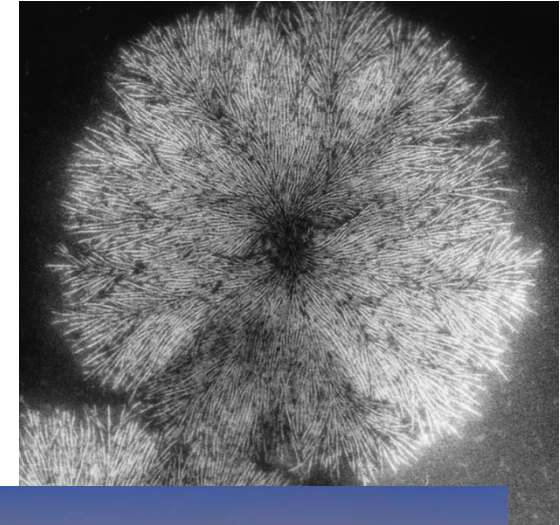


# ÍNDICE

## 12.1. Polímeros

## 12.2. Materiales compuestos



## 12.1- Polímeros

Los plásticos:

Se pueden moldear fácilmente

Están constituidos por macromoléculas

Moléculas de grandes dimensiones con composición y estructura química es simple.

**Polímeros:** moléculas lineales o ramificadas, formadas por la repetición de monómeros, se componen básicamente de C, H, O, N.

**Grado de polimerización:** número medio de veces que se repite el monómero.

Grados muy bajos, líquidos a temperatura ambiente (aceites sintéticos y ceras);

Al aumentar el G.P., productos sólidos a temperatura ambiente, aumentando su temperatura de “fusión”. Sólidos amorfos, no puede hablarse de punto de fusión, sino de un reblandecimiento progresivo con la temperatura.

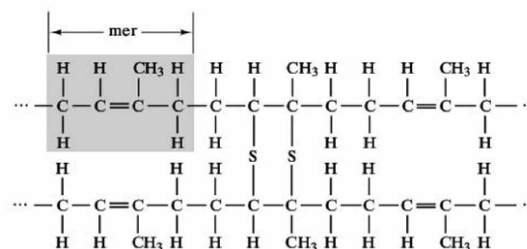
Polímeros más habituales  
( $5000 < M < 500000$  gr/mol), p.e. *polietileno*

Las propiedades de los polímeros se derivan de la fuerza de esos enlaces primarios, y de las fuerzas de atracción intermoleculares, mucho más débiles, pero reversibles. Al calentar el material estos enlaces se debilitan, permitiendo a las macromoléculas deslizarse unas sobre otras, dando lugar a fenómenos de fluencia y de flujo en fundido

✓ **Termoplásticos:** largas moléculas lineales o ramificadas, unidas entre sí *sólo por enlaces secundarios*. Como propiedad fundamental **funden** al calentarse.

✓ **Elastómeros:** cadenas con pocos puntos de entrecruzamiento. Como propiedad fundamental, tienen una **gran elasticidad**.

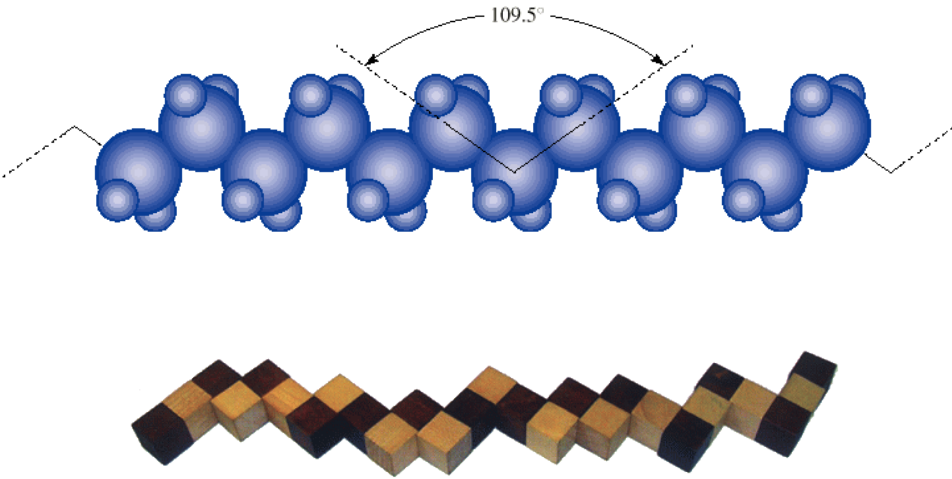
✓ **Termoestables:** elevado grado de reticulación, es decir gran número de enlaces primarios entre cadenas. Como propiedad fundamental, **no funden** al calentarse.



Caucho natural (poliisopreno) parcialmente reticulado. Los átomos de azufre se unen, uno o varios, a los dobles enlaces existentes, estableciendo anclajes entre las macromoléculas. Similar efecto provoca el oxígeno (envejecimiento del caucho).

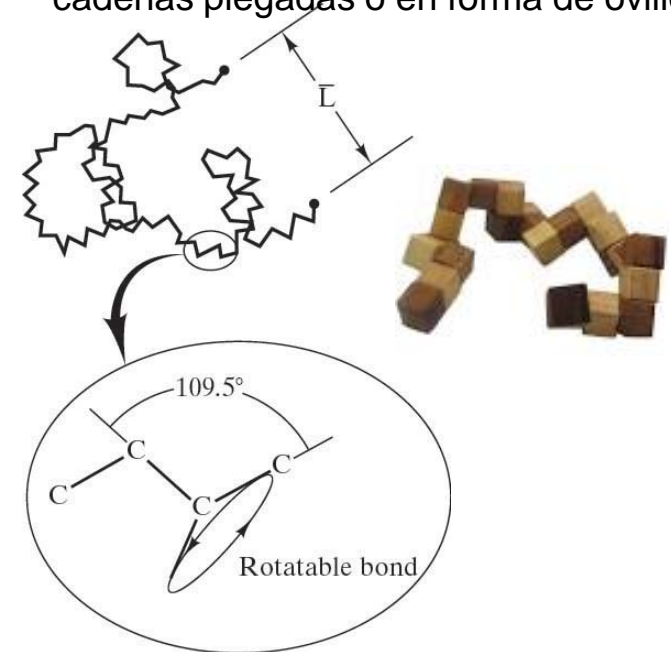
# 12.1- Polímeros

Las moléculas poliméricas no son rectas, debido a la forma configuración tetraédrica de los 4 enlaces simples del carbono:



Materiales poliméricos: estructura  
(UPV)

Además, el enlace simple puede rotar 360°, dando lugar a la formación de cadenas plegadas o en forma de ovillo.



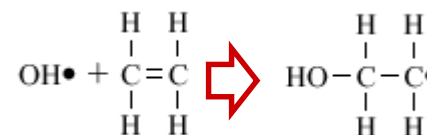
Representación esquemática del esqueleto estructural de la macromolécula. Los enlaces covalentes mantienen una distancia fija, pero permiten rotación, lo que permite infinitas configuraciones a la molécula. El tamaño medio de la molécula, o su distancia entre extremos, es proporcional a la raíz cuadrada del número de enlaces.

## 12.1- Polímeros. Síntesis de polímeros

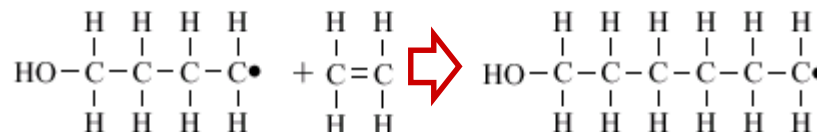
**Polimerización por adición:** adición de un monómero insaturado (con doble enlace) a la cadena de crecimiento.

Tiene 3 etapas:

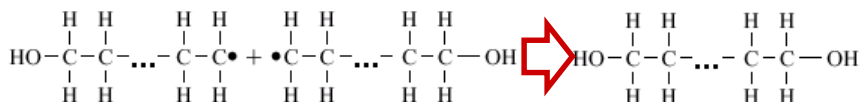
✓ **Iniciación:** se añade un iniciador (molécula inestable que produce radicales libres por descomposición)



✓ **Propagación:** la cadena crece:



✓ **Terminación:** unión de dos cadenas o con un iniciador:



Materiales poliméricos: polimerización

(UPV)

Poliolefinas y polímeros vinílicos que se sintetizan por adición.

Abreviatura	Nombre	Monómero
PE	Polietileno	$\text{CH}_2=\text{CH}_2$
PP	Polipropileno	$\text{CH}_2=\text{CH}(\text{CH}_3)$
PS	Poliestireno	$\text{CH}_2=\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5)$
PVC	Policloruro de vinilo	$\text{CH}_2=\text{CHCl}$
PAN	Poliacronitrilo	$\text{CH}_2=\text{CHCN}$
PMMA	Polimetacrilato de metilo	$\text{CH}_2=\text{C}-\text{COO}-\text{CH}_3$
BUNA	Polibutadieno	$\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}_2$
POM	Polióxido de metileno	$\text{CH}_2=\text{O}$

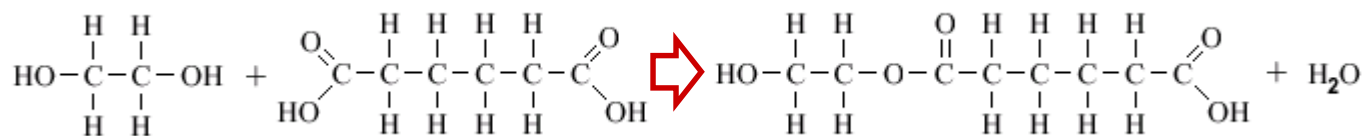
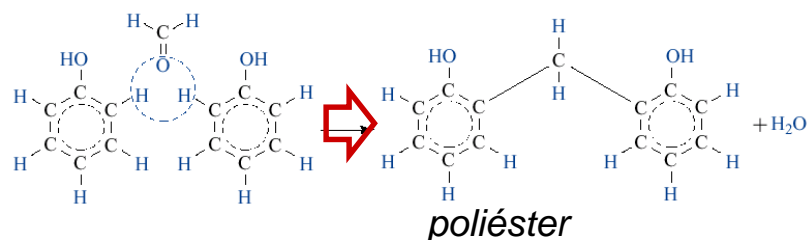
## 12.1- Polímeros. Síntesis de polímeros

### Polimerización por condensación:

reacciones químicas intermoleculares, generalmente entre diversas especies monoméricas y con la eliminación de un subproducto de bajo peso molecular.

Familias de polímeros que se sintetizan por condensación

fenolformaldehido



	Reactantes	Polímero
Dioles	$\text{HOH}_2\text{C}-\text{R}-\text{CH}_2\text{OH}$	Poliésteres
Diácidos	$\text{HOOC}-\text{R}'-\text{COOH}$	$-\text{R}-\text{CH}_2-\text{COO}-\text{R}'-$
Diaminas	$\text{H}_2\text{N}-\text{R}-\text{NH}_2$	Poliámidas
Diácidos	$\text{HOOC}-\text{R}'-\text{COOH}$	$-\text{R}-\text{NHCO}-\text{R}'-$
Dioles	$\text{HOH}_2\text{C}-\text{R}-\text{CH}_2\text{OH}$	Poliuretanos
Diisocianatos	$\text{OCN}-\text{R}'-\text{NCO}$	$-\text{R}-\text{CH}_2-\text{NHCOO}-\text{R}'-$

## 12.1- Polímeros. Peso molecular. Medida, influencia de propiedades

Peso molecular medio numérico:

$$\overline{M}_n = \sum x_i M_i$$

...donde  $x_i$  es la fracción numérica de cadenas con peso molecular  $M_i$ , es decir:

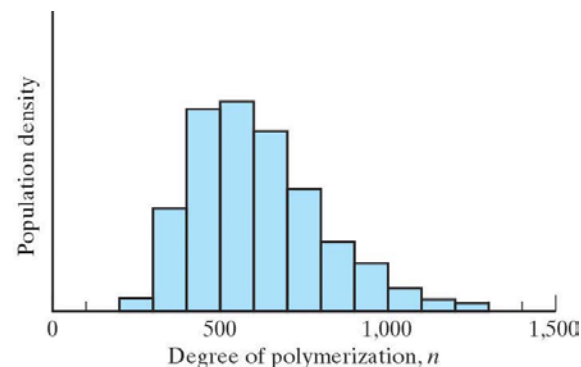
$$x_i = \frac{\text{número de cadenas con masa } M_i}{\text{número total de cadenas}}$$

Peso molecular medio másico:

$$\overline{M}_w = \sum w_i M_i$$

...donde  $w_i$  es la fracción másica de cadenas con peso molecular  $M_i$ , es decir:

$$w_i = \frac{\text{peso de las cadenas con masa } M_i}{\text{peso total de las cadenas}}$$



Distribución de tamaños moleculares en un polímero.

Grado de polimerización: (sería el número medio de unidades monoméricas repetidas en la cadena)

$$n_n = \frac{\overline{M}_n}{\overline{m}} \qquad n_w = \frac{\overline{M}_w}{\overline{m}}$$

...donde  $m$  es el peso molecular del monómero del cual se parte para obtener el polímero.

Es un parámetro muy importante en polímeros, pues **determina las propiedades** de los mismos para una familia determinada.

## 12.1- Polímeros. Peso molecular. Medida, influencia de propiedades

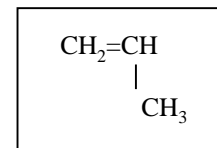
**Problema.** El análisis de una muestra de polipropileno (PP) muestra que existen cinco longitudes de cadenas, según los datos de la tabla que se muestra abajo. Determine:

- El peso molecular medio numérico.
- El peso molecular medio másico.
- El grado de polimerización medio numérico.
- El grado de polimerización medio másico.
- Dibuje esquemáticamente la estructura de una molécula de polipropileno (al menos 3 monómeros).

Datos: Pat. (C)= 12 g/mol, Pat. (H)=1 g/mol

El PP se obtiene por polimerización del monómero propileno o cuyo esquema aparece abajo

Núm. de cadenas	$M_r$ medio (gr/mol)					
150	3000					
200	6000					
300	9000					
200	12000					
150	15000					



## 12.1- Polímeros. Peso molecular. Medida, influencia de propiedades

**Solución a) y b)** Calculamos las fracciones numérica ( $x_i$ ) y másica ( $w_i$ ) de cada uno de los grupos de cadenas, columnas 3 y 5 (en la columna 4 calculamos el peso total de las cadenas de cada grupo ( $n \cdot Mr$ ) como paso intermedio para el  $w_i$ ):

$$x_i = \frac{\text{número de cadenas con masa } M_i}{\text{número total de cadenas}}$$

$$w_i = \frac{\text{peso de las cadenas con masa } M_i}{\text{peso total de las cadenas}}$$

Num.Cadenas (n)	Mr medio (Mr)	$x_i$	$n \cdot Mr$	$w_i$	$Mr \cdot x_i$	$Mr \cdot w_i$		
150	3000	0,15	450000	0,05	450	150		
200	6000	0,2	1200000	0,13	1200	800		
300	9000	0,3	2700000	0,30	2700	2700		
200	12000	0,2	2400000	0,27	2400	3200		
150	15000	0,15	2250000	0,25	2250	3750		
$\Sigma$	1000	45000	1	9000000	1	9000	10600	
					Mr Medio numérico	Mr Medio másico	(g/mol)	

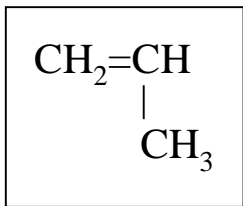
$$\overline{M}_n = \Sigma x_i M_i$$

$$\overline{M}_w = \Sigma w_i M_i$$



## 12.1- Polímeros. Peso molecular. Medida, influencia de propiedades

c) y d) A partir de los pesos moleculares medios numérico y másico podemos hallar los respectivos grados de polimerización, simplemente dividiendo por el peso molecular del monómero:



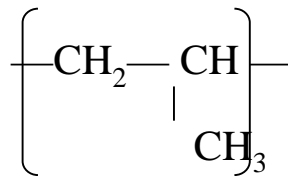
$$M_r = 3 \times 12 + 6 \times 1 = 42 \text{ g/mol}$$

$$n_n = \frac{\overline{M}_n}{\overline{m}} = \frac{9000}{42} = 214.3$$

$$n_w = \frac{\overline{M}_w}{\overline{m}} = \frac{10600}{42} = 252.4$$

Es decir, aproximadamente las cadenas tienen de 200 a 250 unidades monoméricas por término medio.

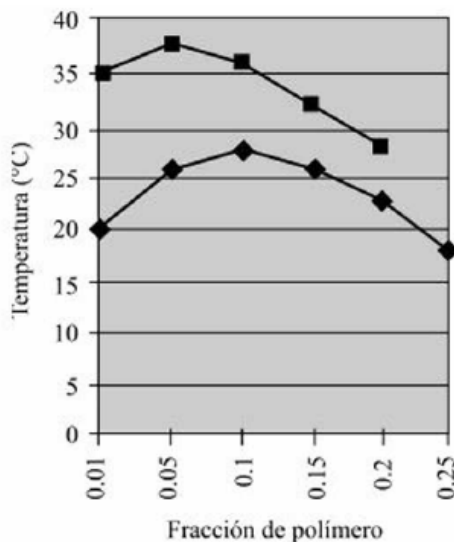
e) La polimerización progresa por el doble enlace, por lo tanto la molécula polimérica sería



## 12.1- Polímeros. Solubilidad y estabilidad química

Los polímeros no se ven afectados por el agua ni por ácidos o bases inorgánicas, por lo que tienen una notable estabilidad química; solamente los agentes fuertemente oxidantes provocan su degradación

Los *disolventes orgánicos* pueden actuar sobre los polímeros infiltrándose entre las macromoléculas. Con el disolvente adecuado, no existe una concentración de saturación al aumentar la cantidad de soluto. La temperatura facilita la disolución



No existe ningún disolvente universal para todos los plásticos. Una forma de cuantificar la interacción polímero-disolvente es mediante el parámetro de solubilidad.

Para termoplásticos amorfos, los disolventes adecuados son aquellos con parámetro de solubilidad próximo al del polímero. Los elastómeros y termoestables no se disuelven.

Parámetros de solubilidad de disolventes y polímeros comunes (cal/cm<sup>3</sup>)

Hexano	Tolueno	Benceno	THF	Cloruro de metilo	Etanol	Fenol	Agua
7.3	8.13	13.2	13.3	13.7	12.7	14.5	23.4
PTFE	PE	PP	SBR	PS	PVC	PA	PAN
6.3	8.0	7.13	8.5	13.1	13.6	13.6	15.4

Líneas de solubilidad de un mismo polímero en dos disolventes distintos. Por encima de la línea hay una fase única (solubilidad total). Se identifica la temperatura crítica.

## 12.1- Polímeros. Cristalinidad

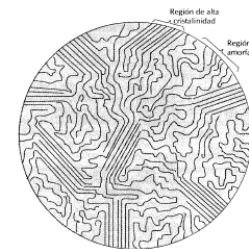
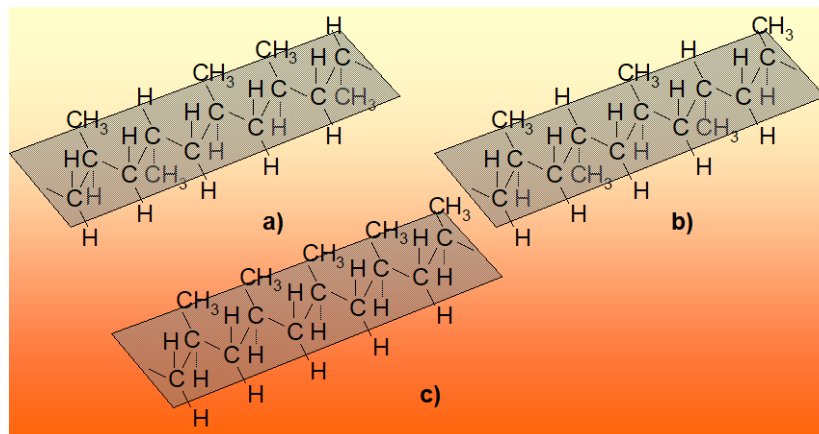
Ordenamiento regular de las cadenas poliméricas formando estructuras regulares: **cristales**.

Entre otros factores, el grado de cristalinidad de un polímero viene influenciado por la estereoisomería

- Isómero atáctico,
- isómero isotáctico, y
- isómero sindiotáctico.

*Isotáctico muestra mayor cristalinidad y por lo tanto mayores características resistentes*

Materiales poliméricos: cristalinidad  
(UPV)

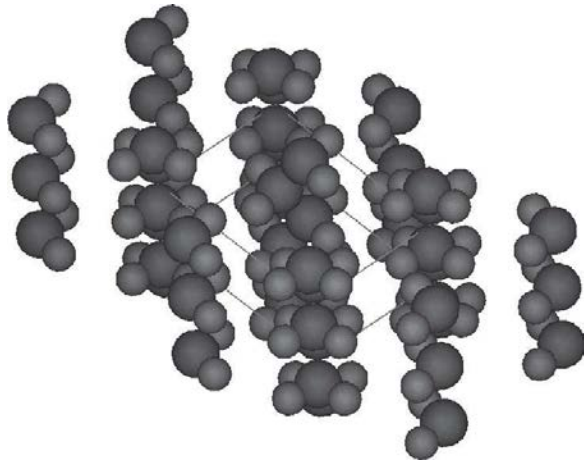


Modelo de micela con flecos de un polímero semicristalino, mostrando las regiones cristalina y amorfa

La cristalinidad se manifiesta como:

- ✓ **Ligero aumento de la densidad:** la mejor ordenación hace que para la misma masa se ocupe menos volumen
- ✓ **Pérdida de transparencia:** los cristales producen reflexiones en múltiples direcciones (color blanco)
- ✓ **Mayor resistencia a disolventes** (que el equivalente amorfo). Los disolventes atacan con mayor dificultad una estructura compacta.
- ✓ **Temperatura de fusión definida.**
- ✓ **Mejores propiedades mecánicas tras estiramiento**, ya que se produce un alineamiento de las cadenas.

## 12.1- Polímeros. Factores que influyen en la cristalinidad de un polímero



Estructura cristalina del polietileno, en sistema ortorrómbico. Las dimensiones de la celda unitaria son 0,255 nm x 0,4134 nm x 0,741 nm. Los puntos oscuros representan los átomos de carbono.

Factores influyentes en la cristalinidad.:

- ✓ **Simetría de la cadena:** los grupos laterales voluminosos dificultan la ordenación.
- ✓ **Intensidad de los enlaces secundarios:** fuertes enlaces secundarios, regularmente distanciados, favorecen la cristalinidad.
- ✓ **Flexibilidad de la cadena principal:** a menor flexibilidad, mayor tendencia a la cristalinidad.
- ✓ **Velocidad de enfriamiento,** que influye en el porcentaje de cristalinidad del sólido (a mayor velocidad, menor cristalinidad)

## 12.1- Polímeros. Comportamiento térmico

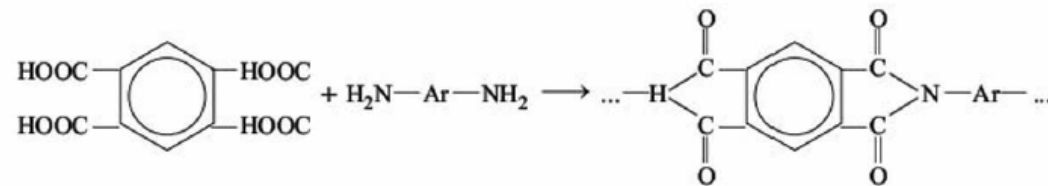
Todos los polímeros, termoplásticos y termoestables, experimentan a una cierta temperatura,  $T_g$  (**temperatura de transición vítrea**), con una notable disminución de su módulo elástico por encima de ella.

La temperatura de fusión es siempre superior a la temperatura vítrea (típicamente,  $T_{\text{fusión}} = 1,5 - 2 \text{ veces } T_g$ , expresadas ambas en K),

Si continúa aumentando la temperatura, se llega a la temperatura de descomposición, cuando la agitación térmica *rompe los enlaces primarios*, degradando el polímero de una manera irreversible; a diferencia de las fuerzas intermoleculares, los enlaces primarios no son regenerables.

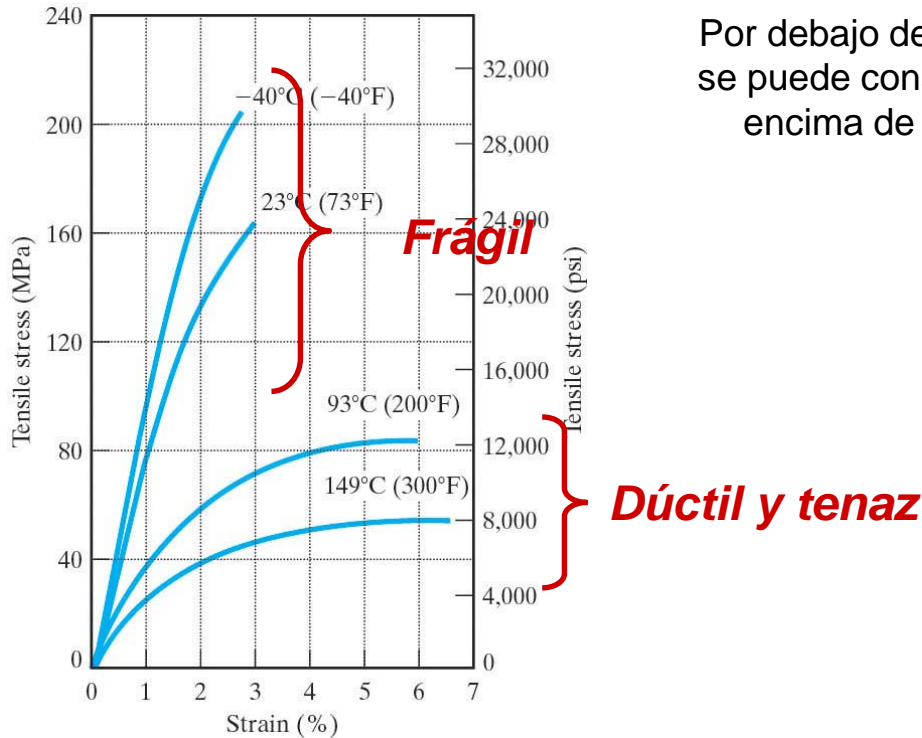
Temperatura de transición vítrea, fusión y descomposición de algunos termoplásticos.

°C	PE	NR	PP	PA 6	PET	PVC	PS	PMMA
$T_g$	-115	-73	-20	53	613	81	100	105
$T_f$	137	(28)	176	265	265	213	240	
$T_d$	406				280-320			200



Síntesis de poliimidas, a partir de tetrácidos con diaminas aromáticas. Es una de las familias de polímeros de alta temperatura más empleados. Siendo un termoplástico, su procesado se dificulta porque su temperatura de reblandecimiento supera a la de descomposición.

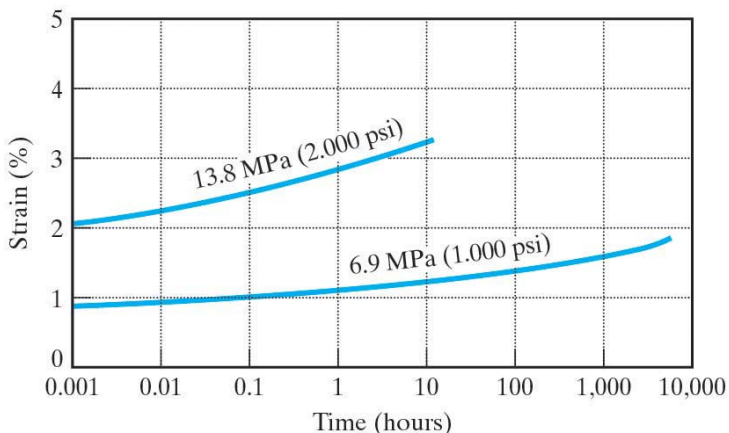
## 12.1- Polímeros. Comportamiento mecánico de los polímeros



Por debajo de la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) el polímero se puede considerar como resistente pero frágil mientras que por encima de ésta, el polímero presenta una gran plasticidad y tenacidad

Gráfica tensión-deformación de un poliéster a diferentes temperaturas, por encima y debajo de su  $T_g = 70\text{ }^\circ\text{C}$ .

## 12.1- Polímeros. Comportamiento mecánico de los polímeros

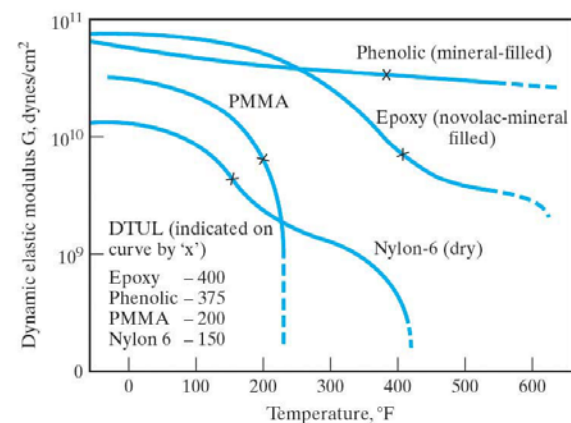


Curvas de fluencia de un Nylon 66, a 60°C y 50 por ciento HR.

En los *termoplásticos amorfos*, la fluencia a temperaturas superiores a su transición vítrea es tan exagerada que imposibilita su uso en esas condiciones.

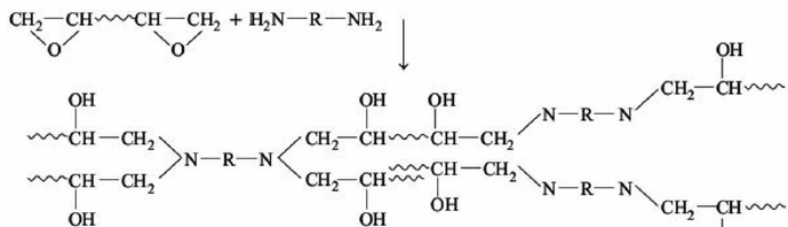
En los *termoplásticos cristalinos*, los segmentos de macromolécula que están dentro de la zona cristalina tienen más impedido su movimiento, lo que restringe su fluencia.

Los *plásticos termoestables* tienen su fluencia restringida por los enlaces primarios de reticulación.

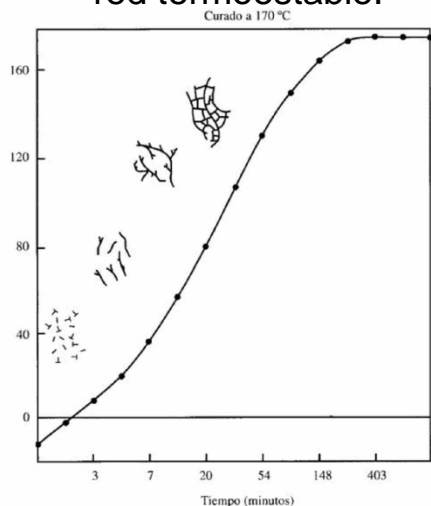


Cambio del **módulo elástico** con la **temperatura** en polímeros termoestables, termoplásticos amorfos (PMMA) y termoplásticos cristalinos.

# 12.1- Polímeros. La reutilización de termoestables y elastómeros

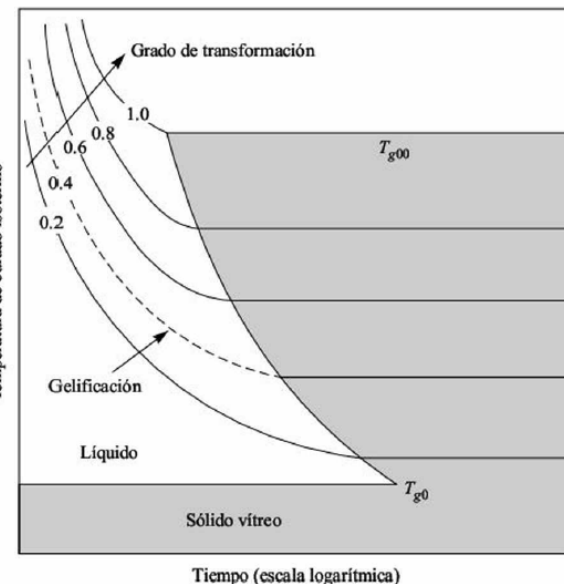


Transformaciones químicas de reticulación de resinas epoxy con diaminas, que generan una red termoestable.

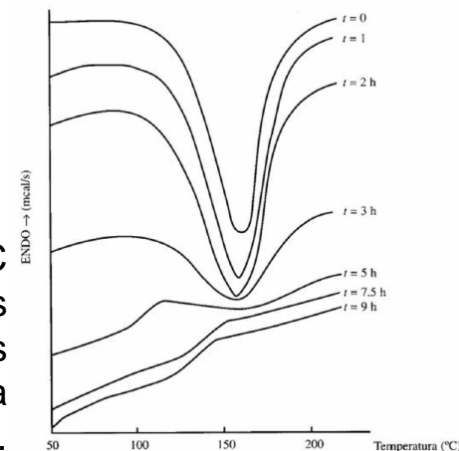


Transformaciones físicas durante la reticulación. Se esquematiza el crecimiento de cadenas, acompañado de un crecimiento en  $T_g$ , alcanzándose la gelificación hacia el 50 por ciento de reacción.

Diagrama Temperatura-Tiempo. Transformación de una resina termoestable, sometida a curados isoterms. El área sombreada representa una zona de estado vítreo, con reacción congelada.



Termogramas obtenidos en DSC dinámico (10°C/mínimo), de muestras de resina epoxy, sometidas previamente a curado isoterma a 160°C.





## 12.1- Polímeros. Plásticos comerciales

Los polímeros en estado puro son raramente empleados. Necesitan aditivos para tener utilidad industrial.

*Aditivo: sustancia que mejore las propiedades físicas, químicas o mecánicas de un polímero, o que reduzca su coste.*

*Aditivos suelen ser moléculas orgánicas, con una compatibilidad parcial con el polímero, o simplemente, partículas sólidas de relleno (cargas).*

*Los aditivos se clasifican en:*

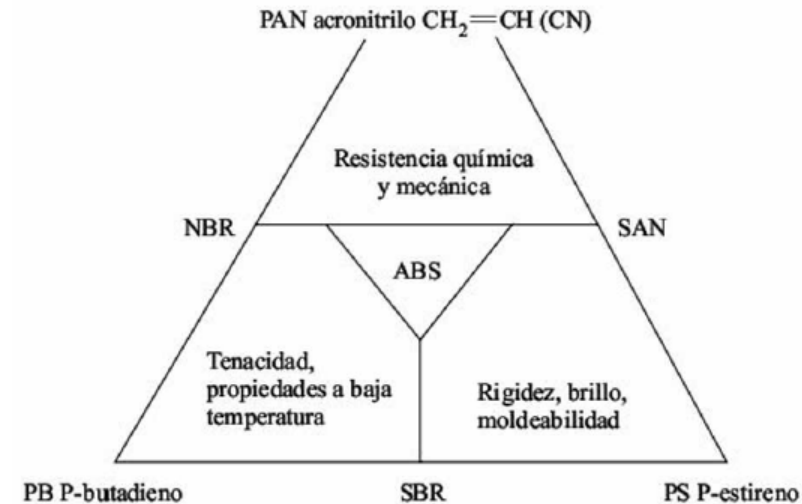
*Aditivos ayudantes del procesado.*

— Lubricantes para facilitar el flujo de plástico fundido, evitando su adherencia al molde (lubricantes internos y externos, respectivamente).

— Estabilizantes para evitar la degradación térmica y oxidativa del polímero durante el proceso de transformación, durante el cual se ve sometido a altas temperaturas.

*Aditivos modificadores de propiedades del producto.*

Colorantes, plastificantes, ignífugos, antiestáticos, rellenos o cargas, etc

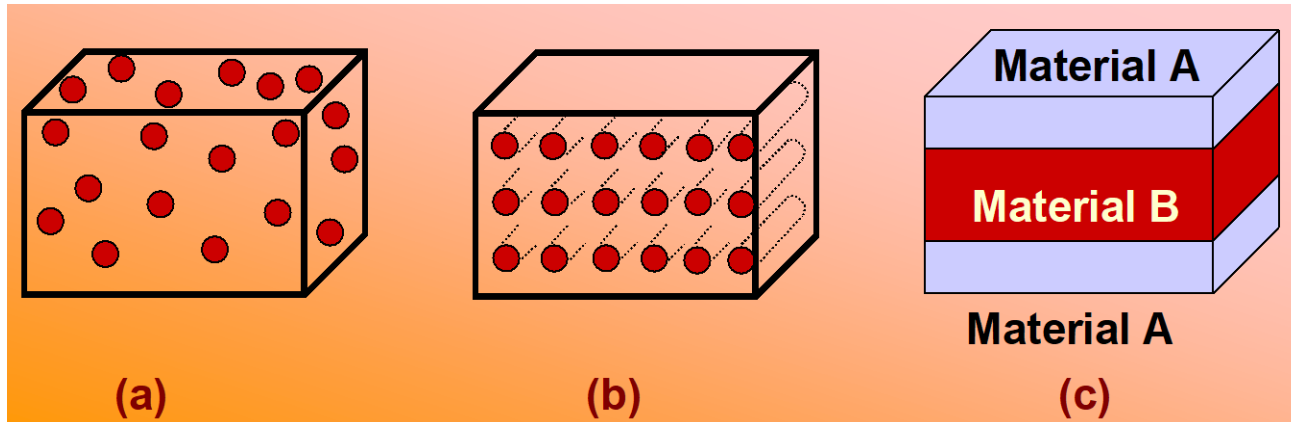


Copolímeros binarios y ternarios, con las propiedades más significativas que aporta cada monómero.

# 12.2- Materiales compuestos. Clasificación y selección

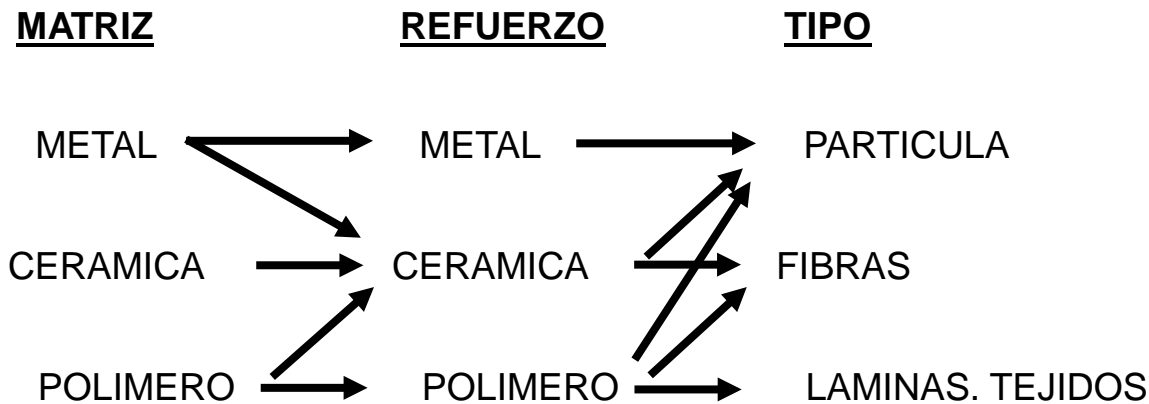
COMBINAN LAS PROPIEDADES DE LOS COMPONENTES.

TRES TIPOS: SEGUN COMBINACION ESPACIAL



Comparación de los tres tipos de materiales compuestos. a) Con partículas. b) Con fibras. c) Laminares.

POSIBLES COMPUESTOS



[Materiales compuestos: tipos y clasificación](#)  
(UPV)

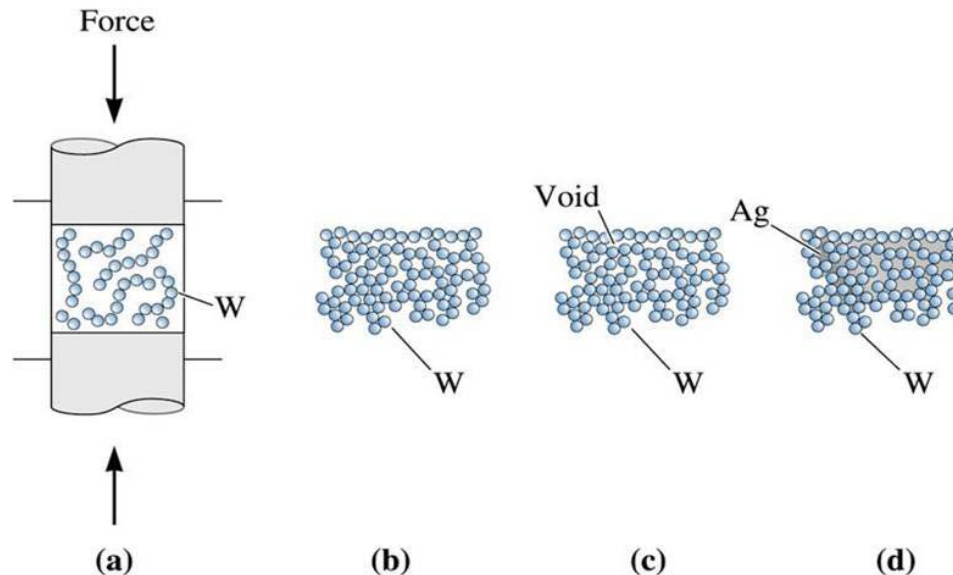
## 12.2- Materiales compuestos. Clasificación y selección

**Problema:** Se produce un material compuesto plata-wolframio para contactos eléctricos fabricando en primer término un compacto de wolframio poroso por metalurgia de polvos y, a continuación, infiltrando plata pura en los poros. La densidad del compacto del wolframio antes de la infiltración es de  $14,5 \text{ g/cm}^3$ . Calcule la fracción volumétrica de porosidad y el porcentaje final en peso de la plata en el compuesto después de la infiltración.

Datos:  $\rho_W = 19,3 \text{ g/cm}^3$   $\rho_{Ag} = 10,94 \text{ g/cm}^3$

*Nota: Se puede suponer que la densidad del poro es cero. Y que todos los poros están abiertos o interconectados.*

*Un esquema del proceso es el siguiente:*



## 12.2- Materiales compuestos. Clasificación y selección

**Solución** A partir de la regla de las mezclas, calculamos primeramente la fracción de poros en el compacto de W (supuesta la densidad de los poros nula):

$$\begin{aligned}\rho_c &= f_W \rho_W + f_{\text{pore}} \rho_{\text{pore}} \\ 14.5 &= f_W (19.3) + f_{\text{pore}} (0) \\ f_W &= 0.75 \\ f_{\text{pore}} &= 1 - 0.75 = 0.25\end{aligned}$$

Es decir un 25% de porosidad

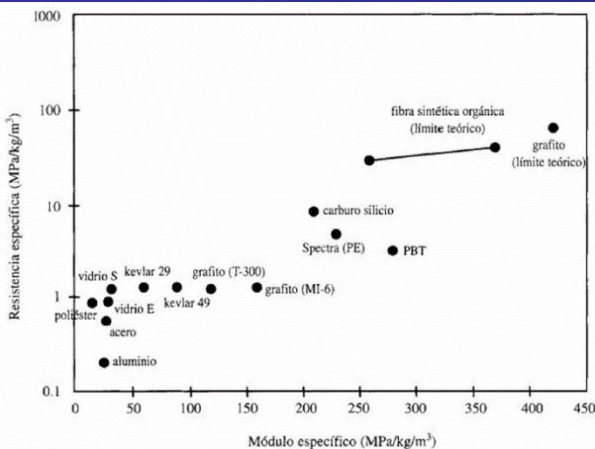
Al infiltrar esa porosidad con Ag (supuesto que se rellenan completamente) coinciden precisamente la fracción volumétrica de los poros con la de la plata, por lo que la densidad final del compuesto vendría dada otra vez por la regla de las mezclas, y la fracción en peso de Ag resultaría:

$$f_{\text{Ag}} = f_{\text{pore}} = 0.25$$

$$\rho_c = f_{\text{Ag}} \rho_{\text{Ag}} + f_w \rho_w = 0.25 \times 10.94 + 0.75 \times 19.3 = 17.1 \text{ g / cm}^3$$

$$\text{wt}\% \text{ Ag} = \frac{(0.25)(10.49)}{(0.25)(10.49) + (0.75)(19.3)} \times 100 = 15.3\%$$

# 12.2- Materiales compuestos. Función de la fibra en el material compuesto



Módulo elástico y resistencia mecánica de distintos materiales, en relación a su densidad. Las fibras aventajan a los restantes materiales, acercándose al límite teórico.

MEJORAN:

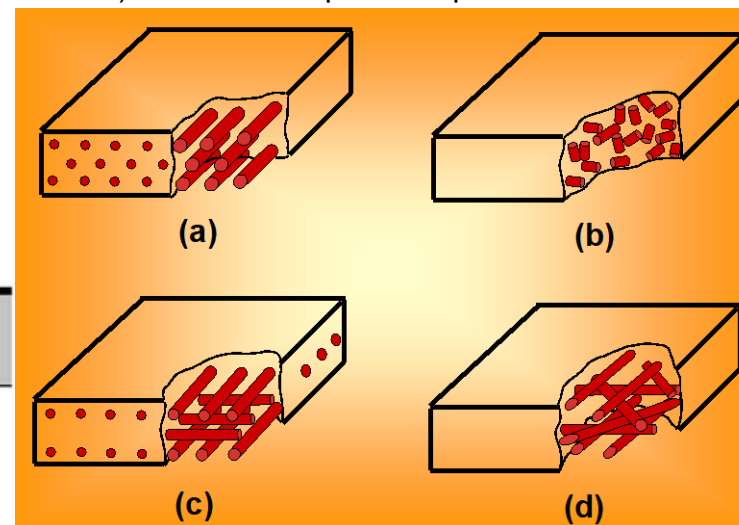
- MODULO DE ELASTICIDAD (RIGIDEZ)
- CARGA DE ROTURA
- RELACION RESISTENCIA / PESO

COMBINAN:

- MATRIZ: BLANDA, BAJA RIGIDEZ
- FIBRAS: FRAGIL, ALTA RIGIDEZ

### TIPOS DE FIBRA

- a) Fibras continuas unidireccionales.
- b) Fibras discontinuas orientadas al azar.
- c) Fibras ortogonales o tejidos.
- d) Fibras en capas múltiples.



Fibras de refuerzo para materiales compuestos.  
Propiedades aproximadas.

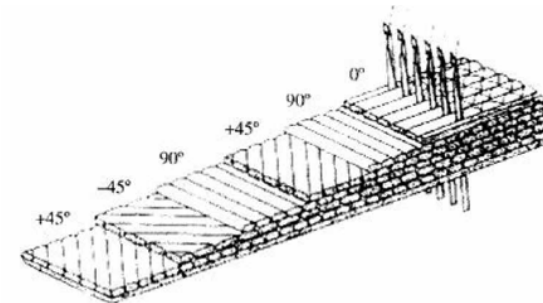
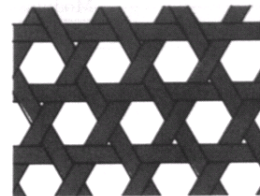
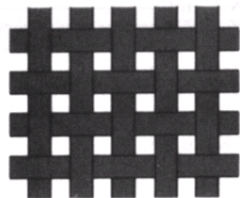
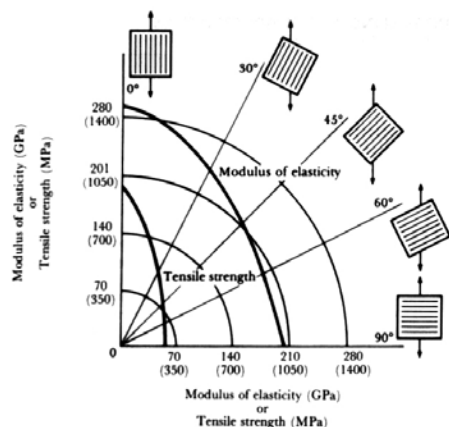
Datos año 1997	Vidrio E	Vidrio S	Carbono HS	Carbono UHM	Aramiditas	UHPE
Coste (ptas./kg)	300	3000	5000	50 000	5000	20 000
E (Gpa)	72	82	200	600	140	120
S (Gpa)	1.5	3.0	4-6	2	3	2.6
Densidad real	2.54	2.48	1.7	1.85	1.5	0.97



# 12.2- Materiales compuestos. Función de la fibra en el material compuesto

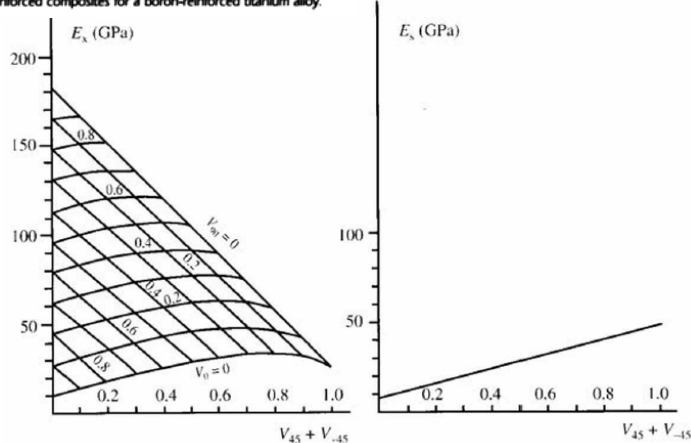
Si los compuestos están reforzados con fibras, las propiedades mecánicas en la dirección de las mismas serán mayores que en la dirección transversal.

Este hecho confiere a estos compuestos un **comportamiento anisótropo**.



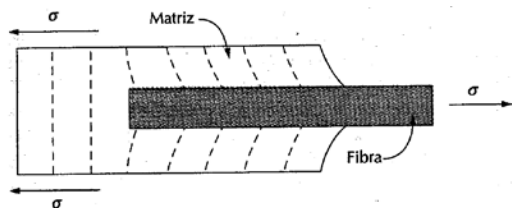
Ejemplo de un laminado, con secuencia de apilamiento (+ 45, -45, 90, 45, 90, 0 ). El cosido entre capas que se representa en la figura no es frecuente en la actualidad, y tiene por objeto mejorar la resistencia interlaminar.

FIGURE 16-13 The effect of fiber orientation with respect to the applied stress for fiber-reinforced composites for a boron-reinforced titanium alloy.



Ábaco para obtener el módulo elástico en laminados de carbono/epoxy, en función del porcentaje de láminas colocadas a 0, 90 y + / - 45 grados.

# 12.2- Materiales compuestos. Función de la fibra en el material compuesto

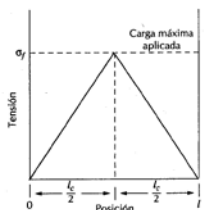


Al aplicar un esfuerzo de tracción, la unión fibra-matriz cesa en los extremos de la fibra y en la matriz se genera un patrón de deformación diferente.

Se define la **LONGITUD CRÍTICA DE FIBRA ( $l_c$ )**:

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

$d$  = diámetro de la fibra  
 $\sigma_f$  = resistencia a tracción de la fibra  
 $\tau_c$  = resistencia a cizalladura de la matriz  
 (unión matriz - fibra)

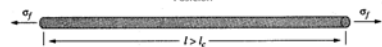
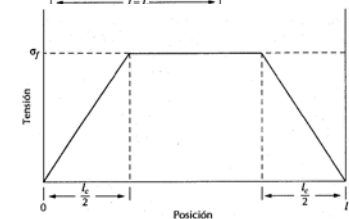


$l_c = (20 \div 150)d \approx 1\text{mm}$  para la mayoría de fibras de vidrio (FV) y carbono.

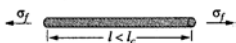
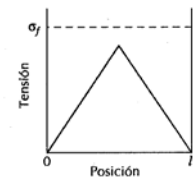


Continuas:  $l > 15 l_c$  ( $l \gg l_c$ )

Cortas (discontinuas):  $l < 15 l_c$



Si  $l < l_c$ : no existe transferencia del esfuerzo de la matriz a la pieza significativo. Actúa como un refuerzo por partículas.

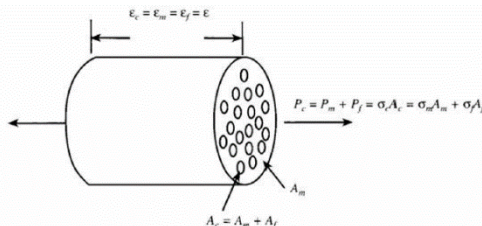


*Propiedades mecánicas de laminados unidireccionales (volumen de fibra = 60 por ciento).*

Fibra	Carbono alta resistencia	Carbono módulo intermedio	Carbono alta resistencia	Bono	Vidrio E	Aramida	
Matriz	Epoxi	Epoxi	Termoplástica	Epoxi	Epoxi	Epoxi	
Módulo elástico longitudinal	140 ÷ 180	205	135	205	40	75	Gpa
Módulo elástico transversal	9 ÷ 10.5	11	9	18.5	8.5	5.5	GPa
Módulo de Poisson	0.28 ÷ 0.30	0.32	0.28	0.23	0.26	0.34	—
Módulo elástico en cortadura	≈ 7.1	8.5	5.1	5.6	4.1	2.3	GPa
Resistencia longitudinal tracción	≈ 1500	3500	2150	1250	1050	1400	MPa
Resistencia longitud. compresión	≈ 1500	1550	1100	2500	610	235	MPa
Resistencia transversal tracción	40 ÷ 50	55	80	60	30	15	MPa
Resistencia transver. compresión	200 ÷ 250	150	200	200	120	55	MPa
Resistencia en cortadura	≈ 70	100	160	65	70	35	MPa

# 12.2- Materiales compuestos. Función de la matriz en el material compuesto

Esquema de un material compuesto unidireccional, sometido a tracción paralela a las fibras. El reparto de la carga total soportada está indicado en la figura



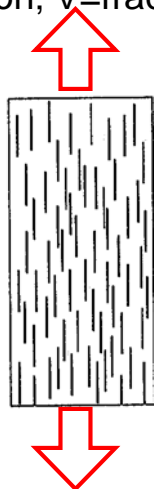
Materiales compuestos: Cálculos con fibra continua y alineada  
(UPV)

Fibras alineadas ⇒ anisotropía de propiedades ⇒ Tenemos que considerar en qué dirección se realiza el esfuerzo o se aplica la carga.

**Dirección longitudinal de la carga** (en la dirección de las fibras), estado de **isodeformación**:

- $F_c = F_m + F_f \Rightarrow F =$  fuerza;  $c =$  compuesto,  $m =$  matriz,  $f =$  fibra
- $\sigma_c = \sigma_m V_m + \sigma_f V_f \Rightarrow \sigma =$  tensión;  $V =$  fracción de volumen (%)
- $V_m + V_f = 1$

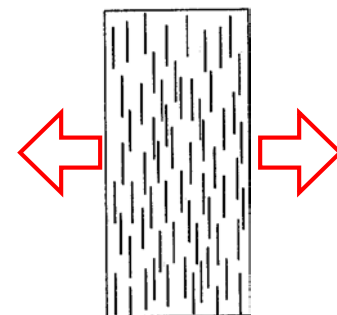
$$E_c = E_m V_m + E_f V_f$$



**Dirección transversal de la carga** (perpendicular al alineamiento de las fibras), estado de **isotensión**:

- $\sigma = \sigma_c = \sigma_m = \sigma_f \Rightarrow \sigma =$  tensión;  $c =$  compuesto,  $m =$  matriz,  $f =$  fibra
- $\epsilon_c = \epsilon_m V_m + \epsilon_f V_f \Rightarrow \epsilon =$  deformación;  $V =$  fracción de volumen (%)
- $V_m + V_f = 1$

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





## 12.2- Materiales compuestos. Función de la matriz en el material compuesto

**Problema:** Se desea realizar un componente con un material compuesto de matriz polimérica. Para ello se utilizan fibras de carbono continuas y alineadas en una matriz epoxi. Las propiedades de fibra y matriz se dan a continuación:

	Tensión de rotura $\sigma_m$ (MPa)	Módulo elástico E (GPa)	Densidad $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
Fibra de Carbono (HM)	2800	280	1,5
Resina Epoxi	50	2,5	1,2

Siendo el contenido de refuerzo del 30% en volumen, calcula:

- La densidad compuesto
- El módulo en la dirección de las fibras.
- La deformación del compuesto cuando esté sometido a una tensión de 100 MPa en la dirección de las fibras
- El módulo en la dirección perpendicular a las fibras
- ¿Qué tensión están soportando las fibras? ¿Cuál es la tensión en la matriz?
- La resistencia a rotura ¿qué rompe antes, la fibra o la matriz? Nota: considera que tanto la fibra como la matriz rompen sin deformar plásticamente.

## 12.2- Materiales compuestos. Función de la matriz en el material compuesto

### Solución

a) Para hallar la densidad aplicamos la ley de mezclas directamente, siendo  $V_m$  y  $V_f$  las fracciones volumétricas de matriz y refuerzo respectivamente:

$$\rho_{comp} = \rho_m \cdot V_m + \rho_f \cdot V_f = 1,2 \cdot 0,7 + 1,5 \cdot 0,3 = 1,29 \text{ gr/cm}^3$$

b) Como se trata de fibras largas, en la dirección de las fibras se cumple la condición de isodeformación por lo que podemos aplicar de nuevo la ley de mezclas, pero esta vez para el módulo:

$$E_{comp} = E_m \cdot V_m + E_f \cdot V_f = 2,5 \cdot 0,7 + 280 \cdot 0,3 = 85,75 \text{ GPa}$$

c) Como ya sabemos el módulo de elasticidad del compuesto del apartado anterior, podemos evaluar su deformación al aplicarle una tensión de 100 MPa aplicando la ley de Hooke:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \Rightarrow \varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{100}{85750} = 0,00117$$

d) Como ya sabemos el módulo de elasticidad del compuesto del apartado anterior, podemos evaluar su deformación al aplicarle una tensión de 100 MPa aplicando la ley de Hooke:

$$E_{c\perp} = \frac{E_m E_f}{V_m E_f + V_f E_m} = \frac{280 \times 2.5}{0.7 \times 280 + 0.3 \times 2.5} = 3.55 \text{ GPa}$$

Que efectivamente es muy inferior al módulo en dirección longitudinal (alta anisotropía)

## 12.2- Materiales compuestos. Función de la matriz en el material compuesto

e) Como en la dirección de las fibras se cumple la condición de isodeformación:

$$\varepsilon_{\text{comp}} = \varepsilon_m = \varepsilon_f$$

y por lo tanto:

$$\sigma_m = E_m \varepsilon_m = 2500 \times 0,00117 = 2,925 \text{ MPa}$$

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_f = 280000 \times 0,00117 = 326 \text{ MPa}$$

que, como era de esperar, es mucho mayor en las fibras que en la matriz.

f) Para evaluar la resistencia a rotura del compuesto hay que hallar quién rompe antes. Suponiendo que tanto la matriz como el refuerzo son materiales elásticos perfectos, se puede hallar la deformación a rotura de ambos para hallarlo:

$$\varepsilon_{\text{rot.m.}} = \frac{\sigma_{\text{rot.m.}}}{E_m} = \frac{50}{2500} = 0,02$$

$$\varepsilon_{\text{rot.f.}} = \frac{\sigma_{\text{rot.f.}}}{E_f} = \frac{2800}{280000} = 0,01$$

Por lo tanto rompe antes la fibra que la matriz, por lo que la resistencia a rotura del compuesto será:

$$\sigma_{\text{comp}} = \sigma'_m \cdot V_m + \sigma_f \cdot V_f = 2500 \cdot 0,01 \cdot 0,7 + 2800 \cdot 0,3 = 17,5 + 840 = 857,5 \text{ MPa}$$

Donde  $\sigma'_m$  es la tensión en la matriz cuando el compuesto rompe, que es igual a multiplicar la deformación a rotura del compuesto (que es la deformación a rotura de las fibras) por el módulo de elasticidad de la matriz. Si rompiera antes la matriz, la resistencia del compuesto sería la resistencia de la fibras por su fracción volumétrica (en la etapa final, solamente las fibras aguantan tensión)

## 12.2- Materiales compuestos. La anisotropía del material compuesto

### FIBRAS DISCONTINUAS Y ALINEADAS

Podemos distinguir dos casos, según la longitud de fibra:

Si  $l > l_c$  (fibra corta) tenemos:

$E \approx 0,9 E$  (fibra continua) (Resultado experimental)

$$(TS)_c = (TS)_f V_f \left(1 - \frac{l_c}{2l}\right) + (TS)_m' (1 - V_f)$$

$$\begin{cases} (TS)_c = \text{resistencia a la tracción del compuesto} \\ (TS)_f = \text{resistencia a la tracción de la fibra} \\ (TS)_m' = \text{tensión en la matriz cuando el compuesto rompe} \end{cases}$$

Si  $L < l_c$  (fibra muy corta ≈ partículas) tenemos:

E como en refuerzo por partículas

$$(TS)_c = \frac{l\tau_c}{d} V_f + (TS)_m' (1 - V_f)$$

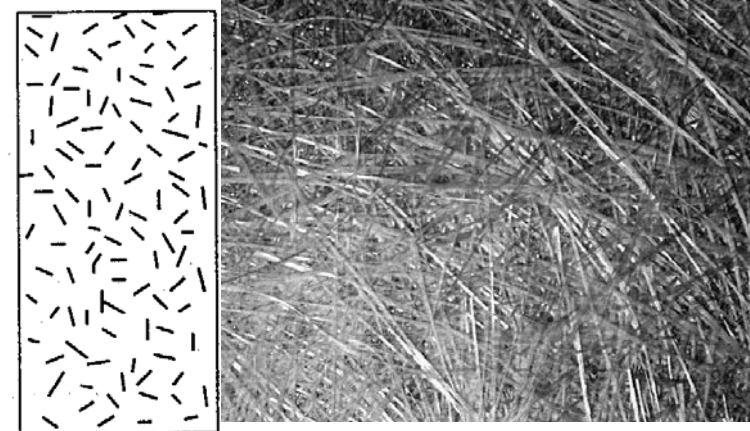
Donde  $d$  = diámetro de la fibra

Aunque el refuerzo es menor que con la fibra continua, son muy utilizados

### DISCONTINUAS Y ORIENTADAS AL AZAR

Se sigue una regla de las mezclas especial, similar al caso de fibras continuas y alineadas pero con valor de  $K$ , que determina la eficiencia de la fibra.

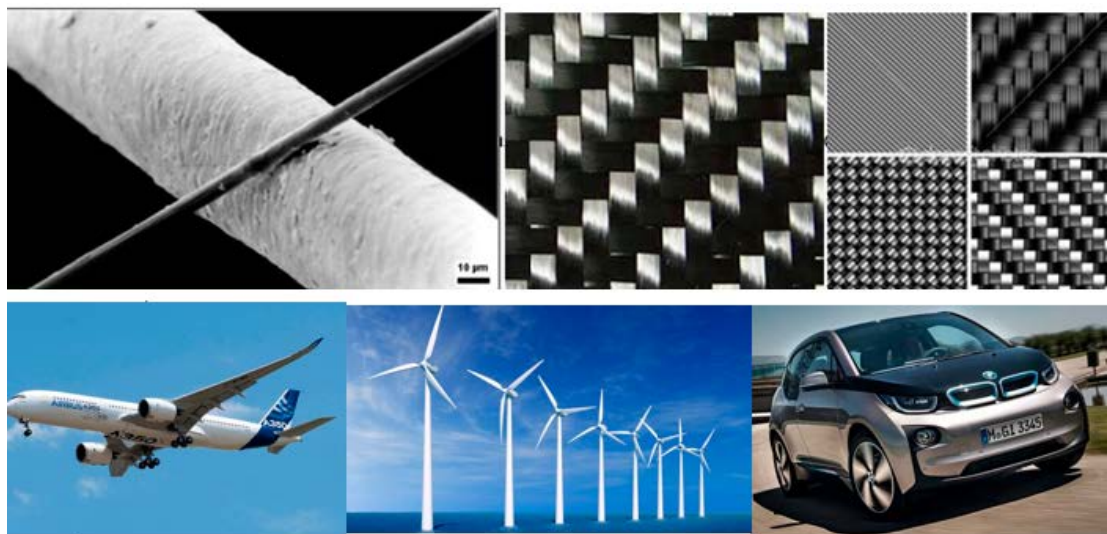
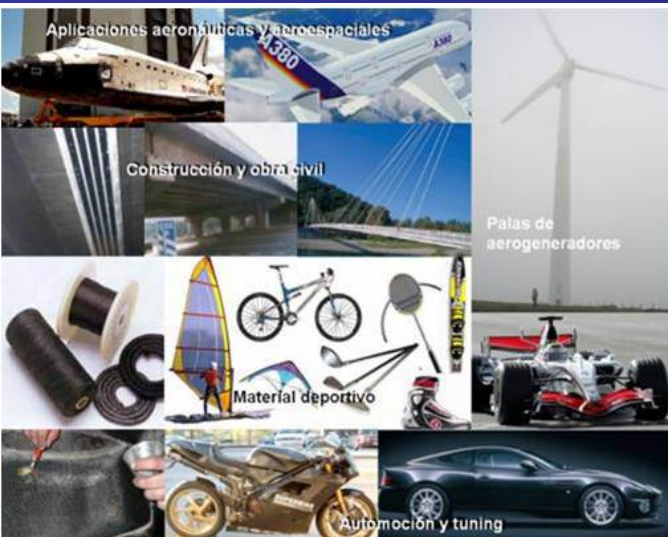
$$E_c = K * E_f V_f + E_m V_m$$



$K$ , generalmente se encuentra entre 0,1 y 0,6; y depende de la fracción volumétrica de fibra y de la relación  $E_f/E_m$

Comportamiento más isótropo.

# 12.2- Materiales compuestos. Aplicaciones y limitaciones de los materiales compuestos



Material	Aplicaciones
Aluminio bórico (Borsic)	Aspas de ventiladores en motores; aplicaciones aeronáuticas y aeroespaciales.
Kevlar-epóxico Kevlar-poliéster	Aviación, aeroespacial (incluso el transbordador Space Shuttle), cascos de lanchas o botes, artículos deportivos (raquetas de tenis, palos de golf, cañas de pescar), chamarras antifuego.
Grafito-polímero	Aeroespacial, automotriz, artículos deportivos.
Vidrio-polímero	Automotriz ligera, acuáticas y marinas, con resistencia a la corrosión, artículos y equipos deportivos, componentes aeroespaciales.



## 12.3- Problemas de examen de años anteriores.

Problema: Una muestra de material compuesto vidrio/epoxi pesaba 2g. y su peso sumergido en agua (densidad 1 g/cm<sup>3</sup>) era 0,908 g. Al eliminar la resina mediante tostación a 600°C, el peso de la fibra restante era de 1,323 g. Calcúlense la densidad, volumen de fibra y poros de este material.

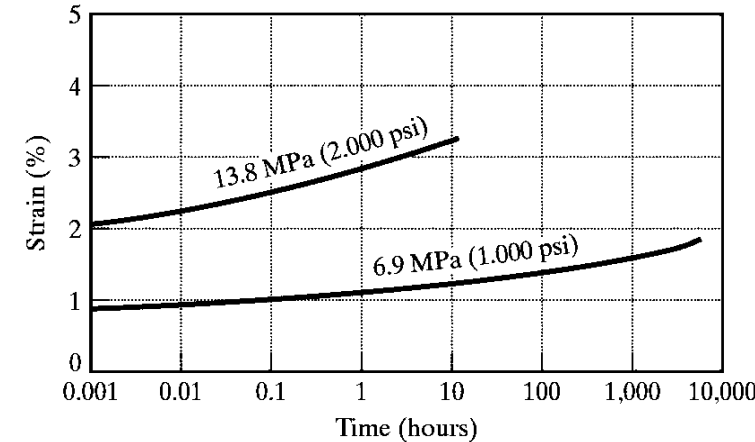
	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Formula
Fibra	2,54	$\rho_{cuerpo} = \frac{P_{aire}}{P_{aire} - P_{agua}} \rho_{agua} \quad \rho = \frac{m}{V}$
Resina	1,3	

Problema: Se desea realizar un componente con un material compuesto de matriz polimérica, siendo el contenido de fibras de refuerzo es del 40% en volumen. Para ello se utilizan fibras de kevlar continuas y alineadas en una matriz epoxi. Calcula la resistencia a rotura en la dirección de las fibras. Las propiedades de fibra y matriz se dan a continuación:

	Tensión de rotura, $\sigma_m$	Módulo elástico, E
Fibra	3620 MPa	124 GPa
Resina	50 MPa	2,5 GPa

## 12.3- Problemas de examen de años anteriores.

**Problema** ¿Cuánto tiempo tardara en romper un tirante de nylon 66 sometido a 10MPa de tensión? Justifíquese numéricamente la respuesta.



**Problema.** Un compuesto reforzado con fibra continua y alienada consta de un 55% en volumen de matriz de policarbonato y 45% de fibra de aramida; las características de estos dos materiales son las siguientes:  
Calcular para este compuesto la resistencia a tracción en condiciones de isodeformación.

	Módulo de elasticidad, GPa	Resistencia a la tracción, MPa
Fibra de aramida	130	3500
Policarbonato	2,4	55

## 12.3- Problemas de examen de años anteriores.

**Problema:** Calcula el peso molecular medio numérico ( $M_n$ ) y másico ( $M_w$ ) de un PVC que presenta la distribución de cadenas con pesos moleculares indicados en la tabla:

Nº de cadenas	$M_r$ (gr/mol)					
100	5000					
250	7500					
400	10000					
200	12500					
50	15000					