Fe_2O_3$

**Fases Hidratadas (algumas...)**  
**CSH** → silicatos de cálcio hidratados  
**CH** → Portlandita (hidróxido de cálcio  $Ca(OH)_2$ )  
**Etringita**, de fórmula geral  $C_6A_3S_3H_{32}$  → sulfoaluminato de cálcio,  $(CaO)_6(Al_2O_3)(SO_3)_3 \cdot 32H_2O$

15

### CMC - CONCRETO (Brita + Areia + Cimento + Água)



Representação esquemática do cimento

Aggregate ← Interfacial transition zone → Bulk cement paste

C-S-H    CH    C-A-S-H (Etringite)

16

Flexão em 3 pontos / three point bending:

Materiais cerâmicos não lidam bem com tensões de tração (abertura de trincas e defeitos)

σ Compressão >> σ Flexão

17

### CMC – CONCRETO ARMADO

Brita + areia + cimento + água = fase majoritária e contínua = matriz

- Propriedade fundamental:
  - ↑ resistência à compressão ( $\sigma \rightarrow \square \leftarrow \sigma$ )
- Propriedades deficientes:
  - ↓ resistência à tração ( $\sigma \leftarrow \square \rightarrow \sigma$ )
  - ↓ resistência à flexão ( $\curvearrowright \sigma \curvearrowleft$ )
  - ↓ resistência ao cisalhamento ( $\tau \downarrow \diamond \uparrow \tau$ )

Vergalhões de aço = fase minoritária e dispersa = reforço

- Propriedade fundamental:
  - ↑ resistência à tração ( $\sigma \leftarrow \square \rightarrow \sigma$ )
  - ↑ flexibilidade ( $\cup \cap$ )
- Propriedades deficientes:
  - ↓ resistência à compressão ( $\sigma \rightarrow \square \leftarrow \sigma$ ) (devido à sua geometria)

18

### MATRIZES

Utilizadas em compósitos

Praticamente qualquer material pode ser utilizado como matriz em compósitos, desde que:

- ▶ Permita obter propriedades desejadas
- ▶ Interações adequadas com a fase dispersa

19

### FASE DISPERSA

Características gerais

Modifica as propriedades da matriz em que está embebida, tornando-a:

- ↑ rígida, ↑ resistente, ↑ resistência ao impacto,
- ↑ condutividade termo-elétrica, ↓ \$, por exemplo

- Em geral, está em menor fração volumétrica (quando passa a estar em maior quantidade ocorre a *inversão de fase*)
- Também em geral, é um material mais nobre, com melhores propriedades (mas nem sempre)

Enfoque principal: melhora das propriedades mecânicas das matrizes

20



Fase dispersa

## PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

**Energia de superfície ( $\gamma_{Surf}$ )**

$\theta_1 \sim 0^\circ$   
Matriz ( $\gamma_{Surf}$ )  
 $\theta = \text{ângulo de contato}$

$\theta_2 > 0^\circ$   
Matriz ( $\gamma_{Surf}$ )

$\theta_3 > 90^\circ$   
Matriz ( $\gamma_{Surf}$ )

**$\theta \sim 0$ :**

- ↑ molhabilidade (requisitos para adesão)
- $\gamma_{Sup1} \sim \gamma_{Sup2}$
- ▶ Água em poliamida ou celulose

**$90^\circ > \theta > 0$ :**

- Molhabilidade moderada (afetada por parâmetros como temperatura)
- $\gamma_{Sup1} \neq \gamma_{Sup2}$
- ▶  $\text{CaCO}_3$  em PP

**$90^\circ > \theta$ :**

- ↓ molhabilidade (difícilmente haverá adesão ou ancoramento)
- $\gamma_{Sup1} \neq \gamma_{Sup2}$
- ▶ Fibra vegetal em PP

25

Fase dispersa

## PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

**Densidade ( $\rho$ ) real e densidade aparente [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ]**  
(ou volume específico e volume aparente [ $\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ ])

$\rho_{\text{Aparente}} = \frac{(M_{\text{Sólido}} + M_{\text{Vazios}})}{(V_{\text{Sólido}} + V_{\text{Vazios}})} = \frac{M_{\text{Sólido}}}{(V_{\text{Sólido}} + V_{\text{Vazios}})}$

$\rho_{\text{Real}} = \frac{(M_{\text{Total}} - M_{\text{Vazios}})}{(V_{\text{Total}} - V_{\text{Vazios}})} = \frac{M_{\text{Total}}}{(V_{\text{Sólido}})} \geq \rho_{\text{Aparente}}$

▶ Na prática: pode ser impossível eliminar os vazios, ∴  $\rho_{\text{Aparente}}$  é + importante

26

Fase dispersa

## PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

**Área superficial específica: área da superfície de uma determinada porção de material ( $\text{g}$  ou  $\text{cm}^3$ )**

$AS_{\text{Geométrica}} = \frac{\text{Área de superfície calculada}}{(\text{Massa ou volume da amostra})}$

$AS_{\text{Real}} = \frac{\text{Área de toda a superfície}}{(\text{Massa ou volume da amostra})} = \frac{AS_{\text{geométrica}} + AS_{\text{Defeitos}}}{(\text{Massa ou volume da amostra})} \geq AS_{\text{Geométrica}}$

▶ As reentrâncias também são superfícies e devem ser consideradas

27

Fase dispersa

## PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

**Distribuição / dispersão**

Espaçar ao máximo o centro geométrico das partículas (aglomeradas ou não) no volume do material

Evitar a aglomeração de partículas primárias (agregados)

**Má distribuição, má dispersão:** Aglomerado (partículas fracamente unidas)

**Boa distribuição, má dispersão:** Região com ↓ concentração de sólidos

**Má distribuição, boa dispersão:**

**Boa distribuição, boa dispersão:**

- Partículas primárias individualizadas (agregados)
- Máxima área de contato
- Composição homogênea por todo o volume do material

28

Fase dispersa

## PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

**razão de aspecto (L/D) = Maior dimensão / menor dimensão**

Particulado  
(L/D ~ 1-10)

- ↓ assimetria
- ↓ área superficial específica (área de superfície / volume ou massa)
  - CaCO<sub>3</sub>,
  - esferas de vidro

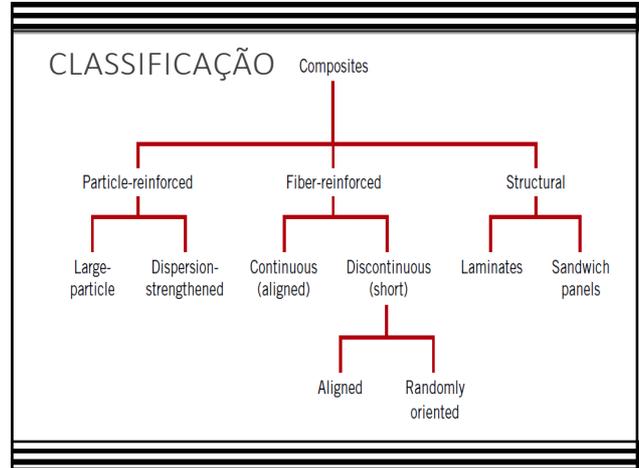
Lamelar  
(Pelo menos uma L/D ≥ 100)

- ↑ assimetria
- ↑ área superficial específica
  - Talco, argilas, grafeno

Fibroso  
(L/D ≥ 100)

- ↑↑ assimetria
- ↑↑ área superficial específica
- ▶ Fibras em geral, nanotubos

29



30

## REFORÇOS FIBROSOS

- **Fibra** é uma geometria. Qualquer material pode assumi-la, mas nem todos terão propriedades úteis (Ex.: muro, corrimão de escada, metrô)
- **Maior área de contato possível com a matriz** (esfera é o contrário)
- Os materiais são mais resistentes, rígidos e flexíveis (ao mesmo tempo) na forma de fibra que na forma *bulk* (sólido volumoso)
  - ▶ Maior orientação molecular no sentido do comprimento da fibra (solicitação das ligações primárias): ↑ E e ↑  $\sigma_{ruptura}$
  - ▶ Menor probabilidade de ocorrência de defeitos (menos volume, menos defeitos): ↑  $\sigma_{ruptura}$
  - ▶ *Distribuição de esforços menor e mais homogênea*

L/D > 100

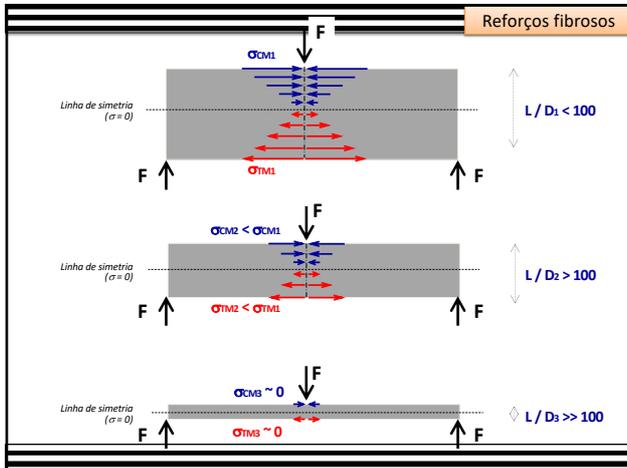
31

Reforços fibrosos

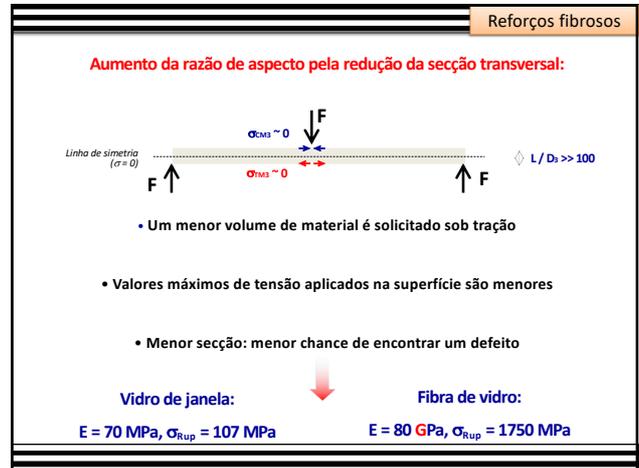
### Viga de concreto armado sob flexão: onde colocar os vergalhões de aço?

**Na região de maior solicitação por tração:  
próximo à superfície**

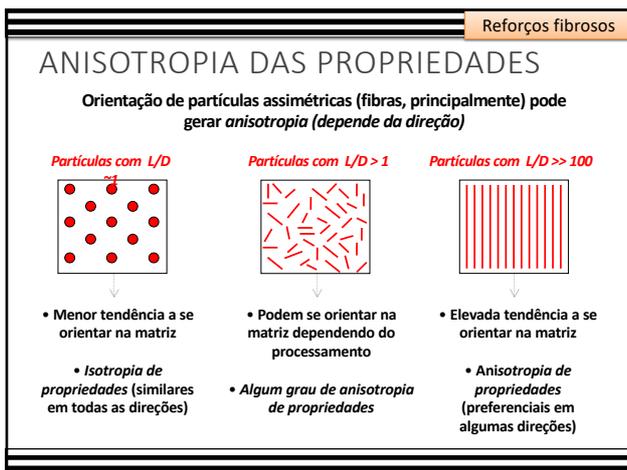
32



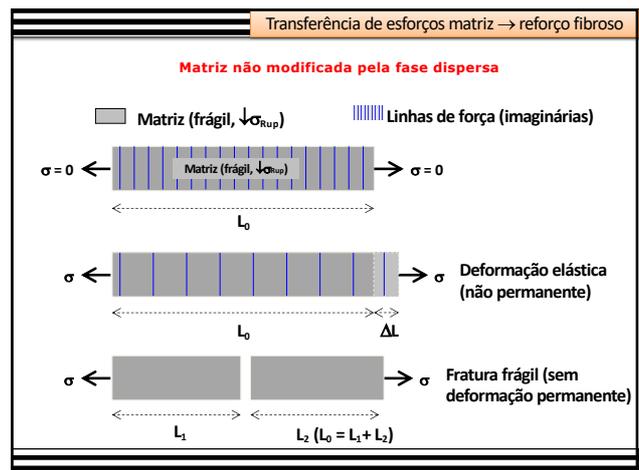
33



34



35



36

Transferência de esforços matriz → reforço fibroso

**Para modificar comportamento mecânico das matrizes por meio da ação de um reforço: *transferir esforços***

↓

**A tensão aplicada deve ser suportada principalmente pelo reforço fibroso adicionado**



Matriz (frágil, ↓ $\sigma_{rup}$ )



Reforço fibroso (↑ $E$  ↑ $\sigma_{rup}$ )

37

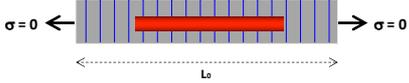
Transferência de esforços matriz → reforço fibroso

**Adição de reforço fibroso**

 Matriz (frágil, ↓ $\sigma_{rup}$ )

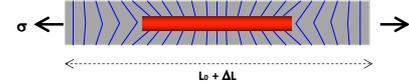
 Reforço fibroso (↑ $E$  ↑ $\sigma_{rup}$ )

 Linhas de força



$\sigma = 0$  ← →  $\sigma = 0$

←-----  
L<sub>0</sub>  
-----→



←  $\sigma$  →  $\sigma$

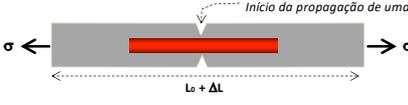
←-----  
L<sub>0</sub> +  $\Delta L$   
-----→

- Supondo uma adesão perfeita:
  - Presença do reforço fibroso (mais rígido que a matriz) impede que todos os pontos de deformem da mesma forma
  - Região ao redor da fibra é mais ancorada
  - Fratura?

38

Transferência de esforços matriz → reforço fibroso

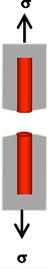
**Adição de reforço fibroso: tipos de fratura em matriz frágil**



←  $\sigma$  →  $\sigma$

←-----  
L<sub>0</sub> +  $\Delta L$   
-----→

↑ Início da propagação de uma trinca na matriz



↑  $\sigma$

↓  $\sigma$

**Se a adesão fibra/matriz for perfeita:**

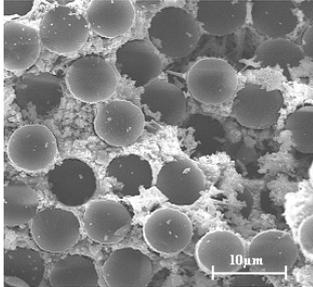
- $\sigma_{interface} > \sigma_{fibra}$  e portanto, fibra rompe mas não é arrancada
- Todo esforço aplicado na matriz é dirigido à fibra
- Elevada eficiência de reforço
- Compósito terá ↑↑↑ E e ↑↑↑  $\sigma_{rup}$

39

Transferência de esforços matriz → reforço fibroso

**Adição de reforço fibroso: tipos de fratura em matriz frágil**

**Adesão fibra/matriz for 100% eficiente**



10  $\mu m$

40

Transferência de esforços matriz → reforço fibroso

**Adição de reforço fibroso: tipos de fratura em matriz frágil**

Início da propagação de uma trinca na matriz

**Se a adesão fibra/matriz for 100% falha:**

- $\sigma_{interface} \ll \sigma_{fibra}$  e portanto, fibra é arrancada inteira
- Pull-out ou arranchamento
- Não há transferência de esforço da matriz para à fibra
- Fibra se comporta como um vazio ( $E = 0$ )
- Compósito terá  $\downarrow E$  e  $\downarrow \sigma_{rup}$  (inferiores aos da matriz)

41

Transferência de esforços matriz → reforço fibroso

**Adição de reforço fibroso: tipos de fratura em matriz frágil**

**Se a adesão fibra/matriz for 100% falha: pull-out ou arranchamento**

42

Necessidade de assimetria para transferir esforços

**Melhores ganhos de propriedade se a fase dispersa estiver aderida à matriz (interface eficiente)**

*Importância da assimetria da fase dispersa: maior área de contato, mais chance de haver ancoramento da fase dispersa na matriz*

Trinca propagando na matriz frágil

Interface matriz/reforço

Reforço de  $\uparrow E$  e  $\uparrow \sigma_{rup}$  ( $L/D = 1$ )

Matriz frágil

**Para haver transferência de esforços:**  
 $\sigma_{interface} \geq \sigma_{ruptura}$  do reforço

Como  $\sigma_{interface}$  é proporcional à força de adesão e área total de contato matriz / reforço:

**Para  $\uparrow \sigma_{interface}$ :  $\uparrow$  atração reforço / matriz e/ou  $\uparrow$  elevada área de contato**

43

Necessidade de assimetria para transferir esforços

**Melhores ganhos de propriedade se a fase dispersa estiver aderida à matriz (interface eficiente)**

*Importância da assimetria da fase dispersa: maior área de contato, mais chance de haver ancoramento da fase dispersa na matriz*

$L/D \sim 1$   $\leftarrow$   $\rightarrow$   $L/D > 100$

*Sabendo que nem sempre boa adesão matriz / reforço pode ser obtida:*

**Maximizando a área de contato (ou seja  $\uparrow L/D$ )**

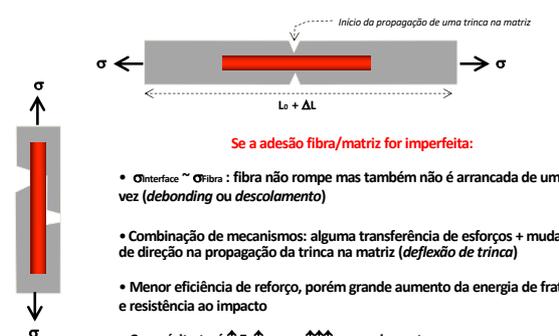
**Aumenta-se a  $\sigma_{interface}$  gerando maiores chances de haver transferência de esforços**

44

Transferência de esforços matriz → reforço fibroso

**Adição de reforço fibroso: tipos de fratura em matriz frágil**

**Se a adesão fibra/matriz for imperfeita:**



Início da propagação de uma trinca na matriz

$L_0 + \Delta L$

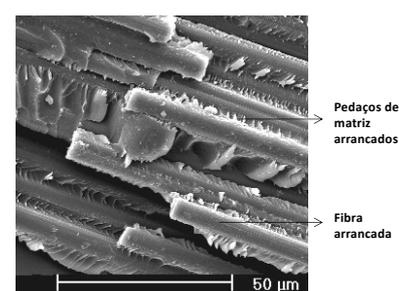
- $\sigma_{interface} \sim \sigma_{fibra}$ : fibra não rompe mas também não é arrancada de uma só vez (*debonding* ou *descolamento*)
- Combinação de mecanismos: alguma transferência de esforços + mudança de direção na propagação da trinca (*deflexão de trinca*)
- Menor eficiência de reforço, porém grande aumento da energia de fratura e resistência ao impacto
- Compósito terá  $\uparrow E$ ,  $\uparrow \sigma_{rup}$  e  $\uparrow\uparrow$  res. ao impacto

45

Transferência de esforços matriz → reforço fibroso

**Adição de reforço fibroso: tipos de fratura em matriz frágil**

**Se a adesão fibra/matriz for imperfeita: *debonding***



Pedacos de matriz arrancados

Fibra arrancada

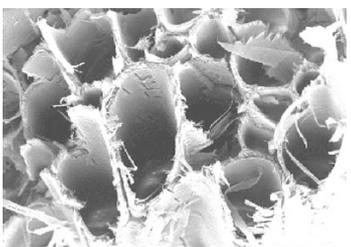
50  $\mu m$

46

Transferência de esforços matriz → reforço fibroso

**Adição de reforço fibroso: tipos de fratura em matriz frágil**

**Se a adesão fibra/matriz for imperfeita: *debonding***



Elevadíssima resistência ao impacto / densidade:  
**MADEIRA**

47

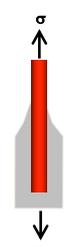
Transferência de esforços matriz → reforço fibroso

**Adição de reforço fibroso: tipos de fratura em matriz dúctil**

- Matriz de elevada ductilidade (grande deformação plástica antes de romper). Ex.: polietileno de alta densidade
- Pouco rígida, mas tem elevada resistência ao impacto

**Se a interface fibra-matriz for**

- **Ineficiente:** arrancamento da fibra,  $\downarrow E$ ,  $\downarrow \sigma_{rup}$  e  $\downarrow$  resistência ao impacto (pela introdução de vazios)
- **Eficiente:** a matriz se deformará *antes* de a interface ser solicitada (como no exemplo ao lado): pequeno ganho em  $E$ ,  $\sigma_{rup}$  e resistência ao impacto.



48

**COMPÓSITOS** Componentes

**MATRIZ**  
**(Fase contínua)**  
 Polímero → PMC (Polymer-Matrix Composite)  
 Cerâmica → CMC (Ceramic-Matrix Composite)  
 Metal → MMC (Metal-Matrix Composite)

**REFORÇO**  
**(Fase dispersa)**  
 Muitas possibilidades: polímero, cerâmica, metal, minerais, materiais orgânicos naturais...

**PROPRIEDADES**  
 Dependem:  
 Propriedades das fases;  
 Quantidades relativas;  
 Geometria (reforço)

49

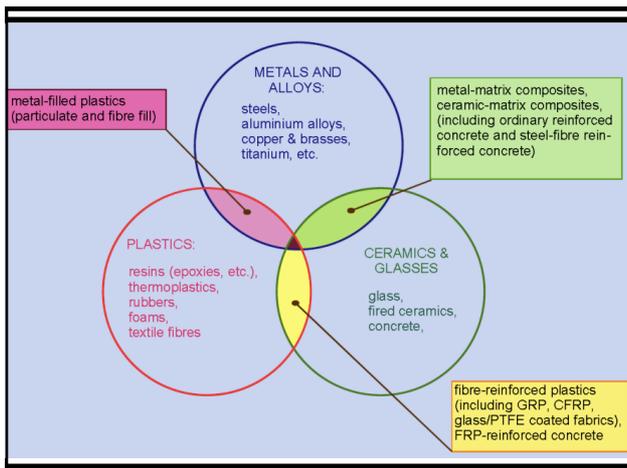
Fase dispersa

**COMPÓSITOS**

The diagram shows five 3D block models illustrating different dispersion characteristics of the dispersed phase within a matrix:

- (a) **Concentração**: Shows a higher density of dispersed particles.
- (b) **Tamanho**: Shows particles of different sizes.
- (c) **Forma**: Shows particles with different shapes (spherical vs. elongated).
- (d) **Distribuição**: Shows the spatial arrangement of particles.
- (e) **Orientação**: Shows particles aligned in a specific direction.

50



51



52