

## Materiales II (código 1056)

- Objetivo: aprender los **conceptos fundamentales**.
- Por medio de **aplicaciones** tomadas de casos lo más **realistas** posibles
- No memorizar, sino entender y saber **aplicar los conceptos** básicos

# Generalidades

---

- Introduce algunas herramientas nuevas (algunas numéricas) que iremos viendo según surja la necesidad
- Herramientas básicas que, una vez introducidas, pueden usarse con carácter general



# Generalidades

---

- Información básica: libro de texto: W. F. Smith "*Ciencia e Ingeniería de Materiales*", 3ª ed. McGraw-Hill.
- Apuntes, problemas de clase y todos los exámenes desde 2005 disponibles en AulaWeb
- Guía de contenidos de AulaWeb, etc.: leer el fichero **LEEME.TXT**



## Materiales II

- |                           |   |              |
|---------------------------|---|--------------|
| 1. Diagramas ternarios    | } | herramientas |
| 2. Tensores cartesianos   |   |              |
| 3. Estructura cristalina  |   |              |
| 4. Difusión               | } | propiedades  |
| 5. Propiedades eléctricas |   |              |
| 6. Propiedades ópticas    |   |              |

## Materiales II

- 7. Materiales poliméricos
  - 8. Materiales cerámicos
  - 9. Materiales compuestos
- } materiales



# Tipos básicos de materiales

---

- En Materiales II, trataremos con:
  - ✓ **polímeros** (casi siempre orgánicos, en ocasiones biopolímeros)
  - ✓ **cerámicos** (inorgánicos)
  - ✓ **materiales compuestos** (en el sentido más general)
- Para aplicaciones:

✓ mecánicas	micro- y nanosistemas	magnéticas
✓ ópticas	refractarios	biomateriales
✓ eléctricas	sensores	pinturas + film
✓ electrónicas	estructuras	adhesivos
✓ automoción	alimentación	energía



# ¿Dónde encontramos estos materiales?

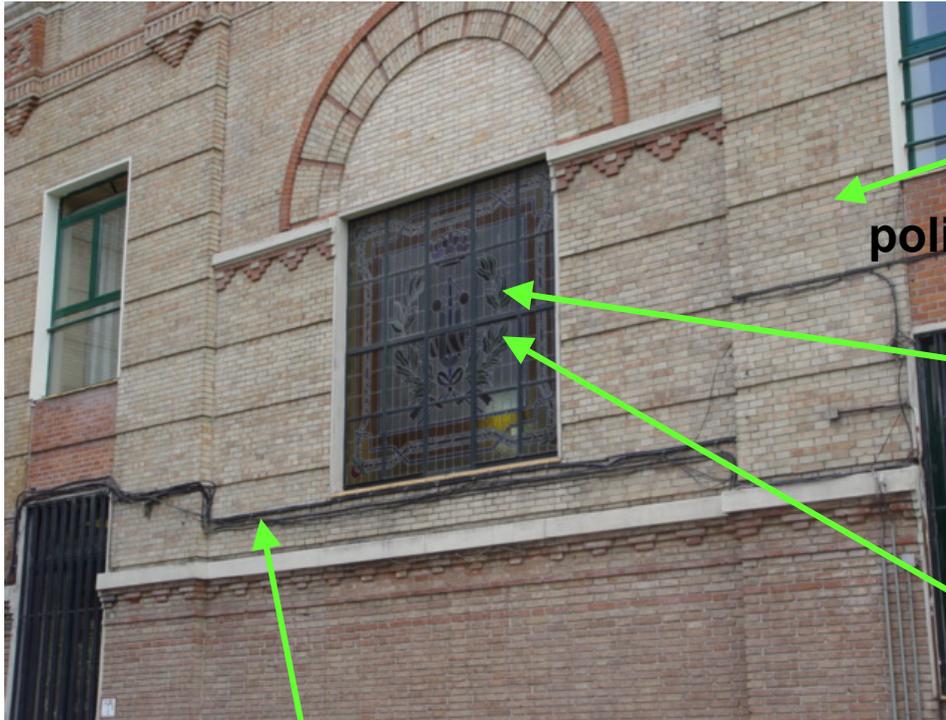


**mármol**  
cerámico, policristalino

**hierba**  
compuesto,  
biopolímero/biopolímero  
policristalino/amorfo

**granito**  
compuesto,  
cerámico/cerámico/cerámico,  
policristalino/ policristalino/ policristalino





**ladrillo**  
compuesto,  
cerámico/cerámico/cerámico  
policristalino/policristalino/policristalino

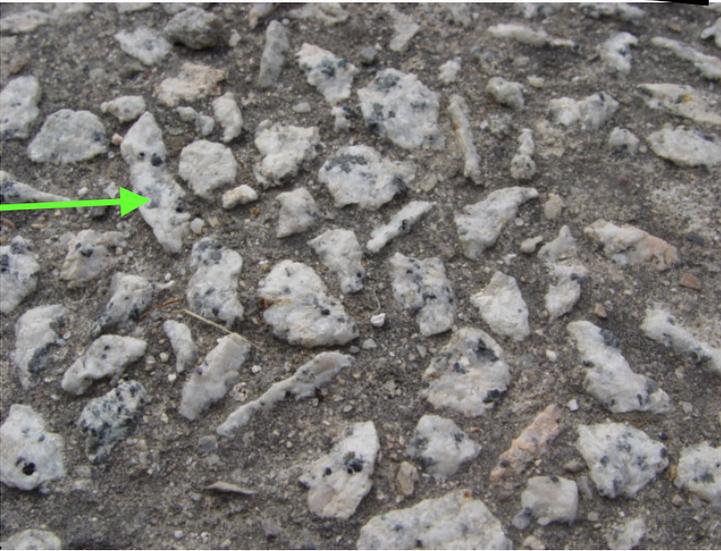
**vidrio**  
cerámico,  
amorfo

**plomo**  
metálico,  
policristalino

**PVC cargado**  
**(revestimiento de cables eléctricos)**  
compuesto  
polímero / cerámico  
amorfo / policristalino



**hormigón**  
compuesto,  
cerámico/cerámico/cerámico  
(arena, grava, cemento)  
policristalino/compuesto/policristalino



**granito**  
compuesto,  
cerámico/cerámico/cerámico,  
policristalino/ policristalino/ policristalino





**vidrio de ventana**  
cerámico  
amorfo

**aluminio anodizado**  
( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )  
cerámico  
policristalino  
**sobre aluminio**  
metálico  
policristalino

**azulejo**  
cerámico, policristalino  
(interior)  
cerámico, amorfo  
(exterior)

**junta de silicona**  
polimérico  
amorfo

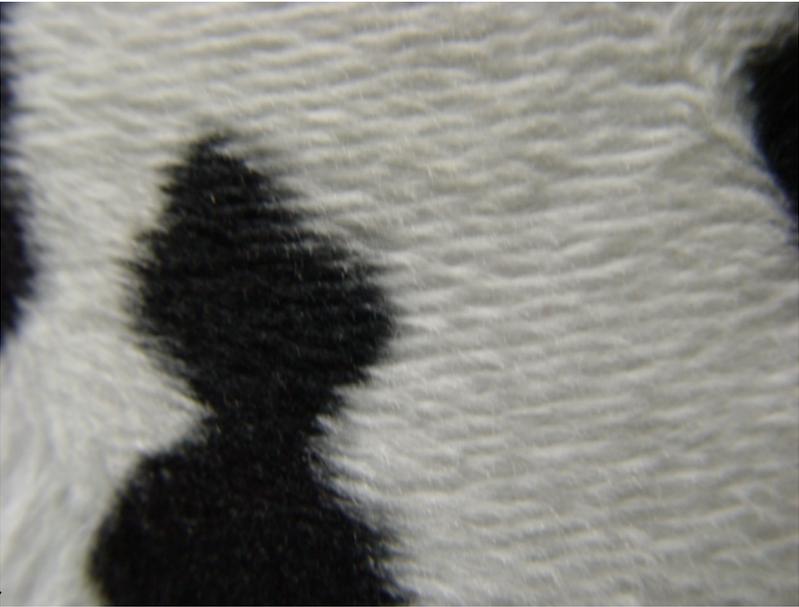
**terrazo**  
compuesto,  
cerámico/cerámico  
policristalino/policristalino



**pintura**  
**compuesto**  
**cerámico/polímero**  
**policristalino/amorfo**

**sobre**  
**acero**  
**metal**  
**policristalino**

**textil tejido**  
**compuesto**  
**polímero/polímero**  
**semicristalino/semicristalino**

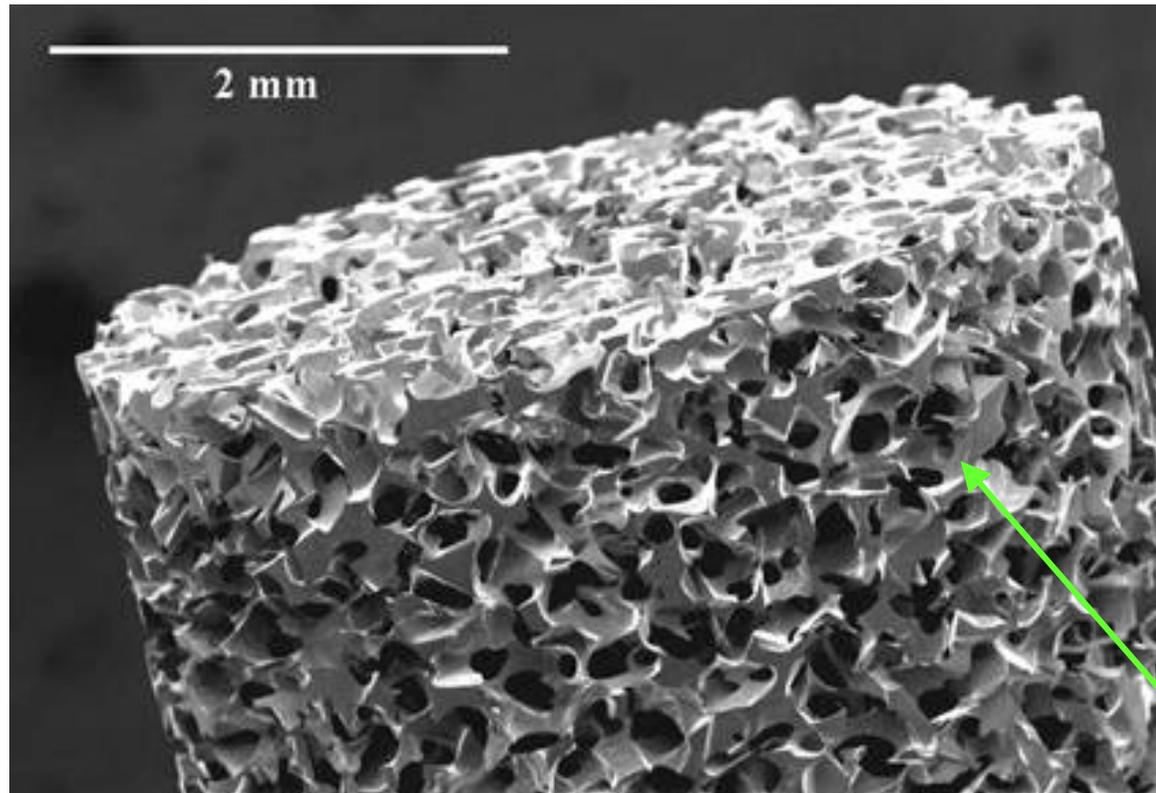




**cartón  
compuesto  
papel/aire  
(papel a su vez  
compuesto)**



**contrachapado  
compuesto  
madera/madera  
(madera a su vez compuesto)**



**espuma de vidrio metálico**  
compuesto metal/gas  
amorfo/-



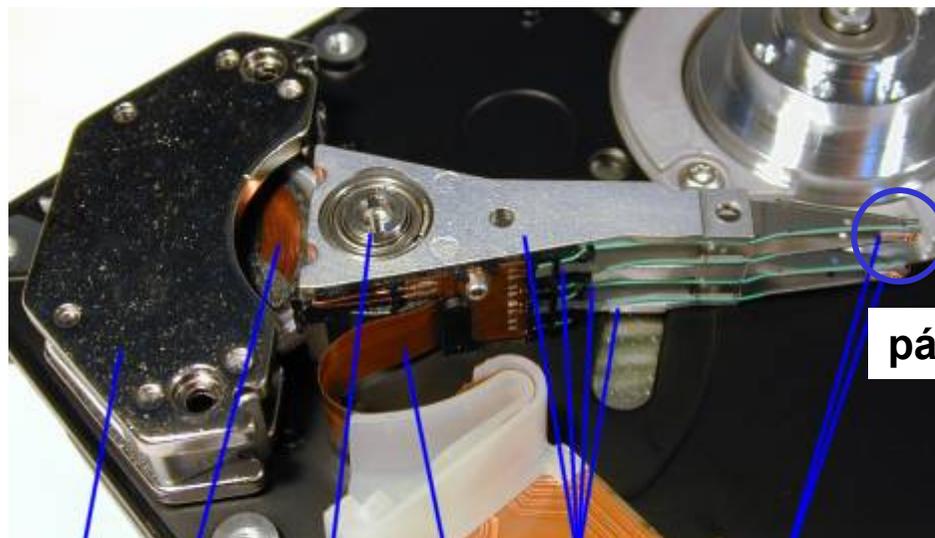
**funda de CD-ROM (PS)**  
polimérico  
semicristalino



**CD-ROM de BPA-PC**  
polimérico  
amorfo

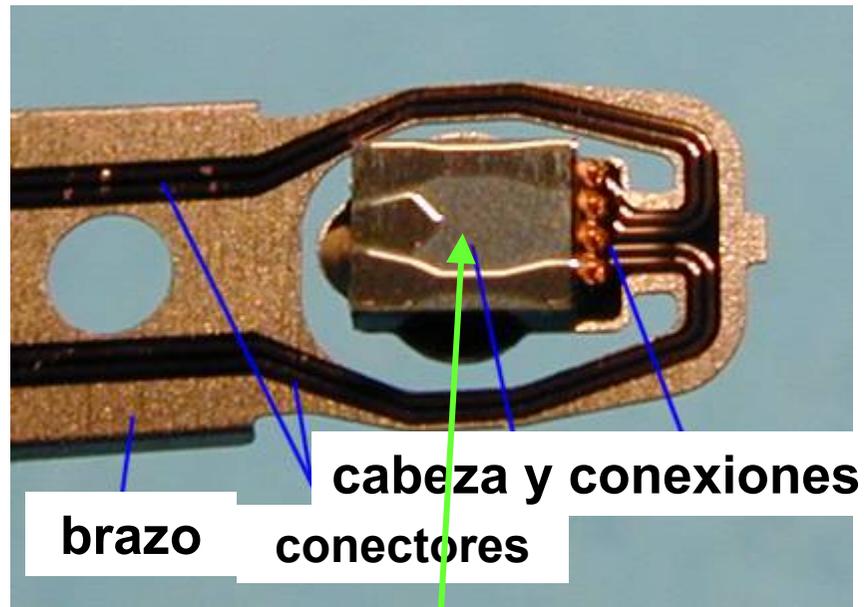


**disco duro**

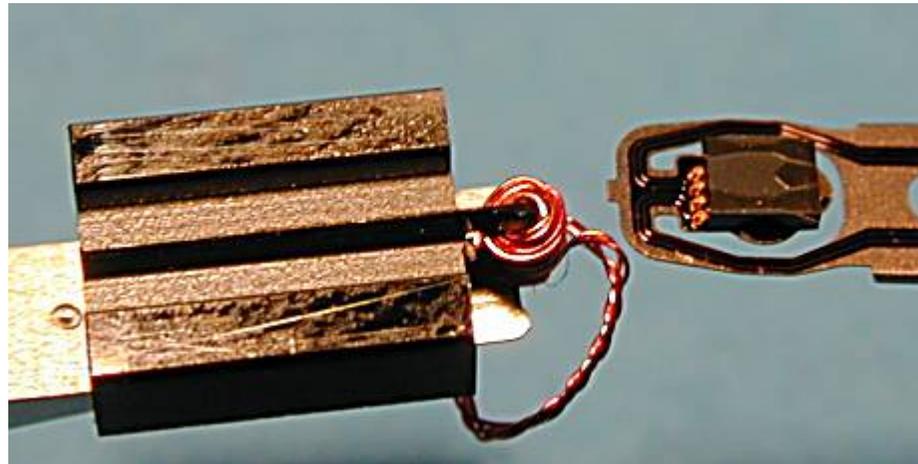


**actuador bobina**    **eje**    **cable**    **brazos**    **cabezas**  
**lectura/escritura**

**(se han quitado los discos para poder ver en detalle las cabezas)**



**material magnetoresistivo**  
compuesto metálico o cerámico,  
policristalino o monocristalino



**40 MB 5.25"**

**3.2 GB, 3.5"**

cabeza de ferrita  
(1991)

anchura de pista  $3.38 \mu$   
longitud de bit  $0.95 \mu$

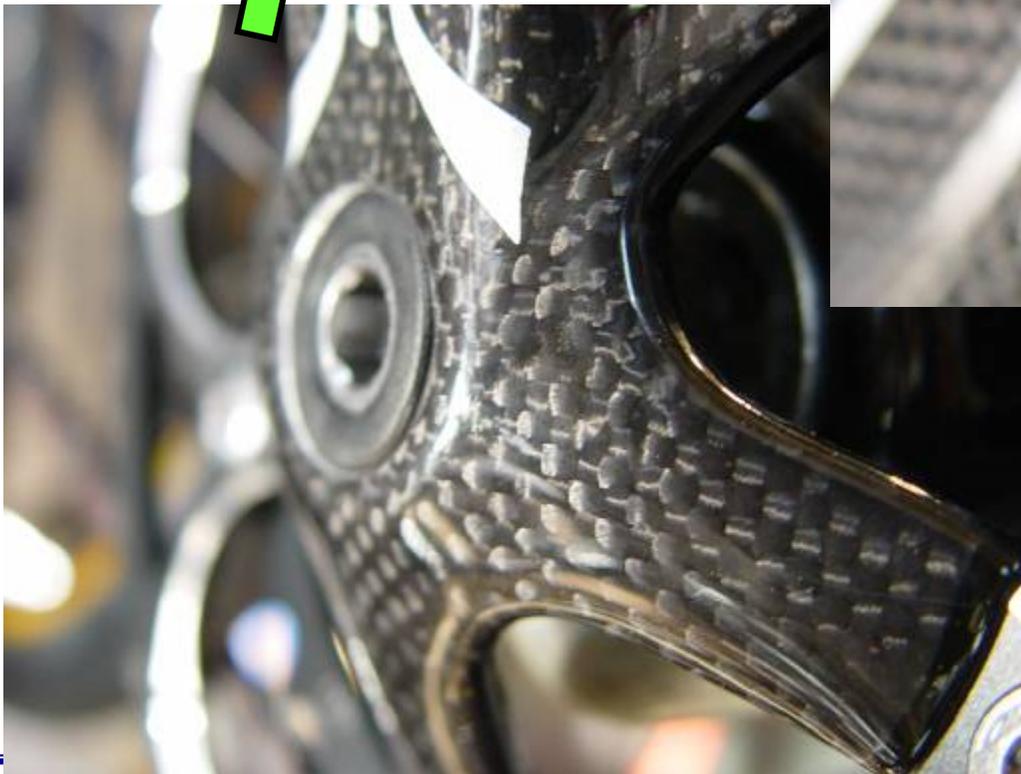
cabeza magnetoresistiva  
(2004)

anchura de pista  $0.62 \mu$   
longitud de bit  $0.052 \mu$



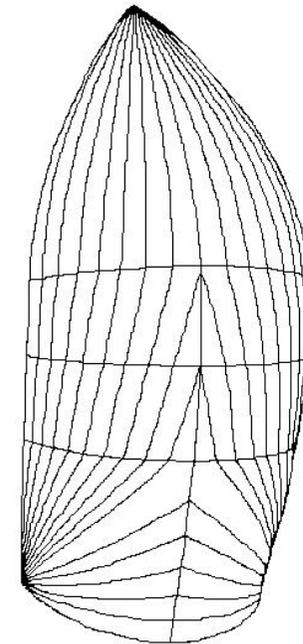
**camisa refractaria de carbono  
compuesto cerámico/polimérico  
policristalino/semicristalino**







**spinnaker**  
**tejido anisótropo**  
**(cortado y cosido “al bias”)**



---

**tejidos anisótropo, -**

**¿cómo se consigue el “vuelo”  
de este vestido  
(que no lleva ningún armazón)?**

**¿cómo se consigue que “cuelgue”  
este pantalón?**



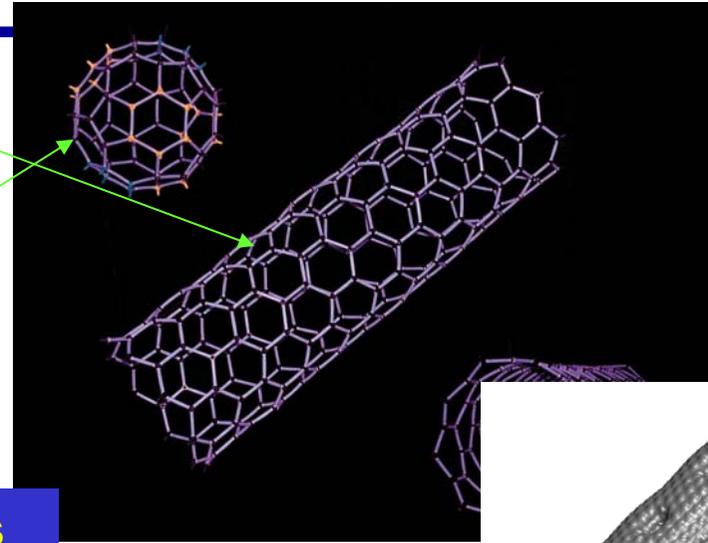
**cortado en paralelo a la  
trama/urdimbre**



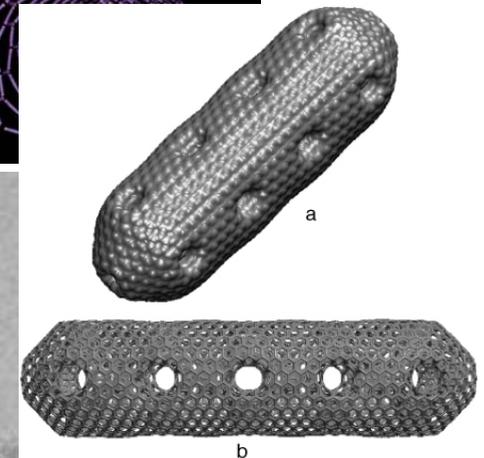
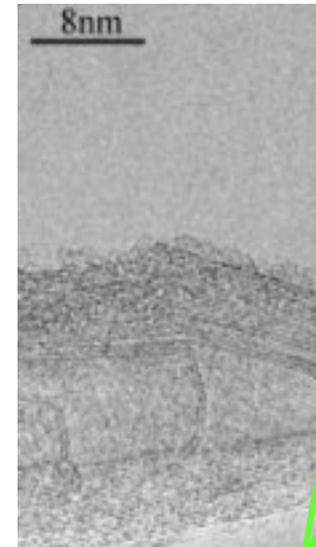
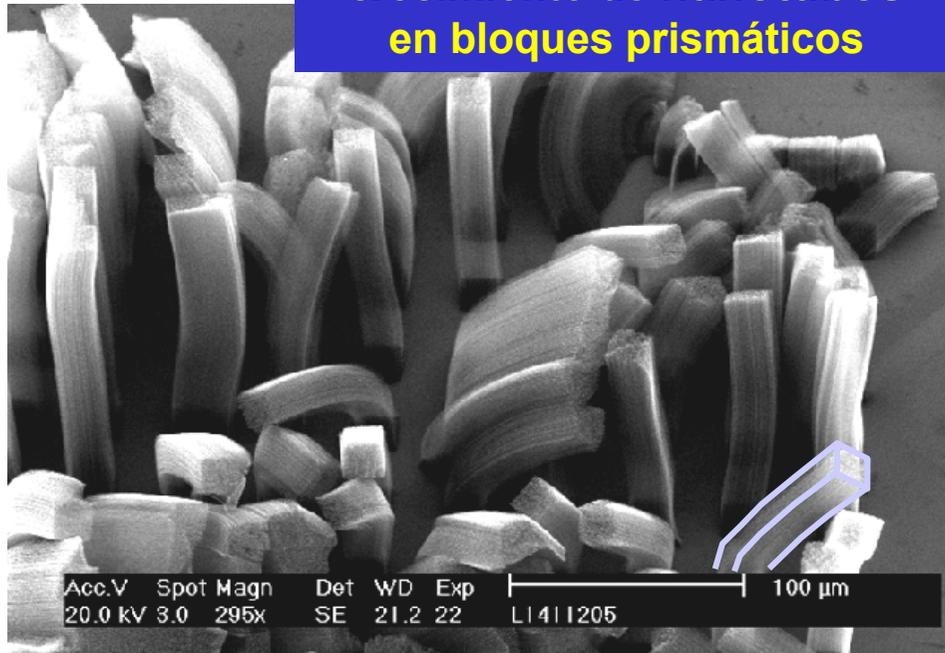
**cortado otra vez “al bias”  
(biais)**

# Compuestos de nanotubos

Los nanotubos son hojas de grafeno enrolladas en forma de cilindro y con los extremos terminados en poliedros construidos con hexágonos y pentágonos (como los buckminsterfullerenos)



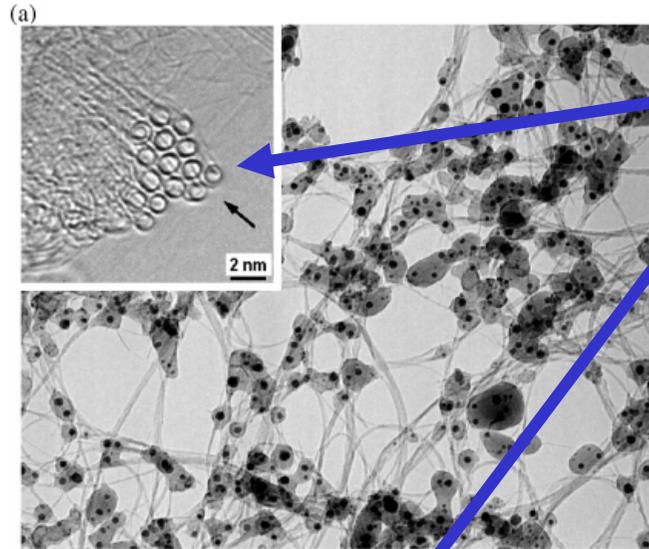
**crecimiento de nanotubos en bloques prismáticos**



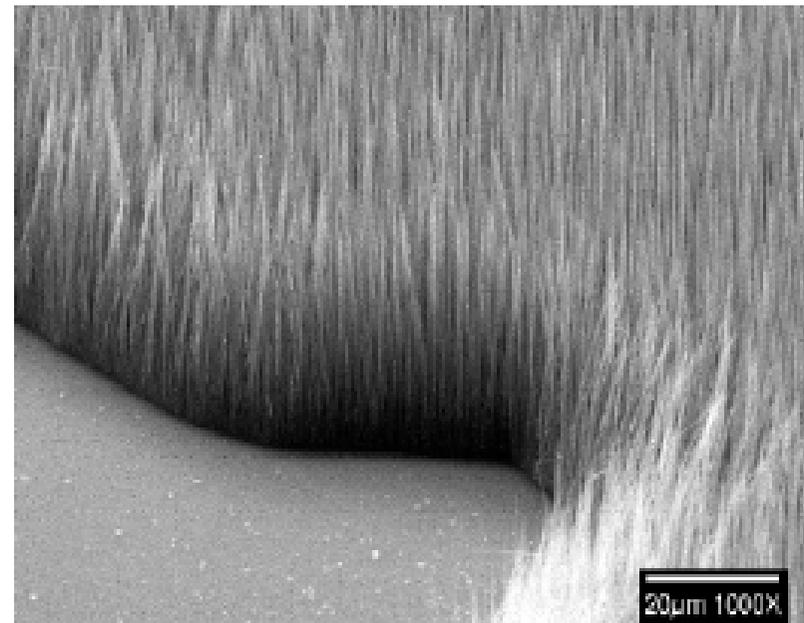
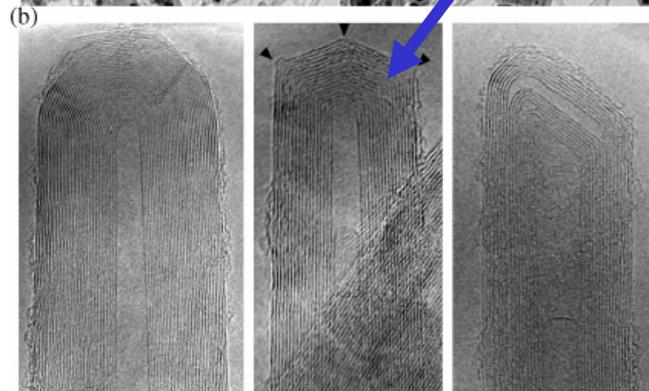
**terminaciones de un grupo de nanotubos concéntricos**

# Compuestos de nanotubos

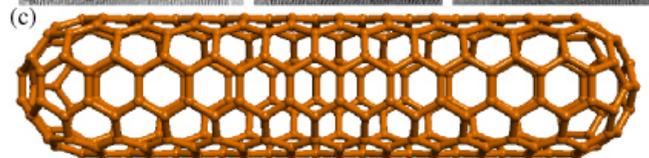
SWNTs en sección

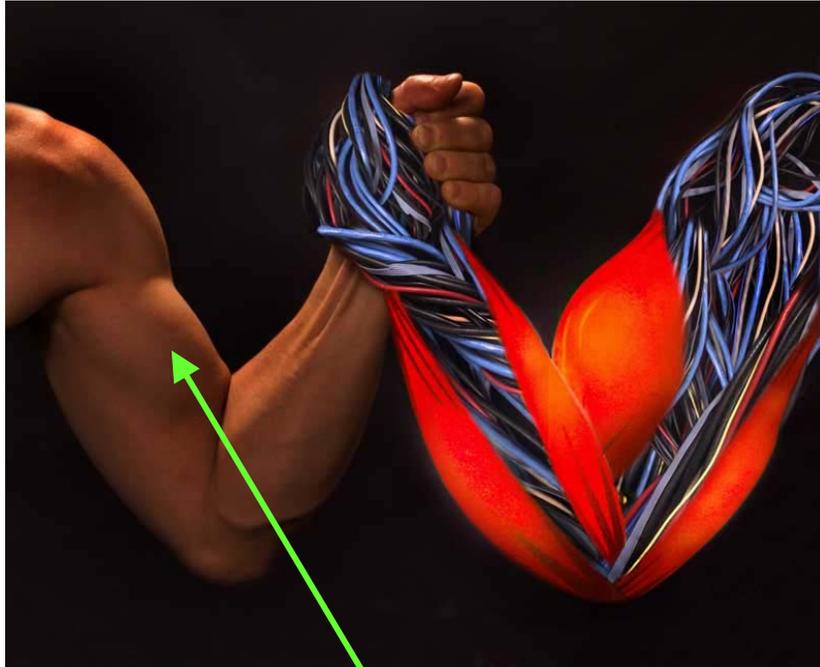


MWNT (Multiple Wall NanoTube)  
(grupo de nanotubos encerrados unos dentro de otros formando capas)



“alfombra” de nanotubos





**tejido muscular,  
compuestos de  
cristales líquidos  
proteínicos  
anisotrópicos  
orientables por excitación eléctrica**



**monitor TFT  
compuestos de cristales líquidos  
orgánicos  
anisotrópicos  
orientables por campo eléctrico**



**GTO F40**  
carrocería de compuesto  
fibra de carbono / Nomex  
altamente anisótropo

- 
- En las aplicaciones anteriores, reflexiona sobre el valor o la importancia del producto / diseño / función y la complejidad del material.
  - En general existe una **correlación muy fuerte** entre **complejidad** a la hora de hacer el diseño y **precio** de mercado
  - El nivel industrial de un país se puede “leer” casi directamente en el tipo de productos en que destaca:

**Aprender a diseñar / optimizar productos con materiales “complejos” es crucial**  
(y además es interesante)



# Claves de la productividad

	USA	Alemania	España	Qatar
Patentes / licencias propias (año <sup>-1</sup> )	23000	8400	1730	5
Patentes / licencias compradas (año <sup>-1</sup> )	1120	2070	3650	870
Productividad (rel.)	1.00	0.87	0.65	0.22
PTN*	A	B	E	H
Crecimiento sector industrial básico (D-L) (año <sup>-1</sup> )	-0.3%	-2.1%	+1.7%	3.0%
Crecimiento sector industrial avanzado (A-D) (año <sup>-1</sup> )	+4.4%	+1.7%	-0.8%	0.1%
Inversión en nanotec. 2003	1.4 bn €	0.34 bn €	0.07 bn €	0 bn €

\* PTN: Product Technological Level A-L

J. Strat. Pol. 23, 445-449 (2004)



---

¿Qué relación tiene MatII con otras asignaturas?



# Planteamiento general

---

- De modo muy simplificado, en ingeniería de materiales (y en casi todas las ingenierías), en física, etc,
  - ✓ **resolver un problema técnico,**
  - ✓ **hacer un diseño**
  - ✓ **crear u optimizar un producto**
  
- **implica casi siempre en último término:**

**formular y resolver el problema como un sistema de ecuaciones que tiene, en general, esta estructura:**



# Planteamiento general

---

- Ecuaciones de conservación
  - ✓ masa, energía, cantidad de movimiento, carga eléctrica, etc.
- Ecuaciones de estado
  - ✓ describen las propiedades de **equilibrio termodinámico** del material o los materiales que intervienen
- Ecuaciones constitutivas
  - ✓ describen las propiedades de transporte (de **no-equilibrio termodinámico**) del material o los materiales que intervienen



# Planteamiento general

---

➤ Ejemplo típico: para diseñar la forma hidrodinámica óptima del casco de un barco, debemos resolver el sistema formado por las:

1. Ecuaciones de conservación

**de masa, de energía y de cantidad de movimiento**

2. Ecuaciones de estado

**p.ej.: densidad del agua constante**

3. Ecuaciones constitutivas

**p.ej.: viscosidad del agua constante, fluido newtoniano**



## Planteamiento general

---

➤ Esta combinación de **ecuaciones algebraicas, diferenciales ordinarias y en derivadas parciales:**

1. **Ecuaciones de conservación de masa, de energía y de cantidad de movimiento**
2. **Densidad del agua constante, calor específico conocido**
3. **Viscosidad del agua constante, fluido newtoniano**

Mat II

se conocen como

ecuaciones de Navier-Stokes ⇒ **Mecánica de fluidos**



# Planteamiento general

---

➤ Otro ejemplo: para diseñar una estructura (p.e. chasis de un automóvil) debemos resolver el sistema formado por las:

1. Ecuaciones de conservación  
de masa, de energía y de cantidad de movimiento

2. Ecuaciones de estado  
p.ej. densidad del acero constante

3. Ecuaciones constitutivas  
Ley de Young (elasticidad lineal,  
mat. isótropo y homogéneo)

Mat II

Resistencia  
de  
materiales



# Planteamiento general

---

➤ Otro ejemplo: para diseñar un núcleo de un transformador eléctrico (material compuesto):

1. Ecuaciones de conservación

**Ec. de Maxwell y conservación de energía**

2. Ecuaciones de estado

**p.ej. densidad constante**

3. Ecuaciones constitutivas

**p.ej. ley de Ohm, material magnético lineal, material eléctrico lineal, isótropo y homogéneo etc.**

Mat II

Electrónica  
Motores  
eléctricos

---

En Materiales II nos ocupamos de

## **LA DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL**

para diversas aplicaciones

para cada aplicación se necesita una o varias propiedades

⇒ **una o varias ecuaciones constitutivas**



---

Las ecuaciones constitutivas son muy frecuentemente relaciones

# LOCALES

es decir, establecen una relación entre los valores de diversas variables en un sólo punto

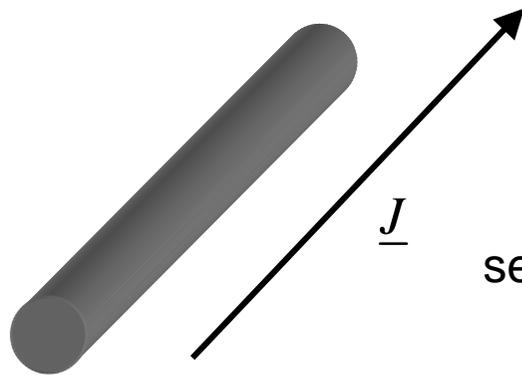
(p.ej.: la "*ley de Ohm*" :  $I = \Delta V / R$  , NO es una relación local)



---

## Son válidas tanto:

- ✓ en problemas **HOMOGÉNEOS** (donde la situación es la misma en todos los puntos), en todo el dominio



conductor eléctrico recorrido por una densidad de corriente eléctrica uniforme: todos los puntos del sistema se encuentran en las mismas condiciones, **en todos se cumple la ley de Ohm (diferencial)**

- ✓ como en problemas **HETEROGÉNEOS** (donde la situación varía de un punto a otro), en cada punto



conductor eléctrico de sección no uniforme: en cada punto existen diferentes condiciones, **pero en todos se cumple la ley de Ohm (diferencial)**

- 
- Salvo excepciones, trataremos siempre con situaciones **HOMOGÉNEAS**
  
  - Las excepciones son materiales cuyas aplicaciones principales dependen precisamente de su heterogeneidad:
    - ✓ **semiconductores**
  
    - ✓ **polímeros cargados, aleaciones de polímeros**
  
    - ✓ **mat. compuestos**
  
  - aunque aprendemos a calcular y tratar sus propiedades de modo promediado espacialmente (⇒ **homogeneización**)



---

➤ Dos conceptos esenciales:

✓ **Material o sistema HOMOGÉNEO:**

- es simétrico (invariante) respecto al grupo de traslación
- “*me desplazo a otro punto del sistema, y las propiedades son las mismas*”; el material o sistema es indistinguible (invariante) respecto a traslación.

✓ **Material o sistema ISÓTROPO:**

- es simétrico (invariante) respecto al grupo de rotación
- “*sin moverme del punto, considero las propiedades del sistema en diferentes direcciones, y resultan ser las mismas en todas direcciones*”; el material o sistema es indistinguible (invariante) respecto a rotación.

- 
- Homogeneidad e isotropía son dos conceptos independientes; un material puede ser:
    - ✓ homogéneo e isótropo
    - ✓ homogéneo y anisótropo
    - ✓ heterogéneo e isótropo
    - ✓ heterogéneo y anisótropo
  
  - Es importante en cada aplicación / problema identificar:
    1. qué ec. de conservación intervienen
    2. qué ec. de estado necesitamos
    3. qué ec. constitutivas describen el material
    4. si es homogéneo o no
    5. si es isótropo o no
    6. en caso negativo, de qué tipo ( $\Rightarrow$  clase de simetría puntual o cristalográfica).



---

➤ Los usos más antiguos de todos los materiales se basan en propiedades para los que los materiales son **isótropos y homogéneos**

- ✓ **aplicaciones estructurales tradicionales (construcción)**
- ✓ **aplicaciones eléctricas tradicionales (empresas eléctricas)**
- ✓ **aplicaciones mecánicas tradicionales (fabricación)**

➤ Las aplicaciones más avanzadas (de mayor valor añadido para los productos) se basan cada vez más en materiales **anisótropos y heterogéneos**

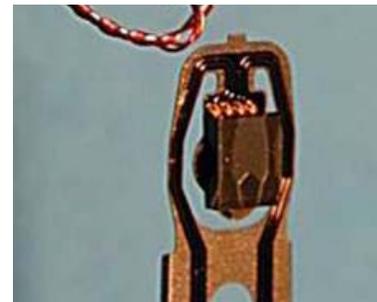
- ✓ **micro-, nano- y optoelectrónica (ordenadores, electrónica)**
- ✓ **MEMS (micro-electromechanical systems)**
- ✓ **materiales biológicos**
- ✓ **sensores (IR, térmicos, etc.)**
- ✓ **estructuras y materiales avanzados**



- 
- El estudio de materiales anisótropos requiere el aprendizaje de algunas técnicas nuevas
  - Y abre posibilidades nuevas:
  - Ejemplo típico:
    - ✓ materiales magnéticos para núcleos de transformadores
    - ✓ precio  $\approx 10$  €/kg



- ✓ cabeza AMR ("*anisotropic magnetoresistance*") de lectura de disco duro de 3.2 GB
- ✓ precio  $\approx 40\ 000$  €/kg



---

# Conceptos básicos



# Conceptos nivel 0

---

## ➤ Cerámicos:

- ✓ a escala molecular/atómica son (casi todos) cristalinos
- ✓ compuestos (casi todos) con pocos (<50) átomos por molécula
- ✓ morfología cristalina o policristalina y excep. amorfa

## ➤ Polímeros ("plásticos"):

- ✓ a escala molecular/atómica son amorfos + cristalinos
- ✓ compuestos con muchos (>>1000) átomos por molécula
- ✓ morfología cristalina, semicristalina y amorfa



# Conceptos nivel 0

---

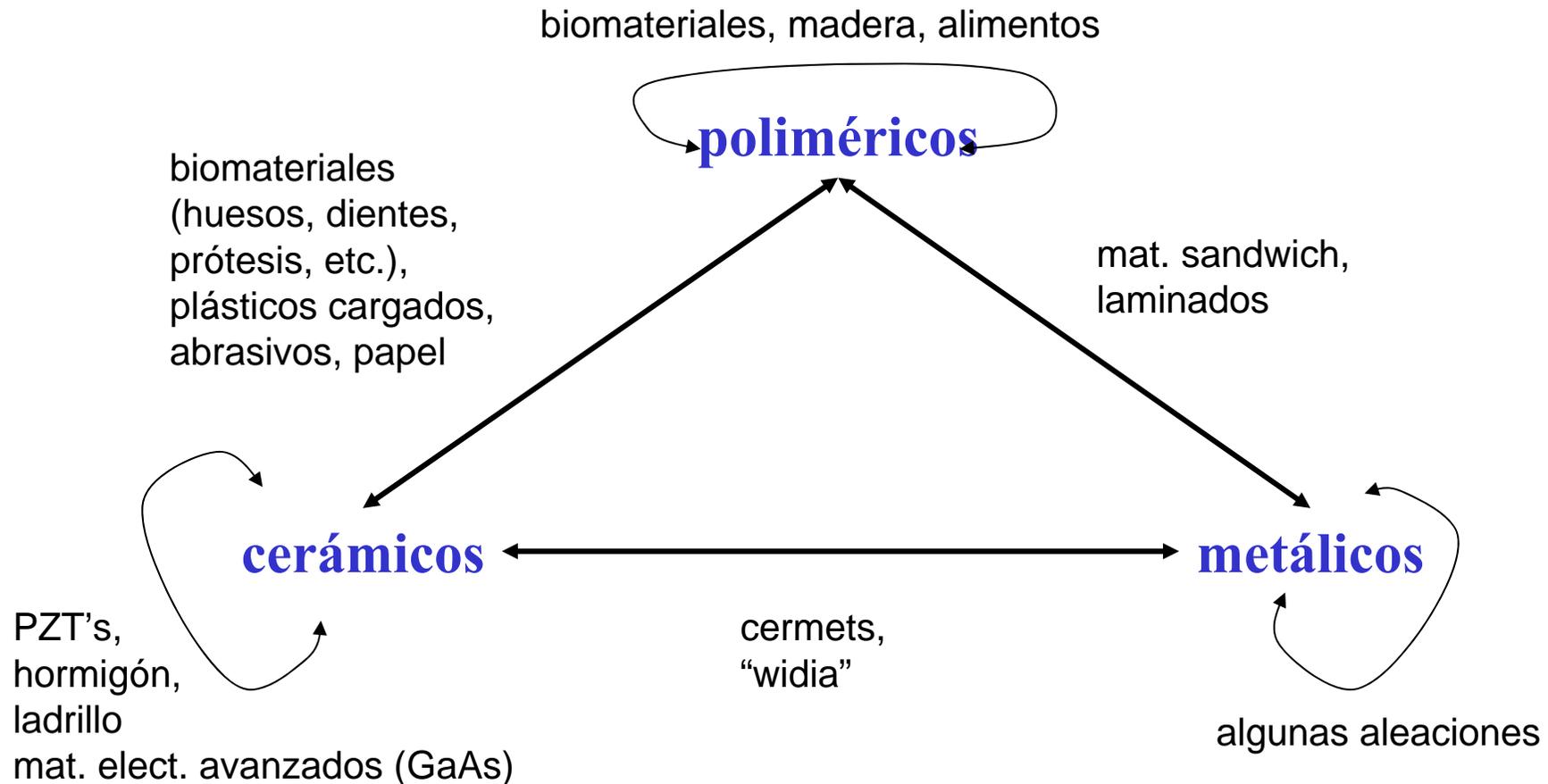
## ➤ Metales:

- ✓ a escala molecular/atómica son (casi todos) cristalinos
- ✓ no forman moléculas, pero sí soluciones sólidas y mezclas físicas
- ✓ morfología policristalina y muy excep. amorfa



# Conceptos nivel 0

- **Compuestos:** “mezclas” físicas, no homogéneas de



# Conceptos nivel 0

---

## Morfología:

- la **organización estructural de un material a escala mesoscópica** (entre 10 nm y 1 cm)
- tan determinante de las propiedades del producto / objeto como su estructura molecular
- tipos principales: **cristalina, amorfa, semicristalina, policristalina**

# Conceptos nivel 0

➤ Principales morfologías de los **Materiales Cerámicos**:

✓ **crystalina (monocristal)**: ej. diamante (brillante)

**silicio para circuitos microelectrónicos**

✓ policristalina (“muchos cristales”)

✓ amorfa: vidrio de ventana

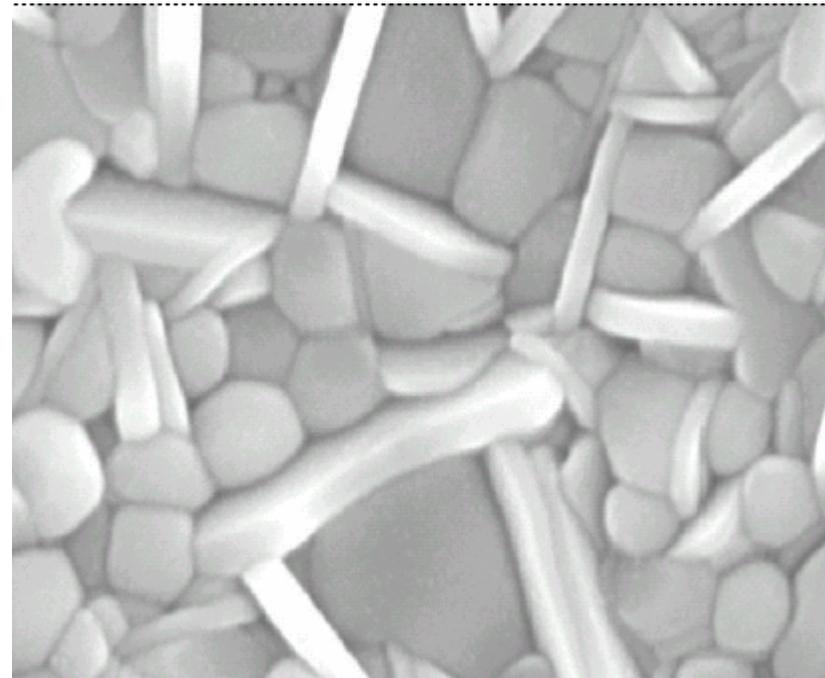


# Conceptos nivel 0

---

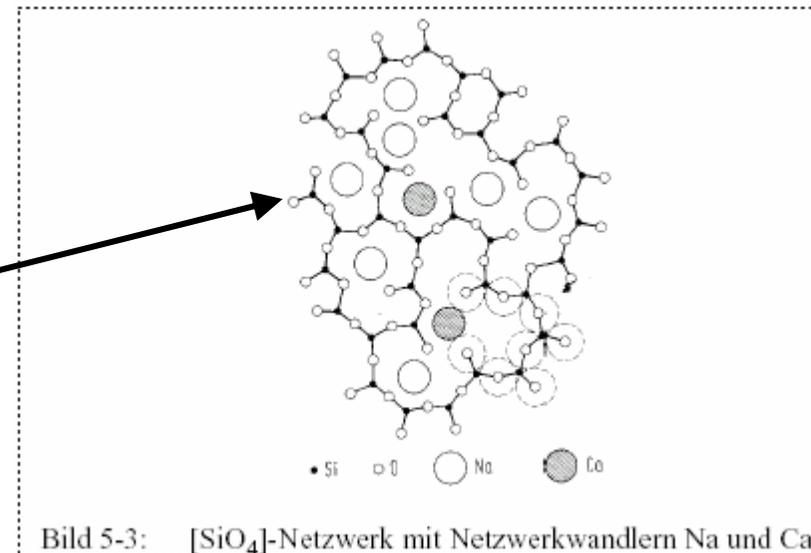
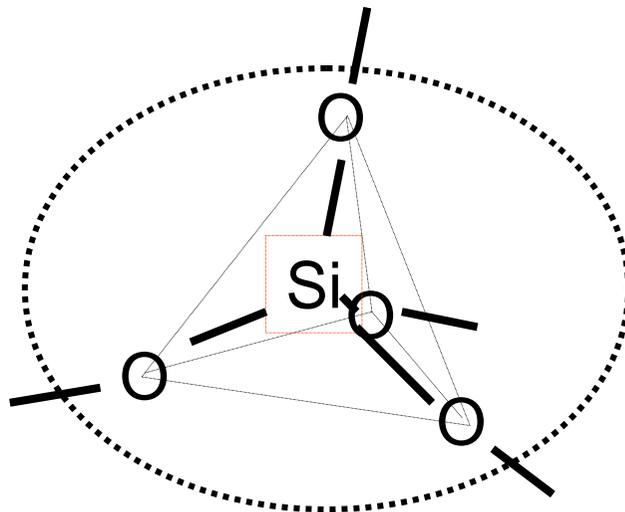
➤ Principales morfologías de los **Materiales Cerámicos:**

- ✓ cristalina (monocristal): diamante (brillante)
- ✓ **policristalina (“muchos cristales”):** p.ej. **Circonia estabilizada**
- ✓ amorfa: vidrio de ventana



# Conceptos nivel 0

- Principales morfologías de los **Materiales Cerámicos** :
  - ✓ cristalina (monocristal): diamante (brillante)
  - ✓ policristalina (muchos cristales)
  - ✓ **amorfa**: p.ej. vidrio de ventana: red 3D desordenada de tetraedros

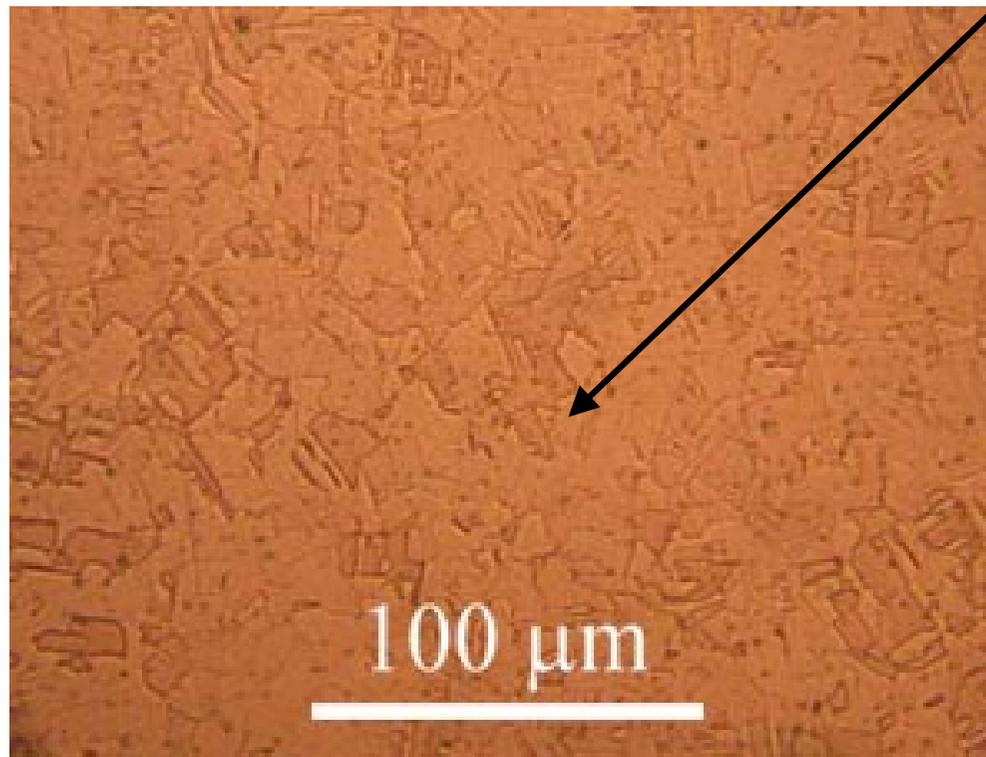


# Conceptos nivel 0

---

➤ Principales morfologías de los **Metales:**

- ✓ **policristalina (“muchos cristales”):** p.ej. acero, aluminio, cobre
- ✓ amorfa: vidrio metálico

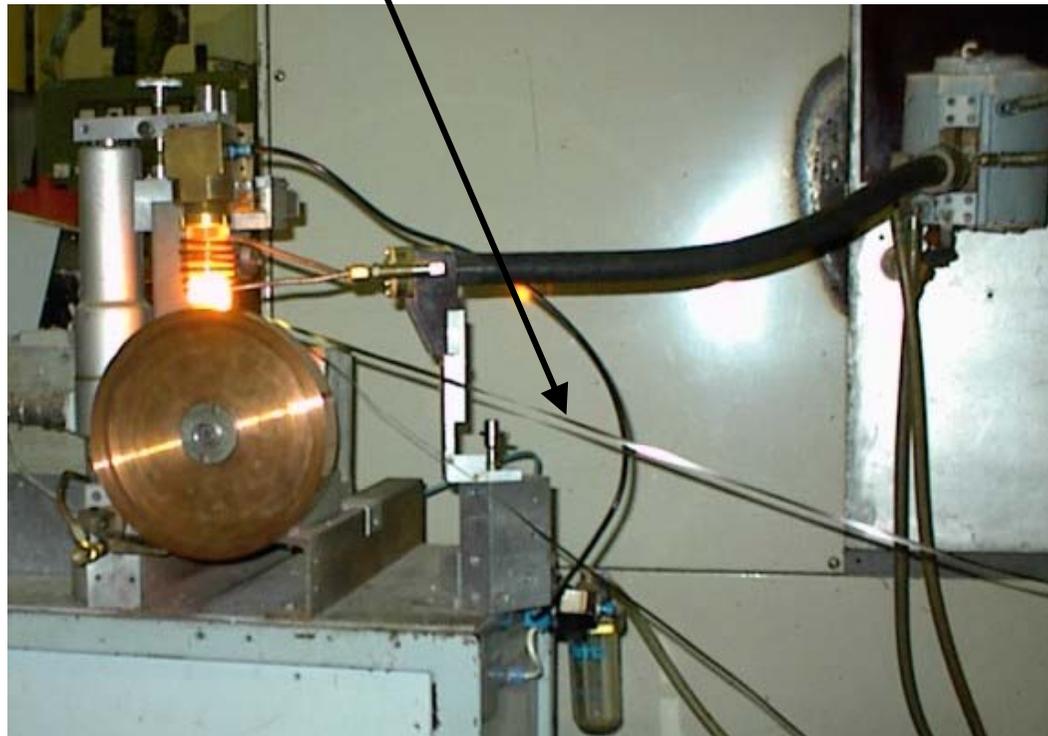


# Conceptos nivel 0

---

➤ Principales morfologías de los **Metales:**

- ✓ policristalina (“muchos cristales”): p.ej. acero, aluminio
- ✓ **amorfa: vidrio metálico**



# Conceptos nivel 0

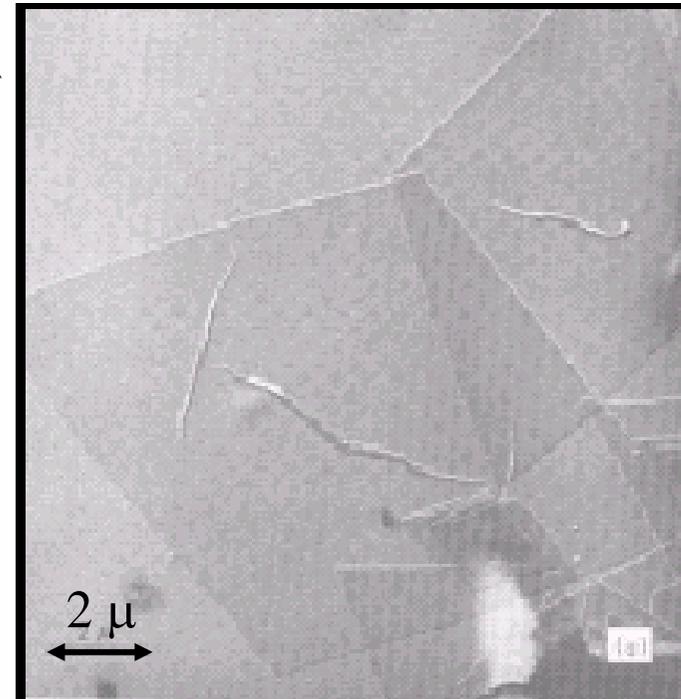
## ➤ Principales morfologías de los **Polímeros**:

✓ **crystalina (monocrystal)**: p.ej monocristal de PS (poliestireno)

✓ **semicristalina**

- esferulítica
- laminar (por estiramiento mecánico)
- “shish-kebab”

✓ **amorfa**



# Conceptos nivel 0

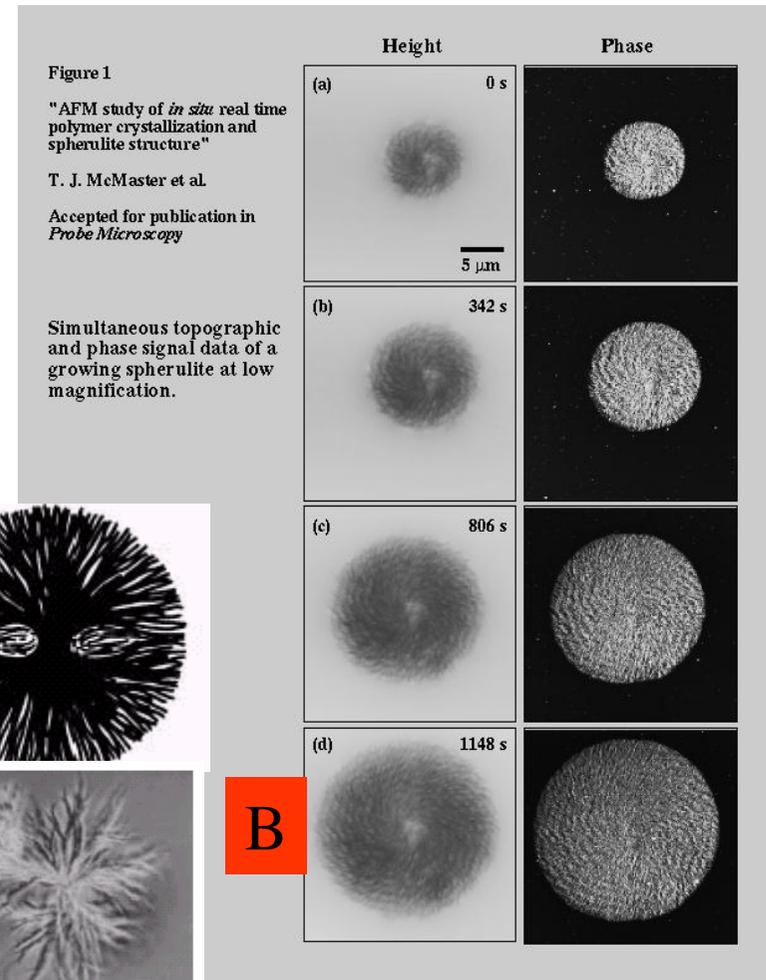
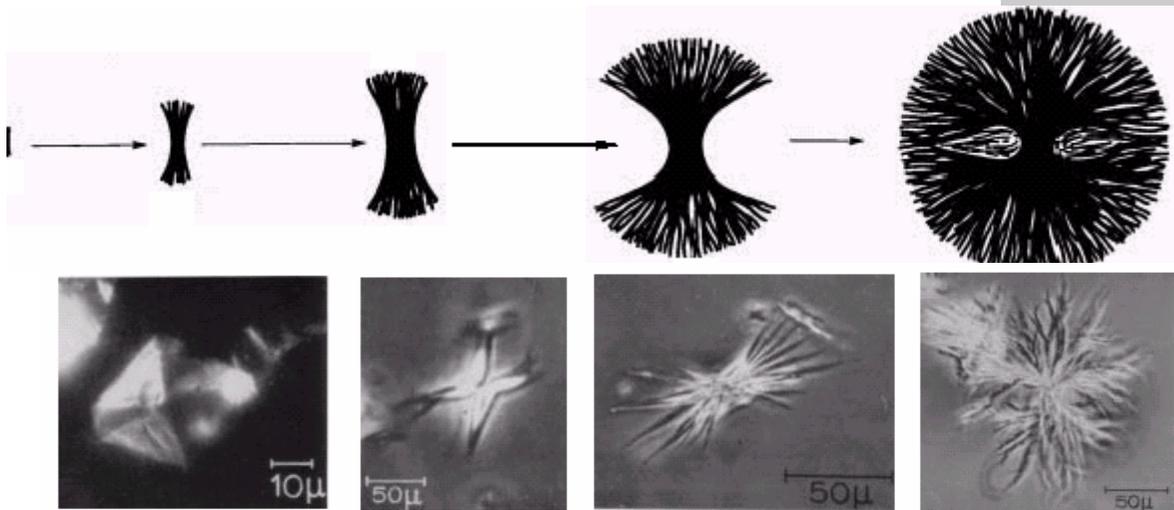
## ➤ Principales morfologías de los **Polímeros** :

✓ **crystalina** (monocrystal)

✓ **semicristalina**

- **esferulítica**
- laminar (por estiramiento mecánico)
- “shish-kebab”

✓ **amorfa**



# Conceptos nivel 0

## ➤ Principales morfologías de los **Polímeros** :

✓ **crystalina** (monocristal)

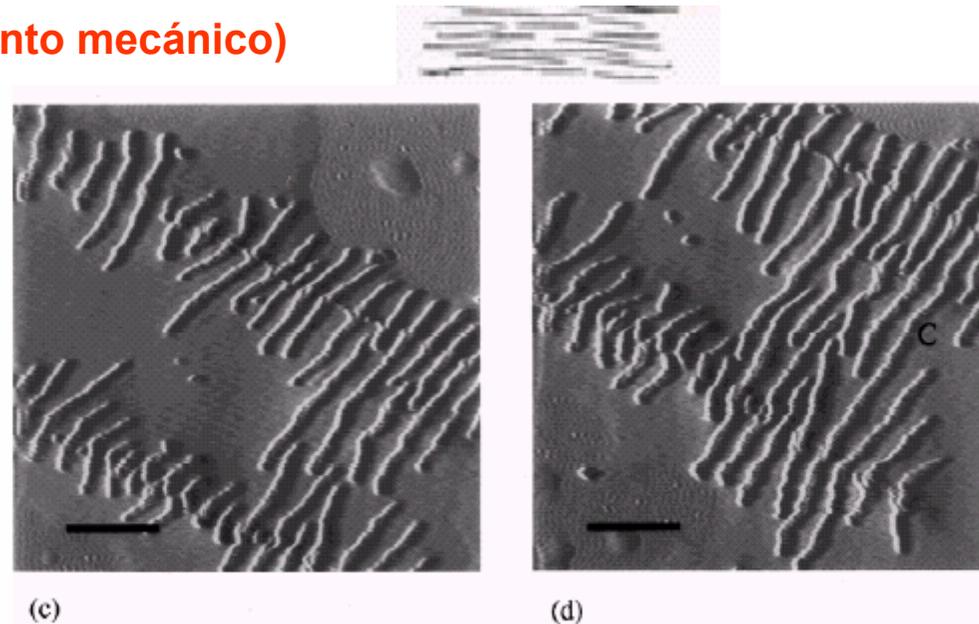
✓ **semicristalina**

- esferulítica

- **laminar (por estiramiento mecánico)**

- “shish-kebab”

✓ **amorfa**

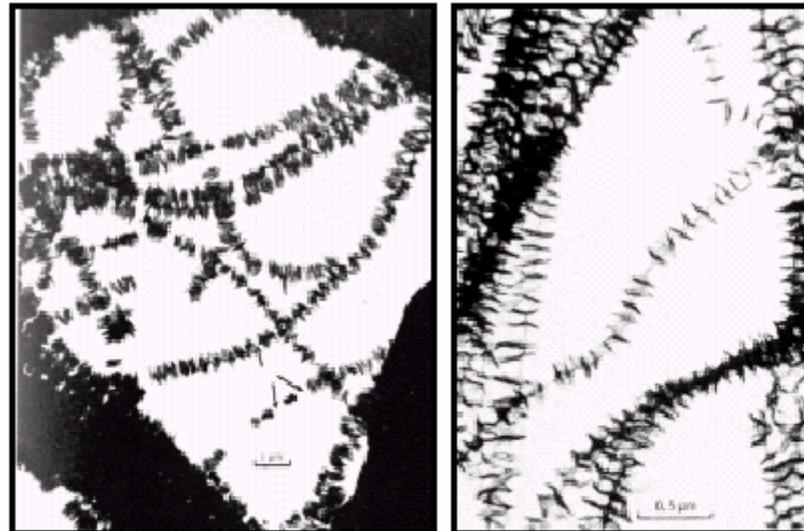


**Figure 2.** A series of AFM amplitude images showing the growth of lamellae from the oriented backbone. (a) and (b) are  $\times 2$  software zooms. (a) Taken at 132.5 °C; (b) taken at 132.3 °C; (c) taken at 132 °C; (d) taken at 131 °C. The scale bars represent 300 nm.

# Conceptos nivel 0

## ➤ Principales morfologías de los **Polímeros** :

- ✓ **crystalina** (monocristal)
- ✓ **semicristalina**
  - esferulítica
  - laminar (por estiramiento mecánico)
  - **“shish-kebab”**
- ✓ **amorfa**



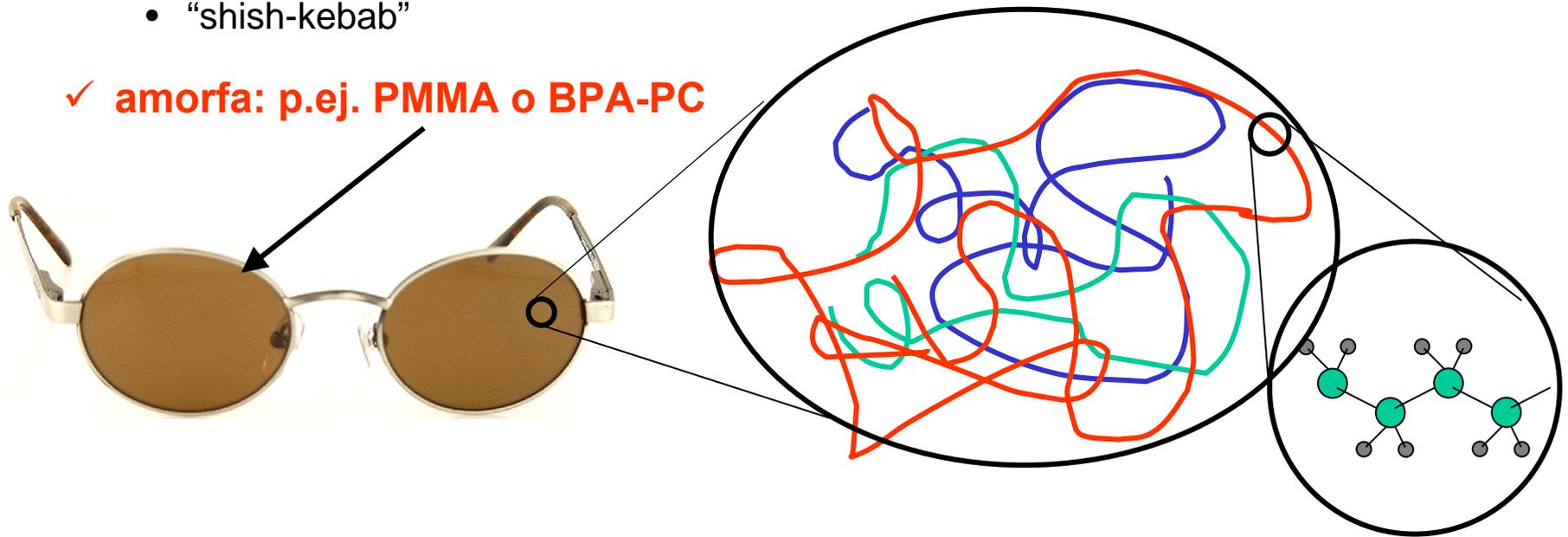
**Figure 2.4** (a) Shish kebab morphology of polyethylene from solution (from Pennings, 1967<sup>3</sup>). (b) Shish kebabs of cellulose formed by recrystallizing cellulose II onto microfibrils of high molecular weight<sup>3</sup>.

# Conceptos nivel 0

## ➤ Principales morfologías de los **Polímeros** :

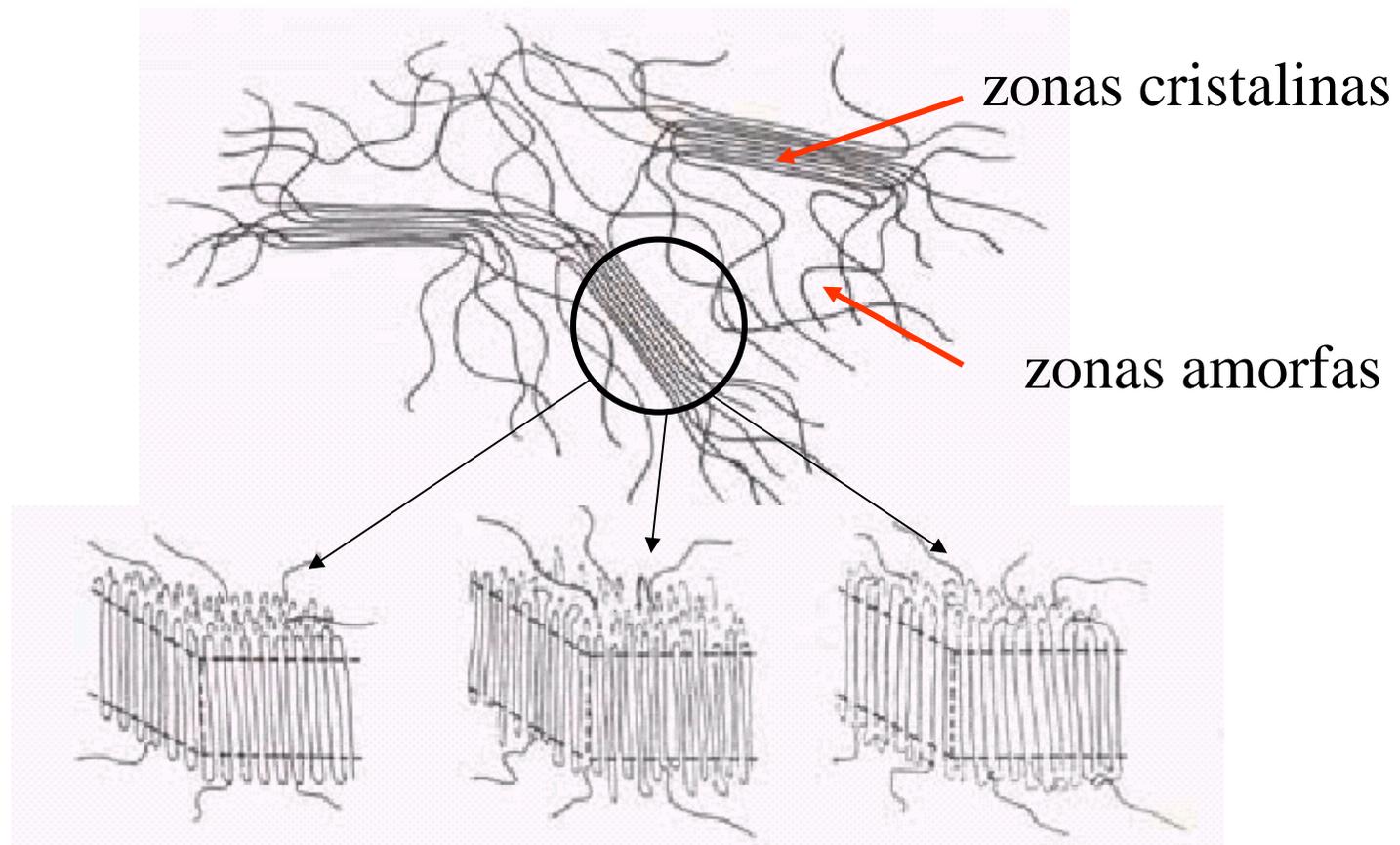
- ✓ **crystalina** (monocristal)
- ✓ **semicristalina**
  - esferulítica
  - laminar (por estiramiento mecánico)
  - “shish-kebab”

✓ **amorfa: p.ej. PMMA o BPA-PC**



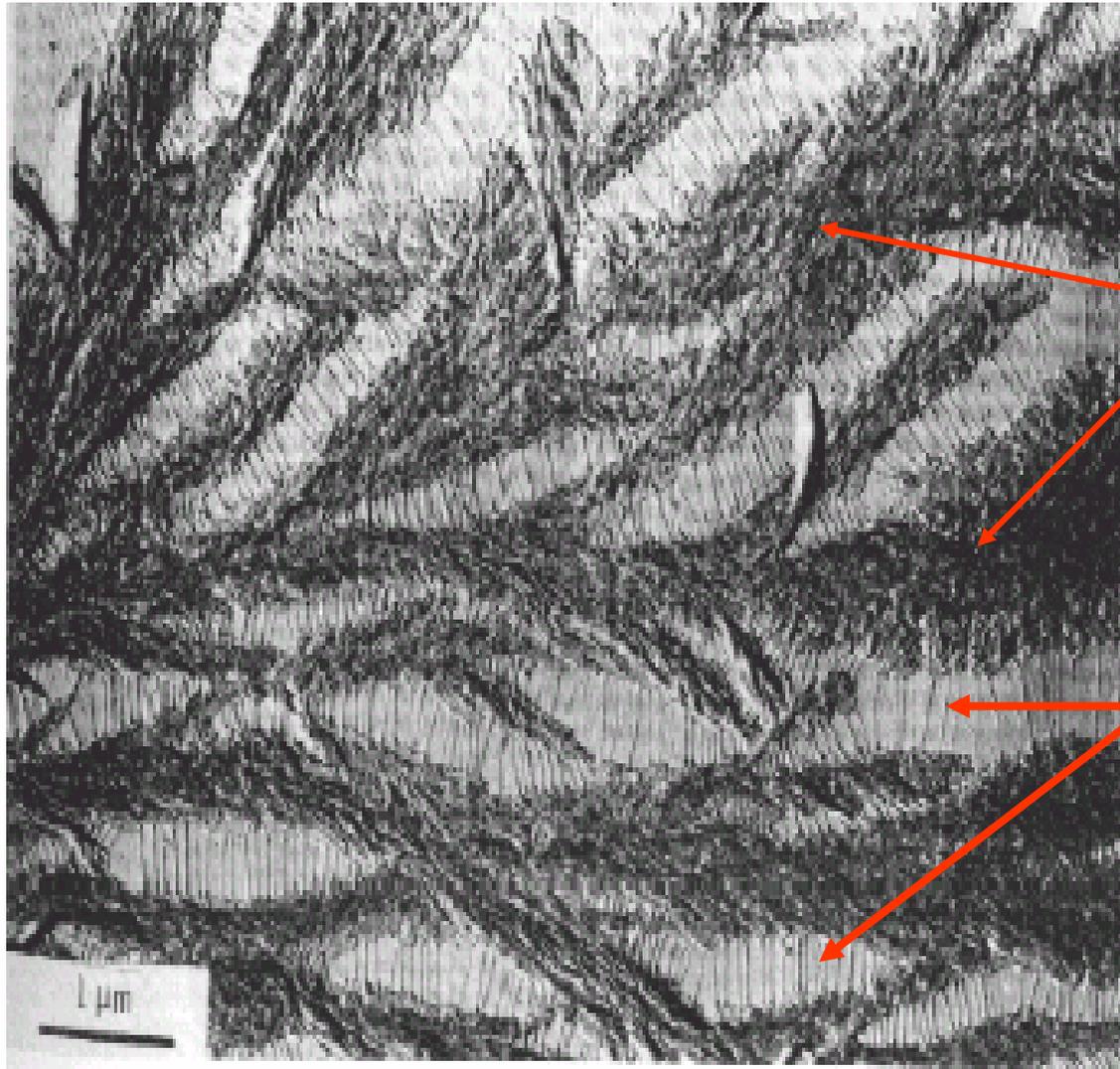
# Conceptos nivel 0

- En cualquier caso, el modo de cristalizar de las moléculas de polímeros es muy diferente del de las cerámicas o los metales:



# Conceptos nivel 0

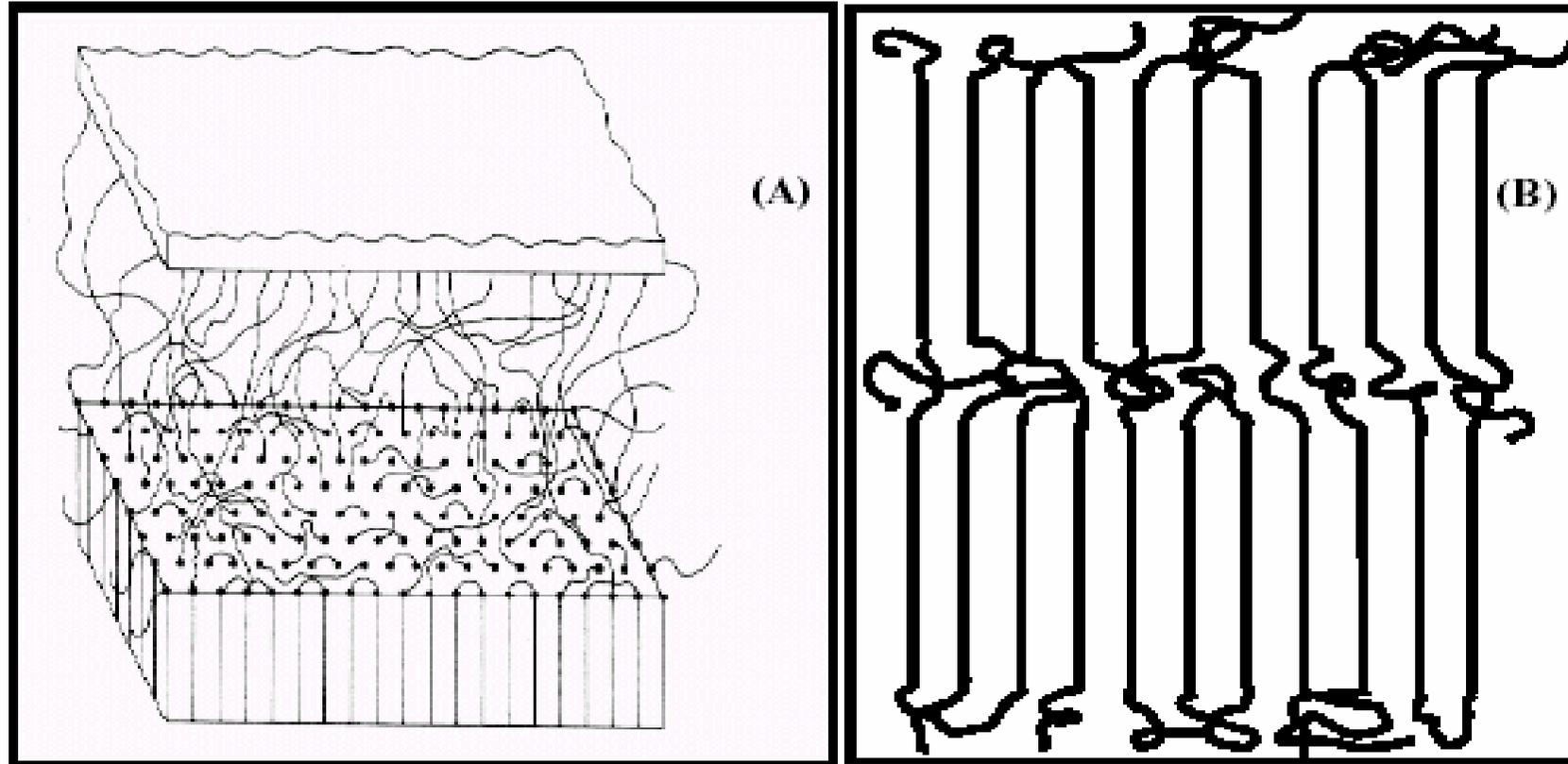
---



zonas (dominios)  
cristalinas

moléculas (cadenas)  
poliméricas que  
intervienen en varios  
dominios cristalinos

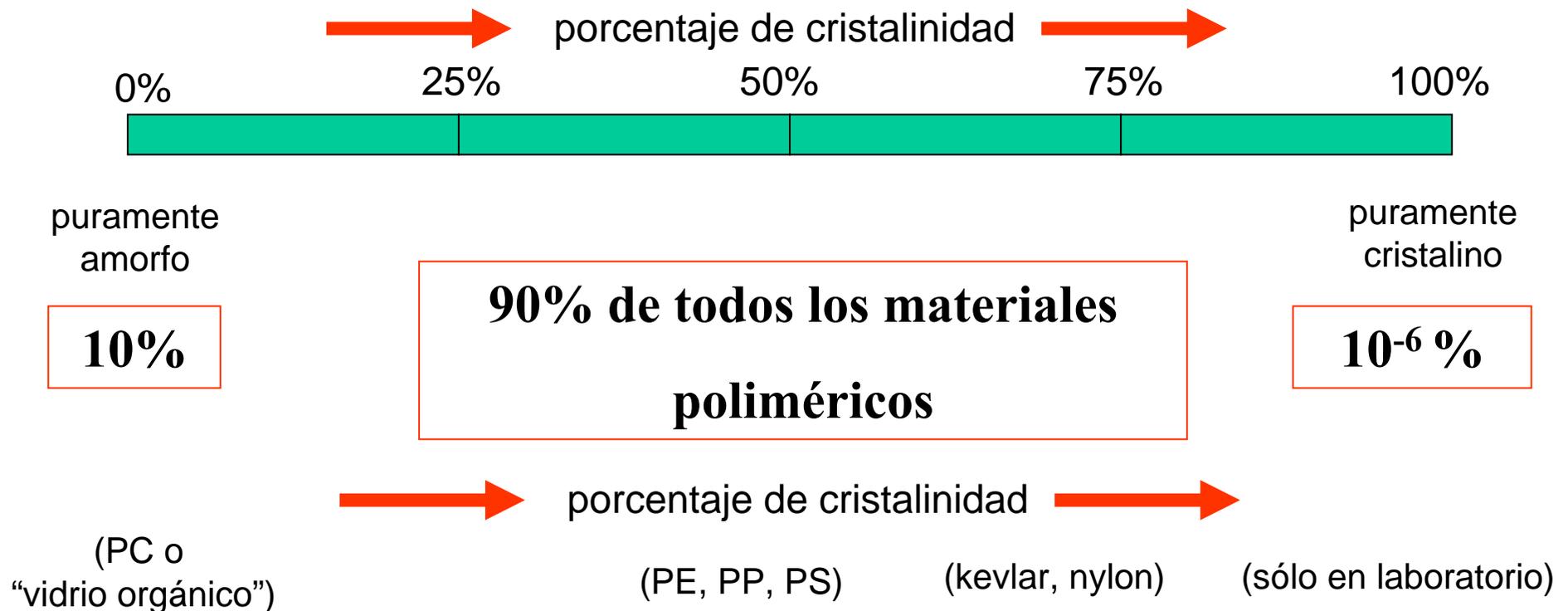
# Conceptos nivel 0



**Figure 2.7** (A) Schematic of a Switchboard model, showing the surface of a lamella, interlamellar region and tie chains between the lamella. (From Mandelkern<sup>30</sup>) (B) originally proposed model for melt crystallization in polymers<sup>17</sup>.

# Conceptos nivel 0

## Materiales poliméricos

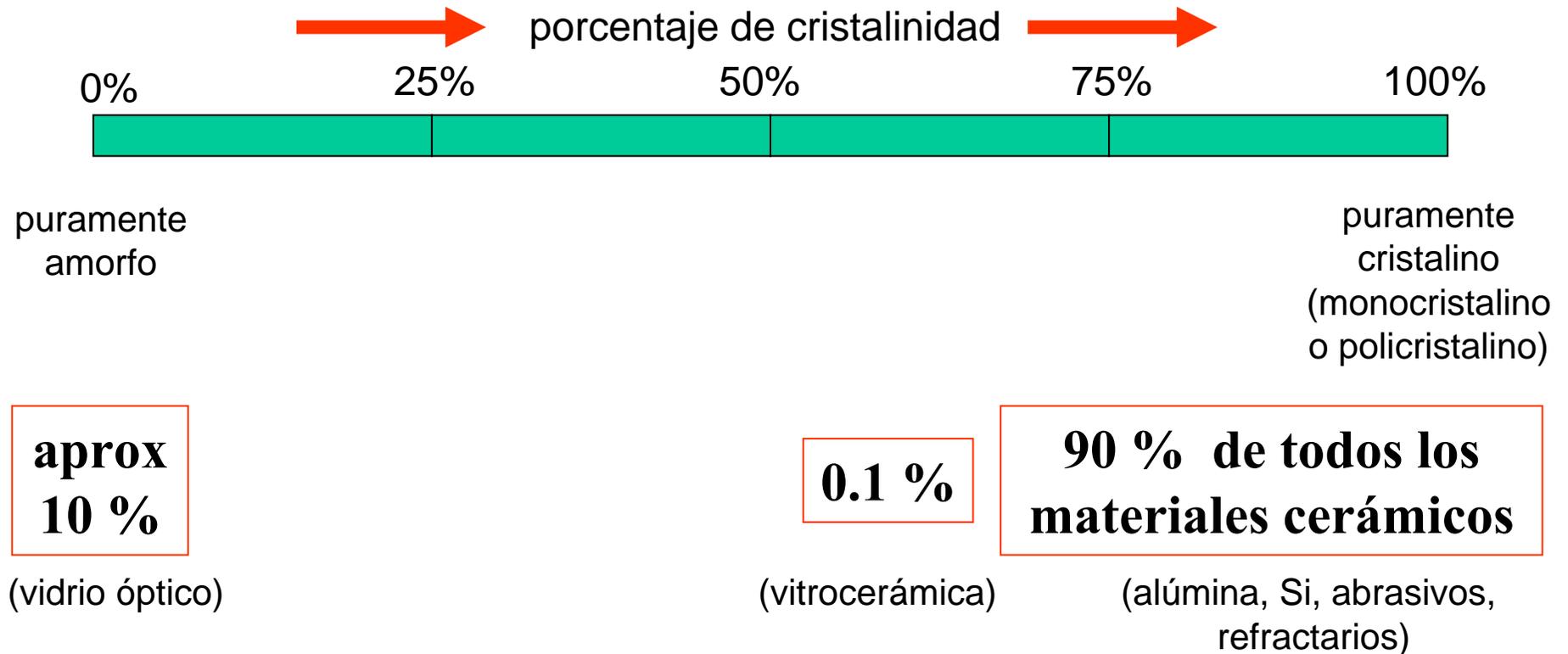


**Según la "historia" (el procedimiento de fabricación) del material, un mismo polímero puede tener grados de cristalinidad muy diferentes**



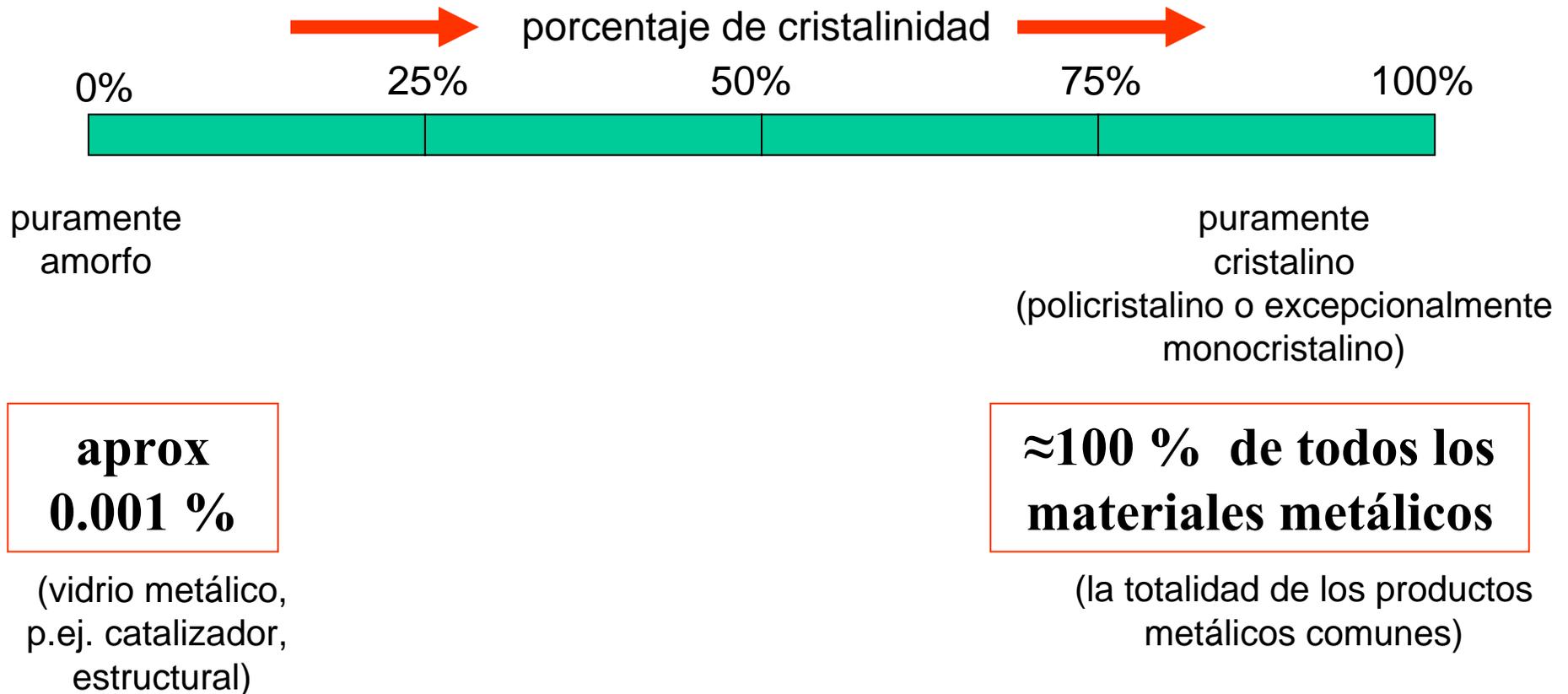
# Conceptos nivel 0

## Materiales cerámicos



# Conceptos nivel 0

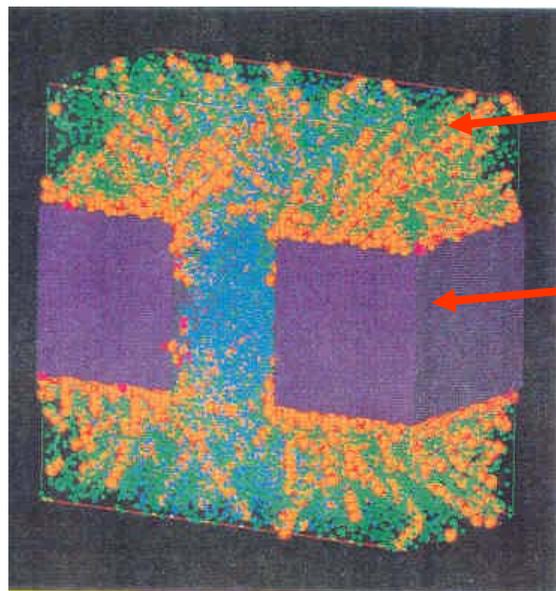
## Metales



# Conceptos nivel 0

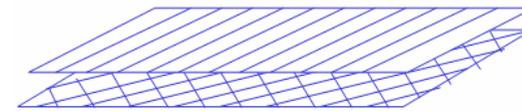
## Materiales compuestos

La morfología de un material compuesto está dada por la combinación de la morfología de sus constituyentes

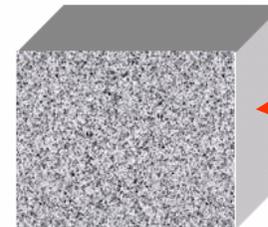


polioxietileno

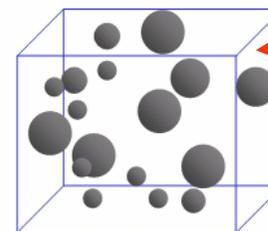
mica



combinación tejidos  
cross-ply / unidireccional  
en matriz de epoxi



hormigón



espuma de poliuretano  
(burbujas de CO<sub>2</sub> dispersas  
en una matriz de  
poliuretano amorfo)

# Conceptos nivel 0

---

## A nivel microscópico/atómico:

- El comportamiento macroscópico (mecánico, electrónico, óptico, etc.) está determinado por la **dinámica a escala molecular**, es decir, por la dinámica de los **grados de libertad (g.d.l o d.o.f)** moleculares/atómicos **activos**
- **La temperatura determina qué g.d.l. están activos: a mayor T, se activan más tipos y mayor número de g.d.l.**



# Conceptos nivel 0

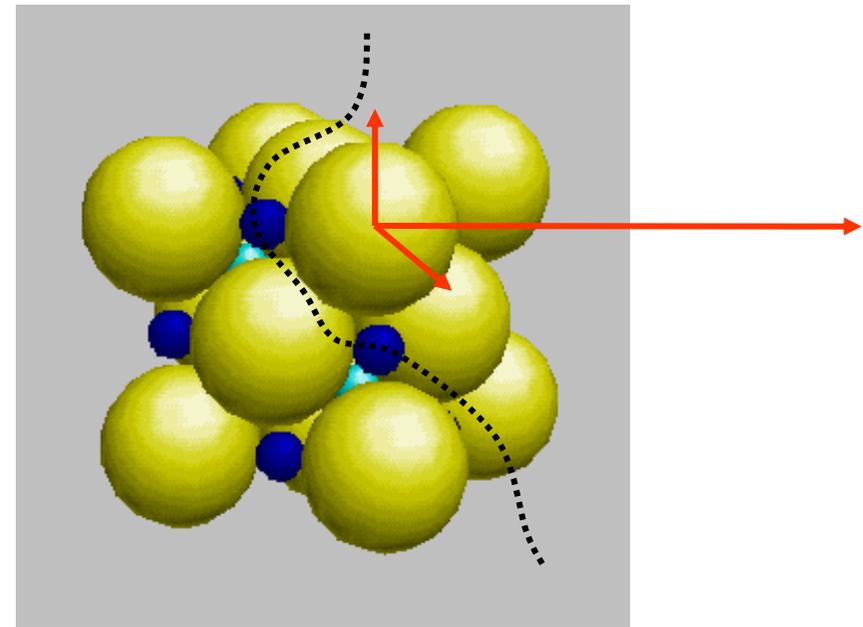
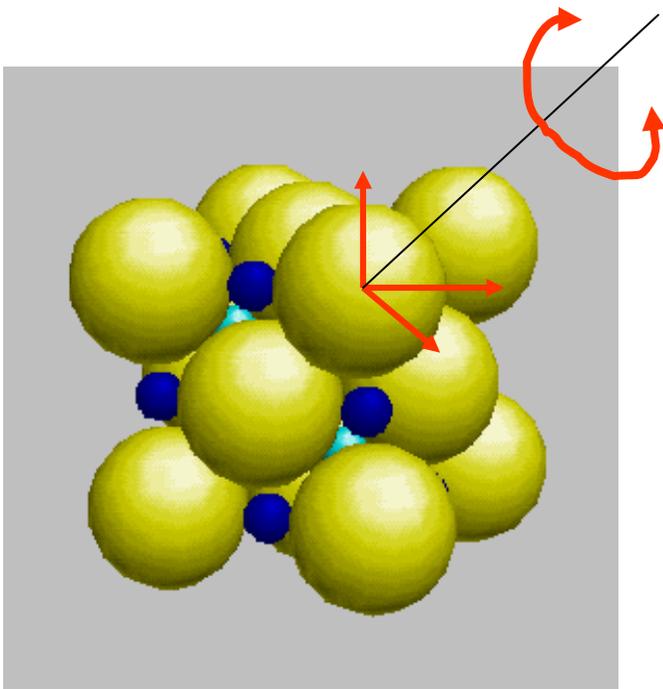
---

- En **materiales cerámicos**, existen enlaces químicos altamente direccionales
- Los grados de libertad **activos** son típicamente
  - ✓ desplazamientos **pequeños**
  - ✓ rotaciones relativas 3D (ángulos de Euler) **pequeñas**de los átomos individuales (modos normales de vibración; pequeña amplitud)



# Conceptos nivel 0

- Como consecuencia, una deformación (o un campo eléctrico) intenso puede conducir a una “rotura” irreversible de la estructura electrónica y a **fragilidad**



## Conceptos nivel 0

---

- En **metales**, los enlaces no son direccionales
- Cationes metálicos sumergidos en un gas de electrones
- Pueden reorganizarse con relativa facilidad
- Duros y tenaces



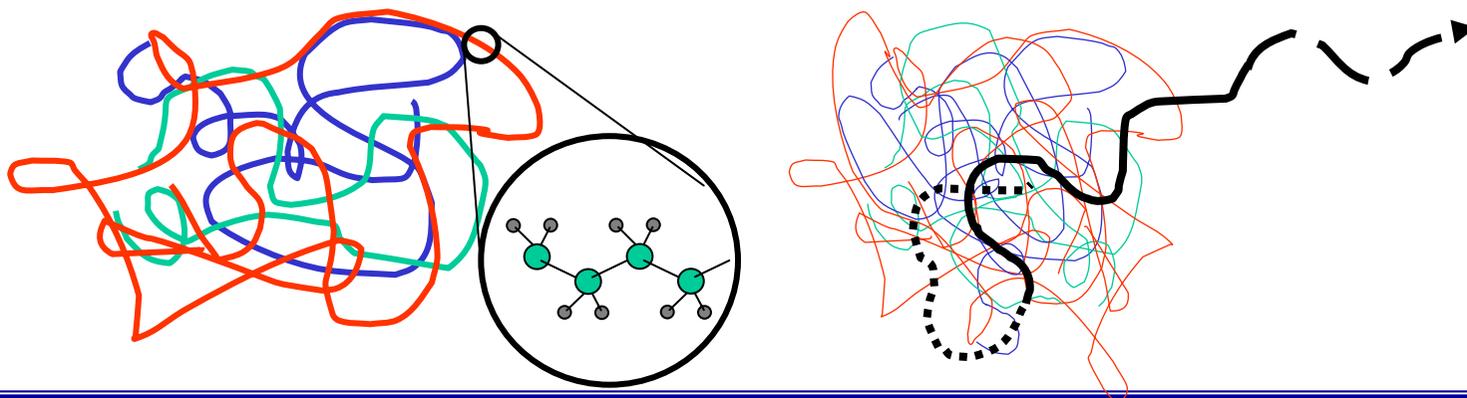
# Conceptos nivel 0

---

➤ En **materiales poliméricos**, los grados de libertad **activos** son esencialmente

- ✓ **torsiones (sobre todo en polímeros fundidos)**
- ✓ **deformaciones de ángulos y longitudes de enlace (en polímeros vítreos y cristalinos)**

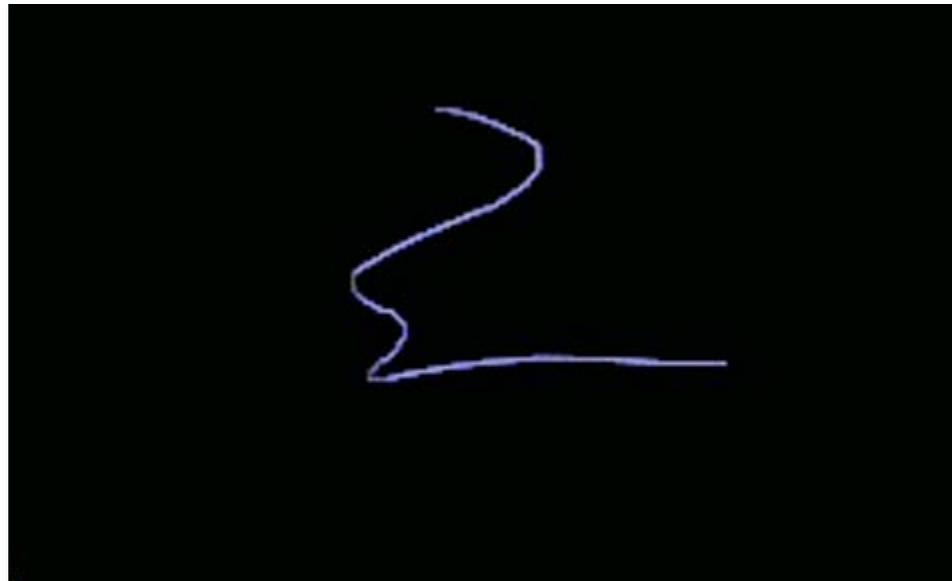
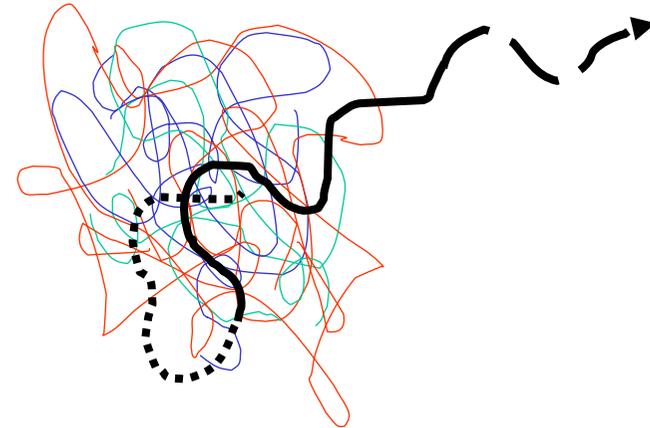
de los enlaces del esqueleto polimérico, que producen una dinámica molecular de **reptación**



# Conceptos nivel 0

---

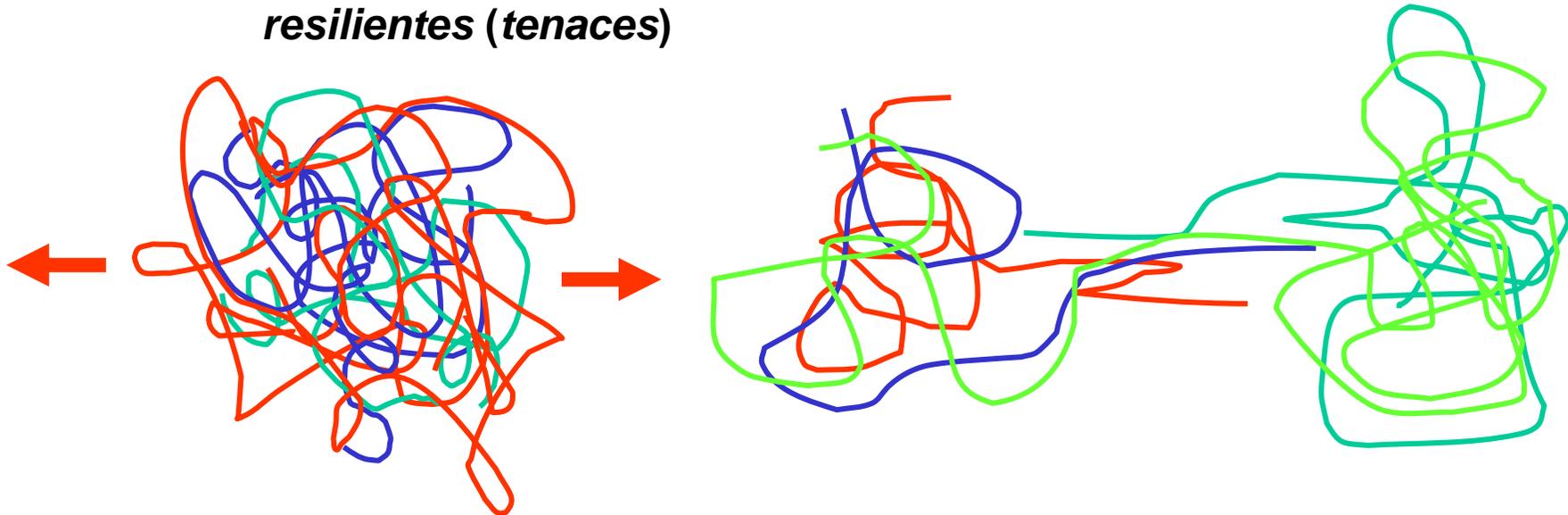
- El resto de las moléculas poliméricas definen un “tubo” en torno a una cadena dada y la obligan a moverse (reptar) a lo largo de él:



# Conceptos nivel 0

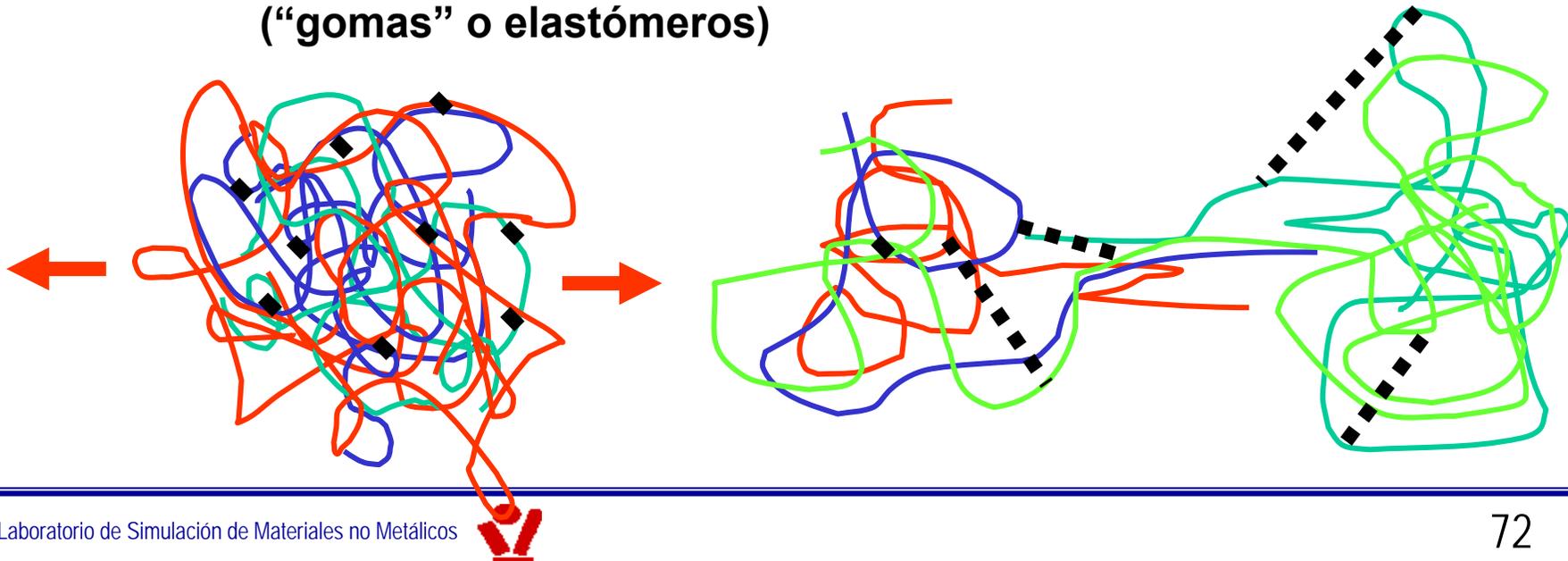
---

- lo que permite grandes deformaciones sin pérdida de la cohesión molecular
  - ✓ los polímeros son generalmente muy flexibles
  - ✓ soportan impactos mucho mejor que los cerámicos: son *resilientes (tenaces)*



# Conceptos nivel 0

- Si los g.d.l. moleculares están **activos** (a temperatura “elevada”, p.ej. 110°C)
  - ✓ fluyen como líquidos viscoelásticos
  - ✓ se pueden **reticular**, “atar químicamente” unas cadenas a otras usando a su vez cadenas poliméricas
  - ✓ con lo cual se obtiene un **sólido** altamente deformable (“gomas” o elastómeros)



# Conceptos nivel 0

---

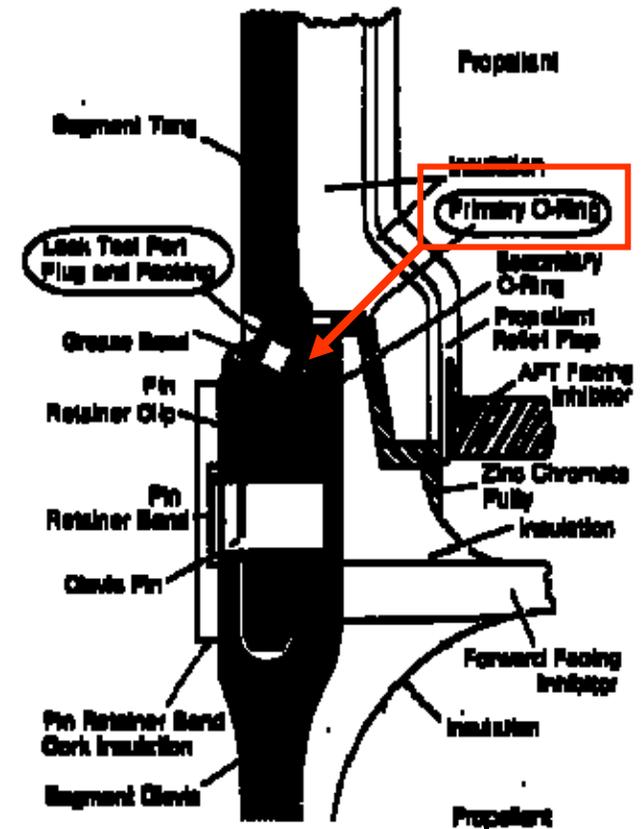
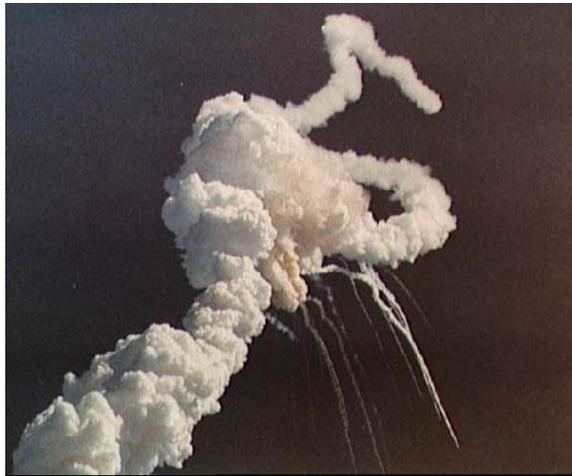
➤ Pero a baja temperatura los g.d.l. moleculares (torsiones) están **“congelados”**:

- ✓ se convierten en sólidos
- ✓ pero se solidifican sin formar un cristal (no hay orden espacial)
- ✓ forman un sólido amorfo, vítreo o vidrio orgánico (**transición vítrea**)
- ✓ los elastómeros dejan de ser elásticos y se fragilizan



# Conceptos nivel 0

## ➤ Con consecuencias



# Conceptos nivel 0

---

- Cerámicas, metales, polímeros orgánicos y compuestos son radicalmente diferentes a todas las escalas
- La predicción del comportamiento macroscópico requiere un conocimiento detallado de su estructura microscópica.

# Conceptos nivel 0

---

## ➤ En resumen:

- ✓ los **polímeros orgánicos** son generalmente:
  - **deformables, blandos y tenaces**
- ✓ los **metales** son generalmente:
  - **duros y tenaces**
- ✓ los **cerámicos** son generalmente:
  - **casi indeformables, duros y frágiles**
- ✓ los **compuestos** pueden “*diseñarse*” con **casi cualquier propiedad**

# Conceptos nivel 0

---

