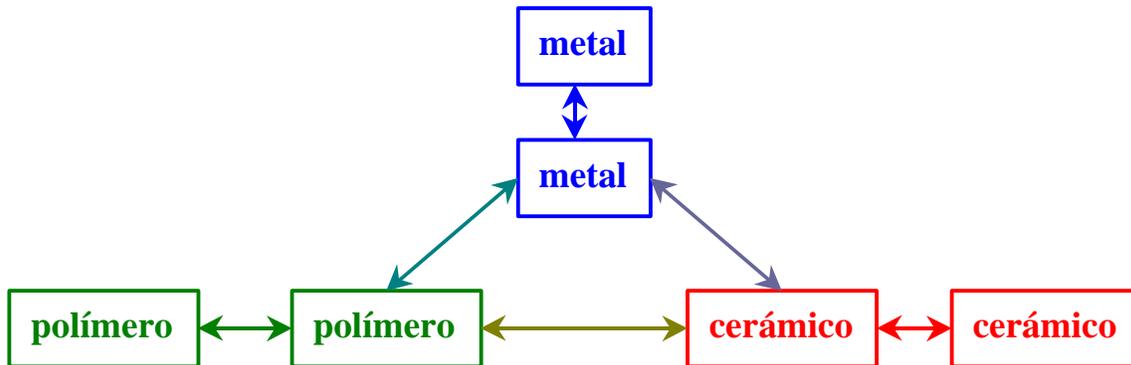


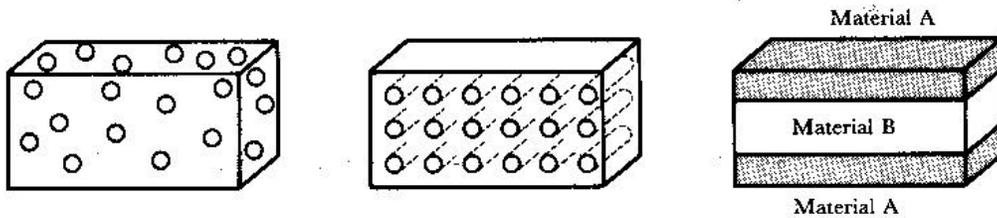
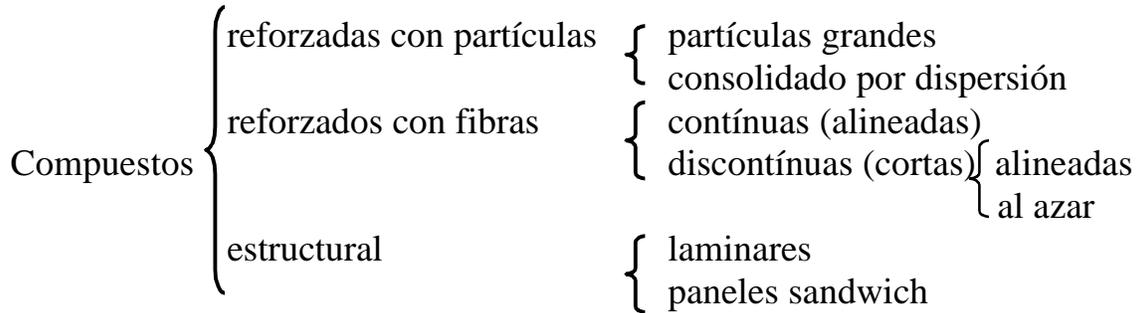
## 9. MATERIALES COMPUESTOS

- Material multifase, donde las fases son químicamente distintas y separadas por una superficie.
- Combinación de dos o más materiales para dar una combinación de propiedades, que no se pueden obtener con los constituyentes individuales. Se espera alta resistencia y baja densidad (relación resistencia-peso).
- Posibles combinaciones:



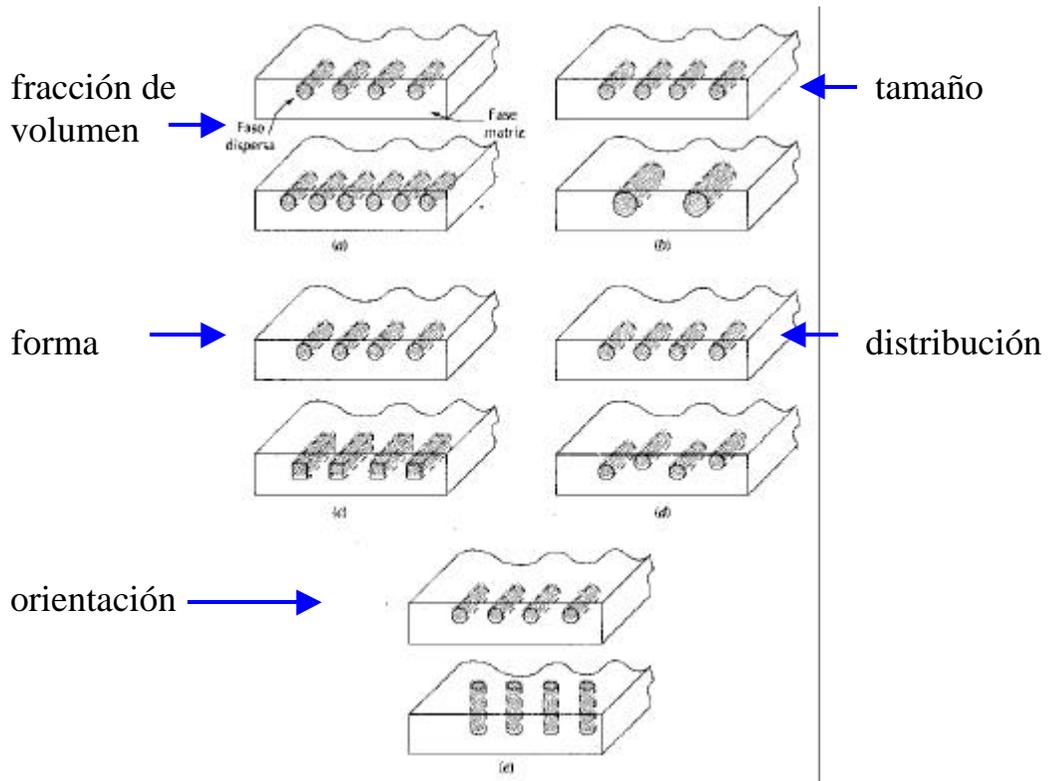
- Compuestos que trabajen a una temperatura menor a 200 °C, generalmente usan como matriz un polímero.
- Compuestos que trabajen a temperaturas mayores, usualmente usan como matriz un metal. Estos son fabricados por un proceso de polvos, por infiltración de fibras o partículas en el metal fundido, ó mediante mezcla de materiales particulados en la fundición.
- A temperaturas altas los compuestos cerámicos tienen un uso potencial. Fibras cerámicas adentro de un compuesto cerámico a menudo pueden absorber la energía durante la propagación de grietas, disminuyendo el crecimiento de ellas.
- **Matriz:** es la fase continua y que rodea a la otra fase
- **Fase dispersa:** es la fase de refuerzo, dentro de la matriz.

**Tipos de fases dispersas:**



**Propiedades de los compuestos** son función de:

- c) propiedades de las fases constituyentes
- b) proporciones relativas (fracción de volumen)
- c) geometría de la fase dispersa



## Regla de las mezclas

- Predice que el módulo elástico del compuesto ( $E_c$ ) está comprendido entre un máximo y un mínimo y es función de la fracción de volumen ( $V$ ).

Máximo:  $E_c = E_m V_m + E_f V_f$       m : matriz  
f: fase dispersa

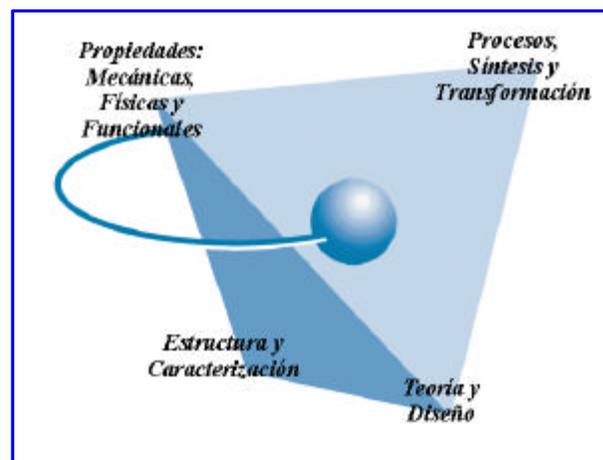
Mínimo:  $E_c = \frac{E_m E_f}{E_m V_f + E_f V_m}$

donde:  $V_m = 1 - V_f$

## Relación resistencia-peso:

- Resistencia específica:  $RE = \sigma/\rho$
- Módulo específico:  $ME = E/\rho$

$\sigma$ : límite de fluencia  
 $\rho$ : densidad  
E: módulo de elasticidad



## 9.1. MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON PARTÍCULAS

- El grado de aumento de las propiedades de la matriz depende de la fuerza de cohesión en la interfase matriz-partícula.
- En la mayoría de los compuestos, la fase dispersa es más dura y resistente que la matriz (más blanda y dúctil). Las partículas tienden a restringir el movimiento de la matriz.
- Las propiedades mecánicas aumentan al incrementarse la cantidad de partículas.

### 9.1.1 Reforzados con partículas grandes (> 1 μm)

- Las interacciones matriz-partícula se describen mediante la mecánica continua, y no a nivel atómico o molecular.
- El módulo elástico del compuesto,  $E_c$ , está comprendido entre un mínimo y un máximo, según la regla de las mezclas.

Máximo:  $E_c = E_m V_m + E_f V_f$

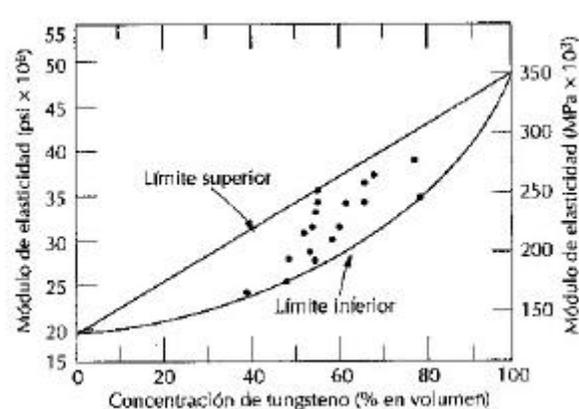
m : matriz

f: fase dispersa

mínimo:  $E_c = \frac{E_m E_p}{E_m V_f + E_f V_m}$

$V_m = 1 - V_f$

Ejemplo: Partículas de W en una matriz de Cu.

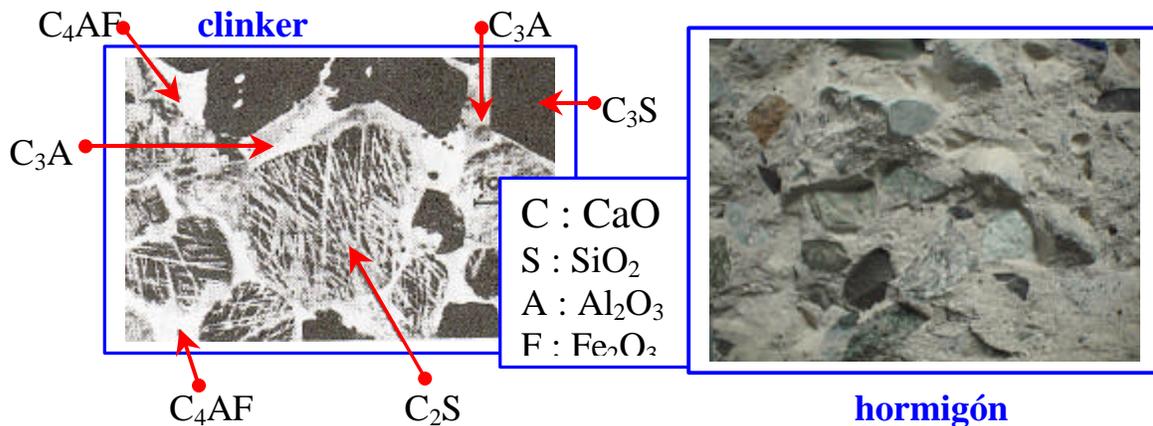


- Densidad del compuesto,  $\rho_c = V_m \rho_m + V_{f1} \rho_{f1} + V_{f2} \rho_{f2} + \dots + V_{fn} \rho_{fn}$ , cuando hay n constituyentes.

## Ejemplos:

### i) Hormigón

- Mezcla de cemento (matriz) y arena o grava (partículas gruesas, 60 a 80 %). El cemento es clinker molido (calcinación de  $\text{CaO} + \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) más 2 a 3 % de yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) y otros componentes (puzolana, escoria de alto horno, etc.).
- El reforzamiento es mayor, mientras más pequeñas y uniformes sean las partículas, aunque la resistencia óptima se logra (empaquetamiento denso del agregado y buen contacto de las intercaras) con partículas de dos diferentes tamaños; partículas finas de arena deben ocupar los espacios vacíos entre partículas de grava.
- Deficiencia de  $\text{H}_2\text{O} \Rightarrow$  unión incompleta entre el cemento y el agregado.
- Exceso de  $\text{H}_2\text{O} \Rightarrow$  aumento de la porosidad



- (Hormigón armado, pretensado, asfáltico y polimérico).

### ii) Cermets

- Mezcla de una matriz metálica y agregados de cerámicas.
- Carburo cementado: Matriz de cobalto o níquel con aprox. 90 % de partículas cerámicas, extremadamente duras de WC o TiC.
- Se utilizan como herramientas de corte. Las partículas, duras, aportan el efecto cortante; la matriz, dúctil, previene la propagación de grietas entre partículas.

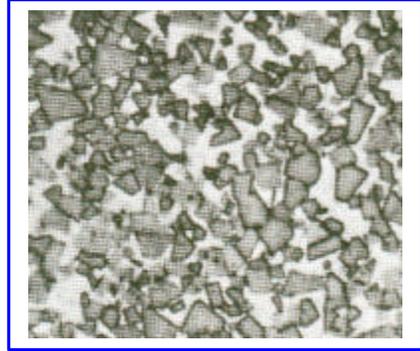
### **iii) Caucho con negro de humo**

- Mezcla de plásticos reforzados con partículas de negro de humo (partículas esféricas de carbón, producidas por combustión incompleta del gas natural u otros derivados del petróleo).
- La adición del negro de humo, partículas entre 20 y 50 nm, aumenta la tenacidad y la resistencia a la tracción, torsión y desgaste.
- Los neumáticos para autos contienen entre el 15 y 30 % en volumen de negro de humo.

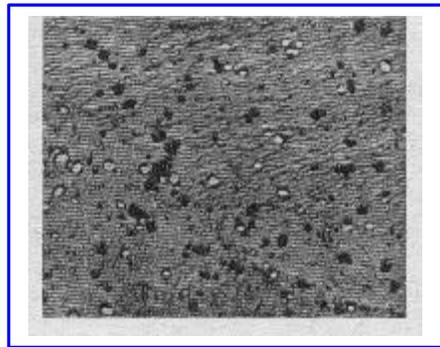
#### **9.1.2 Reforzados con partículas dispersas (< 1 μm)**

- Las partículas tienen un diámetro aproximado entre 10 y 100 nm
- Las interacciones matriz-partícula se pueden describir a nivel atómico o molecular.
- El endurecimiento de la matriz se produce debido a la interacción de las partículas con las dislocaciones (mecanismo de corte o de Orowan).
- El incremento de la resistencia del compuesto, cuando las partículas son incoherentes con la matriz, está inversamente relacionado con el espaciado entre partículas ( $d_p$ ). El esfuerzo de corte necesario para que las dislocaciones se muevan a través de las partículas (Orowan) es función de este espaciado:  $\tau = (G_m b)/d_p$ ;  $G_m$  es el módulo de cizalle de la matriz y  $b$  el vector de Burger.
- La fase dispersa puede ser metálica o no metálica (óxidos).
- El endurecimiento de la matriz por dispersión es menor que por precipitación, pero se mantiene a elevadas temperaturas, en cambio la precipitación desaparece por tratamientos térmicos (crecimiento del precipitado o disolución de éstas).
- Ejemplos: Níquel con toria dispersa (Ni más 3 % vol. de  $\text{ThO}_2$ ). Cu endurecido con TiC, TiN,  $\text{TiO}_2$  y/o  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Polvo de aluminio sinterizado (SAP), matriz metálica de Al con pequeñas escamas dispersas de aluminio recubiertas con alúmina.

Carburo de tungsteno en una matriz de Co.



Partículas de  $\text{TiO}_2$  en una matriz de cobre

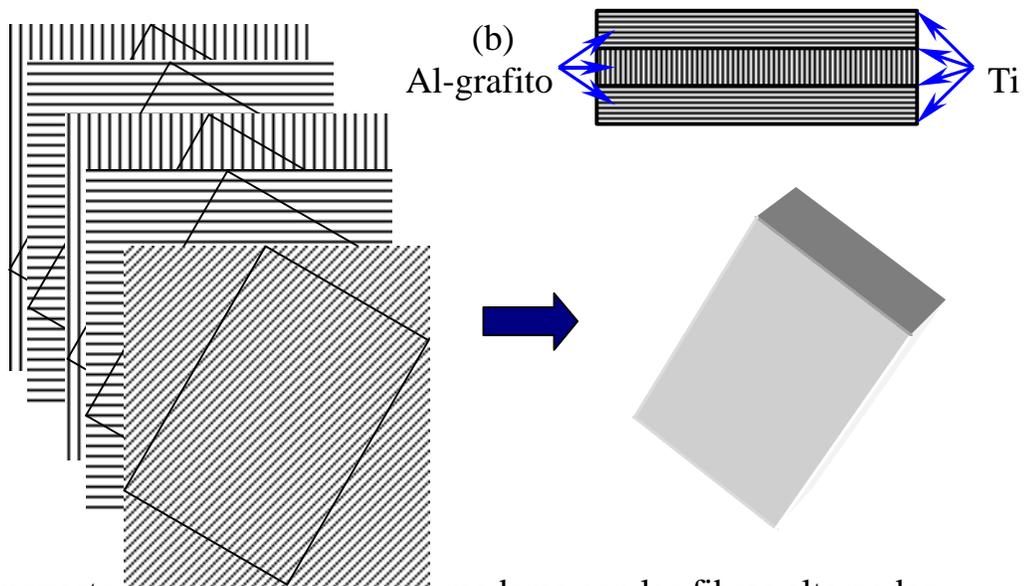


## 9.2. MATERIALES COMPUESTOS ESTRUCTURALES

- Sus propiedades dependen de los materiales constituyentes y de la geometría de los mismos.

### 9.2.1 Materiales Compuestos Laminares

- Se arreglan los componentes en series de capas alternadas
- Cuando se aplican cargas, los esfuerzos resultantes son proporcionales a los módulos elásticos y de corte de los constituyentes.
- También pueden aparecer esfuerzos internos debido a las contracciones o expansiones de las diferentes láminas (diferentes relaciones de Poisson).
- En esfuerzos transversales, se producen esfuerzos de corte entre las superficies de contacto.



- (a) Compuesto laminar por capas de maderas con las fibras alternadas.  
(b) Compuesto de capas alternadas de aluminio con fibras de grafito, las cuales están orientadas a 90 ° una de otra.

- Regla de las mezclas:
  - Propiedades paralelamente al laminado:
    - Densidad :  $\rho_c = \sum V_i \rho_i$
    - Conductividad eléctrica:  $\sigma_c = \sum V_i \sigma_i$
    - Conductividad térmica :  $k_c = \sum V_i k_i$
    - Módulo de elasticidad :  $E_c = \sum V_i E_i$

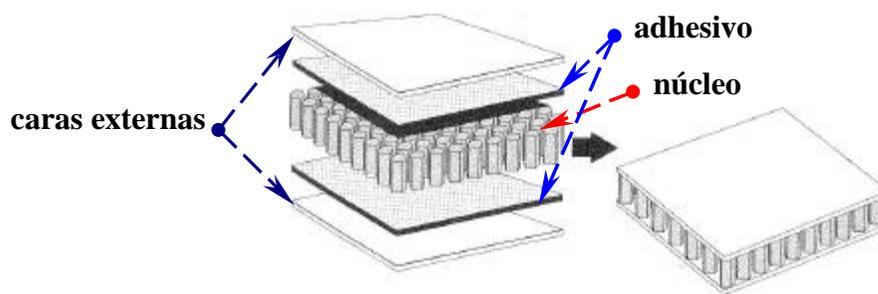
ii) Propiedades perpendicularmente al laminado:

- Densidad :  $\rho_c = \sum V_i \rho_i$
- Conductividad eléctrica:  $1/\sigma_c = \sum V_i / \sigma_i$
- Conductividad térmica :  $1/k_c = \sum V_i / k_i$
- Módulo de elasticidad :  $1/E_c = \sum V_i / E_i$

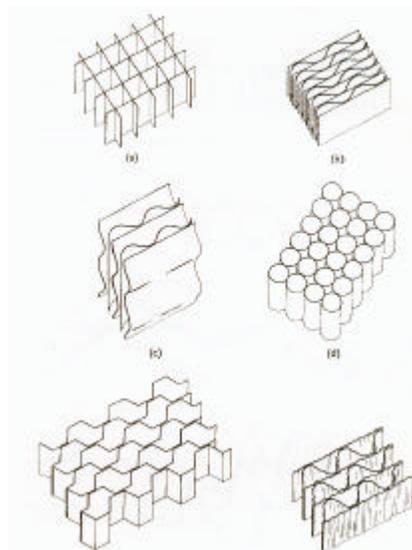
V: fracción volumétrica

### 9.2.2 Materiales Compuestos tipo Sandwich

- Material compuesto por dos láminas externas o caras, de mayor resistencia, y entre ellas una capa de material menos denso (núcleo), de baja rigidez y baja resistencia.



- Las láminas externas pueden estar constituidas por madera enchapada, aleaciones de aluminio, plásticos reforzados con fibras, titanio, acero, etc., y en el núcleo se pueden usar polímeros espumosos, cauchos sintéticos, cementos inorgánicos, madera, papel, etc.
- Las funciones del núcleo son: separar las caras externas, resistir la deformación perpendicular al plano de la cara, y dar cierto grado de resistencia a la cizalladura a lo largo de los planos perpendiculares a las caras.



### 9.3. Materiales Compuestos Reforzados con Fibras

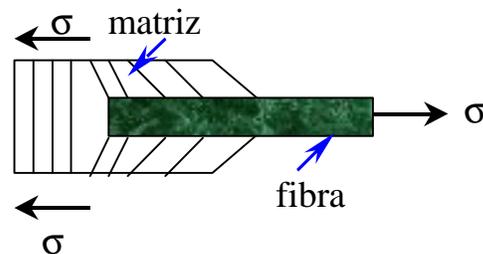
- Aumentan las propiedades mecánicas (resistencia al esfuerzo, fatiga, rigidez) y la relación resistencia-peso al introducir fibras fuertes, rígidas y frágiles.



- La matriz transmite la fuerza a las fibras, otorgando al compuesto ductilidad y tenacidad, donde las fibras soportan la mayor parte de la fuerza aplicada.

#### 9.3.1 Influencia de la longitud de la fibra

- Al aplicar un esfuerzo de tracción, en los extremos de la fibra no hay transmisión de carga desde la matriz, se genera un patrón de deformación.



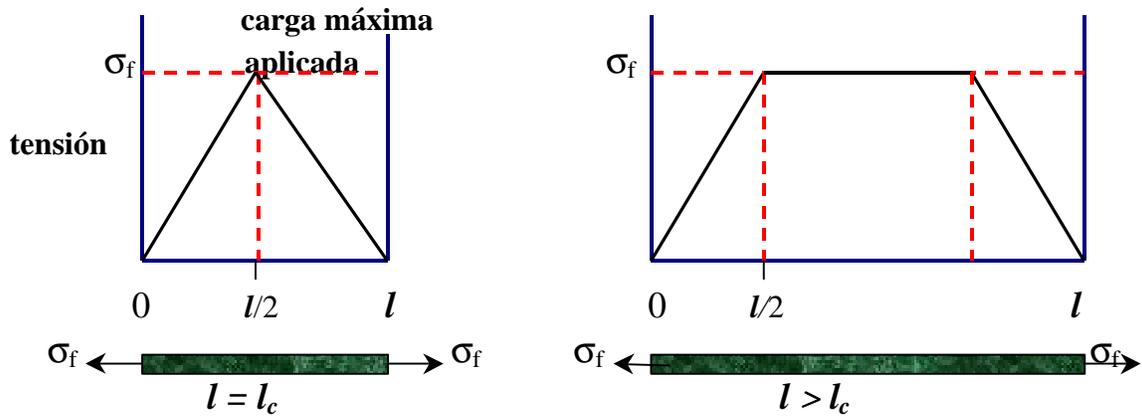
- Existe una longitud de fibra crítica ( $l_c$ ) para aumentar la resistencia y rigidez del compuesto:

$$l_c = \frac{\sigma_f d}{\tau_c}$$

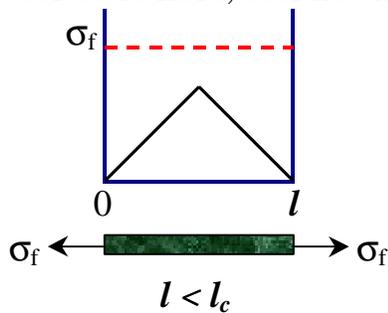
$\sigma_f$ : resistencia a la tracción de la fibra; d: diámetro de la fibra

$\tau_c$  : esfuerzo de corte de la matriz (resistencia de la unión fibra-matriz)

- Los perfiles esfuerzo-deformación dependen si la longitud de la fibra es mayor o menor que la longitud crítica:



- Si  $l = l_c$  : la carga máxima se consigue en el centro de la fibra
- Si  $l > l_c$  : el reforzamiento es más efectivo
- Si  $l < l_c$  : el reforzamiento es insignificante (la matriz se deforma alrededor de la fibra, casi no existe transferencia del esfuerzo)

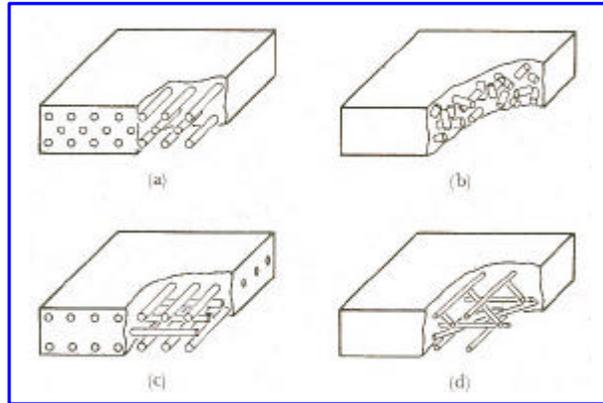


- Si  $l \gg l_c$  (normalmente  $l > 15 l_c$ )  $\Rightarrow$  fibras continuas
- Si  $l < l_c \Rightarrow$  fibras cortas o discontinuas

### 9.3.2 Influencia de la orientación de la fibra

- Alineación paralela a los ejes longitudinales de las fibras
- Alineación al azar
- Las fibras continuas generalmente se alinean
- Las fibras cortas pueden estar alineadas o al azar.

- a) Fibras continuas alineadas
- b) Fibras cortas al azar
- c) Fibras ortogonales
- d) Fibras en capas múltiples



### 9.3.3 Material compuesto con fibras continuas

- Las propiedades del compuesto se esquematizan como:

- Densidad :  $\rho_c = V_m \rho_m + V_f \rho_f$
- Conductividad eléctrica:  $\sigma_c = V_m \sigma_m + V_f \sigma_f$
- Conductividad térmica :  $k_c = V_m k_m + V_f k_f$
- Deformación, se puede considerar:  $\epsilon_c = \epsilon_m = \epsilon_f$

- Con respecto al módulo de elasticidad:

- Si la carga se aplica paralelamente a las fibras continuas unidireccionales:

$$E_c = V_m E_m + V_f E_f$$

- Si el esfuerzo aplicado es muy grande (la curva esfuerzo-deformación no es lineal)

$$E_c = V_f E_f$$

- Si la carga se aplica perpendicularmente a las fibras continuas:

$$1/E_c = V_m/E_m + V_f/E_f$$

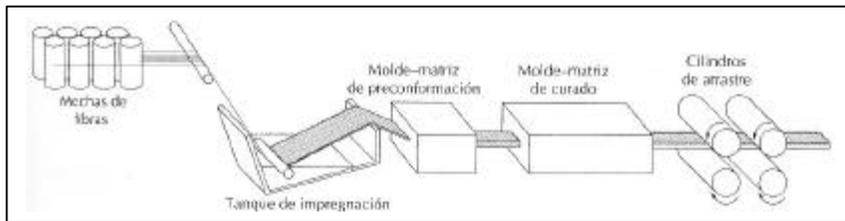
- Para cargas longitudinales, la relación entre la fuerza soportada por la matriz ( $F_m$ ) y la fibra ( $F_f$ ) puede expresarse como:

$$\frac{F_f}{F_m} = \frac{E_f V_f}{E_m V_m}$$

### 9.3.4 Material compuesto con fibras discontinuas (cortas)

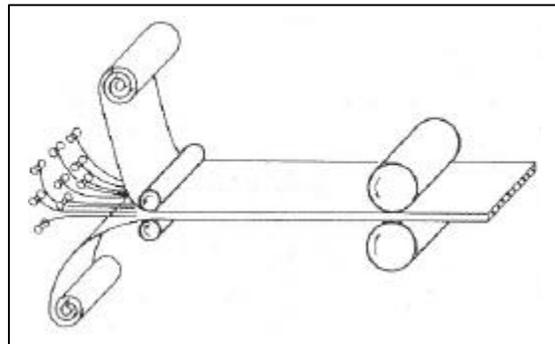
- Fibras dispuestas al azar, es más difícil predecir las propiedades del compuesto.
- Las propiedades pueden resumirse como:
  - Resistencia a la fractura:  $\sigma_c = (l \tau_c V_f)/d + \sigma_m V_m$
  - Módulo de elasticidad :  $E_c = K E_f V_f + E_m V_m$   
*K: parámetro de eficiencia de la fibra*

- Algunos métodos de fabricación:



Pultrusión: fibras continuas se impregnan con una resina termoestable y después se hace pasar por moldes-matriz.

Cintas: fibras individuales y preformadas con resina polimérica. El calor y la presión completan el proceso de polimerización.



Unión y soldadura por deformación y fusión: Compresión en caliente para unir capas de cintas. La difusión de átomos de la matriz llena los huecos en la interfase, produciendo compuestos compactos.

