

# GUIA DE PREGUNTAS Y PROBLEMAS PARA EL ESTUDIO DE LOS TEMAS:

## 1.- INTRODUCCION A LA CIENCIA DE LOS MATERIALES O MATERIALES

## 2.- ESTRUCTURAS CRISTALINAS

### OBJETIVO: PREPARATORIO PARA LA EVALUACION ( AUTO EVALUACION)

#### Parte 1.- Marque con una X la Respuesta Correcta

1 -El ataque químico de la superficie de la muestra se realiza con el fin de:

- Determinar la estructura cristalina.
- Determinar la distribución de fases.
- Eliminar las inclusiones.
- Determinar la composición química del material.

2 -En la red cúbica centrada en caras, los planos densos corresponden a la familia:

- (1 0 0).
- (1 1 0).
- (1 1 1).
- (2 1 1).

3 -La dirección compacta en el sistema cúbico centrado en el cuerpo es:

- No hay direcciones compactas.
- $\langle 100 \rangle$ .
- $\langle 110 \rangle$ .
- $\langle 111 \rangle$ .

4 -Indica la secuencia correcta para la observación de inclusiones en un material metálico.

- Desbaste, pulido y ataque.
- Corte, ataque y pulido.
- Corte, desbaste y pulido.
- Corte y observación directa al microscopio.

5 -La estructura cristalina se determina mediante técnicas de:

- Metalografía.
- Difracción.
- Microdurezas.
- Análisis químico.

- 6 -La celda unitaria del cobre tiene un parámetro reticular  $a = 3,61$  Amgstroms. Calcule el radio atómico.
- 1,80 Amgstroms.
  - 1,20 Amgstroms.
  - 1,27 Amgstroms.
  - 1,56 Amgstroms.
- 7 -En las operaciones de desbaste se deben realizar giros de  $90^\circ$  entre una lija y otra, cuyo objetivo es:
- Poder eliminar mejor los restos de materiales.
  - Observar mejor la eliminación del rayado anterior.
  - Facilitar el contacto del metal con el abrasivo.
  - Para eliminar las inclusiones.
- 8 -Los monocristales de tipo dendrítico adquieren fundamentalmente:
- Forma redondeada.
  - Forma poligonal con fronteras rectilneas.
  - Formas alargadas redondeadas.
  - Morfología especial según de la aleación de que se trate.
- 9 -La débil diferencia de coloración en una observación al microscopio es indicativo de:
- La diferencia de composición química de los granos.
  - Las distintas fases presentes en el material.
  - La distinta orientación cristalina.
  - Ninguna es correcta.
- 10 -La distinción entre distintas fases se puede realizar por:
- Observación microscópica.
  - Microdureza Vickers.
  - Microdureza Knoop.
  - Todas son correctas.
- 11 -La difracción de rayos X es una técnica aplicada para investigar:
- Materiales metálicos.
  - Sólidos con estructuras cristalinas.
  - Materiales polimericos.
  - Sólidos amorfos.
- 12 -La técnica metalográfica nos revela:
- La organización espacial de las fases de un material metálico.
  - Las diferentes formas y tamaños que adoptan las fases en la estructura.
  - Las diferentes configuraciones entre las fases y compuestos.

Todas son correctas.

13 -Decimos que una estructura es cristalina cuando presenta:

- Una sucesión regular de planos cristalinos, necesariamente de máxima densidad.
- Una sucesión regular de planos cristalinos, necesariamente de mínima densidad.
- Una sucesión regular de planos cristalinos, no necesariamente de máxima densidad.
- Una sucesión regular especial de planos cristalinos, necesariamente de máxima densidad.

14 -En la estructura cúbica centrada en cuerpo, son planos oscuros cuando:

- Los índices de Miller son pares.
- Los índices de Miller son impares.
- La suma de los índices de Miller es par.
- La suma de los índices de Miller es impar.

15 -En la celdilla cúbica de caras centradas en el plano de máxima compactación es el:

- (1,1,1).
- (1,1,0).
- (1,0,0).
- (2,0,0).

16 -La fuente de radiación X en difracción es monocromática para:

- Lograr la refracción de la radiación.
- Aumentar la potencia del espectro.
- Resolver el espectro característico.
- Atravesar el material con la radiación.

17 -El espectro característico entre las estructuras c.c.c. del cobre y aluminio, se diferencian en:

- Los índices de los planos refractantes.
- Los ángulos  $2\theta$  característicos del espectro.
- La intensidad de la radiación difractante.
- La energía y la longitud de onda de los electrones refractados.

18 -De las siguientes relaciones entre el parámetro de red y radio atómico, señala la incorrecta:

- $a = 4R/\sqrt{2}$
- $a = 2R/\sqrt{2}$
- $a = 4R/\sqrt{3}$
- $a = 2R$

19 -Cuales son los índices de un plano que corta respectivamente a los ejes x,y,z en  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{3}$ ,  $\frac{1}{4}$ .

- [2,3,4]

[3,2,1]

[1,2,3]

[4,3,2]

20 - Los materiales cuyas propiedades son independientes de la dirección de la medida se denominan:

Anisotrópicas.

Alotrópicas.

Isotrópicas.

Cuasitropicas.

21 - Mediante la metalografía podemos resolver:

La estructura cristalina del material.

Las diferentes formas y tamaños que adoptan en la estructura.

La composición de las inclusiones.

Todas son correctas.

22 - Cual de las siguientes técnicas no es un método de análisis microestructural.

Análisis de las estructuras cristalinas por difracción de rayos X.

Análisis químico de los componentes microestructurales.

Dureza Brinell y Rockwell.

Análisis metalográfico.

23 - Para la celdilla cúbica centrada en el cuerpo la suma de los índices de Miller:

Debe ser un número par para que tenga lugar la difracción.

Debe ser un número par o impar, para que tenga lugar la difracción.

Deben ser todos los índices pares.

Deben ser todos los índices impares.

24 - Para la celdilla cúbica de caras centradas los índices de Miller deben ser:

Pares.

Pares o impares.

La suma de ellos debe ser par.

La suma de ellos debe ser impar.

### **SOLUCION A LAS CUESTIONES DE AUTOEVALUACION:**

1 - b, 2 - c, 3 - d, 4 - c, 5 - b, 6 - c, 7 - b, 8 - c, 9 - c, 10 - d, 11 - b, 12 - d, 13 - c, 14 - d, 15 - a, 16 - c, 17 - b, 18 - b, 19 - a, 20 - c, 21 - b, 22 - c, 23 - a, 24 - b.

**PARTE 2.- DESCRIBIR, EXPLICAR, COMPLETAR LAS SIGUIENTES PREGUNTAS**

## 1.- QUE SE ENTIENDE POR IMPERFECCION O DEFECTO:

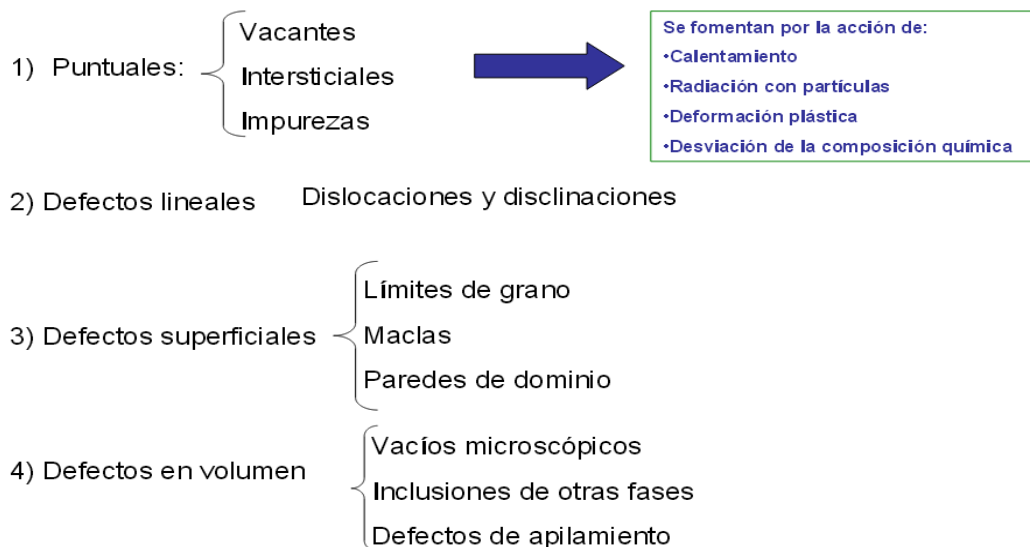
Se entiende por imperfección o defecto cristalino **cualquier región del cristal en la que la organización microscópica de átomos, iones o moléculas, difiere de la correspondiente a un cristal periódico ideal**

## 2.- ¿De que dependen fundamentalmente las propiedades de los Materiales ?

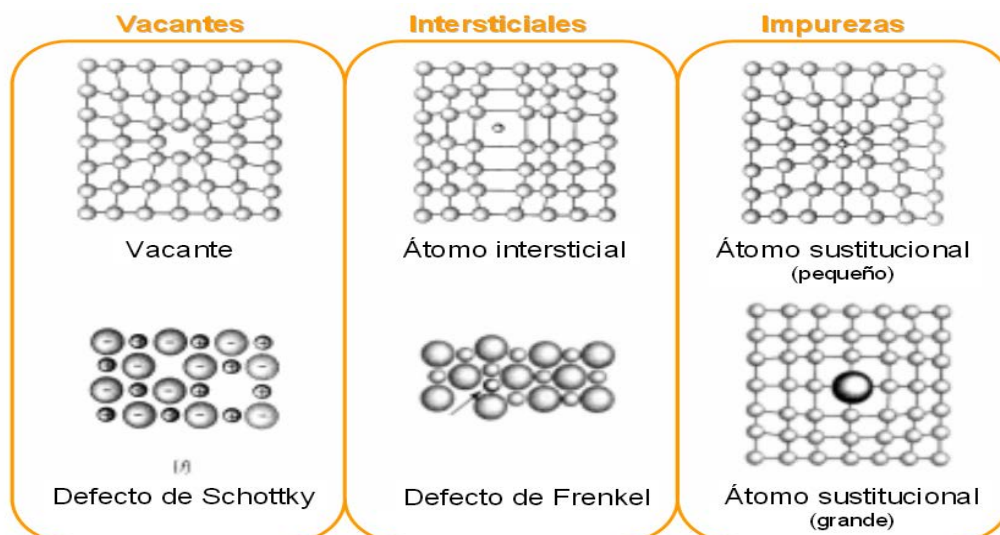
Propiedades como: resistencia mecánica, dureza, difusión, resistencia eléctrica, o actividad química dependen más de los átomos en posiciones no periódicas que de los átomos situados en posiciones periódicas

## 3.- CLASIFICACIÓN DE LOS DEFECTOS Y COMO SE FOMENTAN LOS DEFECTOS PUNTUALES

### CLASIFICACIÓN DE LOS DEFECTOS: POR SU DIMENSIÓN



## 4.- DESCRIBA TODOS LOS DEFECTOS PUNTUALES



## 5.- V o F

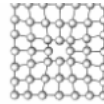
Para cada temperatura existe una concentración en equilibrio de vacantes V

Sólido cristalino no puede existir sin la presencia de defectos V

Los defectos son intrínsecos a los sólidos cristalinos V

## 6.- Proporciones de Vacantes en un sólido

### Proporción de vacantes en un sólido:



Se determina a partir de minimizar la función  $F = U - TS$ , el resultado de este cálculo es:

$$n \approx N \exp\left(-\frac{E}{KT}\right)$$

$n$  = concentración de vacantes.

$N$  = concentración de átomos en la red

$E$  = energía de formación de una vacante

$T$  = temperatura

$K$  = constante de Boltzmann

Por ejemplo, en una situación real en un metal en el cual  $E \sim 1\text{eV}$ , para  $T = 1000\text{ K}$ :

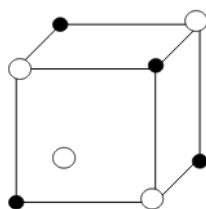
$$\frac{n}{N} \approx 10^{-5}$$

Es decir, que en estas condiciones la proporción de vacantes es del orden de diez partes por millón.

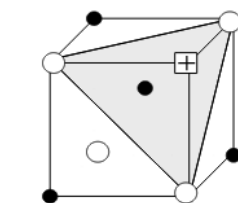
## 7.- QUE ES EL DEFECTO FRENKEL Y REPRESENTELO

**Defecto Frenkel:** es el conjunto formado por un átomo intersticial y un hueco

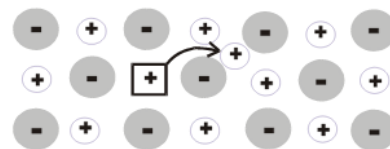
En los sólidos iónicos estas asociaciones de defectos se denominan **defectos de Frenkel**. Estos aparecen en cristales en los que existe una diferencia importante entre los tamaños de los aniones y los cationes (ej: AgCl y otros haluros metálicos), y cuya estructura reticular sea lo suficientemente abierta como para acomodar iones intersticiales sin mucha distorsión.



○ Cl<sup>-</sup>    ● Ag<sup>+</sup>



⊕ vacante catiónica



Formación de un ión intersticial  
y  
una vacante catiónica

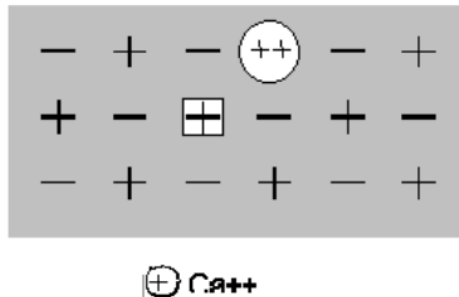
Representación de un defecto de tipo Frenkel en el AgCl. a) Posiciones normales en un cristal ideal, b) Situación intersticial del ión Ag<sup>+</sup>, con formación de una vacante positiva ⊕.

## 8.- DESCRIBA LAS IMPUREZAS

### Defectos de origen extrínseco: Impurezas

Las impurezas pueden promover la presencia de otros defectos

El dopado de NaCl con  $\text{CaCl}_2$  supone la sustitución de iones de  $\text{Na}^+$  por  $\text{Ca}^{++}$ , lo que origina un cristal del tipo  $\text{Na}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Cl}$ . La necesidad de mantener la neutralidad eléctrica del cristal implica la formación de vacantes positivas  $\square$



Formación de vacantes  $\square$  como consecuencia de la existencia de una impureza química divalente

## 9.- INFLUENCIA DE LOS DEFECTOS EN LAS PROPIEDADES EJEMPLO

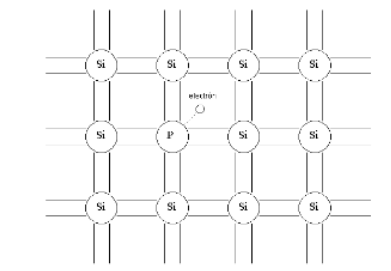
### Impurezas: Influencia sobre las propiedades

#### Dopado de semiconductores

El Si es el material base para la fabricación de dispositivos microelectrónicos; sin embargo no se usa puro ya que se necesita modificar sus propiedades mediante la incorporación controlada de pequeñas cantidades de impurezas:

**Semiconductores de tipo P (B, Al, Ga)**  
Valencia 3  
"aceptores de electrones" → huecos

**Semiconductores de tipo N (P, AS, Sb)**  
Valencia 5  
"donadores de electrones"



La presencia de "defectos", como son los dopantes, confiere a los semiconductores concentraciones suplementarias de portadores de carga que les confiere unas propiedades eléctricas fundamentales en el diseño de los modernos dispositivos electrónicos

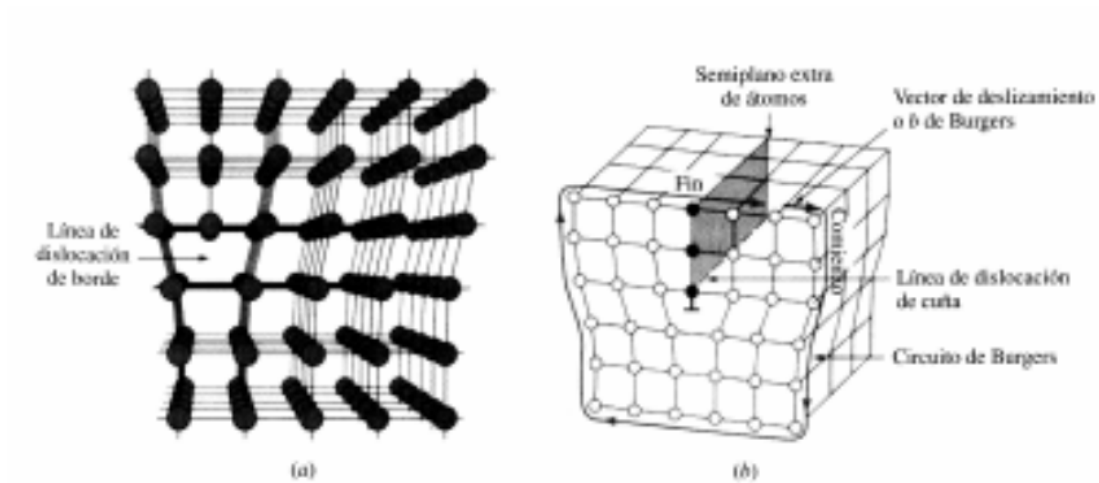
## 10.- DEFINICION DE DISLOCACION

Una dislocación es una imperfección en una red cristalina que influye notablemente en las propiedades mecánicas. Se caracteriza por introducir un plano atómico extra en la red cristalina que produce un desplazamiento de los átomos presentes en la zona donde acaba el plano extra.

## 11.- TIPOS DE DISLOCACIONES

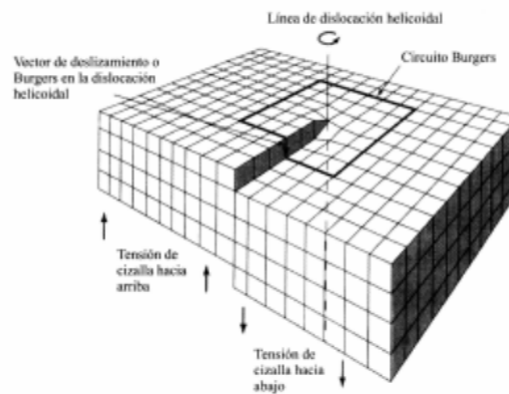
### Dislocaciones en forma de cuña o cuneiformes:

Se originan al introducir en el material un plano de átomos adicional

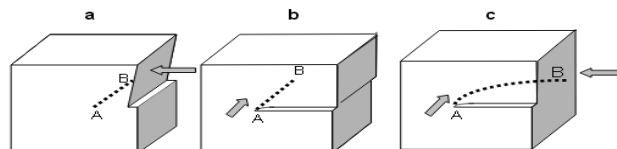


### Dislocaciones helicoidales o de tornillo:

Se originan cuando partes contiguas del material sufren esfuerzos cortantes paralelos pero de sentidos opuestos: Cizalladura



Los dos tipos de dislocaciones definidas son formas límites; las dislocaciones que aparecen normalmente en los sólidos reales son formas intermedias entre estas dos extremas y se denominan **dislocaciones mixtas**



a) dislocación en forma de cuña, b) dislocación helicoidal, c) dislocación mixta con carácter helicoidal en A y cuneiforme en B



## 12.- IMPORTANCIA DE LAS DISLOCACIONES Y SU DESLIZAMIENTO

1. El deslizamiento de las dislocaciones explica por qué la resistencia mecánica de un metal es menor de lo esperable (enlace metálico)
2. El deslizamiento proporciona ductilidad al material (facilidad de deformación). De no existir la posibilidad de deslizamiento, el material sería frágil.
3. Controlar el movimiento de las dislocaciones (introducir impurezas, defectos, solidificación, etc.) permite controlar las propiedades mecánicas del material

## 13.- LIMITES DE GRANO

Superficies internas que separan regiones con diferentes orientaciones cristalinas

## 14.- LA REDUCCION DEL TAMAÑO DE GRANO

..... Mejora la Resistencia del Material

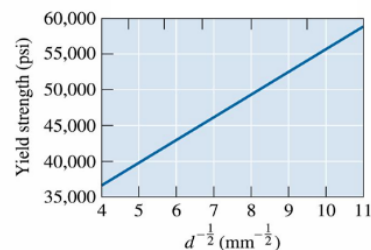
El tamaño de grano influye en las propiedades del material



Las fronteras de grano impiden el movimiento de las dislocaciones

**Ecuación empírica de Hall-Petch**

$$\sigma_y = \sigma_0 + Kd^{-1/2}$$



$\sigma_y$  es el límite elástico del material, es decir el esfuerzo a partir del cual el material se deforma de manera permanente,  $d$  es el tamaño de grano y  $\sigma_0$  y  $K$  son constantes que dependen del metal.

Una reducción del tamaño de grano mejora la resistencia del material

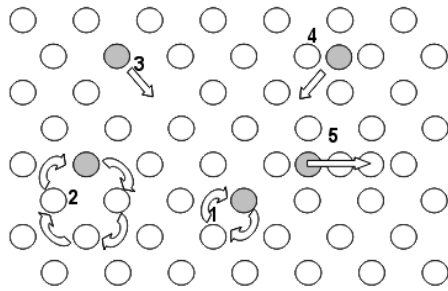
**15.- Cuando en un determinado material existe una cierta concentración de átomos N cuya distribución espacial no es homogénea, es decir existe un gradiente de concentración, tiene lugar un movimiento atómico en la dirección opuesta al gradiente, que tiende a homogeneizar su concentración en el material. Este fenómeno se denomina.....**

**Difusión**

**16.- La importancia tecnológica de la difusión es en:**

Tratamientos térmicos: cementación, nitruración de aceros, control microestructura, Homogenización de impurezas Microelectrónica: Dopado de semiconductores, Modificación de vidrios y cerámicas y Sinterización

## 17.- Mecanismo de Difusión:



### Posibles mecanismos de difusión

- 1 Sustitución atómica
- 2 Sustitución atómica cíclica
- 3 Ocupación de vacantes
- 4 Impureza intersticial (directa)
- 5 Impureza sustituyendo átomo intersticial (indirecta)

Los mecanismos más probables están relacionados con la presencia de diversos defectos en la red cristalina. Implican un menor coste energético

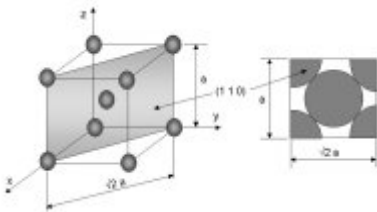
Los más probables en la figura son la difusión por movimiento de vacantes (3) y difusión por vía intersticial directo (4)

## PROBLEMAS PARA EJERCITARSE

### Problema 3.1

La distancia entre los planos de índices (110) en una red cúbica centrada c.c. es  $d_{110} = 2.65 \text{ \AA}$ . Calcular:

- a) La constante reticular.
- b) El radio atómico del elemento.



### Solución al Problema 3.1

a) En las redes cúbicas, los planos de índices (110) son planos que pasan por una arista y la diagonal de una cara, tal como se muestra en la figura. Para esta familia de planos, la relación geométrica entre la distancia  $d_{hkl}$  de otro plano paralelo y la constante reticular vale:

$$d_{hkl} = a / (h^2 + k^2 + l^2)^{1/2}$$

de donde

$$a = d_{hkl} (h^2 + k^2 + l^2)^{1/2}$$

$$a = 2.65 \sqrt{1^2 + 1^2 + 0} = 2.65 \sqrt{2} = 3.747 \text{ \AA}$$

b) En una red c.c. la diagonal del cubo es compacta, es decir, los átomos de las esquinas y el central están tocándose. Por lo tanto, y asumiendo un modelo de esferas duras, la diagonal del cubo, cuya longitud es  $a\sqrt{3}$ , tiene la misma longitud que 4 radios atómicos (intersecta completamente al átomo central y hasta el centro a los dos átomos de las esquinas opuestas). Esto es:

$$a \sqrt{3} = 4 r_a$$

de donde:

$$r_a = a \frac{\sqrt{3}}{4} = 3.747 \frac{\sqrt{3}}{4} = 1.622 \text{ \AA}$$

### Problema 3.2

Calcular la densidad teórica del hierro a temperatura ambiente, sabiendo que presenta red c.c. con parámetro reticular  $a = 2.866 \text{ \AA}$ . Peso atómico de Fe: 55.847.  
Nota: Cte de Avogadro:  $6.0248 \cdot 10^{23} \text{ átomos/mol}$ .

### Solución al Problema 3.2

El número de átomos por celda en la red c.c. es de  $1 + 8 (1/8) = 2 \text{ átomos/celda}$ .

La masa de cada átomo de hierro será:

$$\text{Peso atómico} / n^{\circ} \text{ Avogadro} = 55.847 / 6.0248 \cdot 10^{23} = 9.2695 \cdot 10^{-23} \text{ g}$$

y la masa de cada celda valdrá:

$$2 \text{ átomos} / \text{celda} \cdot 9.2695 \cdot 10^{-23} \text{ g} = 18.539 \cdot 10^{-23} \text{ g}$$

Por otra parte, el volumen de la celda es:

$$a^3 = (2.866 \cdot 10^{-8} \text{ cm})^3 = 2.354 \cdot 10^{-23} \text{ cm}^3$$

con lo que la densidad teórica vale:

$$d = \text{masa} / \text{vol} = 18.539 \cdot 10^{-23} / 2.354 \cdot 10^{-23} \text{ g/cm}^3 = 7.875 \text{ g/cm}^3,$$

valor prácticamente igual al valor experimental  $d = 7.87 \text{ g/cm}^3$ .

### Problema 3.3

Se pretende determinar qué tipo de pigmento blanco se ha utilizado como colorante en un termoplástico. Para ello se examina una muestra pulverizada con difracción de rayos X, empleando radiación Cu  $K\alpha$  de  $\lambda = 1.541 \text{ \AA}$ . Se obtuvo un espectro de difracción con picos en los ángulos  $2\theta$ : Pico 1:  $31.72^\circ$ , Pico 2:  $57.73^\circ$ , Pico 3:  $39.12^\circ$ .

a) Determinar el tipo de pigmento utilizado.

b) ¿Sería posible resolver la cuestión mediante análisis químico?

NOTA: Se dispone de las fichas JCPDS para los diversos pigmentos que se consideran posibles, de las que se extraen los datos sobre las tres distancias más significativas siguientes:

Pigmento	$d_1$ (Å)	$d_2$ (Å)	$d_3$ (Å)
TiO <sub>2</sub> rutilo	3.24	1.68	1.36
TiO <sub>2</sub> anatasa	3.47	1.88	1.69
PbO·TiO <sub>2</sub>	2.82	1.60	2.30
Pb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.18	1.95	1.66

### Solución al Problema 3.3

a) A partir de los valores de ángulos  $2\theta$  y de la ecuación de Bragg, se determinan las distancias  $d_{hkl}$  correspondientes a cada pico.

$$\lambda = 2 d \sin \theta$$

de donde,

	$d = \lambda / 2 \sin \theta$ ,	siendo $\lambda = 1.541 \text{ \AA}$	
Picos $2\theta$ :	31.72	57.73	39.12
Angulos $\theta$ :	15.86	28.87	19.56
Sen $\theta$ :	0.27329	0.48275	0.33485
$d$ ( $\text{\AA}$ ):	2.819	1.596	2.301

Valores que coinciden significativamente con los correspondientes al producto  $\text{PbO} \cdot \text{TiO}_2$ .

b) Es evidente que un análisis químico informaría de la presencia de Pb y Ti. Pero no podría discernir si corresponden a un producto dado, como el  $\text{PbO} \cdot \text{TiO}_2$  o bien es que existe una mezcla de óxidos de  $\text{TiO}_2$  y  $\text{Pb}_2\text{O}_3$ . El análisis químico resulta, por tanto, insuficiente para identificar las estructuras cristalinas presentes.

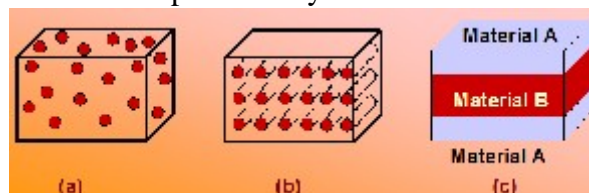
## PARTE DESARROLLO Ejemplo MATERIALES COMPUESTOS

Ejemplo: Los materiales compuestos se producen cuando dos materiales se unen para dar una **combinación de propiedades** que no puede ser obtenida en los materiales originales. Esta definición, en principio, nos justifica las buenas propiedades que se obtienen en aleaciones con la composición eutécticas, como se estudió en el tema correspondiente.

Estos materiales se seleccionan para proporcionar combinaciones de propiedades poco usuales de rigidez, peso, resistencia, resistencia a corrosión, a altas temperaturas, dureza o conductividad.

Los materiales compuestos pueden ser de metal-metal, metal-cerámica, metal-polímero, cerámica-cerámica o polímero-polímero.

Sin embargo, los materiales compuestos suelen clasificarse en tres categorías: con partículas, con fibras y laminares, dependiendo de la forma del material, tal como se aprecia en la figura 15.24 y que recuerda a la disposición del cemento con la grava, las fibras de vidrio como refuerzo de polímeros y la madera.



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

Cuando las partículas de refuerzo se encuentran uniformemente distribuidas, los compuestos tienen propiedades isotrópicas, los compuestos fibrados pueden ser tanto isotrópicos como anisotrópicos y los compuestos laminares siempre tienen un comportamiento anisotrópico

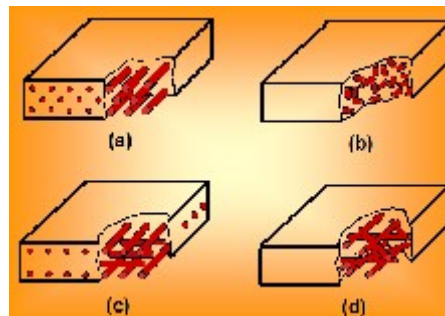
### Compuestos reforzados con fibras

Estos compuestos mejoran la resistencia, carga de rotura, la rigidez, la relación resistencia/peso, por la introducción de fibras fuertes, rígidas y frágiles, en una matriz más blanda y dúctil. El material de la matriz transmite los esfuerzos a las fibras y proporciona tenacidad y ductilidad al compuesto, mientras las fibras soportan la mayor parte de la fuerza o tensión aplicada.

Una característica de estos compuestos respecto a los endurecidos por dispersión es que la resistencia del compuesto aumenta tanto a temperatura ambiente como a elevadas temperaturas.

Se suelen emplear una gran cantidad de materiales reforzados. Desde la antigüedad se conoce el refuerzo de la paja en el adobe y en nuestros días está extendido el refuerzo de acero en estructuras, así como el refuerzo de fibras de vidrio sobre polímeros, fibras de boro o carbono, de propiedades excepcionales de resistencia o diminutos monocristales cerámicos denominados whiskers desarrollados para este objetivo.

Los materiales de refuerzo presentan morfologías muy variadas con orientaciones características como las señaladas en la figura 15.25. Las fibras cortas suelen tener una orientación aleatoria, para fibras continuas se produce la orientación anisotrópica deliberada. Las fibras pueden disponerse como telas o tejidos o ser producidas en forma de fibras largas. También se puede cambiar la orientación en las capas alternadas de fibras largas.

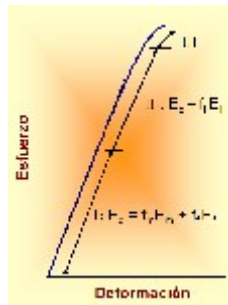


[Figura 15.25. Morfologías de compuestos reforzados con fibras. a\) Fibras continuas unidireccionales. b\) Fibras discontinuas orientadas al azar. c\) Fibras ortogonales o tejidos. d\) Fibras en capas múltiples.](#)

### **9.2.1. PREDICCIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS**

La regla de las mezclas predice siempre la densidad, conductividad eléctrica y térmica de los materiales reforzados con fibras a lo largo de la dirección de las fibras si estas son continuas y unidireccionales.

Sin embargo cuando se aplica una carga paralelamente a las fibras continuas unidireccionales, esta regla predice con precisión el valor del módulo de elasticidad, para bajos valores de esfuerzos, puesto que cuando es elevado, la matriz empieza a deformarse y la curva tensión-deformación no es lineal. La manera aproximada de calcularlo es como se refleja en la figura 15.26.



[Figura 15.26. Curva tensión-deformación para un compuesto reforzado con fibras. Valores del módulo de elasticidad para altos y bajos esfuerzos.](#)

La resistencia de un compuesto va a depender de la unión entre la fibra y la matriz, es decir de su interfase, puesto que se encuentra limitada especialmente por la deformación de la matriz, por lo que el valor calculado es siempre mas bajo que el calculado por la regla de las mezclas.

Otras propiedades como ductilidad, tenacidad, resistencia a fatiga y fluencia son más difíciles de predecir. Al igual que sucede con el empleo de fibras discontinuas.

### **9.2.2. CARACTERISTICAS DE LOS COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS**

Existe una gran cantidad de factores que deben tenerse en cuenta a la hora de seleccionar y diseñar con materiales compuestos reforzados con fibras.

**Relación de aspecto.** Las fibras continuas, que proporcionan mayores resistencias, son a menudo difíciles de introducir en el material y producir el mismo, mientras que las discontinuas son mas fáciles, mayor relación de aspecto, produciendo también alta resistencia.

**Fracción volumétrica de fibras.** Una mayor fracción volumétrica de fibras aumenta la resistencia, situándose el limite superior en el 80%, por la posibilidad de rodear las fibras con el material que hace de matriz.

**Orientación de las fibras.** Las fibras unidireccionales presentan resistencia máxima cuando la carga aplicada es paralela a las fibras, sin embargo las propiedades son muy anisotrópicas. Por ello, se suelen usar fibras dispuestas en forma de tejido, capas cruzadas, sacrificando la máxima resistencia con propiedades uniformes en el compuesto.

**Propiedades de las fibras** El material de las fibras debe ser fuerte, rígido, ligero y tener elevada temperatura de fusión. Se prefieren materiales con elevados módulos y resistencia específicos. Algunas de sus propiedades más señaladas aparecen reflejadas en la tabla 15.7.

El mayor modulo especifico se encuentra en el carbono y el boro, además de presentar elevada temperatura de fusión y alta resistencia mecánica. Ambos deben usarse como material compuesto pues demasiado frágiles y reactivos para se empleados por si solos.

El Kevlar, nombre comercial de un polímero poliamida aromático endurecido, con una estructura constituida por anillos bencénicos, tiene excelentes propiedades mecánicas, aunque su temperatura de fusión es baja.

La alúmina y el vidrio son ligeros, tienen alta resistencia y modulo especifico. Mas rígidos son los wiskers, aunque son discontinuos y su fabricación es complicada y costosa.

[Tabla 15.7 Propiedades de diferentes fibras utilizadas como refuerzo.](#)

	Densidad (mg/cm <sup>3</sup> )	Carga rotura (N/cm <sup>2</sup> )	Módulo elasticidad (N/cm <sup>2</sup> )	Tensión (N/cm <sup>2</sup> )	Módulo específico (N/cm <sup>2</sup> )	Resistencia específica (N/cm <sup>2</sup> )
Aluminio	2.70	3440	72.4	1722	63	132
Aluminio 7075	2.81	5153	97.5	2728	75	172
Aluminio 7050	2.81	5052	92.9	2628	73	168
Aluminio 7030	2.81	4902	91.7	2574	71	164
Aluminio 7010	2.81	5020	90.5	2520	71	162
Aluminio 7005	2.81	4749	86	2374	69	154
Aluminio 7003	2.81	4627	83	2320	67	148
Al	2.70	1300	30	2720	47	272
Aluminio	2.70	3440	72.4	1724	63	132
Al 7075	2.81	5153	97.5	2728	75	172
Al 7050	2.81	5052	92.9	2628	73	168
Al 7030	2.81	4902	91.7	2574	71	164
Al 7010	2.81	5020	90.5	2520	71	162
Al 7005	2.81	4749	86	2374	69	154
Al 7003	2.81	4627	83	2320	67	148
Al	2.70	1300	30	2720	47	272
Aluminio	2.70	3440	72.4	1724	63	132
Al 7075	2.81	5153	97.5	2728	75	172
Al 7050	2.81	5052	92.9	2628	73	168
Al 7030	2.81	4902	91.7	2574	71	164
Al 7010	2.81	5020	90.5	2520	71	162
Al 7005	2.81	4749	86	2374	69	154
Al 7003	2.81	4627	83	2320	67	148
Al	2.70	1300	30	2720	47	272
Aluminio	2.70	3440	72.4	1724	63	132
Al 7075	2.81	5153	97.5	2728	75	172
Al 7050	2.81	5052	92.9	2628	73	168
Al 7030	2.81	4902	91.7	2574	71	164
Al 7010	2.81	5020	90.5	2520	71	162
Al 7005	2.81	4749	86	2374	69	154
Al 7003	2.81	4627	83	2320	67	148
Al	2.70	1300	30	2720	47	272

**Propiedades de las matrices.** Estos materiales son generalmente tenaces y dúctiles para transmitir las cargas a las fibras y evitar que las grietas causadas por fibras rotas se propaguen a todo el compuesto. La matriz debe ser resistente con el fin de contribuir a la resistencia total del compuesto. La temperatura de trabajo del compuesto viene limitada por la de la matriz.

### 9.2.3. SISTEMAS REFORZADOS CON FIBRAS

En la figura 15.27 se comparan el módulo y la resistencia específica de varios compuestos reforzados con fibras con los de los metales.

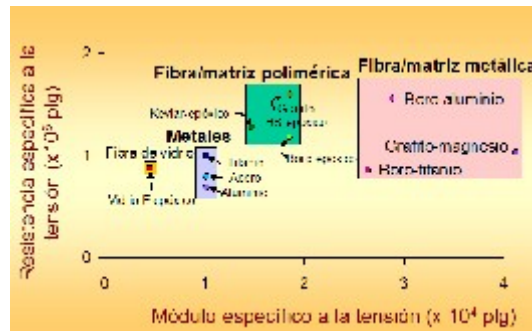


Figura 15.27. Comparación de módulo específico y resistencia específica de materiales metálicos y compuestos.

El **hormigón** armado es un compuesto doble, por un lado es un compuesto de partículas, cemento y grava, reforzado a su vez por varillas de acero, que son las que dan la resistencia y evitan la rotura de la estructura si el hormigón falla.

El **caucho reforzado**, empleado en neumáticos, con nylon, kevlar, alambre de acero, mejora su resistencia y duración.

La **fibra de vidrio** contiene fibras dentro de una matriz polimérica, generalmente de poliéster. Son fibras cortas y discontinuas. Estas mejoran la resistencia del polímero y proporcionan valores de módulo y resistencia específicos del orden de los buenos metales y aleaciones.

Los **compuestos avanzados** son aquellos en los que se requieren combinaciones excepcionales de resistencia y ligereza, como es el sector aeronáutico. Tal como refleja la tabla 15.8 son las fibras de boro, carbono o kevlar, tanto en matrices polimericas como metálicas las que proporcionan mejor resistencia en general, junto a un mejor comportamiento a fatiga que las superaleaciones.

Tabla 16.8. Ejemplos de materiales reforzados con fibras y sus aplicaciones.

Material	Aplicaciones
Aluminio bórico (Borsic)	Aspas de ventiladores en motores, aplicaciones aeronáuticas y aeroespaciales.
Kevlar-epoxi 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), chalecos antibala.
Grafito-polímero Vidrio-polímero	Aeroespacial, automotriz, artículos deportivos. Automotriz ligera, acuáticas y marinas, con resistencia a la corrosión, artículos y equipos deportivos, componentes aeroespaciales.

Estos materiales se emplean en aplicaciones estructurales dada su relación resistencia/peso. Destinando los compuestos de matriz metálica para componentes que trabajan a alta temperatura.

## .2 Compuestos reforzados con fibras

Estos compuestos mejoran la resistencia, carga de rotura, la rigidez, la relación resistencia/peso, por la introducción de fibras fuertes, rígidas y frágiles, en una matriz más blanda y dúctil. El material de la matriz transmite los esfuerzos a las fibras y proporciona tenacidad y ductilidad al compuesto, mientras las fibras soportan la mayor parte de la fuerza o tensión aplicada.

Una característica de estos compuestos respecto a los endurecidos por dispersión es que la resistencia del compuesto aumenta tanto a temperatura ambiente como a elevadas temperaturas.

Se suelen emplear una gran cantidad de materiales reforzados. Desde la antigüedad se conoce el refuerzo de la paja en el adobe y en nuestros días está extendido el refuerzo de acero en estructuras, así como el refuerzo de fibras de vidrio sobre polímeros, fibras de boro o carbono, de propiedades excepcionales de resistencia o diminutos monocristales cerámicos denominados whiskers desarrollados para este objetivo.

Los materiales de refuerzo presentan morfologías muy variadas con orientaciones características como las señaladas en la figura 15.25. Las fibras cortas suelen tener una orientación aleatoria, para fibras continuas se produce la orientación anisotrópica deliberada. Las fibras pueden disponerse como telas o tejidos o ser producidas en forma de fibras largas. También se puede cambiar la orientación en las capas alternadas de fibras largas.

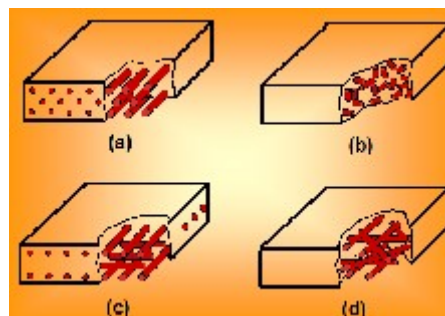


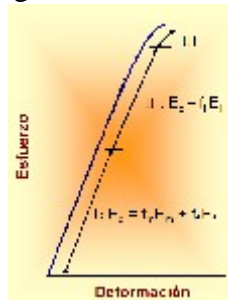
Figura 15.25. Morfologías de compuestos reforzados con fibras. a) Fibras continuas unidireccionales. b) Fibras discontinuas orientadas al azar. c) Fibras ortogonales o tejidos. d) Fibras en capas múltiples.

### 9.2.1. PREDICCIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS



La regla de las mezclas predice siempre la densidad, conductividad eléctrica y térmica de los materiales reforzados con fibras a lo largo de la dirección de las fibras si estas son continuas y unidireccionales.

Sin embargo cuando se aplica una carga paralelamente a las fibras continuas unidireccionales, esta regla predice con precisión el valor del módulo de elasticidad, para bajos valores de esfuerzos, puesto que cuando es elevado, la matriz empieza a deformarse y la curva tensión-deformación no es lineal. La manera aproximada de calcularlo es como se refleja en la figura 15.26.



[Figura 15.26. Curva tensión-deformación para un compuesto reforzado con fibras. Valores del módulo de elasticidad para altos y bajos esfuerzos.](#)

La resistencia de un compuesto va a depender de la unión entre la fibra y la matriz, es decir de su interfase, puesto que se encuentra limitada especialmente por la deformación de la matriz, por lo que el valor calculado es siempre mas bajo que el calculado por la regla de las mezclas.

Otras propiedades como ductilidad, tenacidad, resistencia a fatiga y fluencia son más difíciles de predecir. Al igual que sucede con el empleo de fibras discontinuas.

### **9.2.2. CARACTERISTICAS DE LOS COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS**

Existe una gran cantidad de factores que deben tenerse en cuenta a la hora de seleccionar y diseñar con materiales compuestos reforzados con fibras.

**Relación de aspecto.** Las fibras continuas, que proporcionan mayores resistencias, son a menudo difíciles de introducir en el material y producir el mismo, mientras que las discontinuas son mas fáciles, mayor relación de aspecto, produciendo también alta resistencia.

**Fracción volumétrica de fibras.** Una mayor fracción volumétrica de fibras aumenta la resistencia, situándose el limite superior en el 80%, por la posibilidad de rodear las fibras con el material que hace de matriz.

**Orientación de las fibras.** Las fibras unidireccionales presentan resistencia máxima cuando la carga aplicada es paralela a las fibras, sin embargo las propiedades son muy anisotrópicas. Por ello, se suelen usar fibras dispuestas en forma de tejido, capas cruzadas, sacrificando la máxima resistencia con propiedades uniformes en el compuesto.

**Propiedades de las fibras** El material de las fibras debe ser fuerte, rígido, ligero y tener elevada temperatura de fusión. Se prefieren materiales con elevados módulos y resistencia específicos. Algunas de sus propiedades más señaladas aparecen reflejadas en la tabla 15.7.

El mayor modulo especifico se encuentra en el carbono y el boro, además de presentar elevada temperatura de fusión y alta resistencia mecánica. Ambos deben usarse como material compuesto pues demasiado frágiles y reactivos para se empleados

por si solos.

El Kevlar, nombre comercial de un polímero poliamida aromático endurecido, con una estructura constituida por anillos bencénicos, tiene excelentes propiedades mecánicas, aunque su temperatura de fusión es baja.

La alúmina y el vidrio son ligeros, tienen alta resistencia y modulo específico. Mas rígidos son los wiskers, aunque son discontinuos y su fabricación es complicada y costosa.

Tabla 15.7 Propiedades de diferentes fibras utilizadas como refuerzo.

	Densidad (mg/cm <sup>3</sup> )	Carga rotura (MPa)	Modulo elasticidad (GPa)	Tiempo fusión (°C)	Modulo específico (G/mg)	Resistencia específica (MPa/mg)
Alúmina	2.55	3440	324	2122	25	135
Vidrio E	2.55	1130	85.5	2128	35	170
SiC	2.33	1062	324	1728	35	220
AlN	3.26	2000	317	2175	35	190
BN	1.81	2000	305	2727	71	247
Carbono (poliuretano)	1.78	2100	396	2670	118	194
Carbono (poliuretano)	1.78	1800	281	2520	101	154
EP	1.20	1200	20	2720	17	272
EP	1.20	1800	30	2720	15	150
EP	1.20	2270	40	2180	20	182
EP	1.20	2200	40	2120	18	181
EP	1.20	1100	30	2000	14	181
EP	1.20	1700	30	1770	14	142
EP	1.20	1400	30	1770	11	142
EP	1.20	1200	30	1770	10	142
EP	1.20	1000	30	1770	8	142
EP	1.20	800	30	1770	6	142
EP	1.20	600	30	1770	5	142
EP	1.20	400	30	1770	3	142
EP	1.20	200	30	1770	1	142

**Propiedades de las matrices.** Estos materiales son generalmente tenaces y dúctiles para transmitir las cargas a las fibras y evitar que las grietas causadas por fibras rotas se propaguen a todo el compuesto. La matriz debe ser resistente con el fin de contribuir a la resistencia total del compuesto. La temperatura de trabajo del compuesto viene limitada por la de la matriz.

### 9.2.3. SISTEMAS REFORZADOS CON FIBRAS

En la figura 15.27 se comparan el modulo y la resistencia especifica de varios compuestos reforzados con fibras con los de los metales.

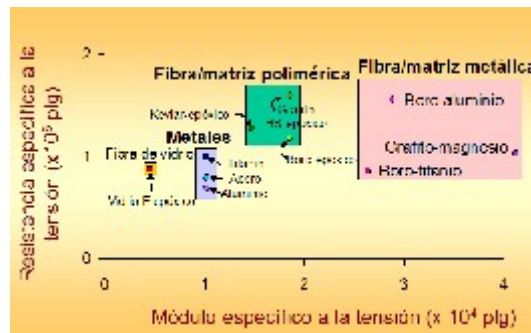


Figura 15.27. Comparación de módulo específico y resistencia específica de materiales metálicos y compuestos.

El **hormigón** armado es un compuesto doble, por un lado es un compuesto de partículas, cemento y grava, reforzado a su vez por varillas de acero, que son las que dan la resistencia y evitan la rotura de la estructura si el hormigón falla.

El **caucho reforzado**, empleado en neumáticos, con nylon, kevlar, alambre de acero, mejora su resistencia y duración.

La **fibra de vidrio** contiene fibras dentro de una matriz polimérica, generalmente de poliéster. Son fibras cortas y discontinuas. Estas mejoran la resistencia del polímero y proporcionan valores de módulo y resistencia específicos del orden de los buenos

metales y aleaciones.

Los **compuestos avanzados** son aquellos en los que se requieren combinaciones excepcionales de resistencia y ligereza, como es el sector aeronáutico. Tal como refleja la tabla 15.8 son las fibras de boro, carbono o kevlar, tanto en matrices poliméricas como metálicas las que proporcionan mejor resistencia en general, junto a un mejor comportamiento a fatiga que las superaleaciones.

Tabla 16.8. Ejemplos de materiales reforzados con fibras y sus aplicaciones.

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

Estos materiales se emplean en aplicaciones estructurales dada su relación resistencia/peso. Destinando los compuestos de matriz metálica para componentes que trabajan a alta temperatura.

## Problemas de Estructuras Cristalinas

1º El aluminio tiene una masa atómica de 26,97 (g/mol). Sabiendo que cristaliza en el sistema FCC y que la dimensión de su celda unidad es 4,049 Å, ¿cuál será su densidad?

La densidad es la masa entre el volumen y por tanto conociendo la masa que hay en un determinado volumen nos permite el cálculo del valor. Tomaremos el valor del volumen de la celda, o sea  $a^3$  que nos da el valor.

$$V = (4,09 \cdot 10^{-10} \text{ m})^3 = (4,09 \cdot 10^{-8} \text{ cm})^3 = 6,638 \cdot 10^{-23} \text{ cm}^3$$

Ahora Calculamos la masa que hay en la celda. Como es una FCC, el número de átomos por celda es 4.

$$\text{masa} = 4 \cdot \text{masa de átomo} = 4 \cdot 26,97 \text{ g/mol} \cdot 1 \text{ mol} / 6,023 \cdot 10^{23} \text{ átomos} = 1,78 \cdot 10^{-22} \text{ gramos}$$

$$\text{Por tanto } d = m/v = 1,78 \cdot 10^{-22} \text{ gramos} / 6,638 \cdot 10^{-23} \text{ cm}^3 = 2,7 \text{ g/cm}^3$$

Solución:  $p = 2,7 \text{ g/cm}^3$

2º La masa atómica de un determinado elemento es 55,8 (g/mol). Sabiendo que su radio atómico es

1,24 Å y su densidad, 7,9 g/cm<sup>3</sup>, sabrías decir si cristaliza en una red BCC o FCC?

Solución: BCC

3° ¿Cómo puede ser posible que la estructura BCC posea un Factor de empaquetamiento atómico menor que la FCC o la HCP y la dimensión de sus huecos octaédricos sea también menor.

4° La densidad de wolframio es  $19,3 \text{ g/cm}^3$  con masa atómica de  $183,9 \text{ g/mol}$ . Si cristaliza en una red de tipo BCC, calcular su radio atómico.

Resolución:

Datos: Primero tenemos que al ser una celda BCC el número de átomos es 2.

Calcularemos ahora el volumen de una celda unidad. como tenemos que :

$$d = m/v \Rightarrow$$

$$v = m/d = 2 \text{ at} * 183,9 \text{ g/mol} : ( 6,023 * 10^{23} \text{ ato /mol} * 19,3 \text{ g/cm}^3) =$$

$$31,64 * 10^{-24} \text{ cm}^3$$

Como en el cubo, el volumen es la arista al cubo, tenemos que  $a = 3,14 * 10^{-8}$

En la BCC, tenemos que la diagonal en el cubo es  $D = 4R = \sqrt{3} a$

El valor de R es  $\sqrt{3} a / 4 = 1,37 \text{ \AA}$

5° ¿Cual es el Factor de empaquetamiento atómico en el sistema cristalino hexagonal simple?

Solución FEA = 0,605

Primero veamos el número de átomos por celda.

En las caras, hay dos compartidos por otra celda, por tanto 1.

En los vértices hay 6 compartidos por 6 celda, por tanto,  $12/6 = 2$ .

Total de átomos 3.

El volumen de la celda es base por altura. La altura es  $2R$ .

El máximo empaquetamiento es  $a = 2R$ , por tanto, la base es según el desarrollo de la Pág. 54

$$6\sqrt{3} R^2.$$

$$\text{El volumen es } ( 6\sqrt{3} R^2) * (2R) = 12\sqrt{3} R^3$$

$$FEA = \text{Volumen de los átomos} / \text{Volumen de celda} = 3 * (4/3 \pi R^3) / 12\sqrt{3} R^3 = 0,605$$

**6° Calcular el cambio teórico del volumen asociado a una transformación alotrópica de un metal desde la FCC a la red BCC.**

Como sabemos en una FCC, el n° átomos celdilla = 4 y  $a = 4*R/\sqrt{2}$ .

En la red BCC n° átomos celdilla = 2 y  $a = 4*R/\sqrt{3}$

Como el numero de átomos se conserva, tenemos que por cada celdilla FCC se formarán 2 celdillas BCC.

$$(\text{Volumen BCC} / \text{Volumen FCC}) = 2 * (4*R/\sqrt{3})^3 / (4*R/\sqrt{2})^3 = 1.088$$

Luego cuando cristaliza en BCC es un 8.8% mayor y por tanto existe una dilatación del material.

7° Un metal cristaliza en la red cúbica centrada en el cuerpo. Si su radio atómico es 1.24 manómetros. ¿Cuántos átomos existirán en  $1 \text{ cm}^3$ ?

Para plantearse el problema tenemos que pensar en el número de celdas que hay en  $1 \text{ mm}^3$ .

Para ello, necesitamos saber que mide una celda. Como tenemos el radio y sabemos que es una BCC, en la diagonal del cubo se cumple que  $\sqrt{3}a = 4R \Rightarrow a = 4*R/\sqrt{3} = 2,83 \text{ nm}$ .

Además sabemos en n° átomos por celdilla es de 2

$$\text{El volumen de la celdilla es por tanto } a^3 = (2.863 * 10^{-7} \text{ cm})^3 = 23.483 * 10^{-21} \text{ cm}^3$$

$$\text{El número de celdilla} = 1 \text{ cm}^3 / 23.483 * 10^{-21} \text{ cm}^3 = 4.25 * 10^{19} \text{ celdas.}$$

Si sabemos el numero de celdas y los átomos que hay en cada celda, tenemos el número de átomos por  $\text{mm}^3$

$$\text{n° átomos} = 4.25 * 10^{19} \text{ celdillas} * 2\text{átomos/celdilla} = 8.5 * 10^{19} \text{ átomos}$$