

---

# **Materiales compuestos**



# Materiales compuestos

---

➤ Capítulo 11 del libro de texto

➤ Estructura:

✓ **Compuestos de matriz polimérica:**

- 11.2: fibras de vidrio, de carbono, de aramida
- 11.3: matriz de poliéster y de epoxi / isodeformación e isoesfuerzo
- Procesado (secciones 11.4, molde abierto, 11.5 molde cerrado)

✓ **Hormigón (11.6)**

✓ **Asfalto (11.7)**

✓ **Madera (11.8)**

✓ **Compuestos de estructura sandwich (11.9)**

✓ **Compuestos de matriz metálica (MMC) y cerámica (CMC) (11.10)**

# Materiales compuestos

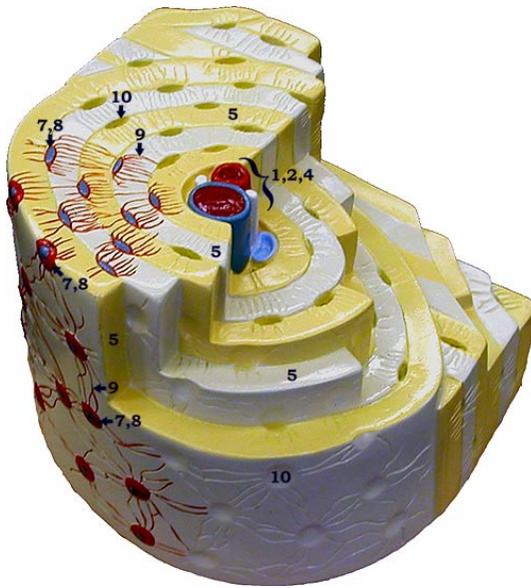
---

- Lo que aprendemos a calcular
  - ✓ isodeformación e isoesfuerzo
  - ✓ módulos elásticos (rigidez y complianza) de compuestos
  - ✓ deformación y esfuerzo en materiales compuestos
  - ✓ pretensado del hormigón (básico, análogo al templado del vidrio)
  - ✓ propiedades medias volumétricas (densidad, conductividad, etc)
  - ✓ mezclas (diag. triangulares)



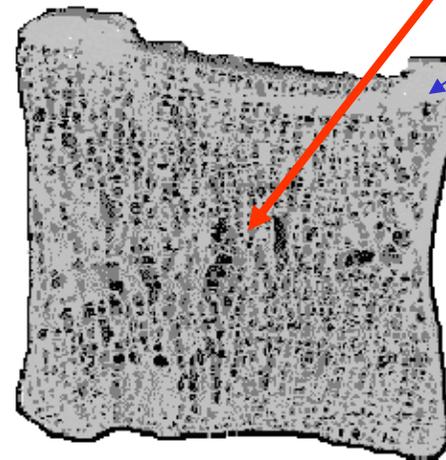
# Materiales compuestos naturales

- La naturaleza recurre con gran frecuencia al uso de materiales compuestos
- El hueso es un ejemplo de adaptación a necesidades estructurales (huesos largos, planos, etc.) y optimizados por evolución hasta el límite mecánico
- Altamente anisotrópicos y generalmente inhomogéneos



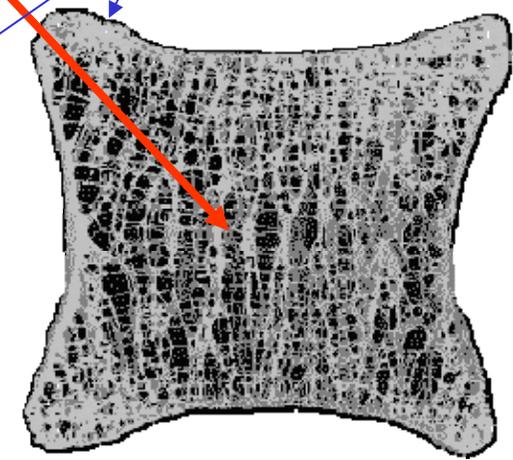
estructura de hueso largo  
(p.ej. fémur)

hueso trabecular (esponjoso)



hueso corto (segmento  
vertebral) normal

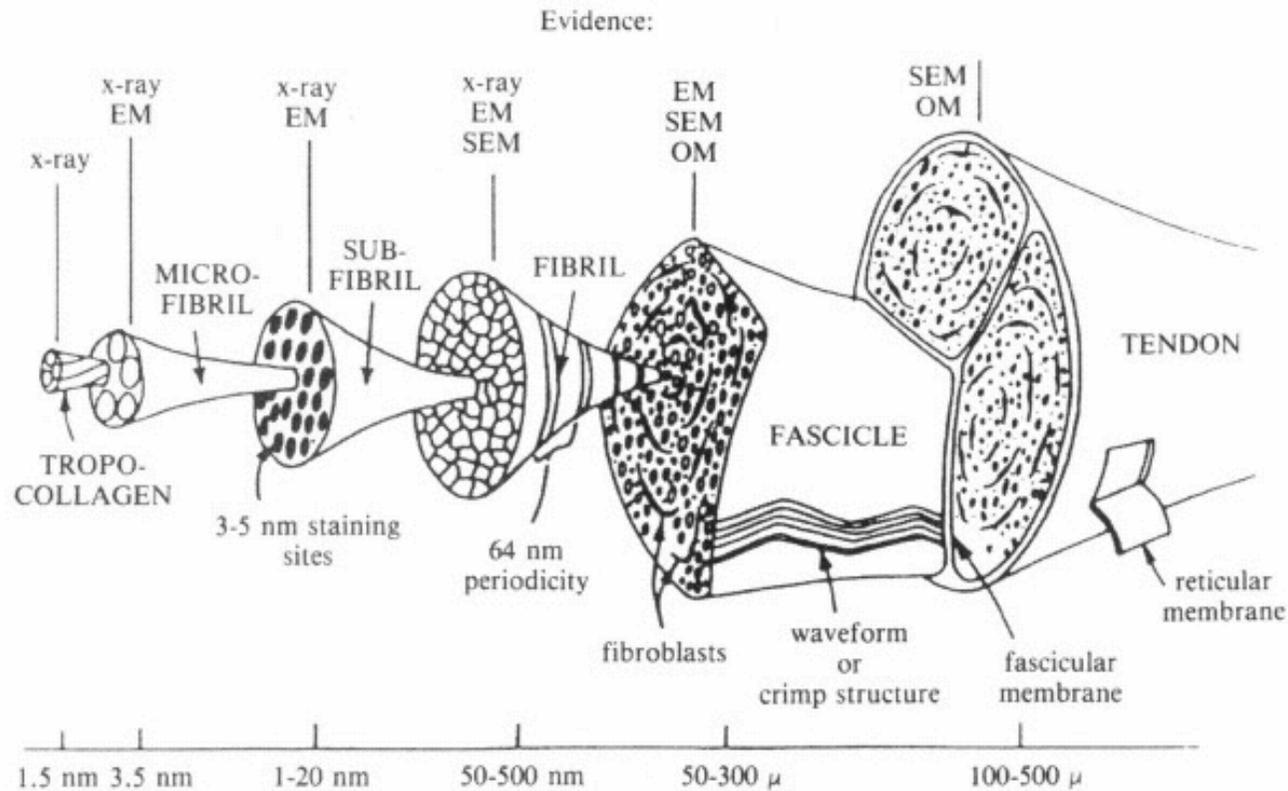
hueso cortical  
(alta densidad)



hueso corto (segmento  
vertebral) de paciente  
con osteoporosis avanzada

# Materiales compuestos naturales

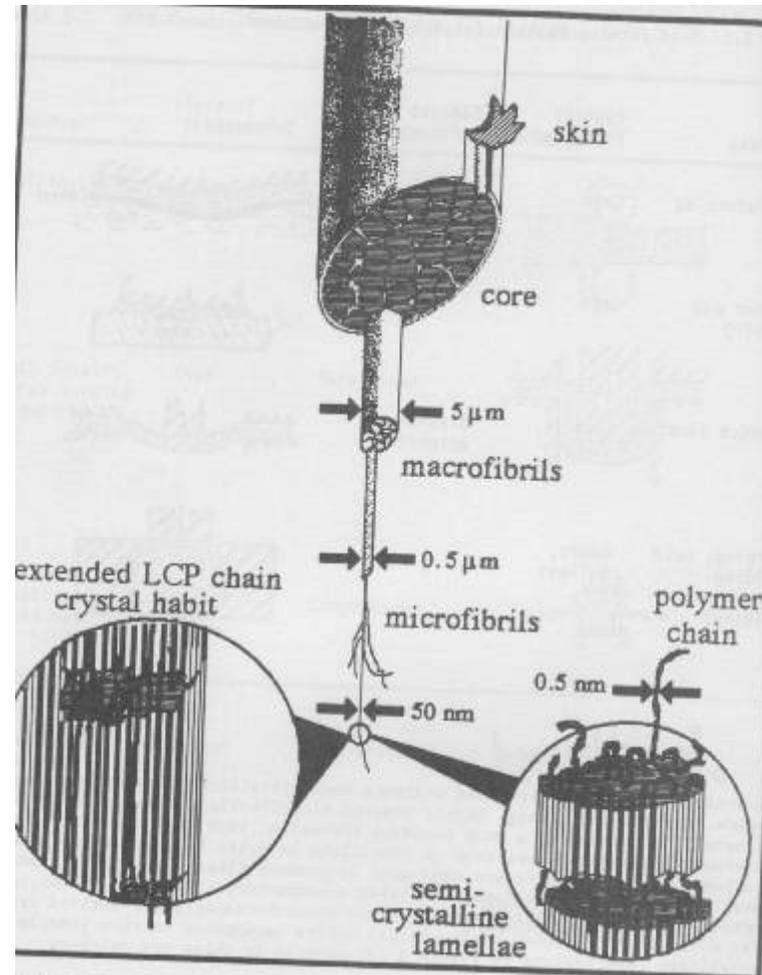
## ➤ Tendones:



**Estructura jerárquica de un tendón  
(Kastelic & Baer, 1980)  
(material compuesto a 5 niveles jerárquicos)**

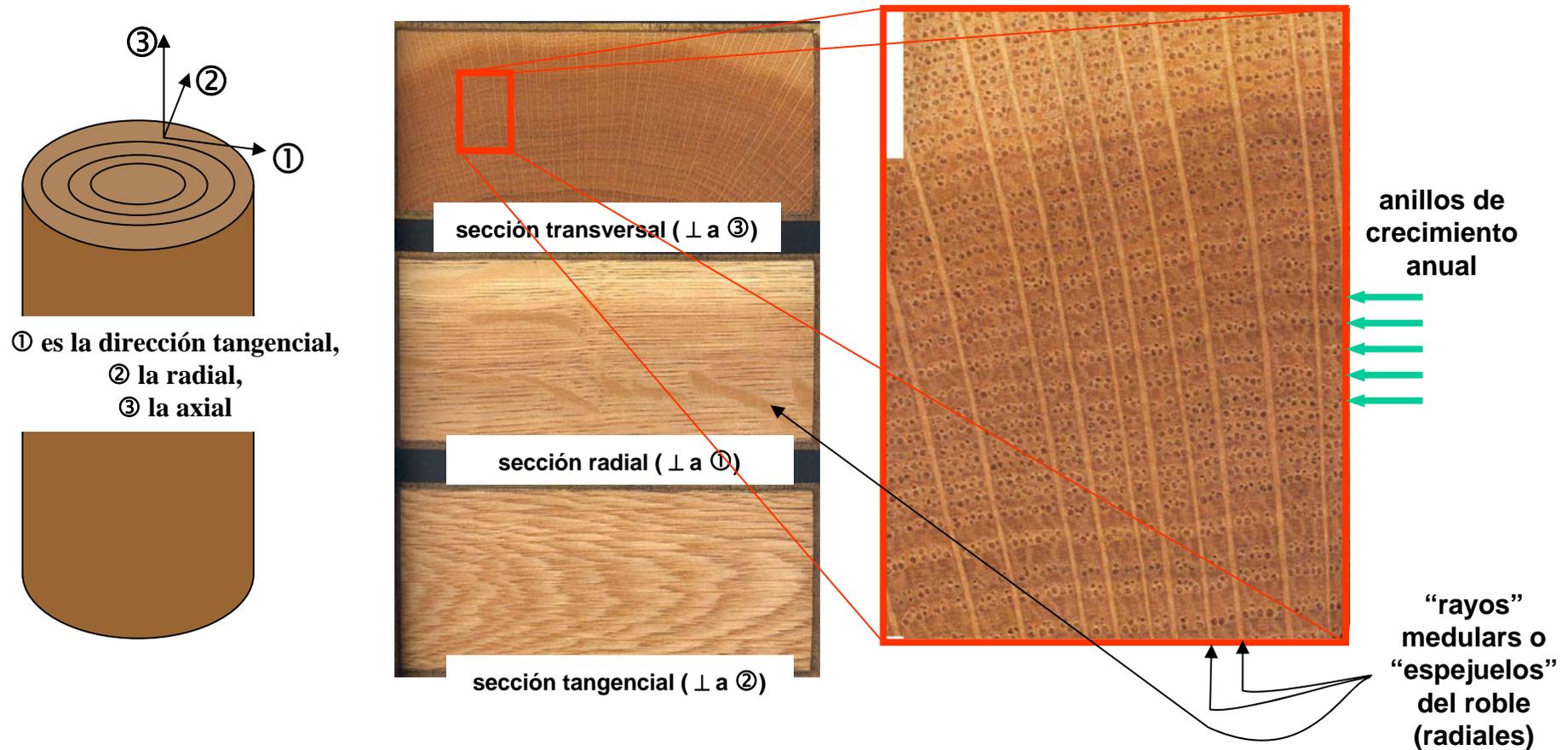
# Materiales compuestos naturales

## ➤ Fibras de cristales líquidos (Kevlar):

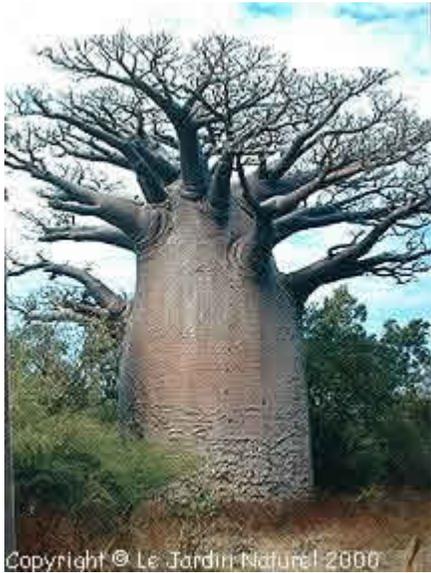


# Materiales compuestos naturales

- La madera es un material compuesto natural con extraordinarias propiedades mecánicas y altamente anisotrópico.
- Desarrollado evolutivamente como material estructural (salvo la capa periférica del cambium, la mayoría del tronco no contiene células vivas. Su función primaria es estructural)

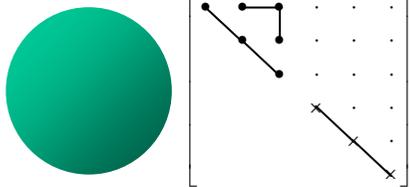


# Adaptación de mat. compuestos naturales a la aplicación



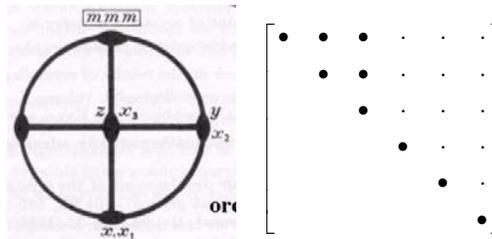
Adansonia Za  
(baobab)  
madera prácticamente  
isótropa

$\infty \infty m$



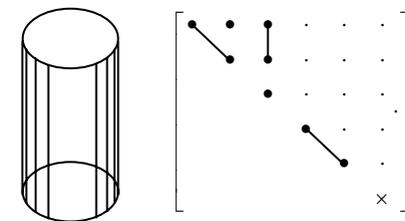
Quercus rubra  
(roble americano)  
madera "normal"  
(ortorrómbica  
"ortotrópica" en ing. mecánica)

$m m m$



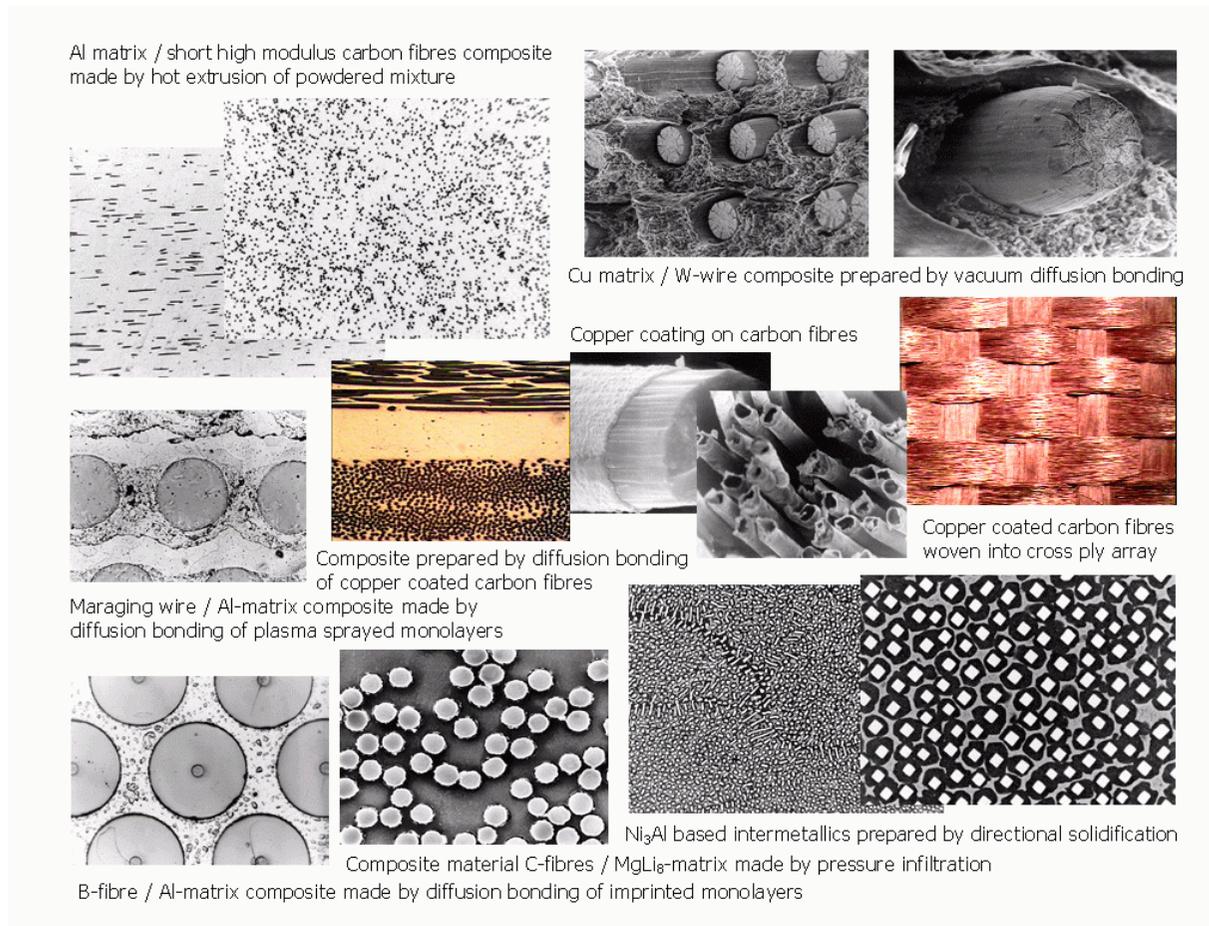
Phoenix dactylífera  
(Palmera)  
"madera" unidireccional, fibras alineadas

$\infty / m m$

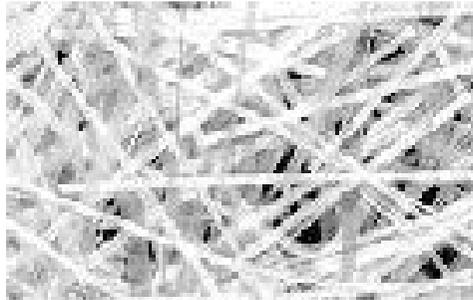


# Materiales compuestos artificiales

Los materiales de la fase discontinua (fibras, whiskers, pellets o esferas) han sido tradicionalmente vidrios inorgánicos, fibras de carbono, partículas cerámicas y metálicas, etc.



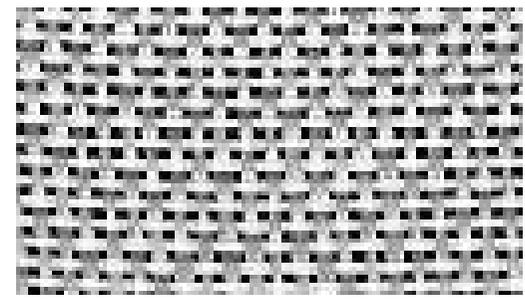
# Materiales compuestos artificiales



“mat” de vidrio S

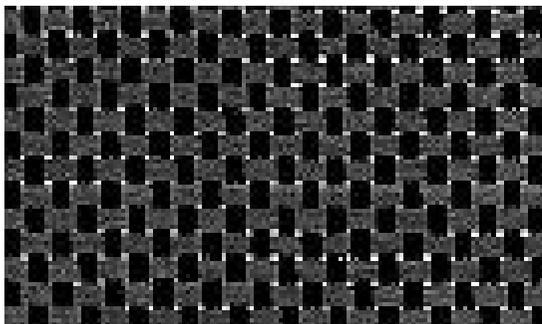


“mat” de vidrio S

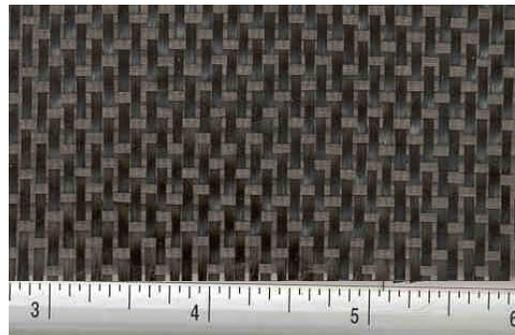


“mat” de vidrio E

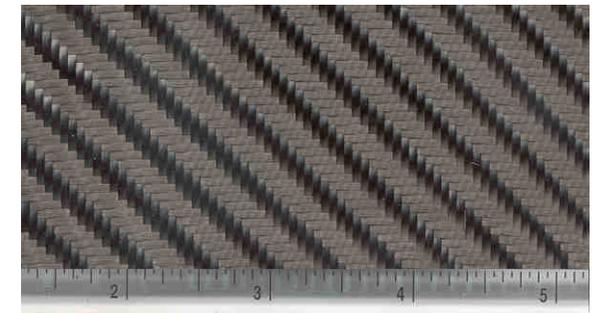
en una matriz,  
típicamente homogénea e isótropa



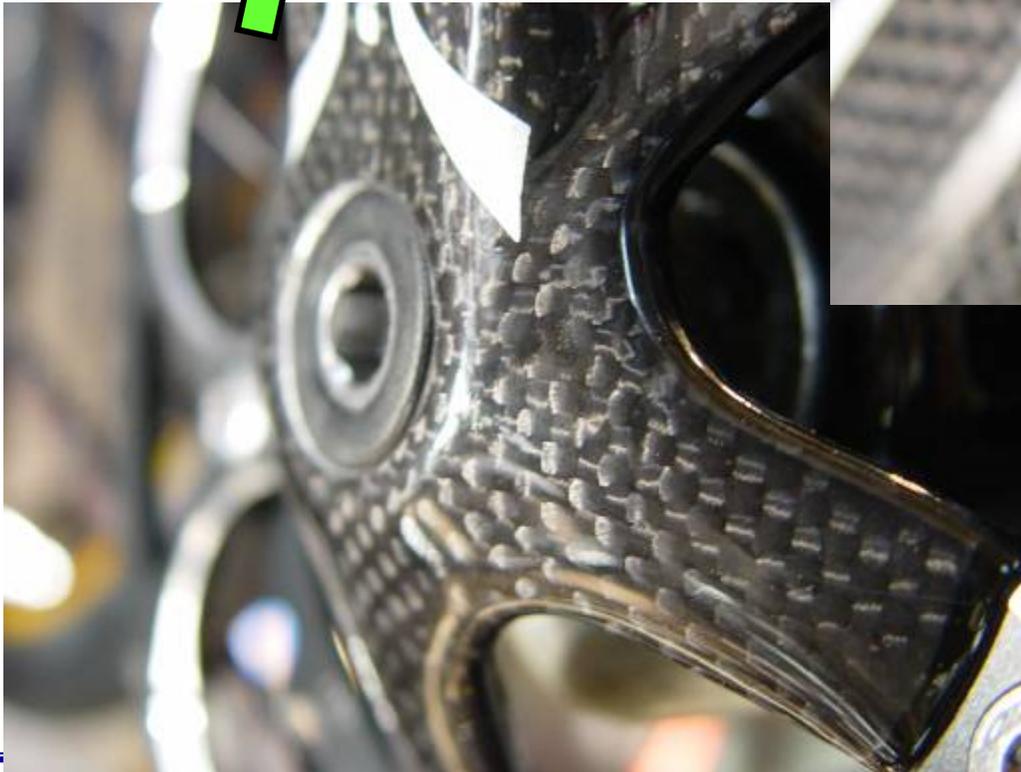
carbono estándar



satin de arnés

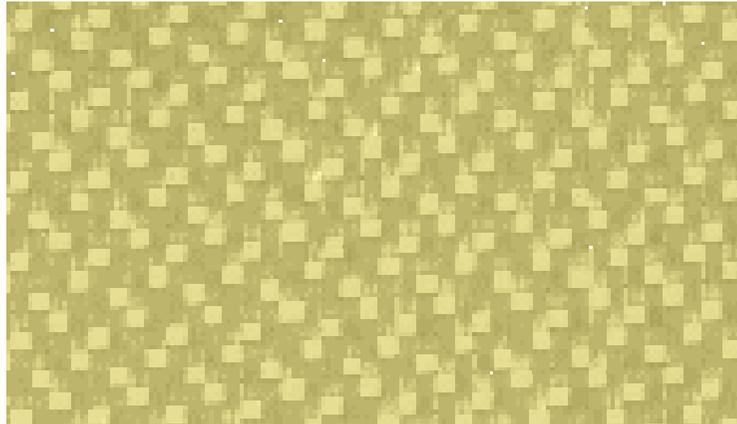


espiguilla (twill) 4x4

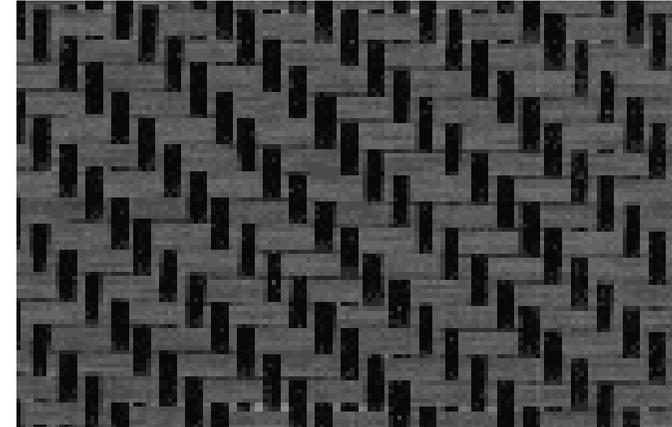


# Material compuesto a 2 niveles

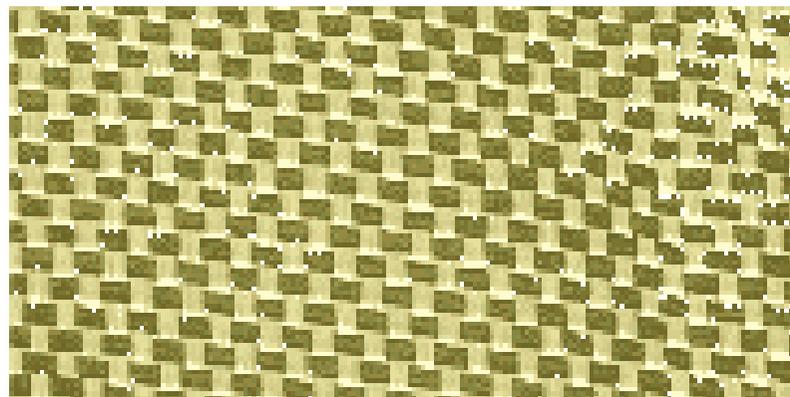
---



satin de Kevlar



espiguilla de carbono



urdimbre (warp) de carbon  
trama (filling, weft) de Kevlar

# Moldes típicos

---



# Aplicación

---

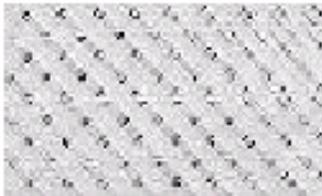


aplicación manual

aplicación con brazo robot



# Ejemplos comerciales de tejidos



Heavy duty reinforcement common in marine construction. Used where high strength and fast build-up are necessary. Lighter weight but better formability than 1708 biaxial.

## DBM 1208 Knytex Biaxial

**+/- 45degree**

Contains double bias(12oz) stitched at 45degrees along with one layer of 3/4oz mat.

Thickness: 0.037"

Cat No.	Description	Price / Yard
FG-120850	<b>50" Width</b>	
Same	1 to 9 Yd	\$8.25
Same	10 to 24 Yd	7.75
Same	25 or More Yd	7.40
FG-120850R	Roll (95-105yd)	\$3.98/ Pound

Full rolls are sold by weight and can vary from 165 to 180 LBs.

## fibra de vidrio

# Ejemplos comerciales de tejidos



**1808 Biaxial**  
**+/- 90 degree**

Contains double bias (18oz) stitched at 90degrees along with one layer of 3/4oz mat.  
Thickness: 0.048"

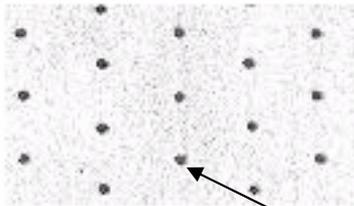
Cat No.	Description	Price / Yard
FG-180850	50" Width	
Same	1 to 9 Yd	\$6.70
Same	10 to 24 Yd	6.50
Same	25 or More Yd	6.15
FG-180850R	Roll (55-65yd)	Call

Full rolls are sold by weight and can vary from 120 to 135 LBs.

fibra de vidrio



# Ejemplos comerciales de tejidos



## Coremat®

Coremat® is a microsphere filled, random laid, chopped fiber polyester fabric with good conformability, that is used as a laminate bulking and print-control mat. Ideal for adding stiffness to laminates and molds.

Available in 2 MM or 4 MM thicknesses.

Both sold in 39.37" width

Cat No.	Description	Price / Yard
FG-CM0239	<b>2 Millimeter</b>	5.75
	Roll (538sq ft)	Call
FG-CM0439	<b>4 Millimeter</b>	8.75
	Roll (538sq ft)	Call

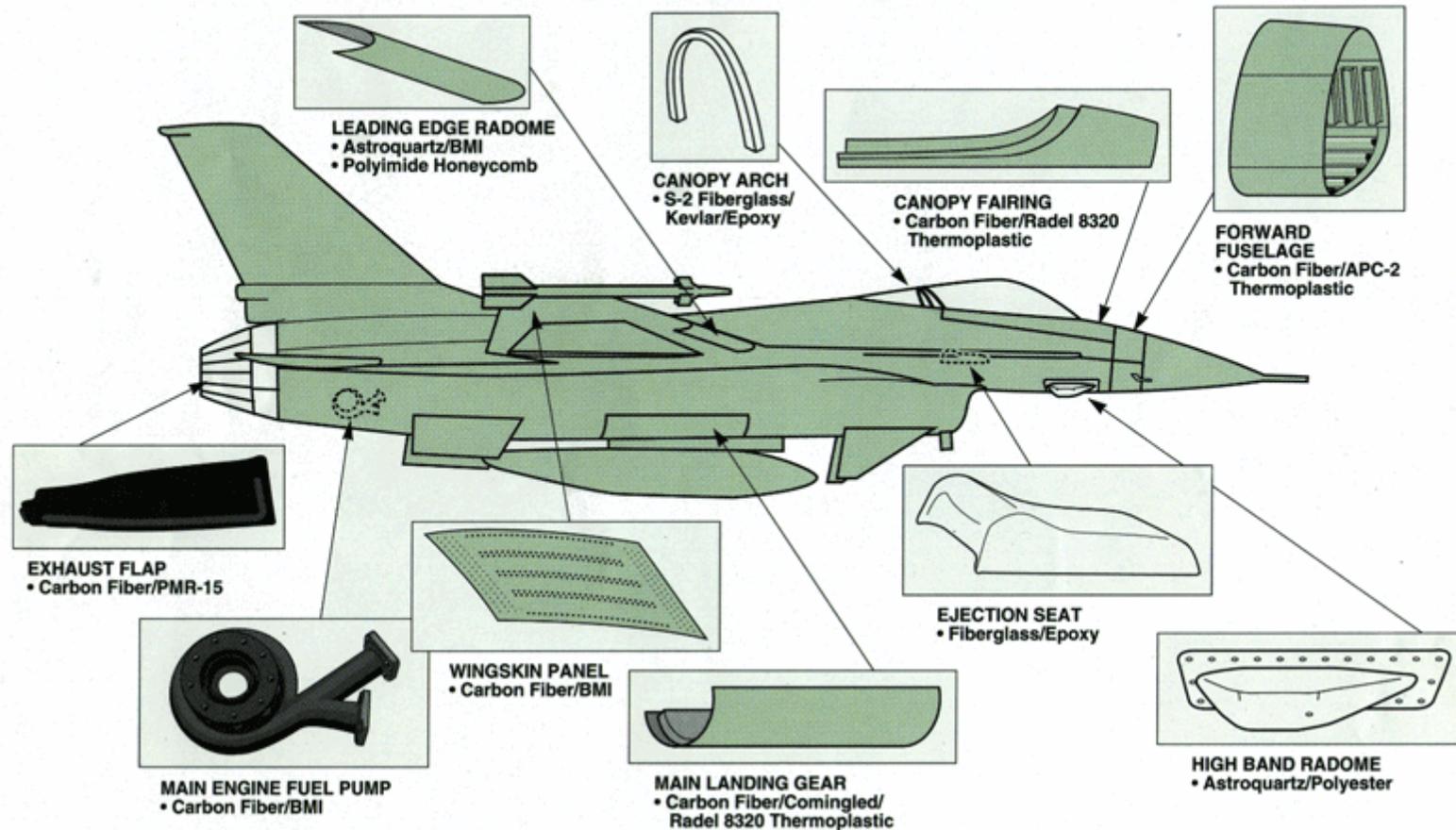
**combinación de tejido  
con partículas esféricas**

---

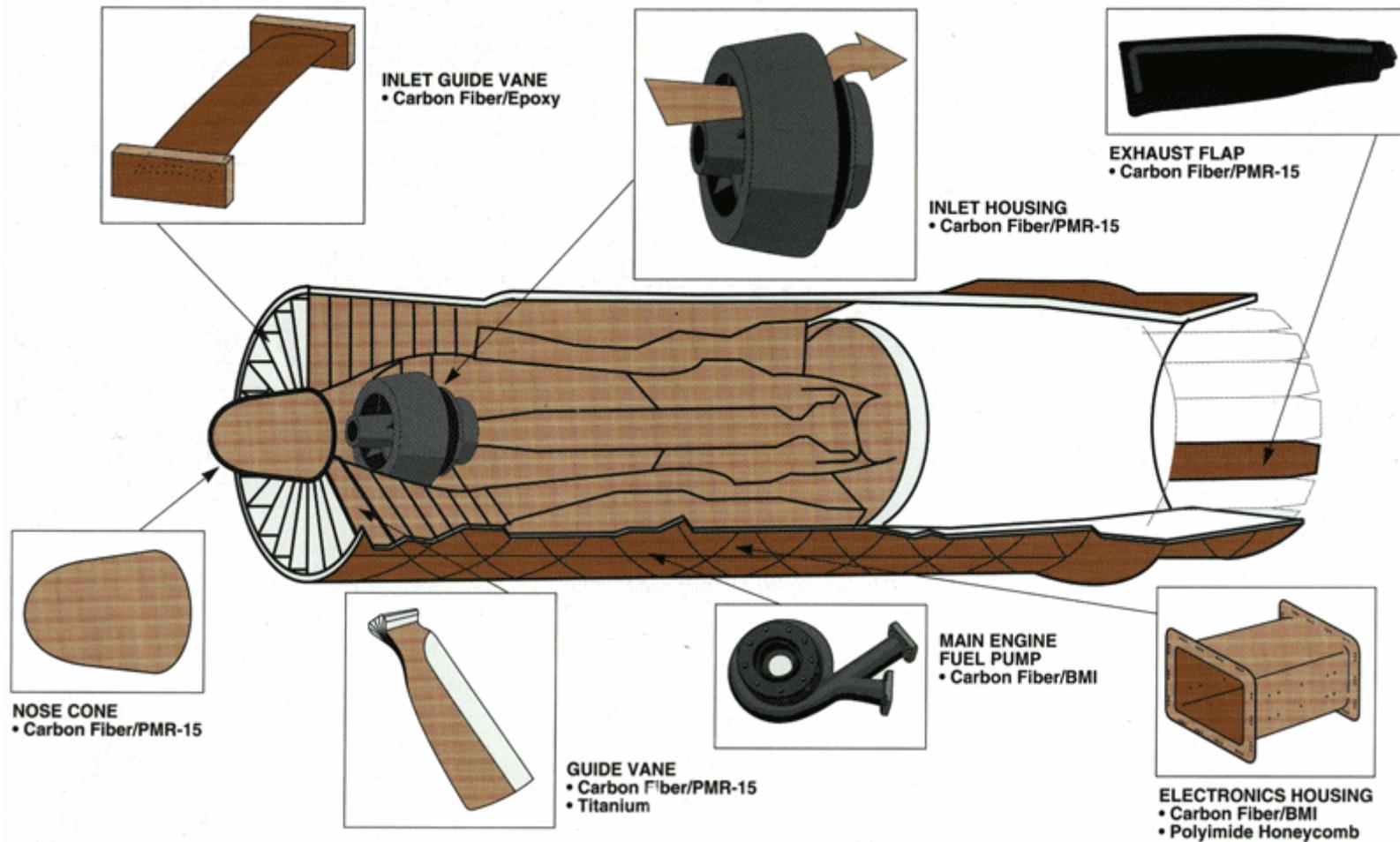
**Las posibilidades de  
combinación son  
prácticamente ilimitadas**



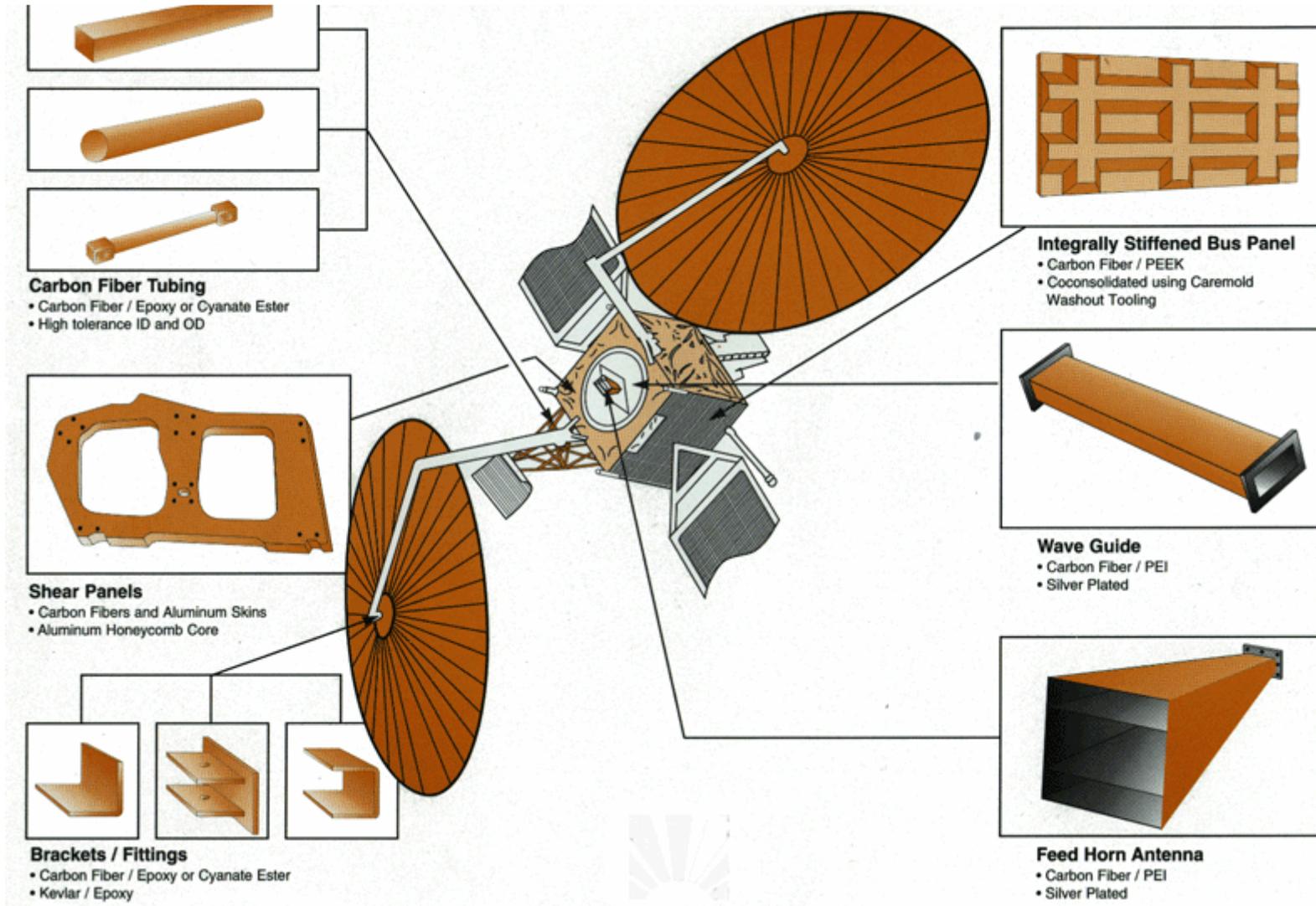
# Aplicaciones en aviación militar



# Aplicaciones en turbinas de aviación



# Aplicaciones en técnica espacial



# Aplicaciones en bienes de consumo

---



horquilla de bicicleta  
(440 g)

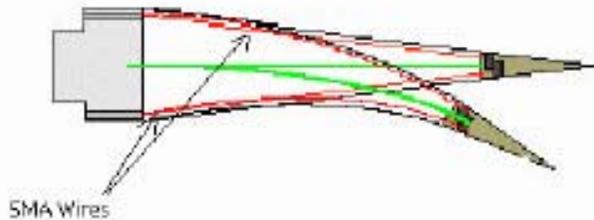


bicicleta  
(4600 g)

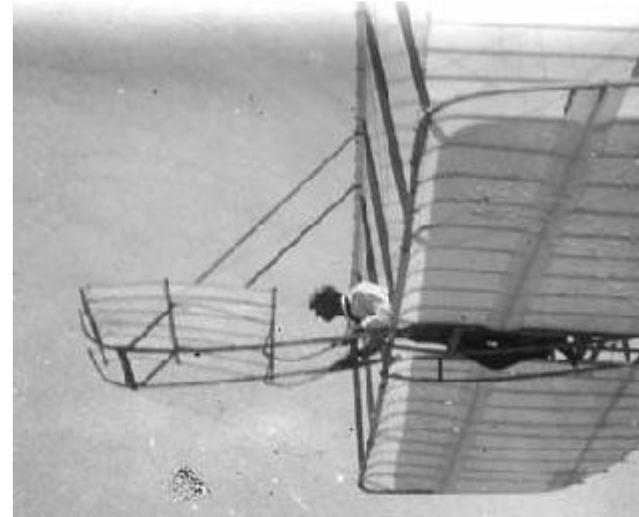


modelo de casco de velero para la  
America's cup  
(escala 1:15)

# Aplicaciones en materiales “inteligentes”



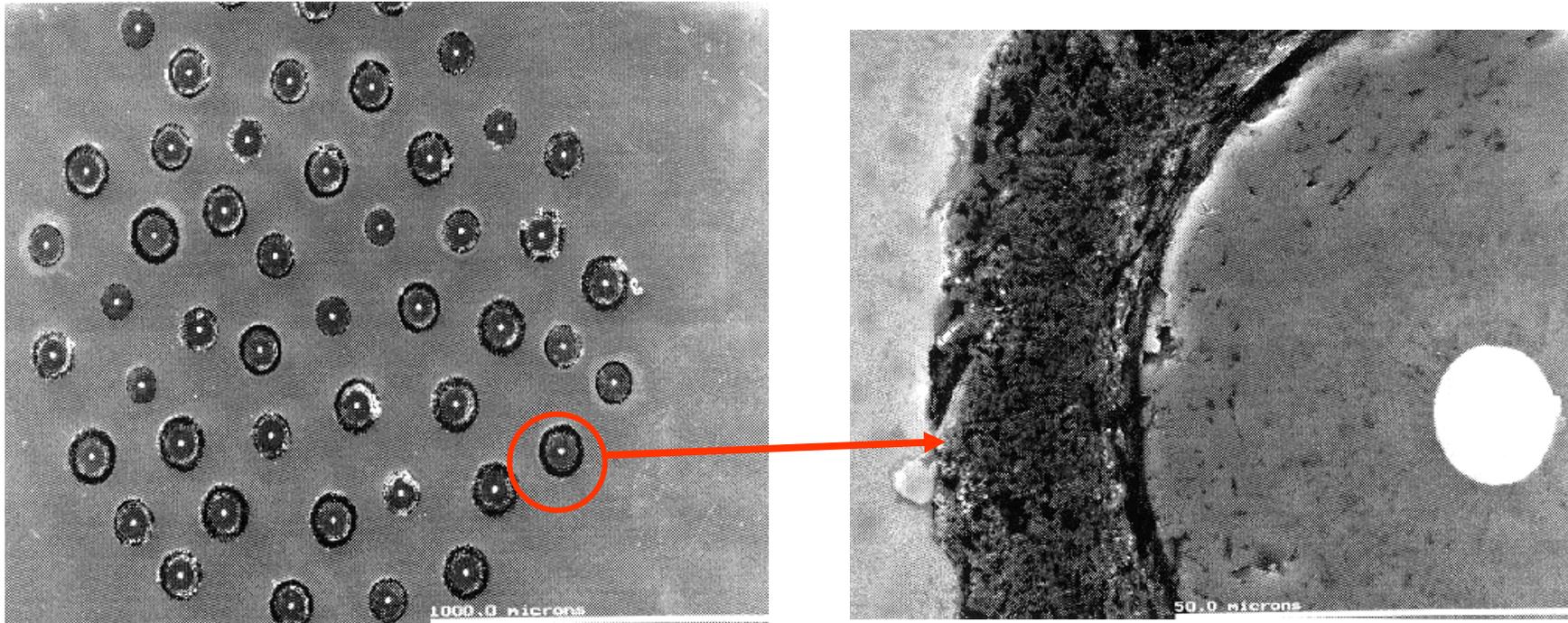
control de vuelo  
por flexión de las alas  
(sin alerones)



control de vuelo  
por flexión de las alas  
(sin alerones)

# Materiales compuestos artificiales

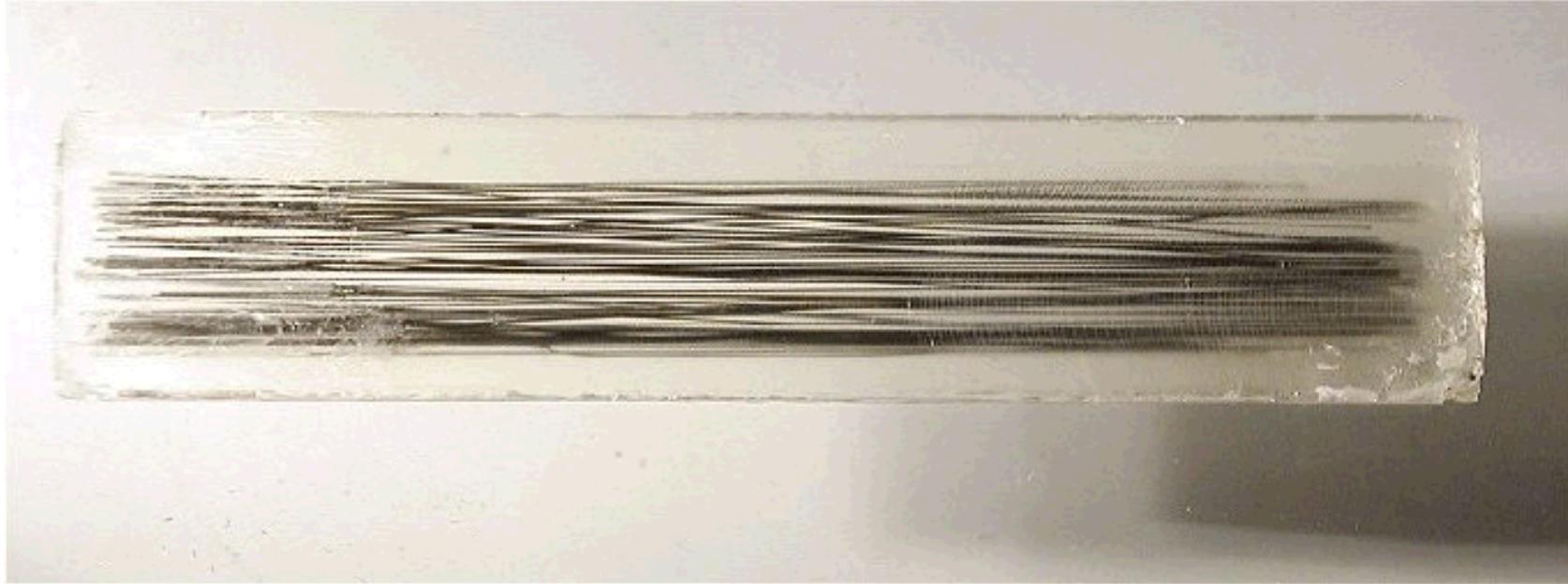
---



Compuesto de matriz en aleación de Ti  
con fibras de SiC recubiertas de diamante

# Materiales compuestos artificiales

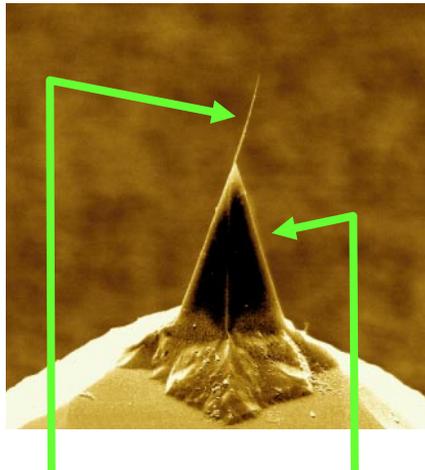
---



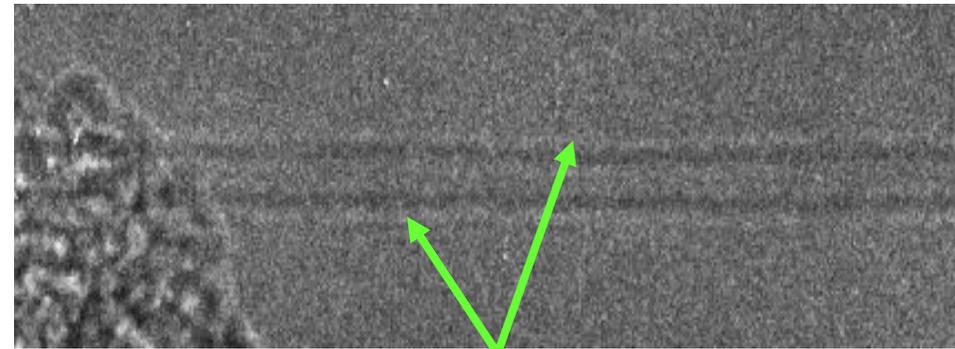
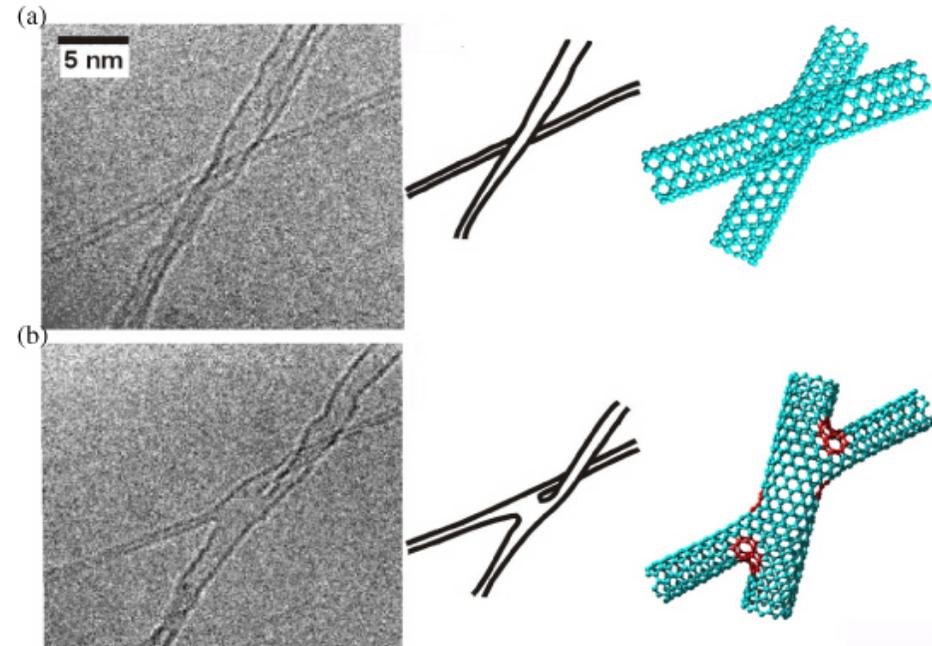
**Compuesto de matriz de PMMA con  
aprox. 100 fibras de carbono  
(100x20x5 mm, compuesto de fibras  
orientadas unidireccionalmente) (2005)**

# Materiales nanocompuestos

Recientemente empiezan a usarse **nanotubos** y otros nanomateriales por sus excepcionales propiedades mecánicas.

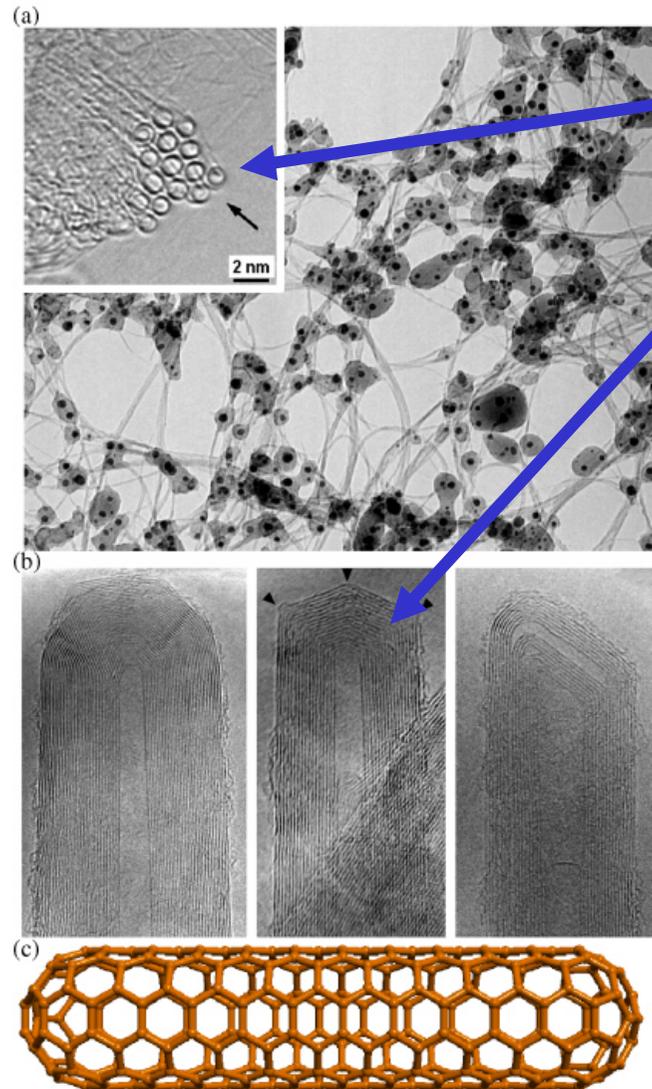


Nanotubo sobre punta de un microscopio AFM



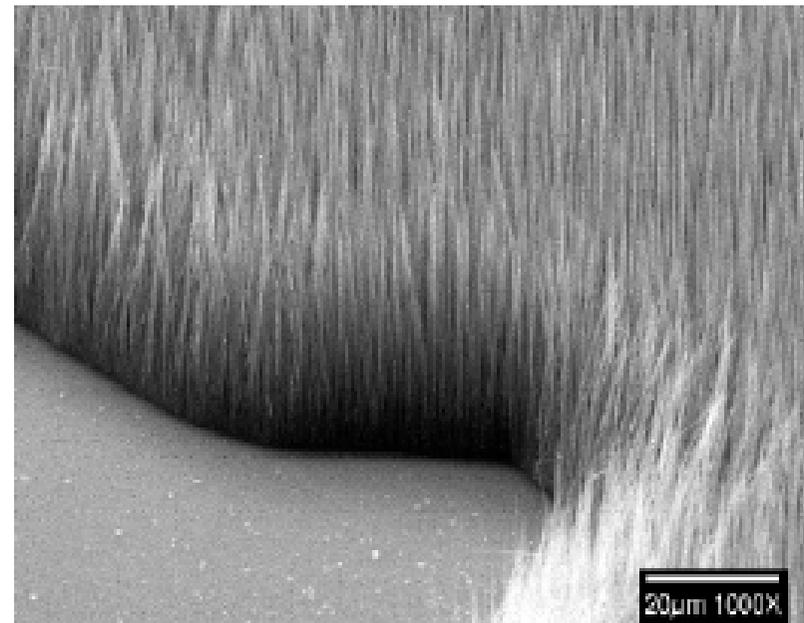
SWNT (Single Wall NanoTube)

# Materiales compuestos



**SWNTs en sección**

**MWNT** (Multiple Wall NanoTube)  
(grupo de nanotubos encerrados unos dentro de otros formando capas)



**“alfombra” de nanotubos**

# Dos puntos esenciales

---

Para el desarrollo, diseño, uso, optimización de materiales compuestos hay dos cuestiones primordiales:

***A) Saber tratarlos como materiales generalmente anisótropos***

***B) Determinar las propiedades del compuesto a partir de las de los componentes (p.ej. matriz y fibra), de su composición y de su estructura  
(HOMOGENEIZACIÓN)***



A)

---

**la estructura geométrica del material compuesto**  
**( $\Rightarrow$  de sus componentes)**  
**determina sus propiedades**

**igual que para materiales cristalinos, orientados,  
etc.**

- **clases cristalográficas,**
- **tensores cartesianos,**
- **notación de Voigt, etc.**
- ***str*( )**
- **etc...**

} hay que saber usarlas



## B)

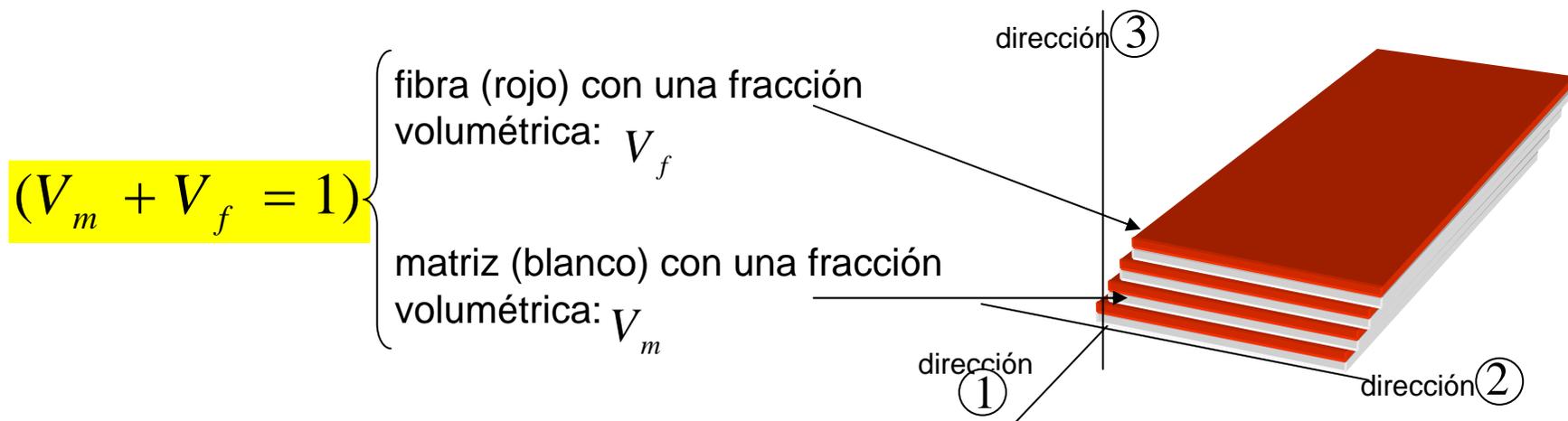
---

- puede ser complicado
- requiere considerar detalladamente la estructura y la simetría del compuesto
- **no hay un procedimiento general**
- afortunadamente **es posible acotar** inferior y superiormente el valor de la mayoría de las propiedades de utilidad práctica



# Materiales compuestos

- Por ejemplo, consideremos un material compuesto por láminas de dos materiales diferentes con una simetría concreta ( $\infty/\text{mm}$ ).
- Utilizaremos **fracciones volumétricas** de cada componente ("matriz" y "fibra") porque se pueden relacionar con dimensiones geométricas del compuesto:



# Materiales compuestos: propiedades orden 0

---

- La densidad del material compuesto a partir de las fracciones volumétricas de los componentes es:

$$\rho_c = V_m \rho_m + V_f \rho_f \quad \longrightarrow \quad \text{suma de masas}$$

- y a partir de las fracciones máxicas sería:

$$\frac{1}{\rho_c} = \frac{x_m}{\rho_m} + \frac{x_f}{\rho_f} \quad \longrightarrow \quad \text{suma de volúmenes}$$

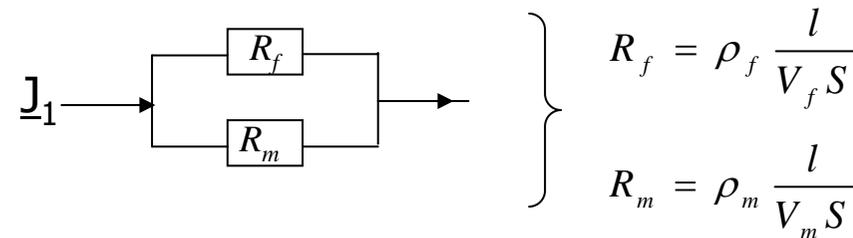
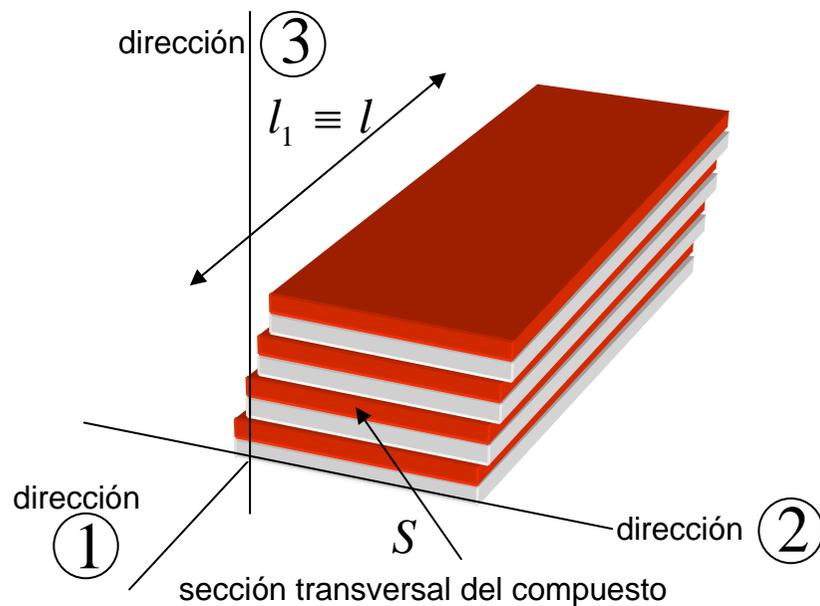
- se suman siempre propiedades extensivas (p. ej. la temperatura no es una propiedad extensiva)

# Materiales compuestos: propiedades orden 2

- Para propiedades de 2º orden (p. ej. **resistividad eléctrica**)

necesitamos determinar dos valores de la matriz  $\llbracket \underline{\rho}_c \rrbracket = \begin{pmatrix} \rho_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \rho_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \rho_{33} \end{pmatrix}$

- Si establecemos una densidad de corriente  $\underline{J}_1$  en dirección 1, los dos componentes estarán en paralelo:



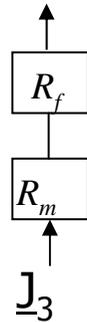
$$\frac{1}{R_c} = \frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_m} \Rightarrow \frac{1}{\rho_c \frac{l}{S}} = \frac{1}{\rho_f \frac{l}{V_f S}} + \frac{1}{\rho_m \frac{l}{V_m S}}$$

es decir:

$$\frac{1}{(\rho_c)_{11}} = \frac{1}{\rho_f} V_f + \frac{1}{\rho_m} V_m$$

# Materiales compuestos: propiedades orden 2

➤ En dirección 3 los dos componentes están en serie:



$$R_f = \rho_f \frac{V_f l}{S}$$

$$R_m = \rho_m \frac{V_m l}{S}$$

$$R_c = R_f + R_m \Rightarrow \rho_c \frac{l}{S} = \rho_f \frac{V_f l}{S} + \rho_m \frac{V_m l}{S}$$

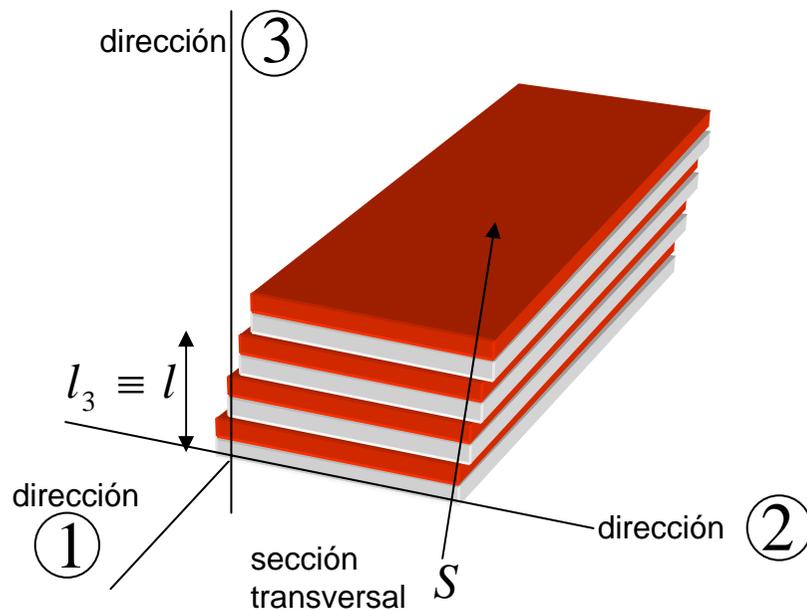
es decir:

$$(\rho_c)_{33} = \rho_f V_f + \rho_m V_m$$

Si la dirección 2 es equivalente a la 1, la resistividad eléctrica de este material compuesto, expresada en los ejes del dibujo, es:

$$\underline{\underline{[\rho_c]}} = \begin{pmatrix} (\rho_c)_{11} & 0 & 0 \\ 0 & (\rho_c)_{11} & 0 \\ 0 & 0 & (\rho_c)_{33} \end{pmatrix}$$

Y para esta propiedad de segundo orden, el material se comporta (y se diseña) igual que un material cristalino tetragonal.



# Materiales compuestos: propiedades orden 2

---

- En el **caso particular** anterior, si aplicamos una diferencia de potencial en **dirección 1 o 2**, tenemos una situación de **isogradiante** (matriz y fibra a igual diferencia de potencial; la intensidad de corriente a través de cada componente es diferente)
- Si aplicamos una diferencia de potencial en **dirección 3**, tenemos una situación de **isoflujo** (el flujo de electrones es el mismo a través de matriz y fibra; la diferencia de potencial a través de cada componente es diferente)
- En **isogradiante** se suman ponderadamente las conductividades eléctricas
- En **isoflujo** se suman ponderadamente las resistividades eléctricas



# Materiales compuestos: propiedades orden 2

Los conceptos de "isogradiante" e "isoflujo" se aplican de modo inmediato a otras propiedades de 2º orden (típicamente de transporte o de no-equilibrio)

**flujo generalizado** = - **coeficiente fenomenológico** x **gradiente**

$\underline{J}$	átomos/(m <sup>2</sup> ·s)	$\underline{D}$	m <sup>2</sup> /s	$\underline{\nabla C}$	(átomos/m <sup>3</sup> )/m
$\underline{q}$	W/m <sup>2</sup> , J/m <sup>2</sup> ·s	$\underline{k}$	W/m.K	$\underline{\nabla T}$	K/m
$\underline{J}$	A/m <sup>2</sup> , C/m <sup>2</sup> ·s	$\underline{\sigma}$	S.m	$\underline{\nabla V}$	V/m

$$\underline{J} = -\underline{D} \cdot \underline{\nabla C}$$

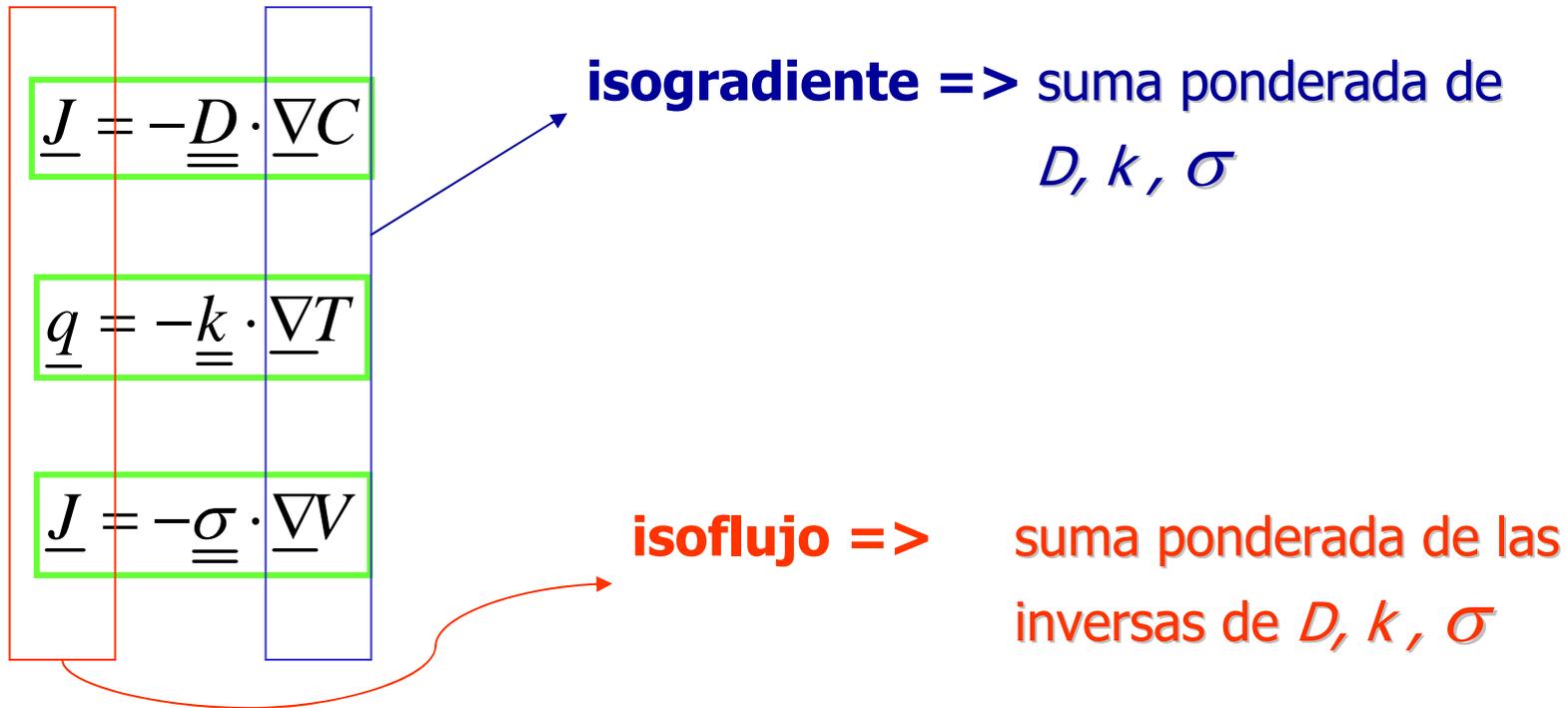
$$\underline{q} = -\underline{k} \cdot \underline{\nabla T}$$

$$\underline{J} = -\underline{\sigma} \cdot \underline{\nabla V}$$



# Materiales compuestos: propiedades orden 2

---



# Materiales compuestos

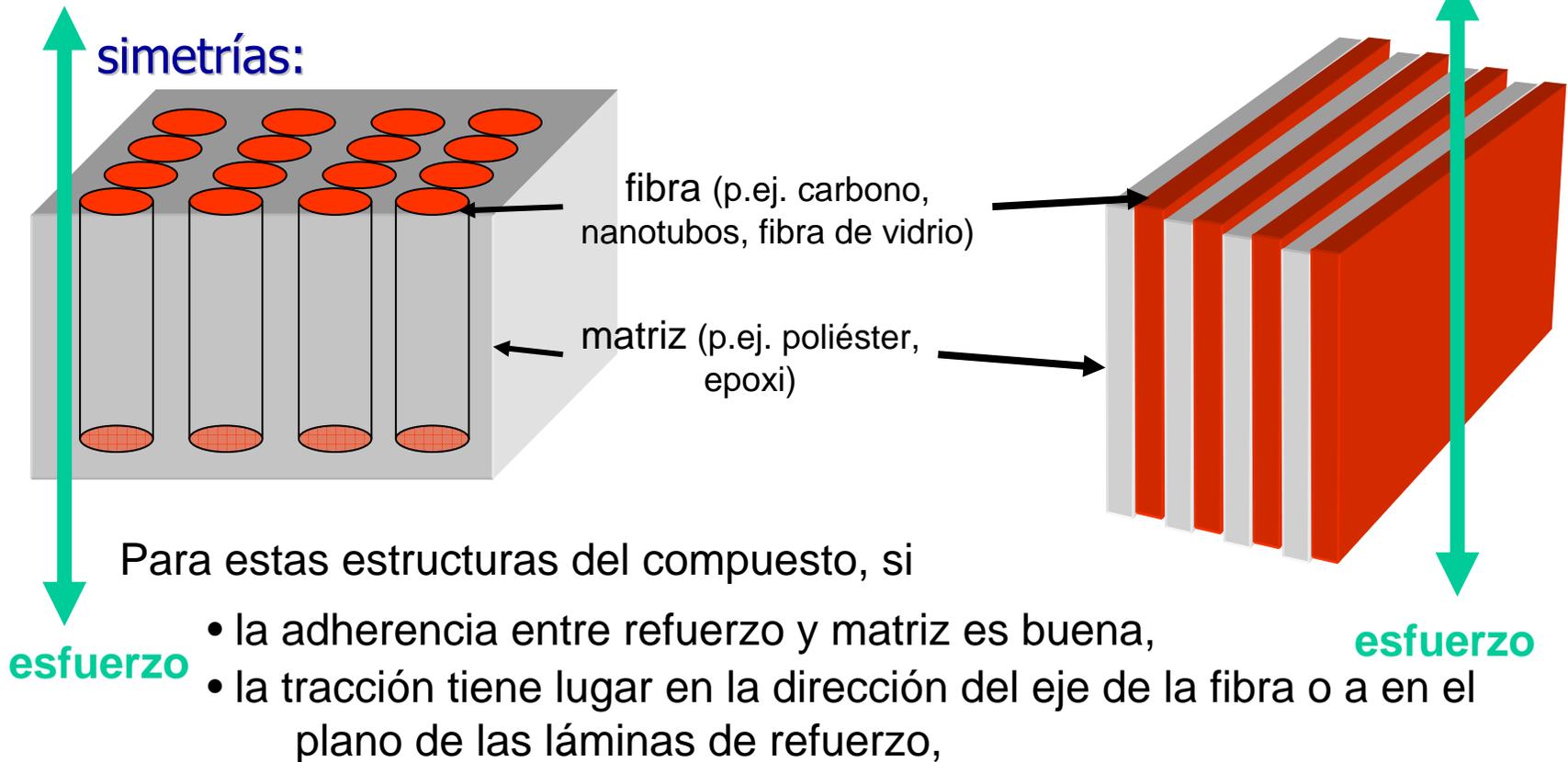
---

- Un análisis análogo se realiza para propiedades de 4º orden: complianza y rigidez elástica,
- en condiciones de isodeformación e isoefuerzo



# Materiales compuestos: propiedades orden 4

## ➤ Condiciones de isodeformación en materiales con distintas

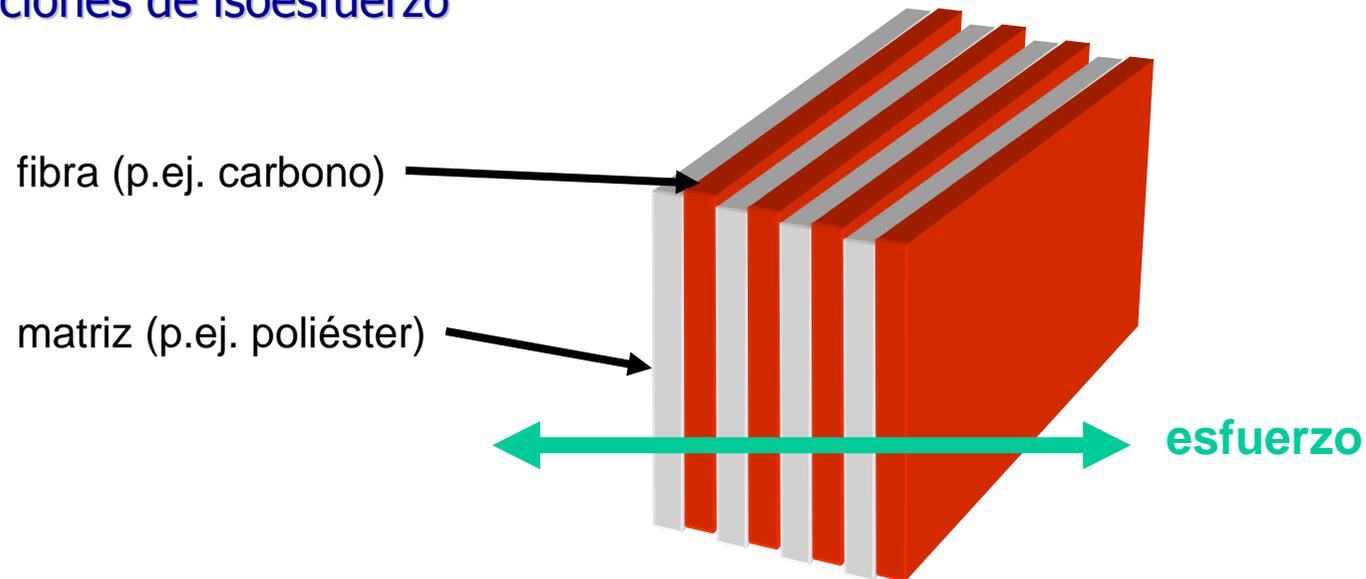


*matriz y fibra sufren la misma deformación pero diferentes esfuerzos (isodeformación)*

# Materiales compuestos: propiedades orden 4

---

## ➤ Condiciones de isoesfuerzo



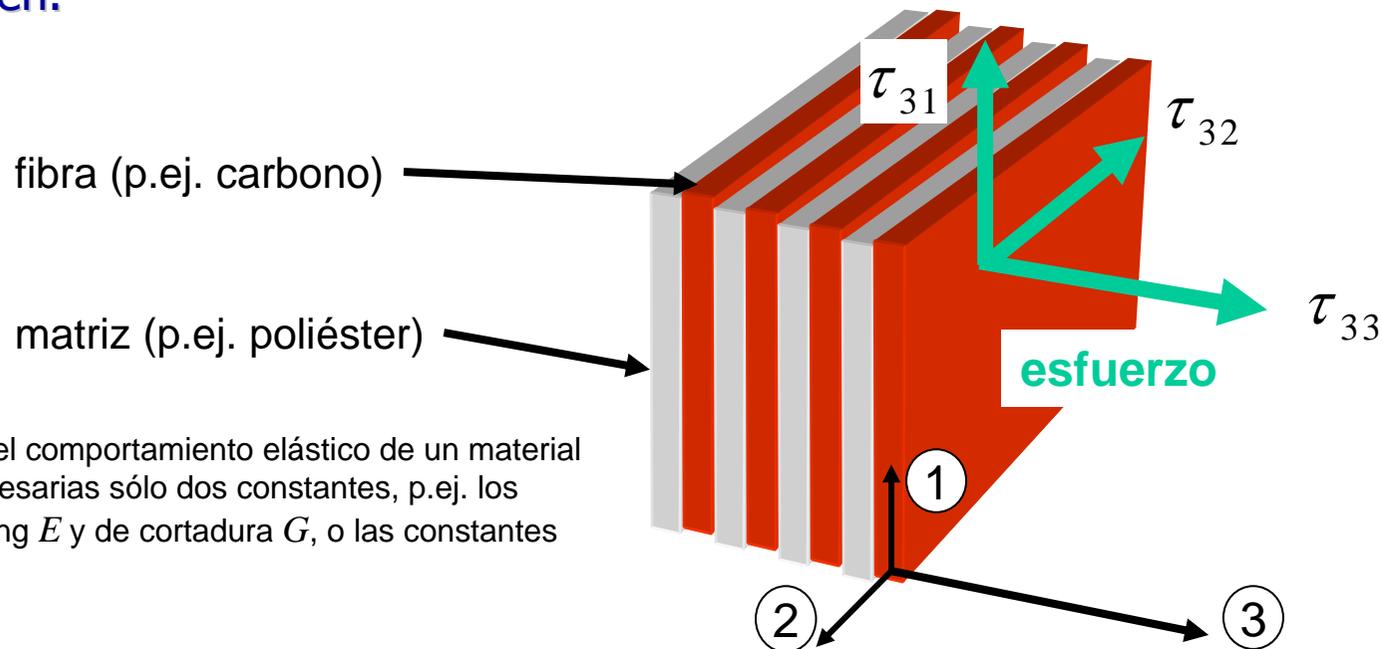
Para esta estructura del compuesto, si

- la adherencia entre refuerzo y matriz es buena,
- la tracción tiene lugar perpendicularmente al plano de las láminas de refuerzo,

*matriz y fibra sufren el mismo esfuerzo pero diferentes deformaciones*  
**(isoesfuerzo)**

# Materiales compuestos: propiedades orden 4

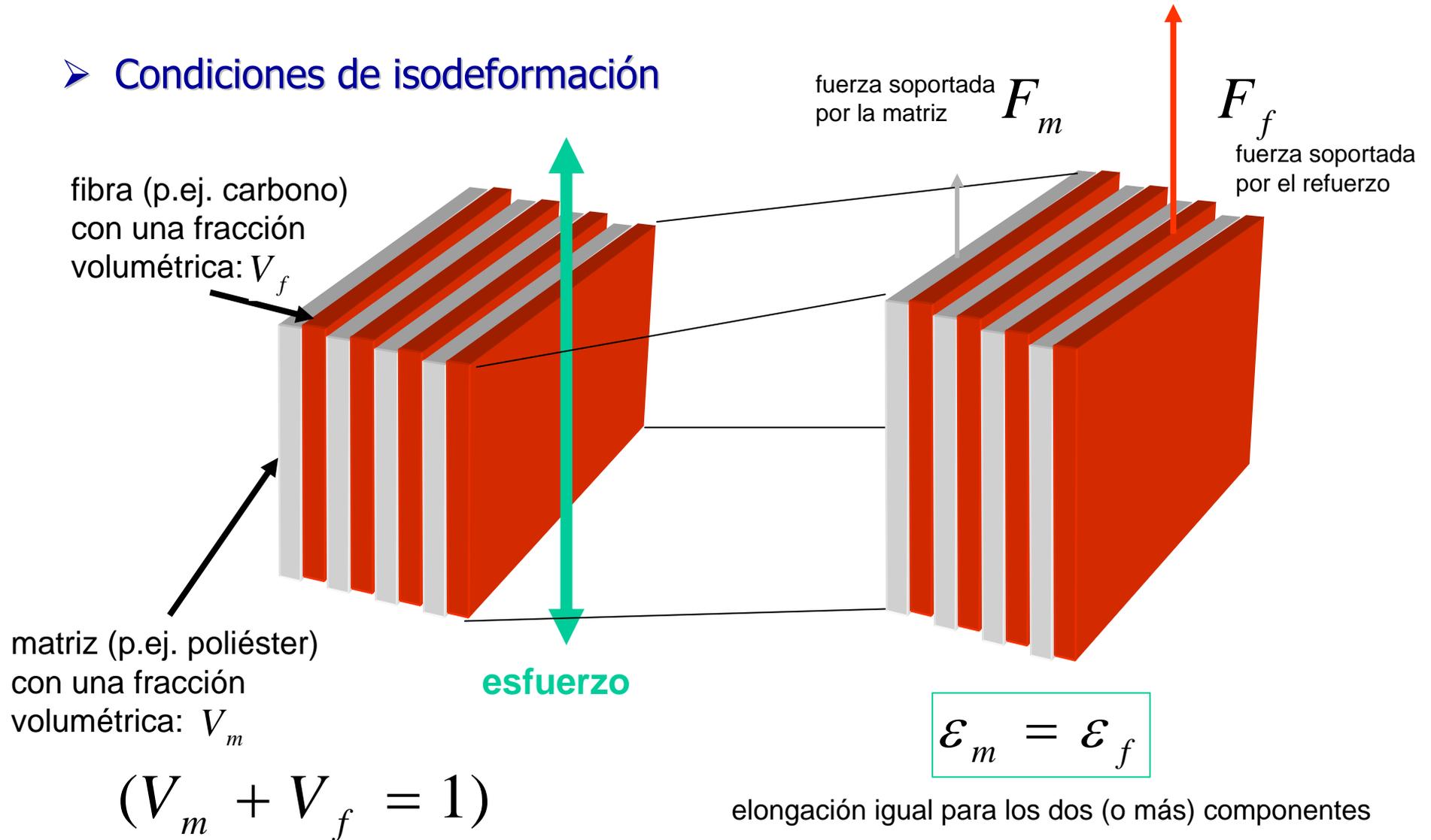
En el caso general, todas las componentes del esfuerzo y la deformación están activas (extensión, compresión, cortadura) y el comportamiento mecánico del compuesto no puede representarse por medio de dos parámetros (módulo de Young, módulo de cortadura<sup>1</sup>) sino por medio de la complianza o de la rigidez, que son propiedades tensoriales de 4º orden.



<sup>1</sup> para describir el comportamiento elástico de un material isótropo son necesarias sólo dos constantes, p.ej. los módulos de Young  $E$  y de cortadura  $G$ , o las constantes de Lamé  $\lambda$  y  $\mu$ .

# Materiales compuestos: propiedades orden 4

## ➤ Condiciones de isodeformación



# Materiales compuestos: propiedades orden 4

## ➤ Condiciones de isodeformación

$$\varepsilon_m = \varepsilon_f \Rightarrow \frac{\tau_m}{E_m} = \frac{\tau_f}{E_f} \Rightarrow \frac{F_m}{A_m E_m} = \frac{F_f}{A_f E_f} \Rightarrow \frac{F_m}{V_m E_m} = \frac{F_f}{V_f E_f}$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m \Rightarrow \frac{\tau_c}{E_c} = \frac{F_c}{1 \cdot E_c} = \frac{F_f + F_m}{E_c} = \frac{\varepsilon_c V_f E_f + \varepsilon_c V_m E_m}{E_c}$$

de donde:

$$E_c = V_f E_f + V_m E_m$$

es decir, **el módulo elástico del compuesto en isodeformación es la media ponderada de los módulos elásticos de las componentes individuales** (el factor de ponderación es la fracción volumétrica de los componentes).

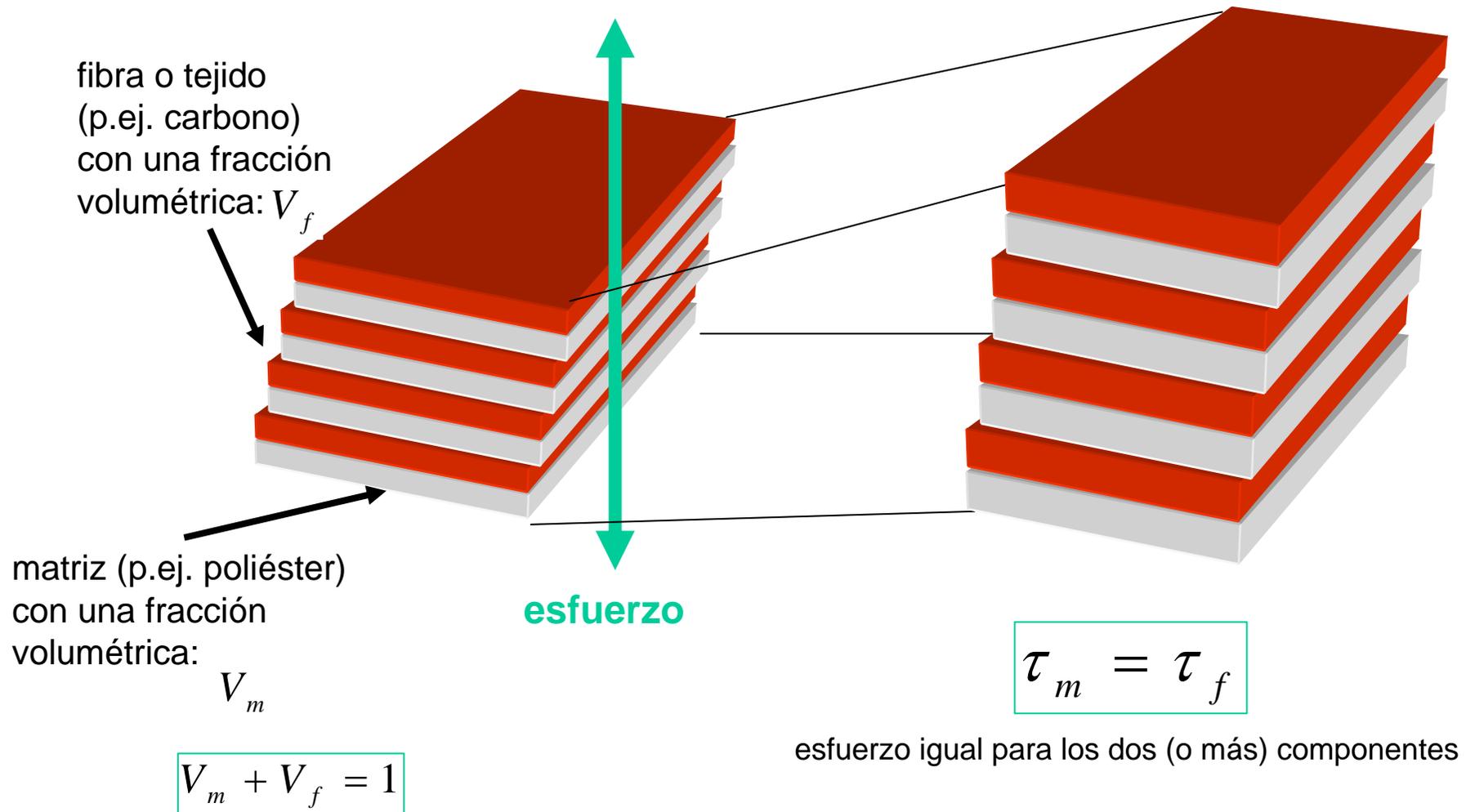
También puede expresarse como:

**la rigidez del conjunto es la suma ponderada de las rigideces de los componentes)**

**Regla de mezcla de Voigt**

# Materiales compuestos: propiedades orden 4

## ➤ Condiciones de isoesfuerzo



# Materiales compuestos: propiedades orden 4

- Condiciones de isoesfuerzo, razonando análogamente:

de donde:

$$\frac{1}{E_c} = V_f \frac{1}{E_f} + V_m \frac{1}{E_m}$$

Al inverso del módulo de Young se le denomina complianza elástica.

es decir, **la complianza elástica del compuesto en isoesfuerzo es la media ponderada de las complianzas elásticas de las componentes individuales** (el factor de ponderación es la fracción volumétrica de los componentes).

También puede expresarse como:

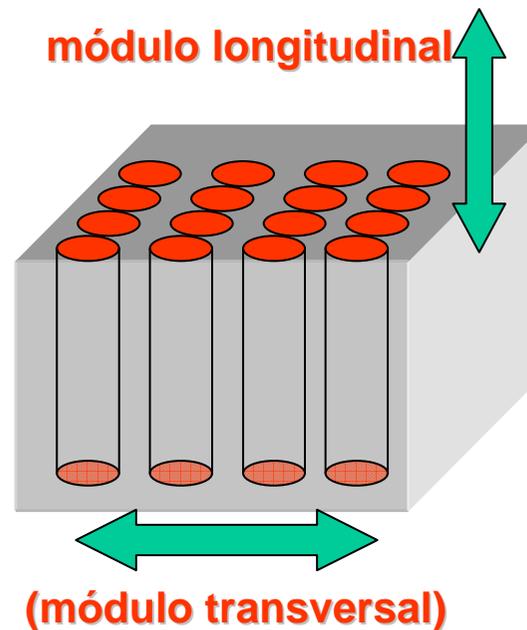
**la complianza del conjunto es la suma ponderada de las complianzas de los componentes)**

**Regla de mezcla de Reuss**

Nota: existe una analogía entre isodeformación e isogradiente , y entre isoesfuerzo e isoflujo

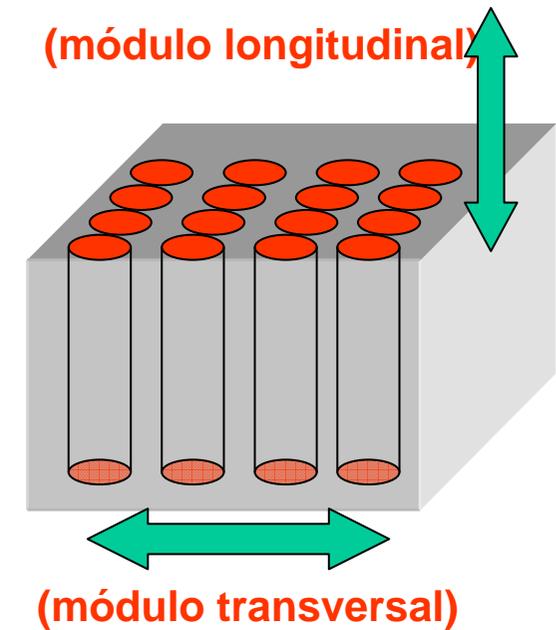
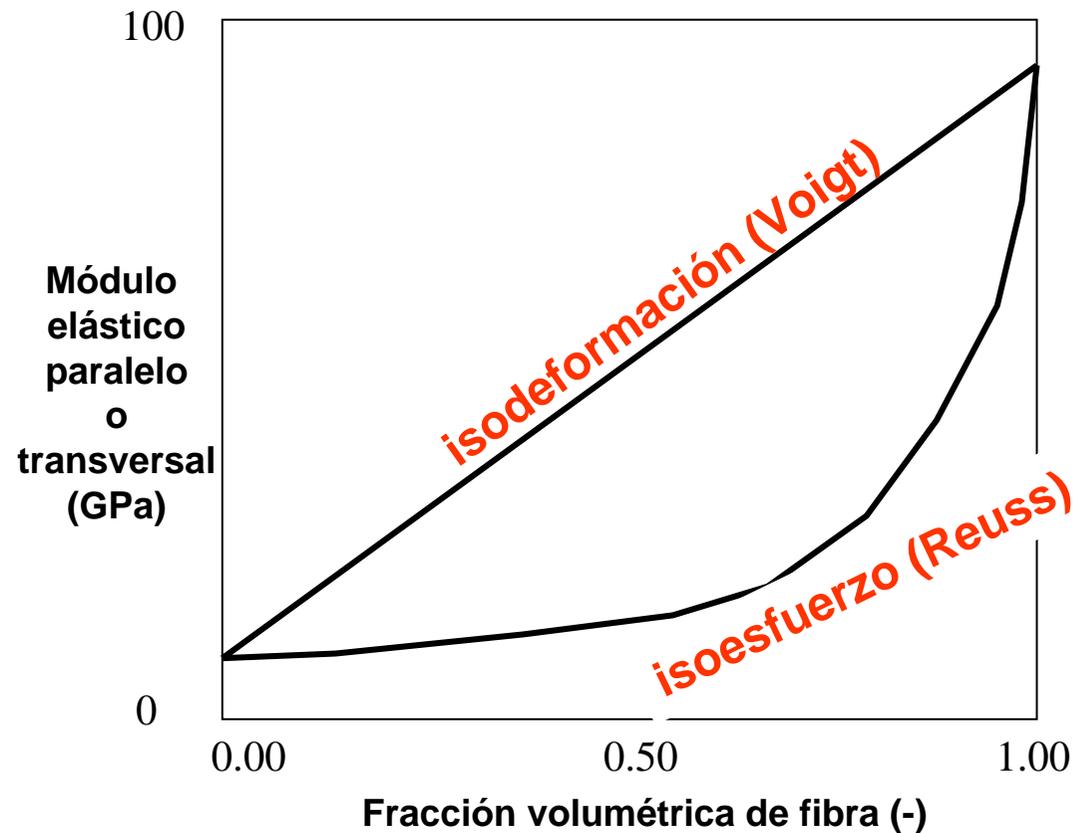
# Materiales compuestos

El mismo material tiene módulos elásticos diferentes en diferentes direcciones



# Materiales compuestos

Las reglas de mezcla de Voigt y Reuss representan cotas superior e inferior respectivamente para el módulo elástico de un compuesto:



# Materiales compuestos

---

Lo mismo ocurre con todas las propiedades del material que sean direccionales:

**El mismo material compuesto  
puede tener propiedades  
muy diferentes  
en diferentes direcciones**



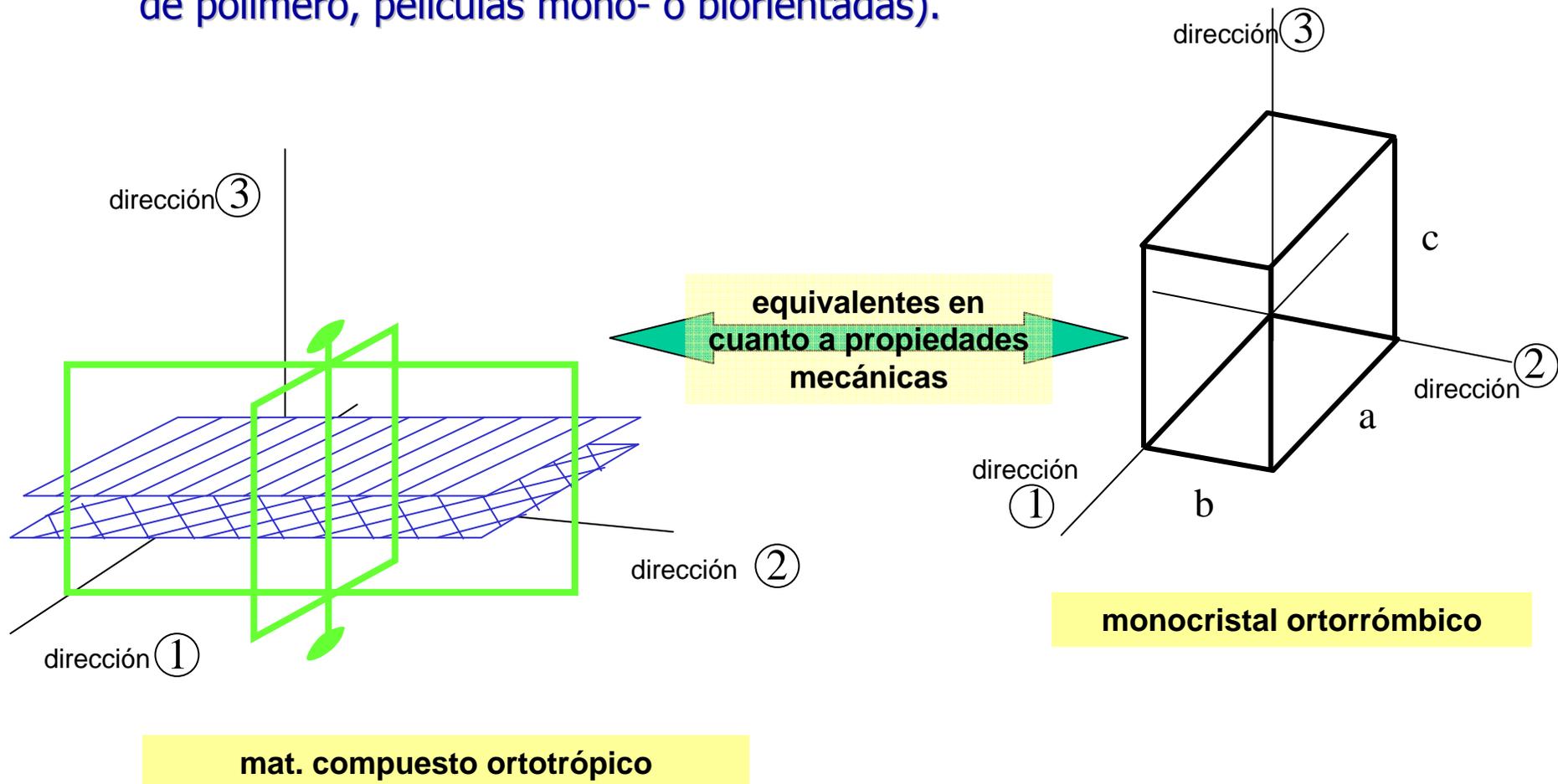
# Materiales compuestos

---

- La regla de mezcla a usar para determinar la propiedad del material compuesto en una dirección será tipo Voigt o bien tipo Reuss.
- **El tipo de regla de mezcla que se debe usar está por tanto determinado por la morfología del compuesto** (p.ej. orientación de las fibras o de las láminas).
- si no es aplicable ninguna de las dos, se utilizará la regla de Reuss-Voigt-Hill: la media aritmética entre los valores resultantes de aplicar Reuss y Voigt.

# Materiales compuestos

Las propiedades de materiales compuestos obedecen a las mismas reglas que se aplican a monocristales y materiales poliméricos orientados (p.ej. fibras estiradas de polímero, películas mono- o biorientadas).



# Materiales compuestos

---

- La mayoría de **las propiedades** de los materiales compuestos **dependen de la simetría estructural** del compuesto (es decir, de cómo está construido).
- **Según los elementos de simetría** del material compuesto, éste **se asigna a una clase cristalográfica** determinada.
- Y para todas las clases cristalográficas son conocidas las **estructuras de las matrices** que representan las propiedades del material  
(⇒ 02\_01\_02.pdf)
- Los métodos aplicables para materiales cerámicos y poliméricos orientados son directamente aplicables para los mat. compuestos.

