



Universidad Autónoma del Estado de México
Centro Universitario UAEM Valle de México



CENTRO UNIVERSITARIO UAEM VALLE DE MÉXICO

PROGRAMA EDUCATIVO INGENIERÍA INDUSTRIAL

UNIDAD DE APRENDIZAJE INGENIERÍA DE MATERIALES

UNIDAD DE COMPETENCIA ESTRUCTURAS CRISTALINAS

Dr. en C. en. Ing. José Guadalupe Miranda Hernández
jgmirandah@uaemex.mx

MARZO 2018

UNIDAD DE APRENDIZAJE



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
CENTRO UNIVERSITARIO UAEM VALLE DE MÉXICO
COORDINACIÓN DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

PROGRAMA PERMANENTE DE ELABORACIÓN Y ACTUALIZACIÓN DE UNIDADES DE APRENDIZAJE

Unidad de Aprendizaje

INGENIERÍA DE MATERIALES

Elaborado por:

M. en C. Armando Vargas Gómez
Profesor de Asignatura
Fecha: 10 Diciembre 2004

Actualizado por:

Dr. José Gpe. Miranda Hernández
Profesor-Investigador
Fecha: 10 de Agosto de 2012

Revisado por:

La Comisión Permanente de Elaboración y Actualización de Unidades de Aprendizaje de
la Academia de Ingeniería Industrial del Centro Universitario UAEM Valle de México
Fecha: 13 de septiembre de 2012

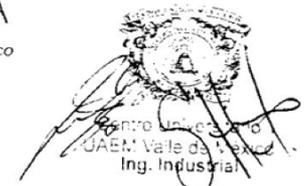
Aprobado y avalado por:

H. Consejo Académico
del Centro Universitario UAEM Valle de México
Acta en Sesión Extraordinaria no.: 28
Fecha: 17 de septiembre de 2012

H. Consejo de Gobierno
del Centro Universitario UAEM Valle de México
Acta en Sesión Extraordinaria no.: 28
Fecha: 17 de septiembre de 2012



Handwritten signature



UNIDAD DE APRENDIZAJE



Universidad Autónoma del Estado de México

Centro Universitario UAEM Valle de México
Coordinación General de Ingeniería Industrial

Programa Permanente de Elaboración y Actualización de Unidades de Aprendizaje

2. Materia y su naturaleza atómica.	2.1	Estructura del átomo.	
	2.2	Configuración electrónica.	
	2.3	Números cuánticos.	
	2.4	Enlaces atómicos y moleculares.	
3. Estructuras cristalina.	3.1	Sistemas cristalinos.	
	3.2	Redes de Bravais	
	3.3	Parámetros de red, número de átomos por celda, número de coordinación y factor de empaquetamiento.	
	3.4	Índices de Miller, Direcciones y Planos cristalográficos.	
4. Imperfecciones reticulares	4.1	Imperfecciones cristalinas.	<p>21-21-21</p> 
	4.2	Defectos puntuales.	
	4.3	Defectos lineales (o dislocaciones).	
	4.4	Defectos superficiales.	
5. Difusión y procesamiento de materiales	5.1	Mecanismos de difusión y energía de activación.	
	5.2	Leyes de Fick.	
	5.3	Difusión y el efecto en el procesamiento de materiales.	

GUIÓN

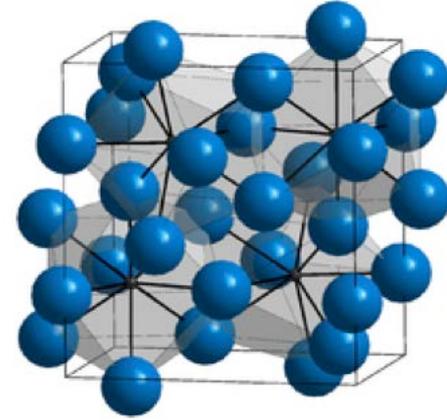
En este material se muestra el objetivo general de la Unidad de Competencia, mencionando las Unidades Temáticas que considera esta unidad. Así mismo y en particular se presenta el desarrollo de las Unidades temáticas 3.1, 3.2 y 3.3. El desarrollo de este material inicia con una breve repaso del tema de enlaces atómicos y moleculares de la Unidad de Competencia 2 para después continuar con los temas que ocupan a este trabajo mediante una introducción, tablas e imágenes que deben ser enriquecidas por el profesor en la explicación y presentación del material a los estudiantes.

Este material no es el sustituto de un apunte es un apoyo didáctico que pretende ser ilustrativo, objetivo y concreto con el fin de ser un apoyo para el profesor o refuerzo conceptual para el estudiante en el fortalecimiento del proceso de enseñanza-aprendizaje.

En esta unidad de competencia se encuentran algunos ejercicios cuantitativo a resolver y deben ser retroalimentados por el profesor en la explicación al alumno, finalmente el profesor deberá pedir evidencia a los estudiantes de ejercicios resueltos.

UNIDAD DE COMPETENCIA 3

Estructuras cristalinas



Objetivo

Comprender las características de los sólidos monocristalinos, policristalinos y no cristalinos y analiza y explica las estructuras atómicas de los materiales sólidos.

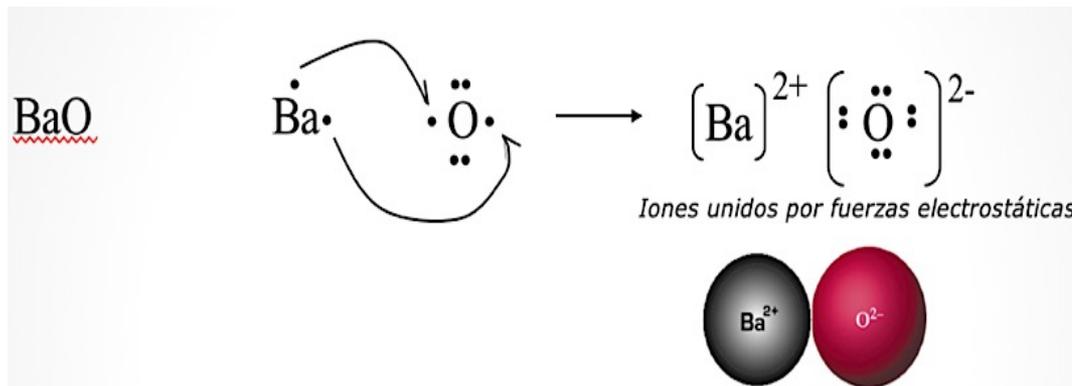
Unidades Temáticas

- 3.1 Sistemas cristalinos.
- 3.2 Redes de Bravais.
- 3.3 Parámetros de red, números de átomos por celda, número de coordinación y factor de empaquetamiento.
- 3.4 Índices de Miller, direcciones y planos cristalográficos.

REPASO: ENLACES QUÍMICOS

ENLACE IÓNICO

El enlace iónico se establece por cesión de electrones (uno o más) de un átomo metálico a un átomo no metálico. El átomo metálico se convierte así en un catión y el no metálico en un anión. Estos iones quedan unidos por fuerzas de atracción electrostática.



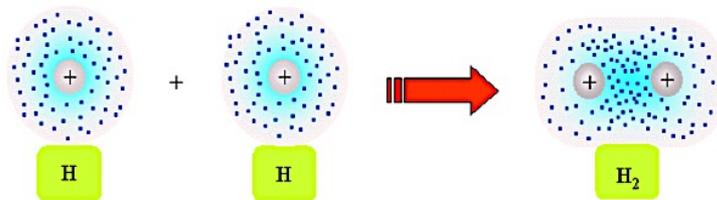
REPASO: ENLACES QUÍMICOS

ENLACE COVALENTE

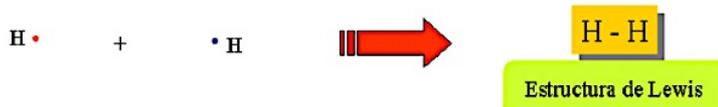
El enlace covalente se establece por compartición de uno o más pares de electrones entre dos átomos de elementos no metálicos (elevada electronegatividad).

En la mayoría de los casos, cada átomo adquiere la configuración electrónica de gas noble (octeto completo).

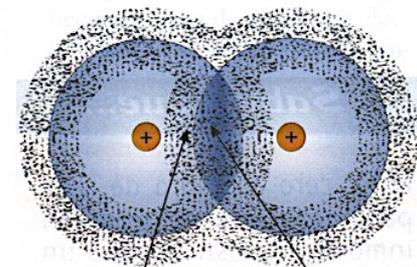
Molécula de hidrógeno



Dos átomos de hidrógeno comparten un par de electrones



Molécula de hidrógeno



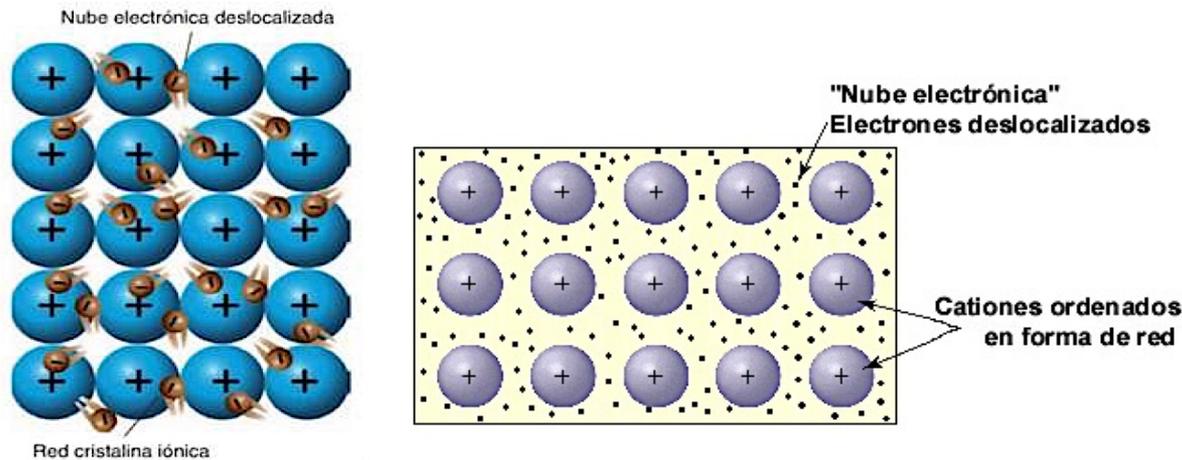
Enlace covalente de un par de electrones Interacción del enlace

Enlace covalente en la molécula de hidrógeno.

REPASO: ENLACES QUÍMICOS

ENLACE METÁLICO

El enlace metálico se establece entre átomos metálicos. Los átomos metálicos dejan libres electrones s y d adquiriendo estructura de gas noble u otras estructuras electrónicas especialmente estables.

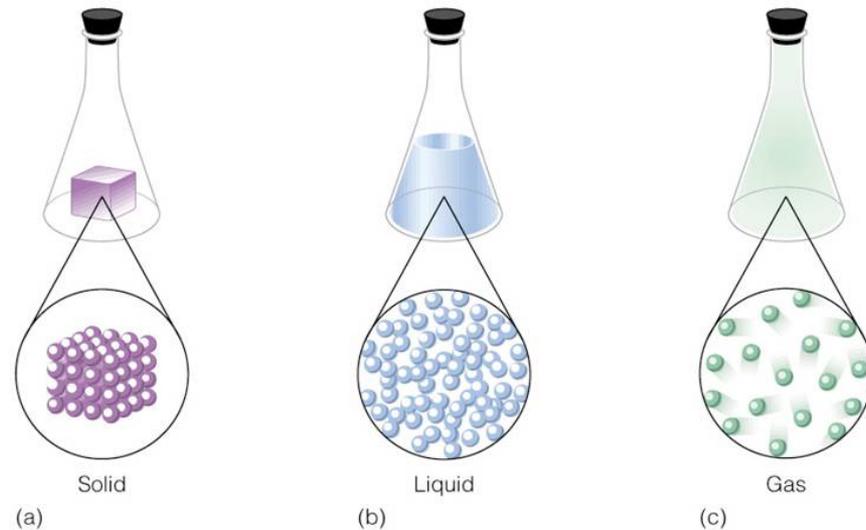
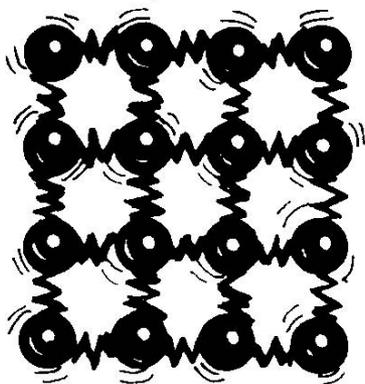


Representación del enlace metálico

3.1 Sistemas cristalinos

Estructuras Cristalina

¿A QUE SE REFIERE LA AGRUPACIÓN DE ÁTOMOS Y MOLÉCULAS?

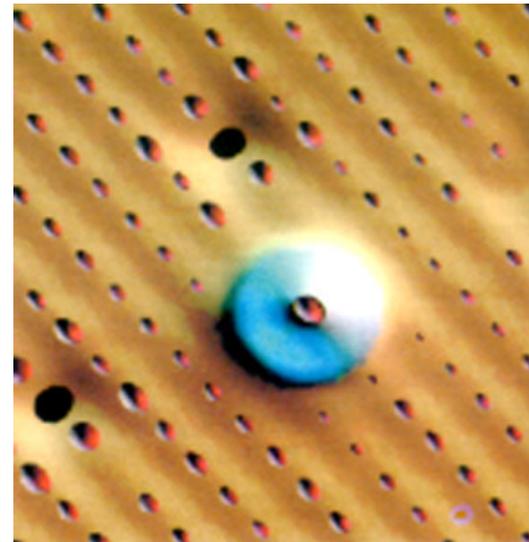
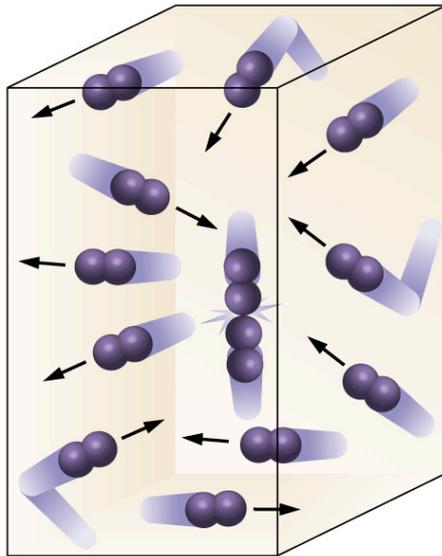


Los átomos que forman las sustancias presentan un arreglo atómico que puede ser de corto y largo alcance, pero también sin orden.

3.1 Sistemas cristalinos

Estructuras Cristalina

Sin orden: Los átomos y moléculas carecen de un arreglo ordenado, ejemplo los gases se distribuyen aleatoriamente en el espacio disponible.



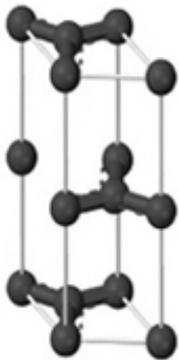
Xenón

3.1 Sistemas cristalinos

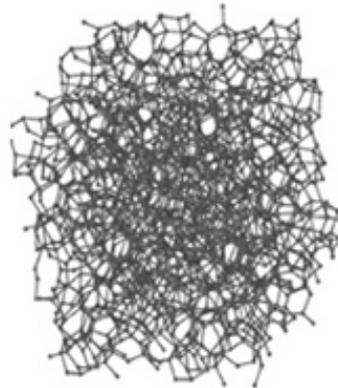
Estructuras Cristalina

Ordenamiento de corto alcance: es el arreglo espacial de los átomos o moléculas que se extiende sólo a los vecinos más cercanos de éstos. A estas estructuras se les denomina estructuras no cristalinas.

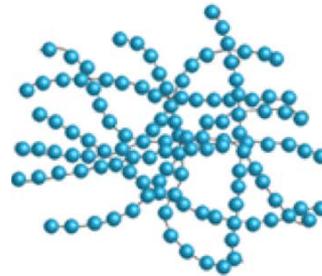
Ejemplo: vidrios, cerámicos, polímeros.



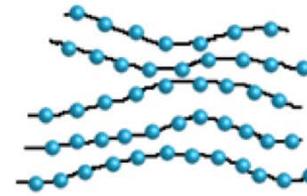
Estructura
cristalina



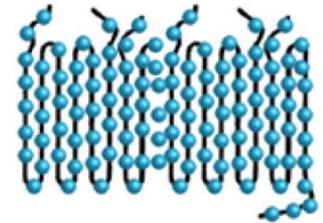
Estructura
amorfa



Estructura amorfa
termoplástico



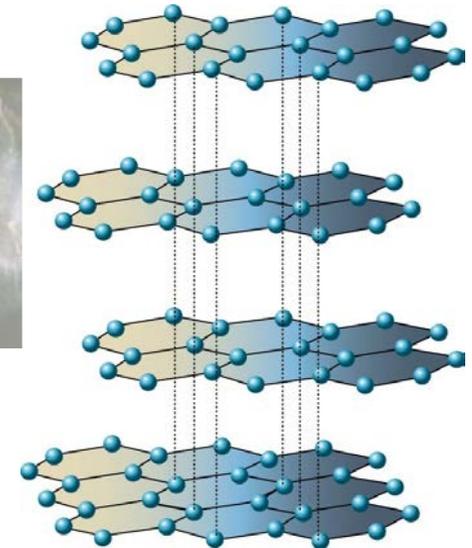
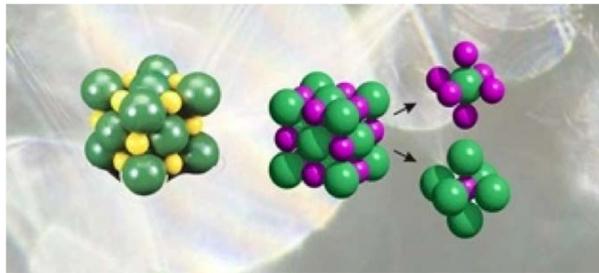
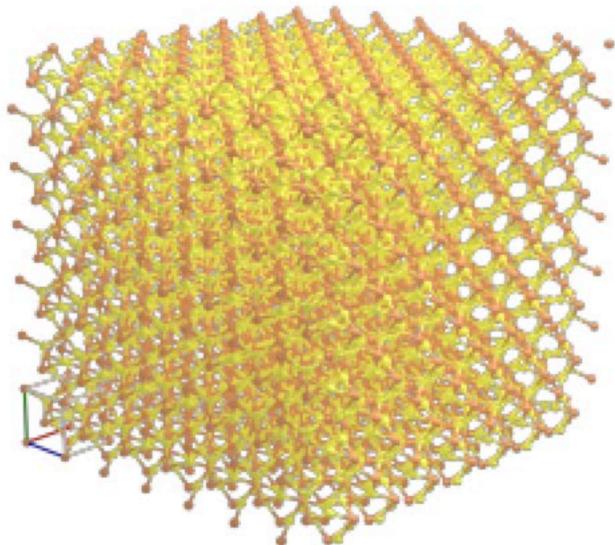
Estructuras cristalinas termoplástico
(micelar y lamelar)



3.1 Sistemas cristalinos

Estructuras Cristalina

El arreglo atómico de largo alcance abarca escalas de longitud mucho mayores de 100 nanómetros. Los átomos o los iones en estos materiales forman un patrón regular y repetitivo, semejante a una red en tres dimensiones.



Grafeno (compuesto de carbono densamente empaquetados)

3.1 Sistemas cristalinos

CONCLUSIÓN: *Estructura cristalina es la forma geométrica como átomos, moléculas o iones se encuentran espacialmente ordenados.*

Según la distribución espacial de los átomos, moléculas o iones, los materiales sólidos pueden ser clasificados en:

Cristalinos: compuestos por átomos, moléculas o iones organizados de forma periódica; es decir, entres dimensiones. Las posiciones ocupadas siguen ordenación que se repite para grandes distancias atómicas (de largo alcance).

Amorfos: compuestos por átomos, moléculas o iones que no presentan una ordenación de largo alcance. Pueden presentar ordenación de corto alcance.

3.1 Sistemas cristalinos

EJEMPLOS

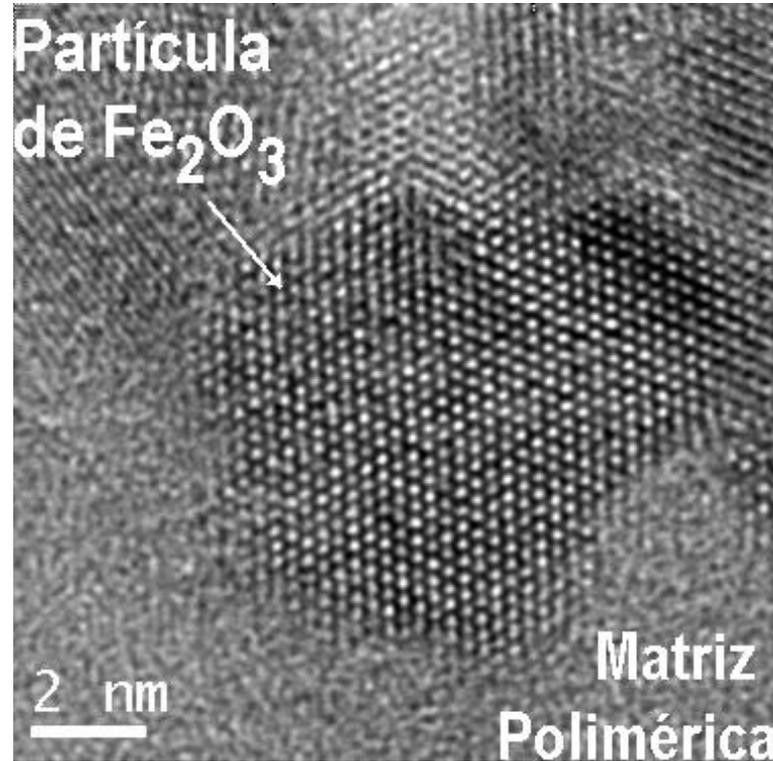
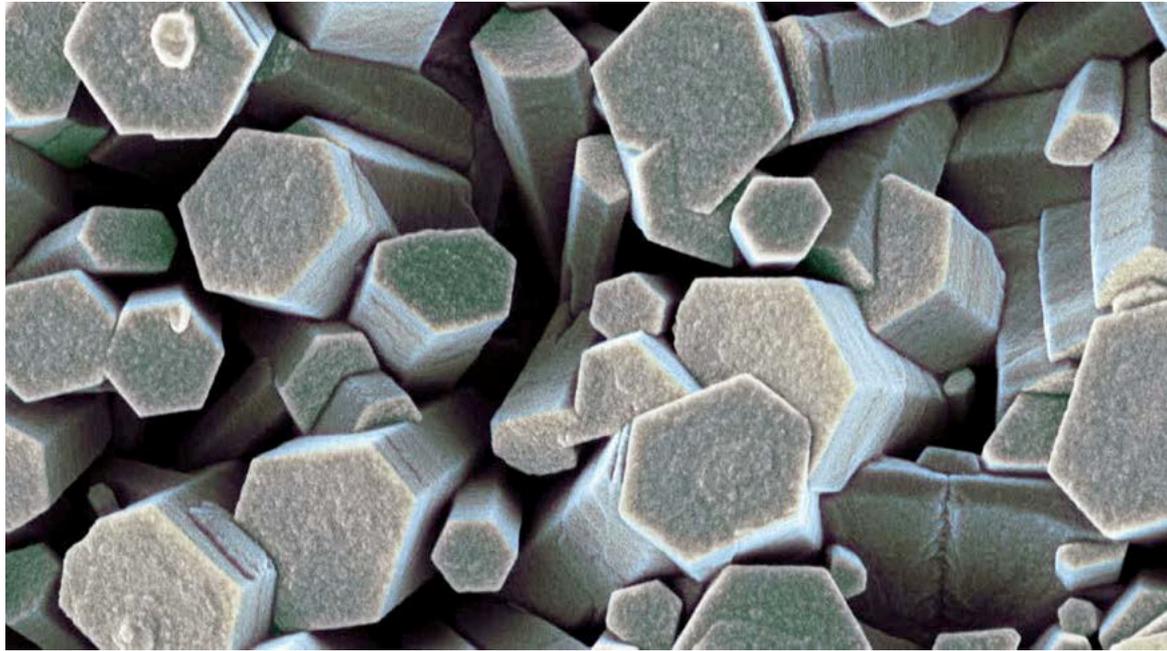


Imagen de microscopía electrónica de alta resolución de una nanopartícula de Hematita (Fe_2O_3) rodeada por una matriz polimérica de poliestireno.

3.1 Sistemas cristalinos

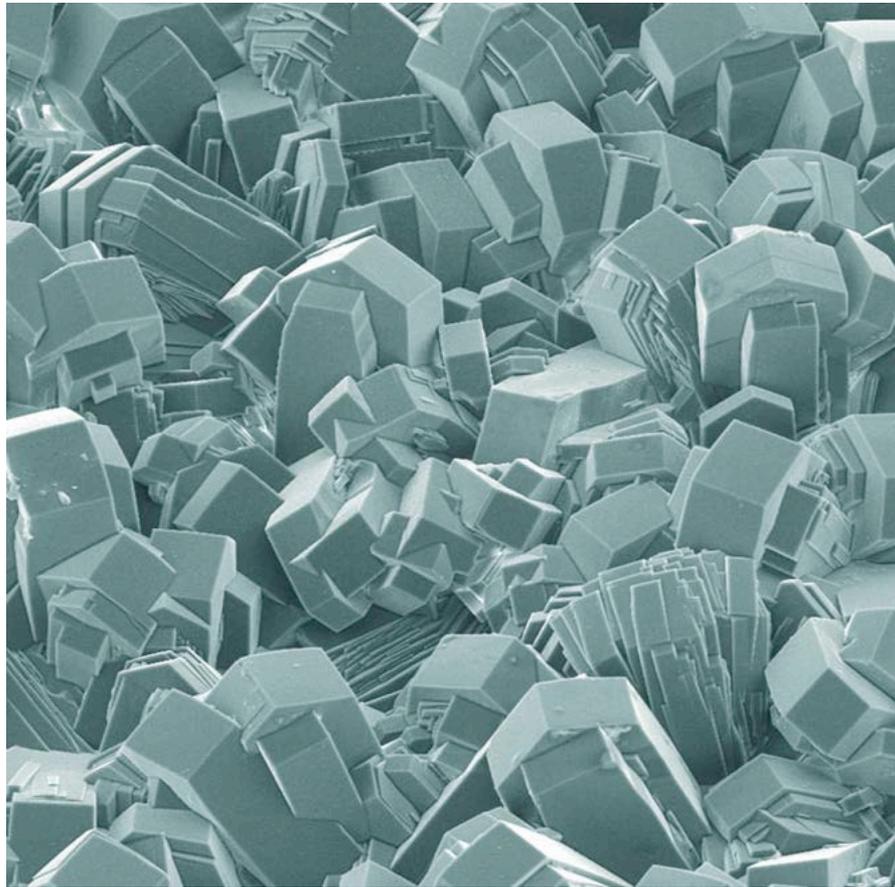
EJEMPLOS



Cristales de oxido de zinc, microscopio electrónico de barrido

3.1 Sistemas cristalinos

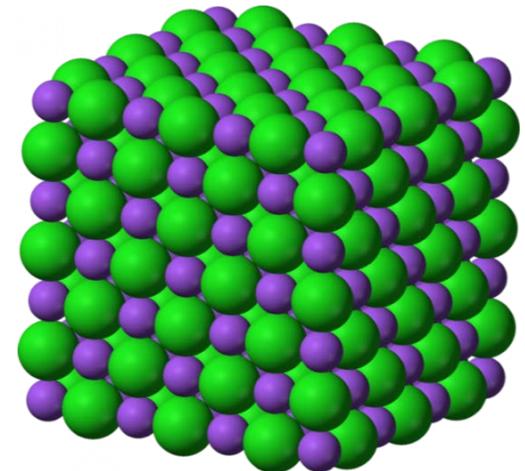
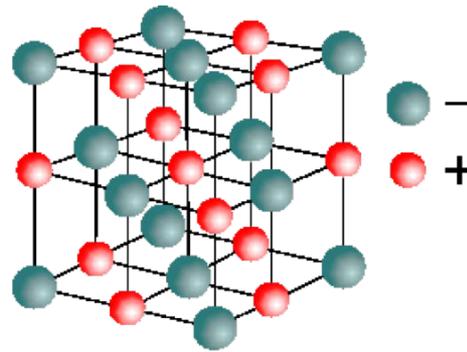
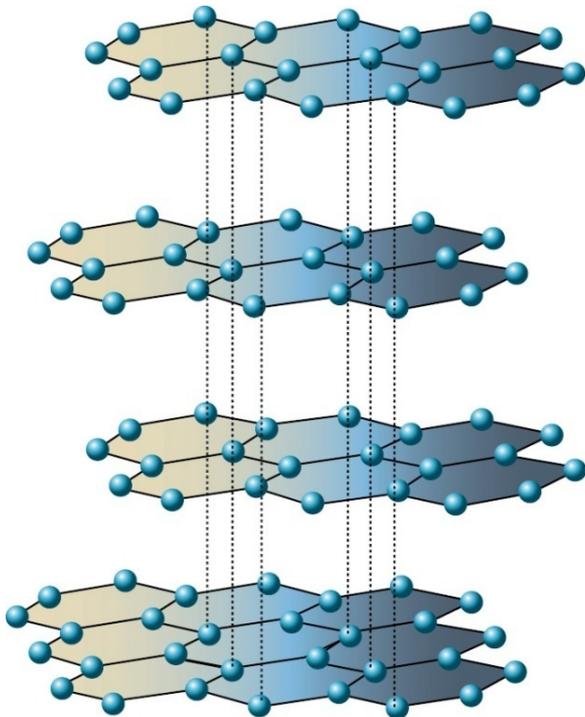
EJEMPLOS



Cristales de cerámica, microscopio electrónico de barrido

3.1 Sistemas cristalinos

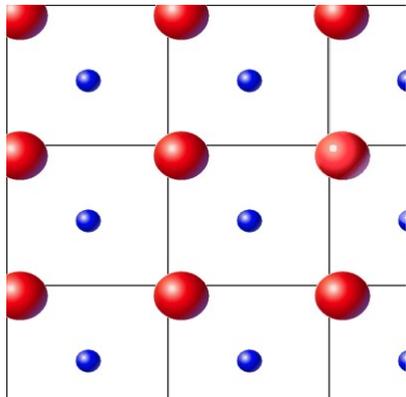
Cristal: Es la agrupación de átomos o iones que se encuentran en las posiciones de equilibrio (con fuerza nula y energía mínima) constituyendo una estructura ordenada, periódica y repetitiva, que se extiende en las tres direcciones del espacio generando un orden de largo alcance.



3.1 Sistemas cristalinos

Para representar de forma sencilla la estructura interna de los cristales se suele utilizar el concepto de red espacial, según el cual la posición de cada átomo, molécula, ion o grupo de átomos se describe mediante la posición de un punto, denominado punto reticular.

Red cristalina: disposición tridimensional de puntos coincidentes con las posiciones de los átomos (o centro de las esferas). Los átomos están ordenados en un patrón periódico, de tal modo que los alrededores de cada punto de la red son idénticos.

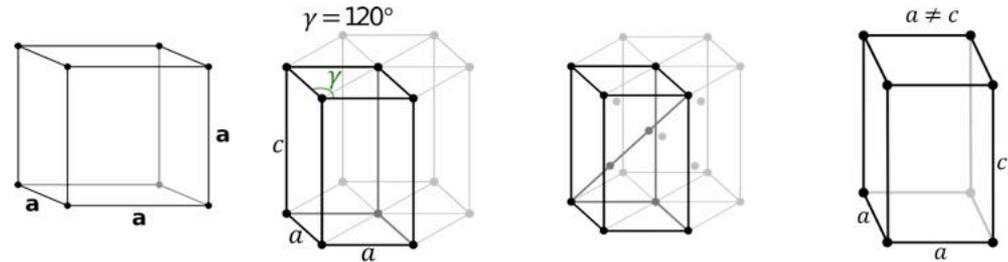


Un sólido cristalino es un conjunto de átomos estáticos que ocupan una posición determinada

3.1 Sistemas cristalinos

SISTEMAS CRISTALINOS

La estructura cristalina está constituida por la combinación de una red cristalina más la base de la red, y es la unión de ambas la que determina el tipo de operaciones de simetría que admite el cristal.



Cúbico



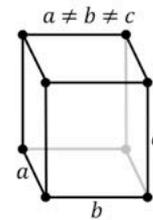
Hexagonal



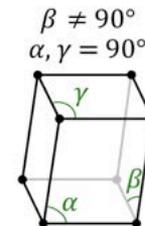
Trigonal



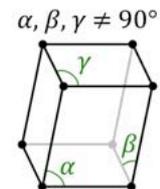
Tetragonal



Ortorómbico



Monoclínico



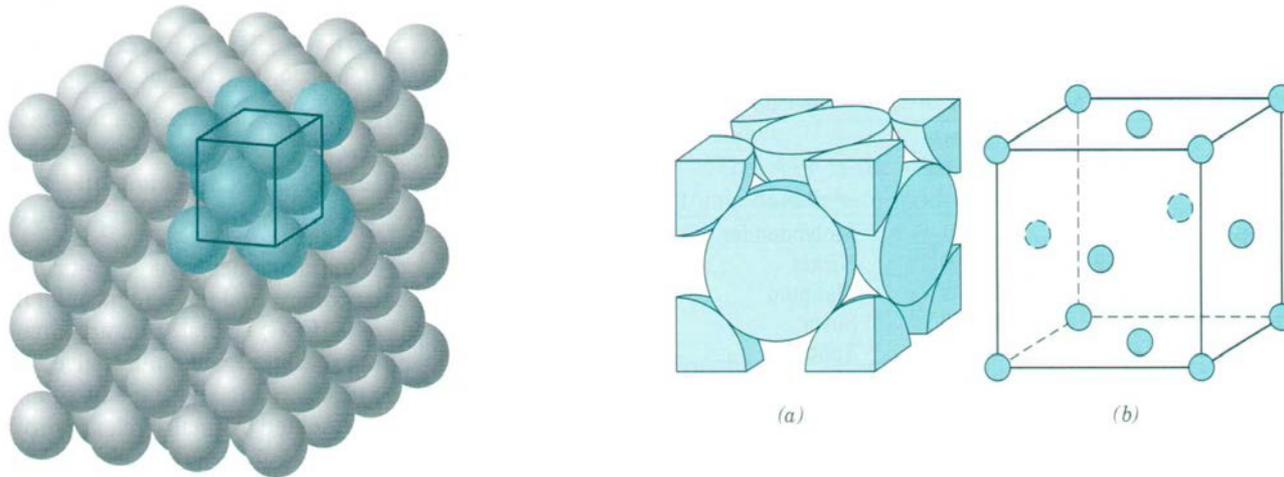
Triclínico

3.1 Sistemas cristalinos

Celda unitaria: es el agrupamiento más pequeño de átomos que conserva la geometría de la estructura cristalina, y que al apilarse en unidades repetitivas forma un cristal con dicha estructura (subdivisión de una red que conserva las características generales de toda la red).

3.1 Sistemas cristalinos

Celdas unitarias: Ejemplo sistema cúbico



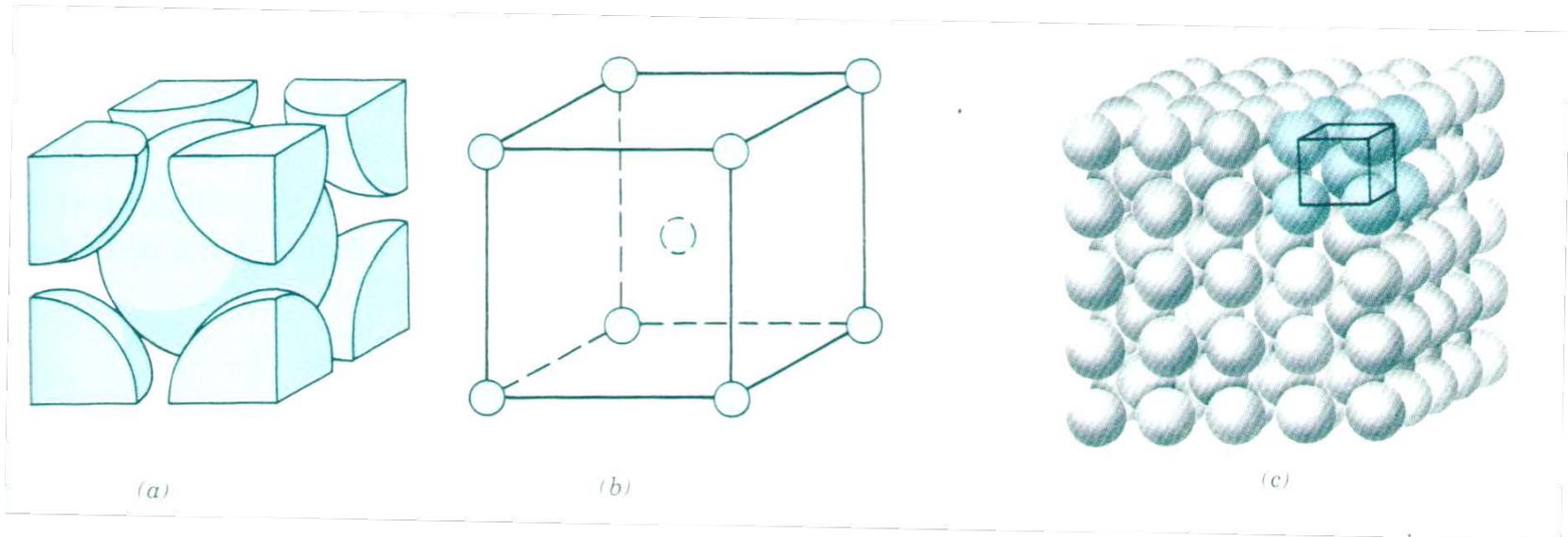
Estructura cristalina cúbica de cara centrada:

(a) representación de la celda unidad mediante esferas rígida

(b) celda unidad representada mediante esferas reducidas

3.1 Sistemas cristalinos

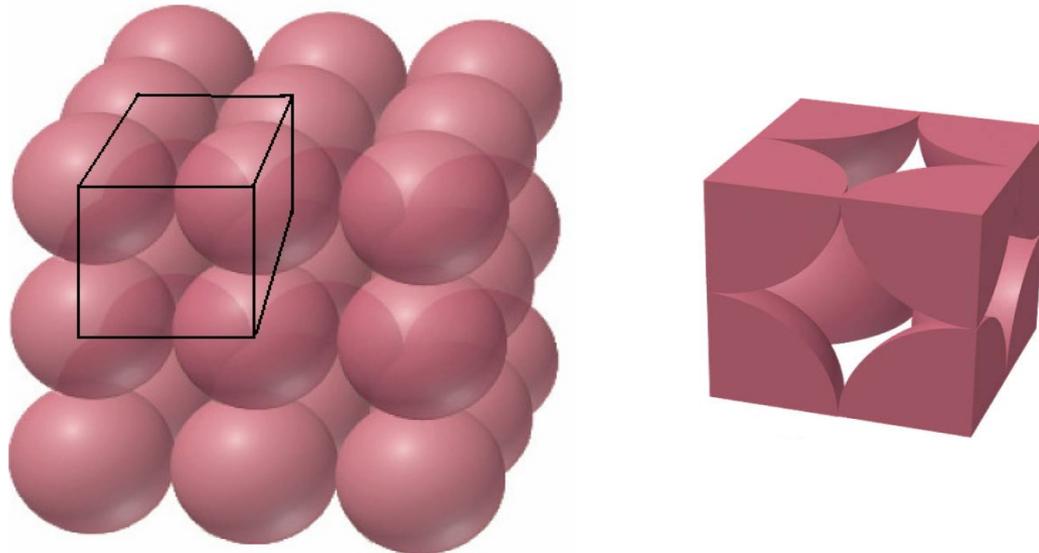
Celdas unitarias: Ejemplo sistema cúbico



Representación de la red y de la celda unitaria del sistema cúbico centrado en el cuerpo

3.1 Sistemas cristalinos

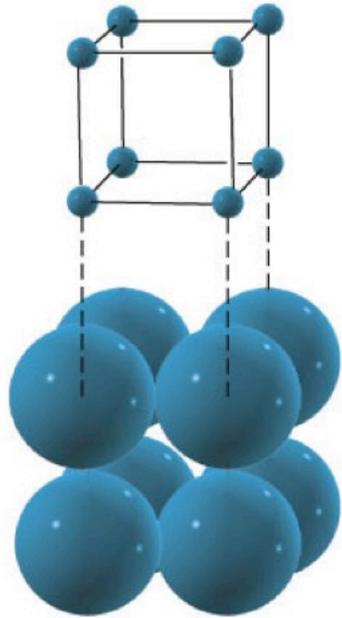
Celdas unitarias: Ejemplo sistema cúbico



Representación de la red y de la celda unitaria del sistema cúbico simple

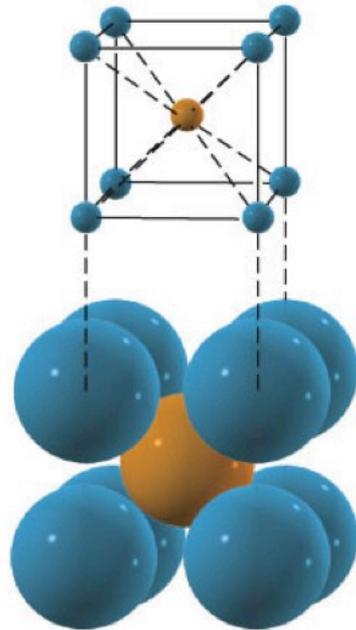
3.1 Sistemas cristalinos

Celdas unitarias: sistema cúbico

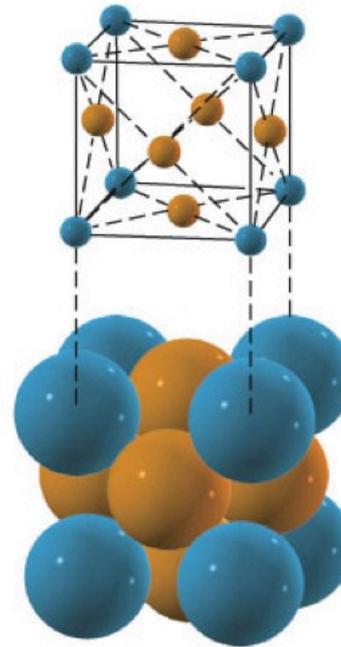


Primitive

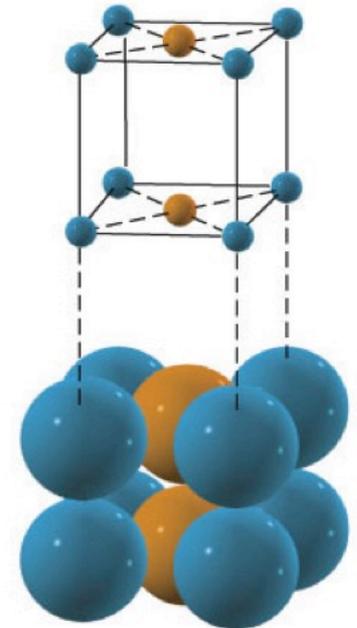
© 2007 Thomson Higher Education



Body-centered



Face-centered

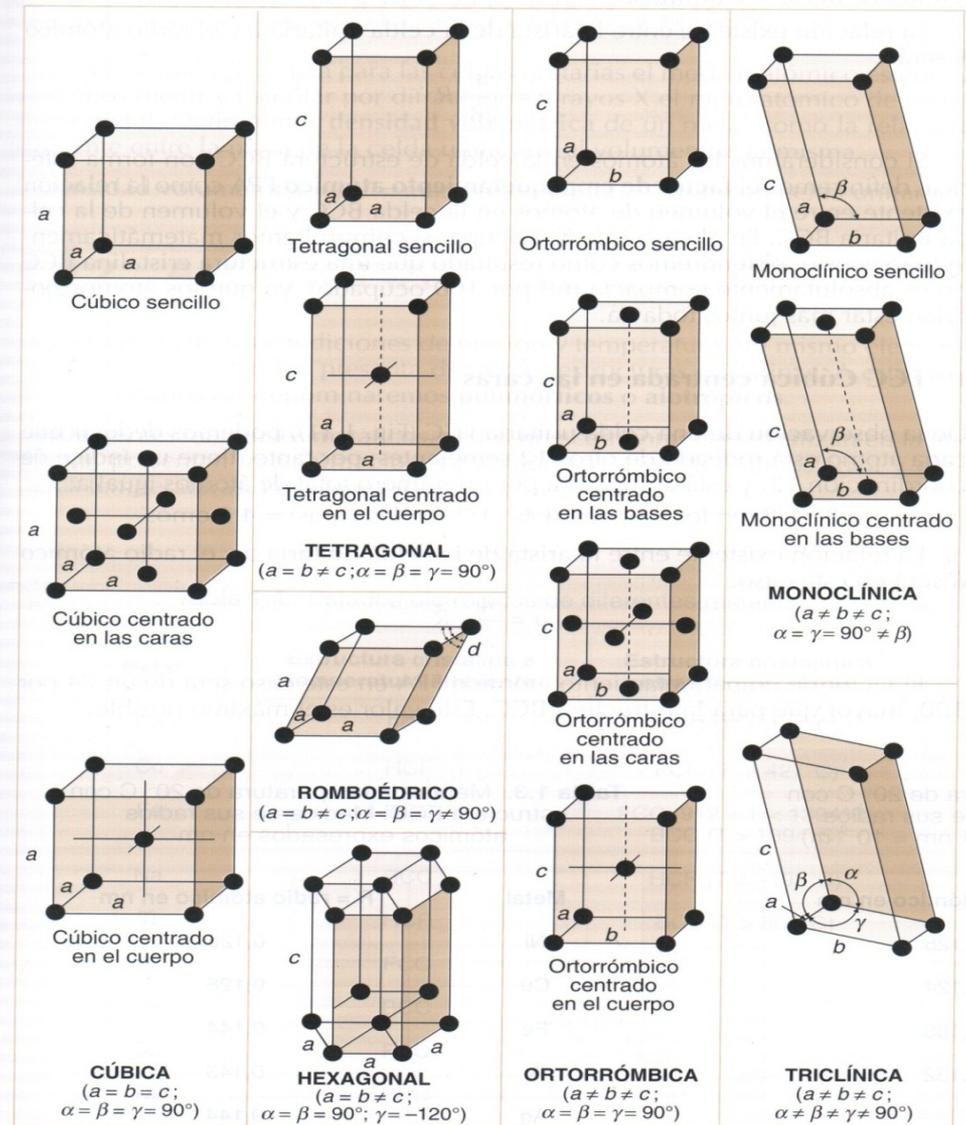


Side-centered

3.2 Redes de Bravais

El cristalógrafo francés A. Bravais demostró, en 1848, que solo hay 14 redes de traslación tridimensionales que son compatibles con las características de simetría de cada sistema cristalino: las 14 redes de Bravais.

La cristalografía permite clasificar todas las estructuras cristalinas de los materiales, bien sean metálicos, cerámicos o poliméricos, en unos pocos tipos y posibilita trasladar su análisis, independizándolo de su composición química, al estudio de su red espacial o cristalina.

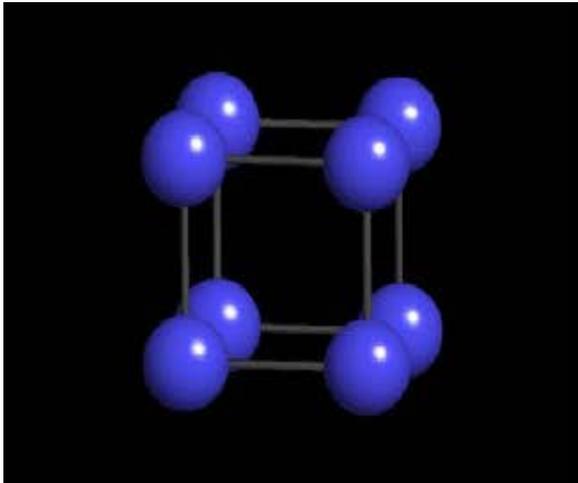
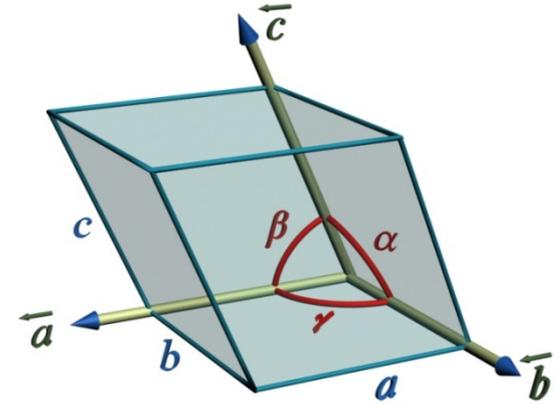


Redes de Bravais agrupadas de acuerdo a su sistema cristalino y características fundamentales de éstos y sus retículas espaciales.

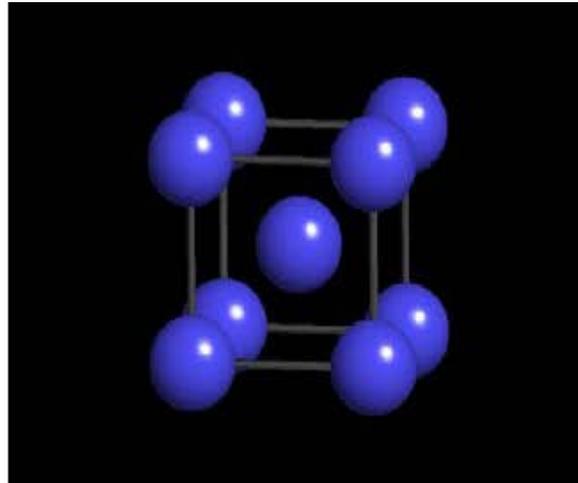
3.2 Redes de Bravais

Sistema cúbico

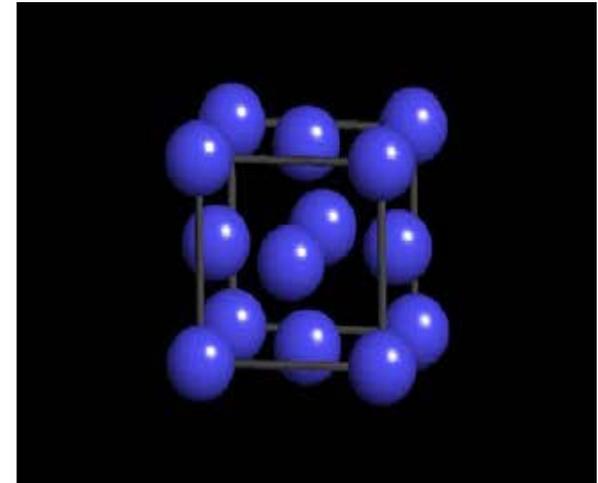
$$a = b = c$$
$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$



Simple



Centrada en el cuerpo



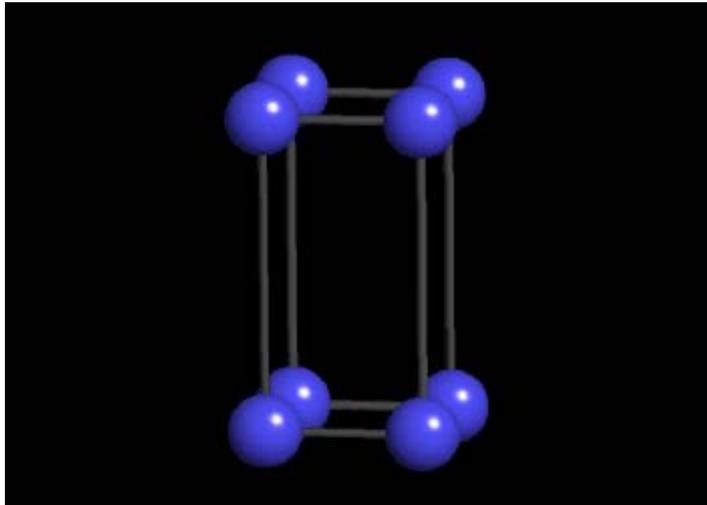
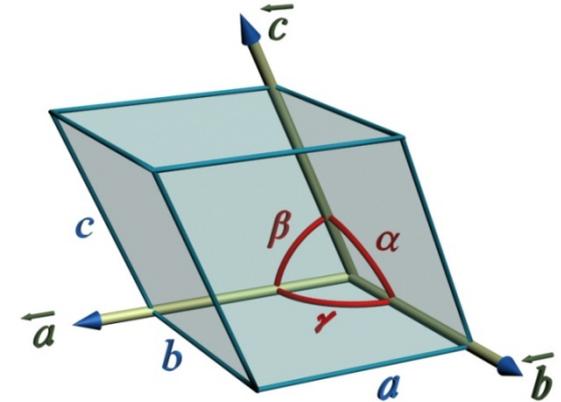
Centrada en las caras

3.2 Redes de Bravais

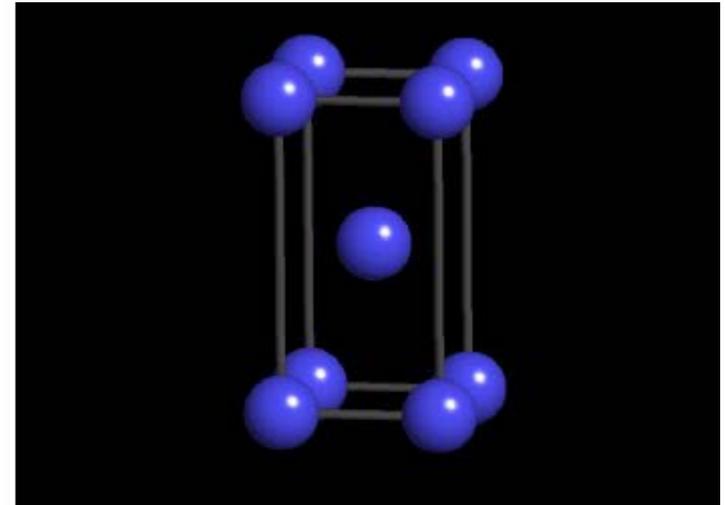
Sistema tetragonal

$$a = b \neq c$$

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$



Simple



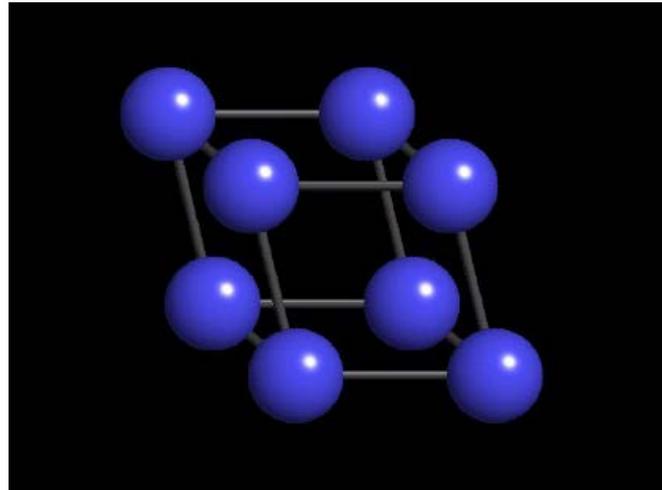
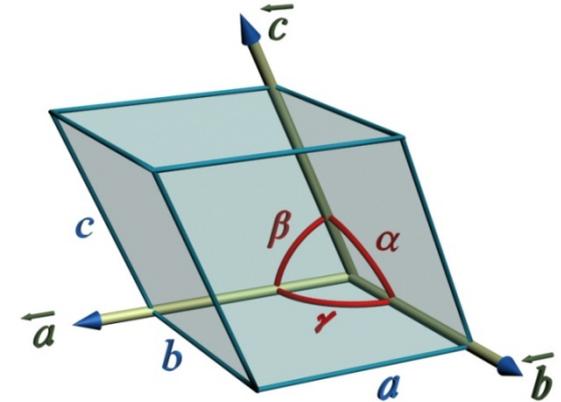
Centrada en el cuerpo

3.2 Redes de Bravais

Sistema romboédrico

$$a = b \neq c$$

$$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$$

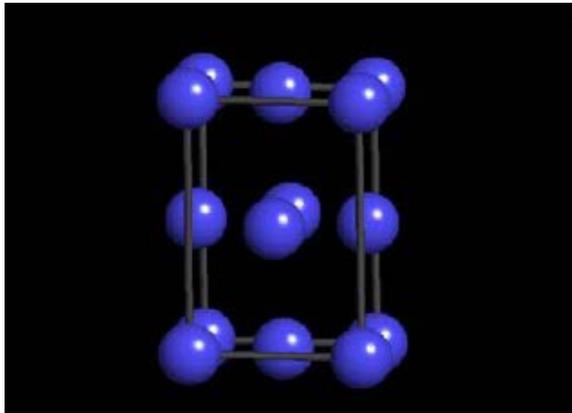
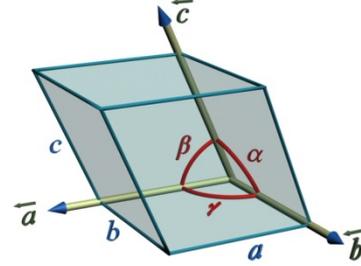


Romboédrico

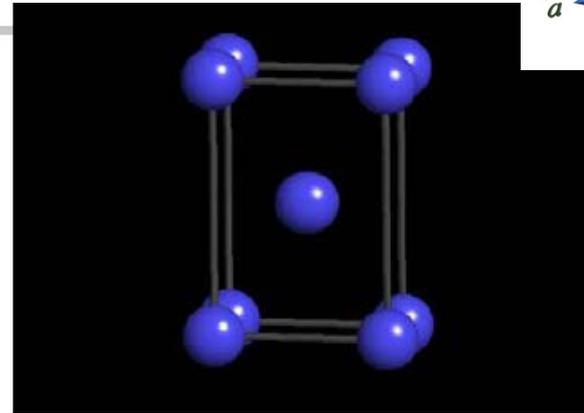
3.2 Redes de Bravais

Sistema ortorrómbico

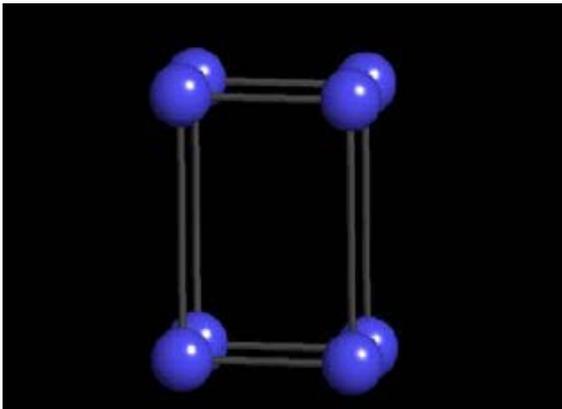
$$a \neq b \neq c$$
$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$



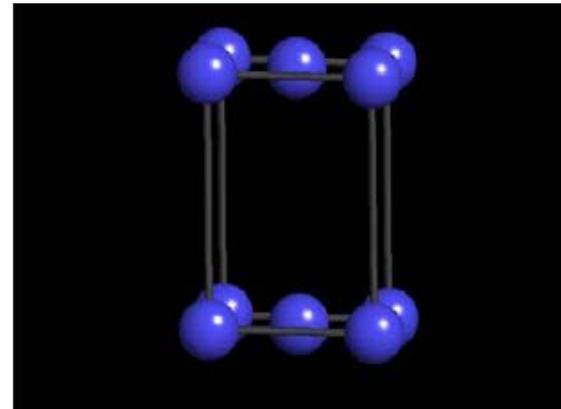
Centrada en las caras



Centrada en el cuerpo



Simple



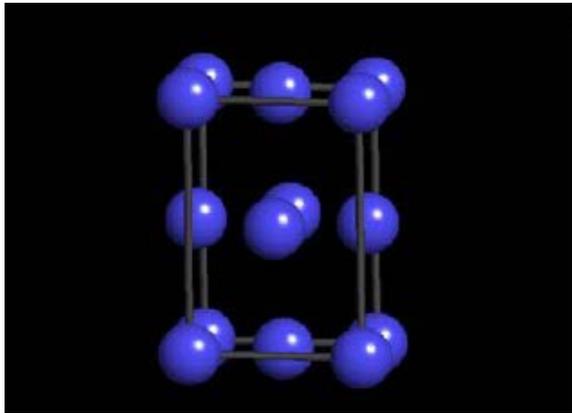
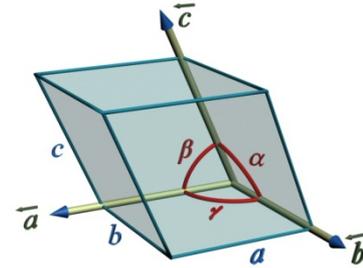
Centrada en las bases

3.2 Redes de Bravais

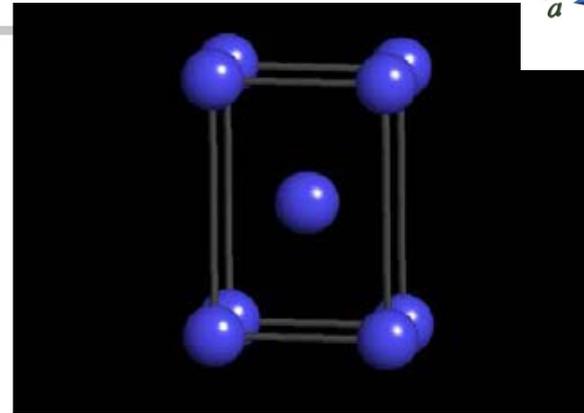
Sistema monoclínico

$$a \neq b \neq c$$

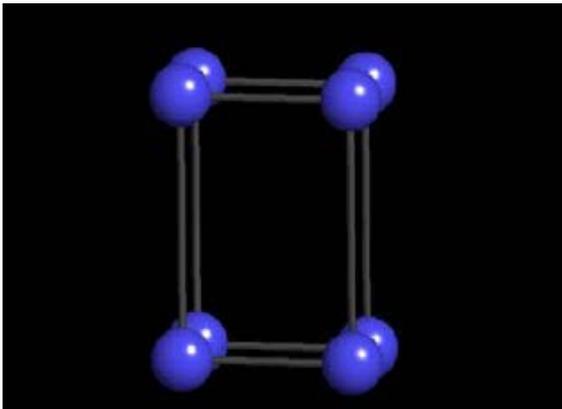
$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$



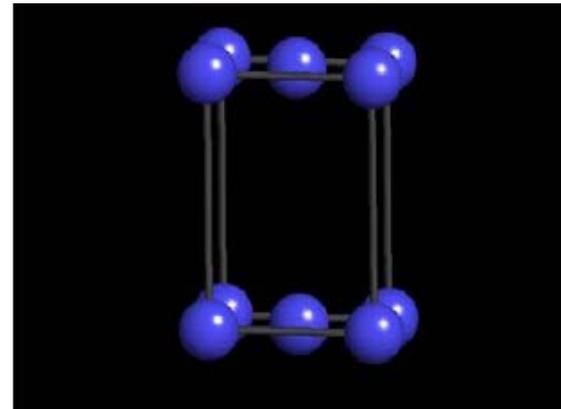
Centrada en las caras



Centrada en el cuerpo



Simple



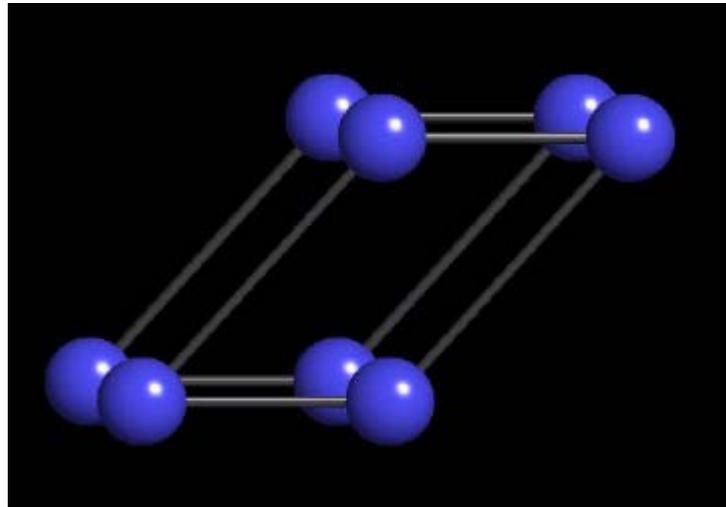
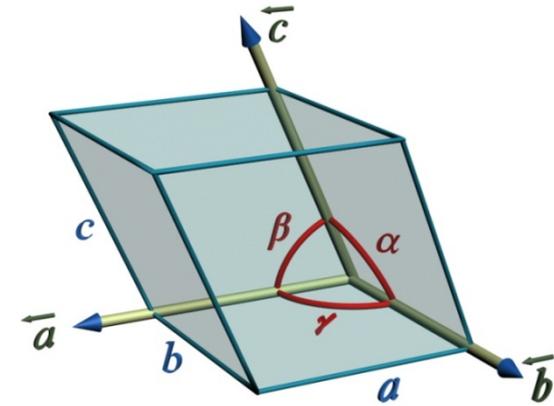
Centrada en las bases

3.2 Redes de Bravais

Sistema triclínico

$$a \neq b \neq c$$

$$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$$



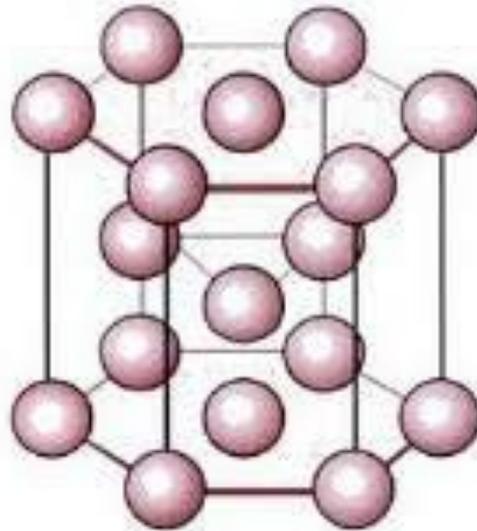
Simple

3.2 Redes de Bravais

Sistema hexagonal

$$a = b \neq c$$

$$\alpha = \beta = 90^\circ \text{ y } \gamma = 120^\circ$$



Celda unidad de la estructura hexagonal compacta

3.2 Redes de Bravais

Al respecto

El 90% de los Metales cristalizan en 3 estructuras densamente empaquetadas puesto que:

- Normalmente tiene un único elemento, luego el radio atómico es el mismo.
- El enlace metálico no es direccional.
- Con el fin de reducir la energía de enlace las distancias entre átomos tienden a ser pequeñas $\Rightarrow E_{\text{mínima}}$

Estructuras cristalinas de elementos metálicos a 25°C y 1atm.

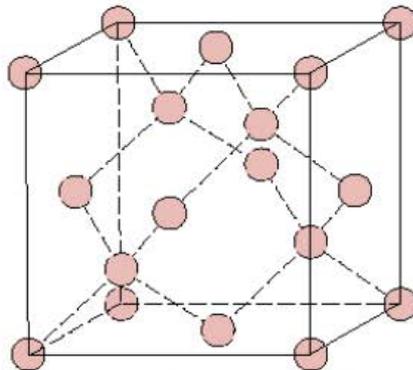
Estructura cristalina	Elemento
Hexagonal compacta	Be, Cd, Co, Mg, Ti, Zn
Cúbica compacta	Ag, Al, Au, Ca, Cu, Ni, Pb, Pt
Cúbica centrada en el cuerpo	Ba, Cr, Fe, W, alcalinos
Cúbica-primitiva	Po

3.2 Redes de Bravais

Por consideración

Los átomos de carbono forman estructuras diferentes a esta capacidad de asumir dos o más estructuras cristalinas se le conoce como alotropía-polimorfismo

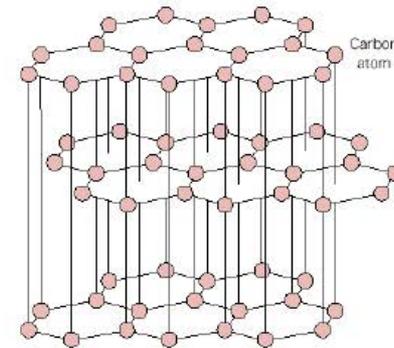
Diamante



Estruct. Tridimens.
Transparente
Muy duro (\Rightarrow Coval.)
No conductor



Grafito



Estruct. Laminar
Negro
Blando (\Rightarrow Enl. 2°)
Conductor



3.3 Parámetros de red, números de átomos por celda, número de coordinación y factor de empaquetamiento

Estructuras cristalinas y radios atómicos de algunos elementos

<i>Metal</i>	<i>Estructura cristalina^a</i>	<i>Radio atómico^b</i> (nm)	<i>Metal</i>	<i>Estructura cristalina</i>	<i>Radio atómico</i> (nm)
Aluminio	FCC	0,1431	Molibdeno	BCC	0,1363
Cadmio	HC	0,1490	Níquel	FCC	0,1246
Cromo	BCC	0,1249	Platino	FCC	0,1387
Cobalto	HC	0,1253	Plata	FCC	0,1445
Cobre	FCC	0,1278	Tántalo	BCC	0,1430
Oro	FCC	0,1442	Titanio (α)	HC	0,1445
Hierro (α)	BCC	0,1241	Tungsteno	BCC	0,1371
Plomo	FCC	0,1750	Zinc	HC	0,1332

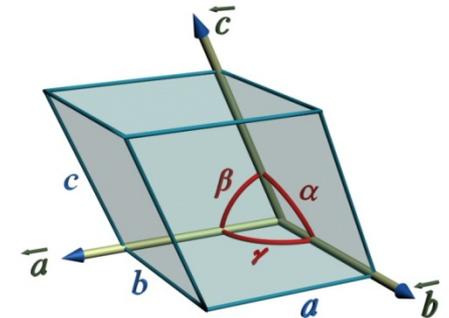
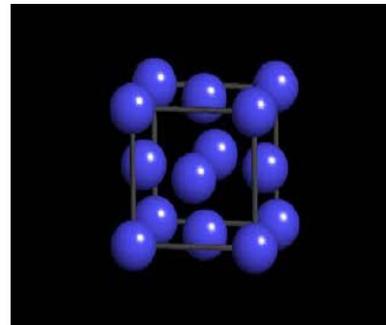
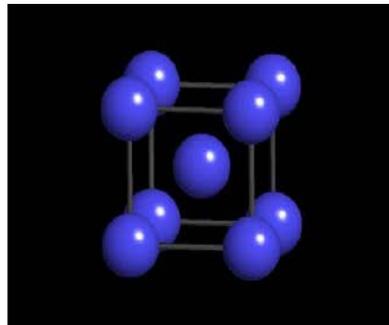
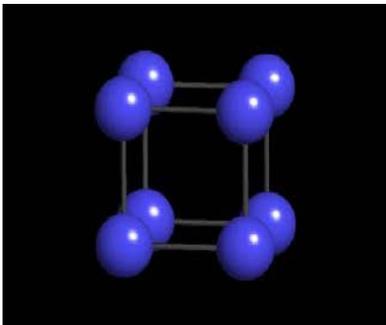
^a FCC = cúbica centrada en las caras; HC = hexagonal compacta; BCC = cúbica centrada en el cuerpo.

^b Un nanómetro (nm) equivale a 10^{-9} m. Para convertir los nanómetros a unidades angstrom (Å) es necesario multiplicar por 10 el valor de los nanómetros.

3.3 Parámetros de red, números de átomos por celda, número de coordinación y factor de empaquetamiento

Parámetros de red: Describe el tamaño y la forma de la celda unitaria, incluyen las dimensiones y los costados de las celdas unitarias y los ángulos entre sus costados.

Por ejemplo en un sistema cristalino cúbico, solamente es necesaria la longitud de uno de los costados para describir por completo la celda y se suponen ángulos de 90° de sus costados.



La medida de la longitud de la arista a la temperatura ambiente **es el parámetro de red** y a menudo la longitud se da en (nm), o en Angstroms (A).

$$1 \text{ nanómetro (nm)} = 10^{-9} \text{ m} = 10^{-7} \text{ cm} = 10 \text{ A}$$

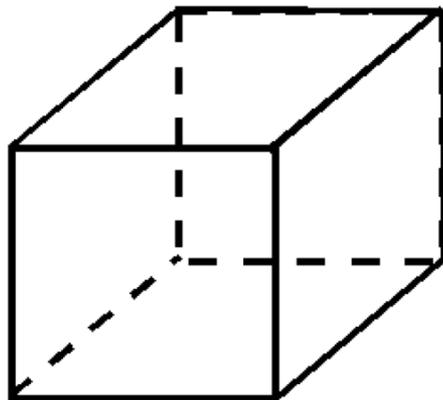
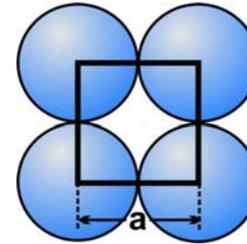
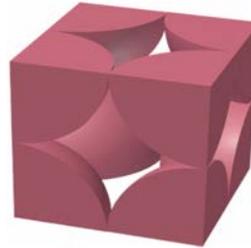
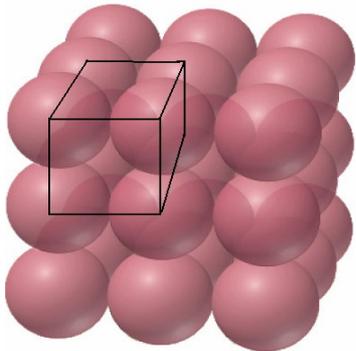
$$1 \text{ angstrom (A)} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m} = 10^{-8} \text{ cm}$$

$$1 \text{ Angstrom} = 10^{-10} \text{ m} = 0,1 \text{ nm}$$

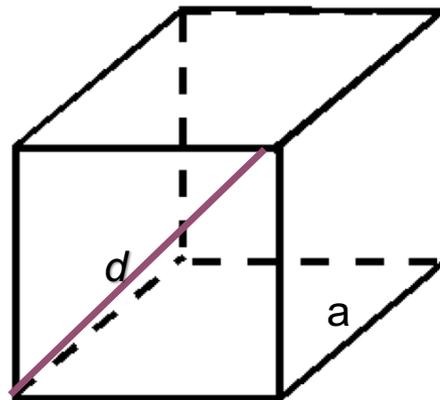
3.3 Parámetros de red, números de átomos por celda, número de coordinación y factor de empaquetamiento

Parámetros de red: determine la arista en función del radio atómico.

CS: deduzca el procedimiento.

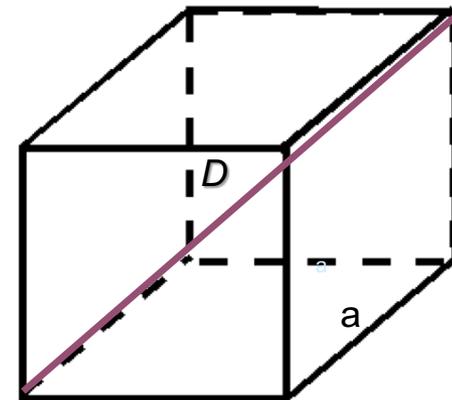


arista



arista

$$d = a\sqrt{2}$$



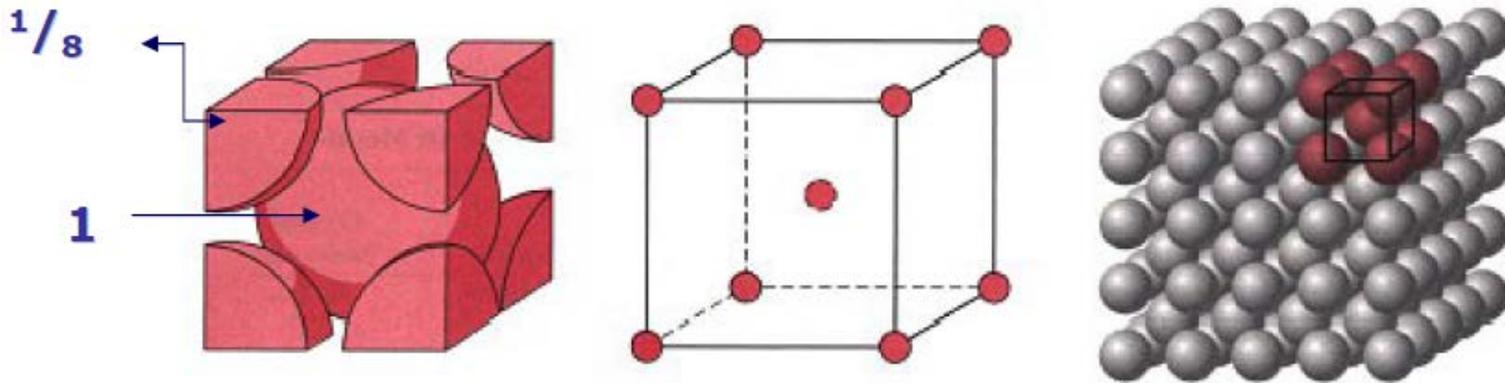
arista

$$D = a\sqrt{3}$$

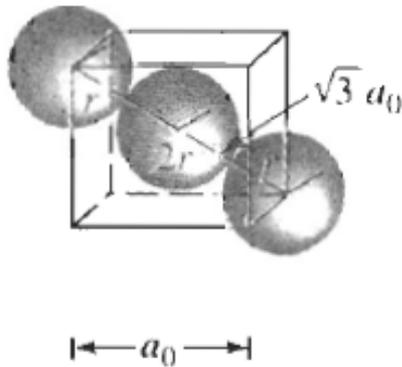
3.3 Parámetros de red, números de átomos por celda, numero de coordinación y factor de empaquetamiento

Parámetros de red: determine la arista en función del radio atómico.

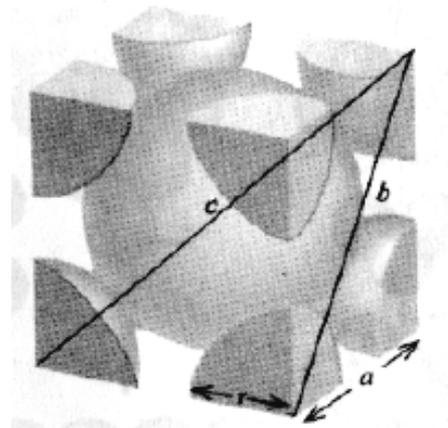
BCC: deduzca el procedimiento.



Ref. J.F. Shackelford "Introducción a la Ciencia de Materiales para Ingenieros". Prentice Hall



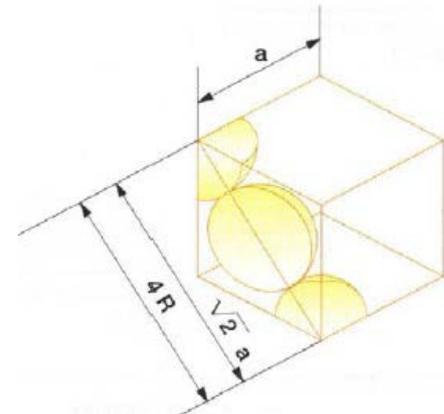
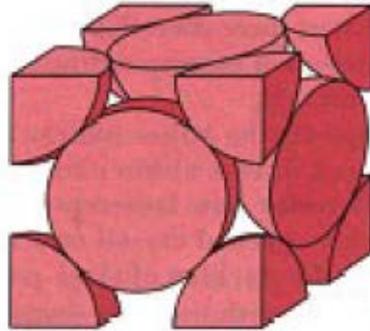
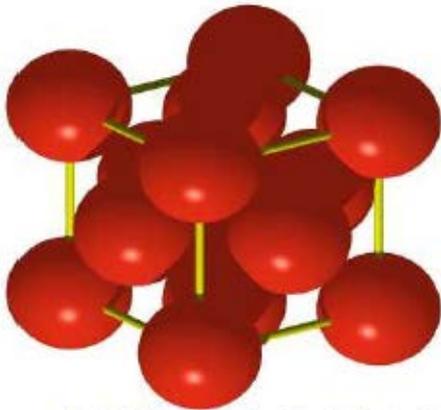
$$a_0 = \frac{4r}{\sqrt{3}}$$



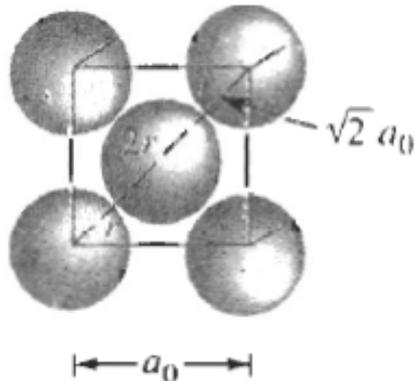
3.3 Parámetros de red, números de átomos por celda, número de coordinación y factor de empaquetamiento

Parámetros de red: determine la arista en función del radio atómico.

FCC: deduzca el procedimiento.



Ref. J.F. Shackelford "Introducción a la Ciencia de Materiales para Ingenieros".

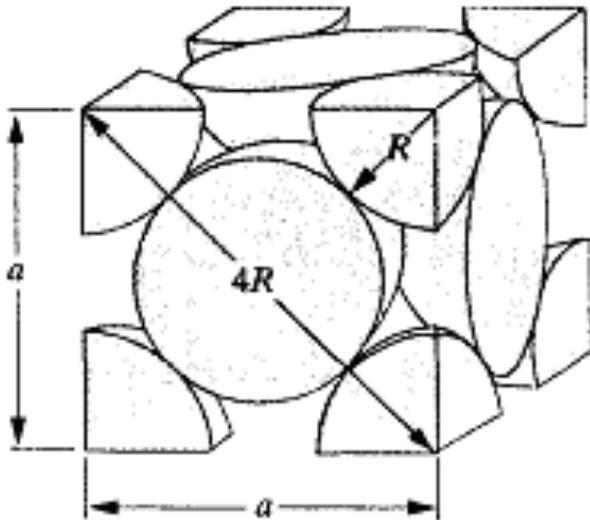


$$a_0 = \frac{4r}{\sqrt{2}}$$

3.3 Parámetros de red, números de átomos por celda, número de coordinación y factor de empaquetamiento

Ejercicio:

Calcular el parámetro de red y el volumen de la celda unidad del hierro FCC (Radio atómico = 1.24 \AA) en nanómetros.



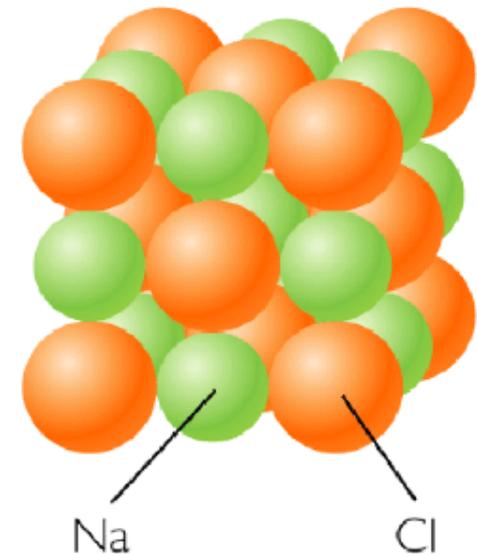
3.3 Parámetros de red, números de átomos por celda, número de coordinación y factor de empaquetamiento

Ejercicio:

Calcule el parámetro de red del cloruro de sodio y el volumen de la celda unitaria en nanómetros.

Radio iónico sodio = 0.98 \AA

Radio iónico cloro = 1.81 \AA



3.3 Parámetros de red, números de átomos por celda, número de coordinación y factor de empaquetamiento

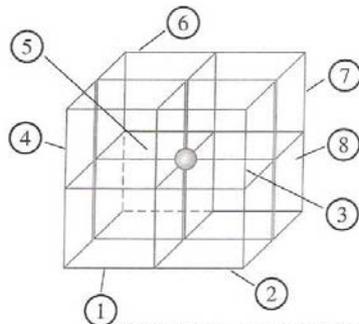
Número de átomos por celda unitaria:

Cada una de las celdas unitarias de los diferentes sistemas cristalinos está definida por un número específico de puntos de red.

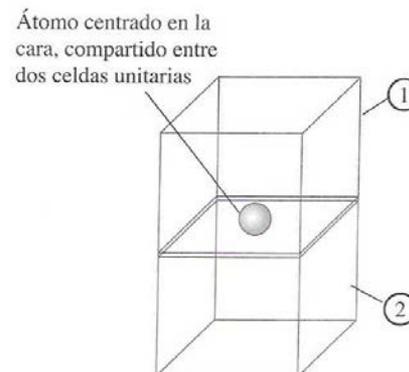
Un punto de red en la esquina de una celda unitaria estará compartido por siete celdas unitarias adyacentes; solo una octava parte de cada esquina corresponde a una celda en particular.

$$\left(\frac{1 \text{ punto de red}}{8 \text{ esquina}} \right) \left(8 \frac{\text{esquinas}}{\text{celda}} \right) = 1 \frac{\text{punto de red}}{\text{celda unitaria}}$$

Es decir, las esquinas contribuyen con **1/8 de un punto** y análogamente las caras con **1/2 de punto** y las posiciones en el centro del cuerpo con **1 punto**.



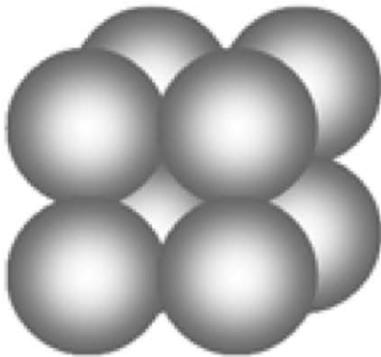
Cada átomo en un vértice es compartido por ocho celdas unitarias (1-4 en el frente, 5-8 atrás)



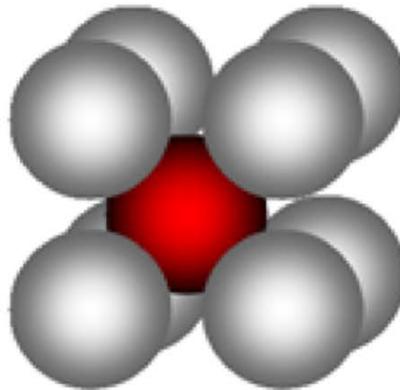
3.3 Parámetros de red, números de átomos por celda, número de coordinación y factor de empaquetamiento

Ejercicio:

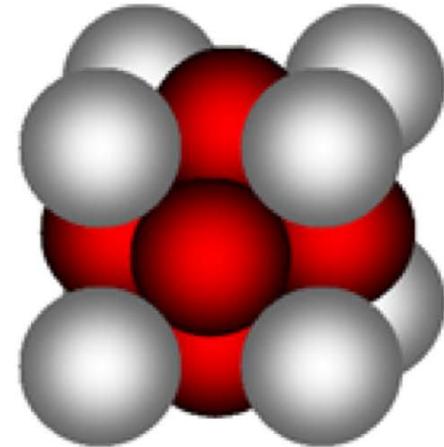
Calcule la cantidad de átomos por celda en el sistema cristalino cúbico.



Cúbica simple



**Cúbica centrada
en el cuerpo**

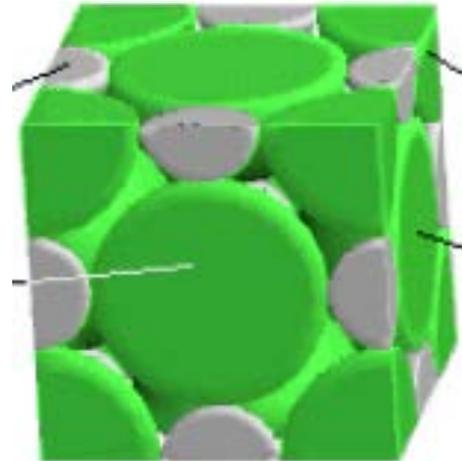
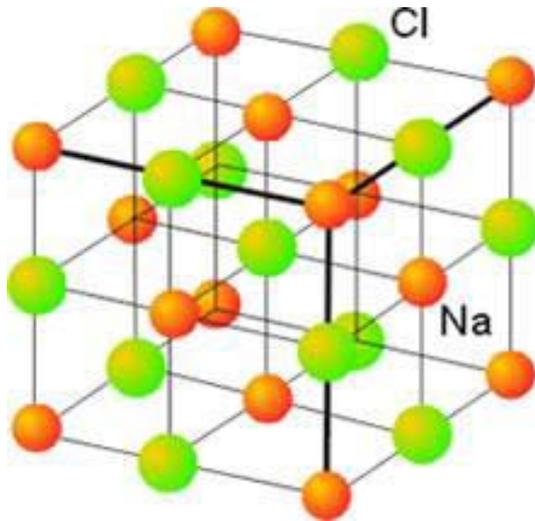


**Cúbica centrada
en las caras**

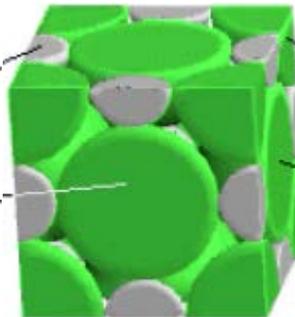
3.3 Parámetros de red, números de átomos por celda, número de coordinación y factor de empaquetamiento

Ejercicio:

Calcule el número de iones en la celda unidad del NaCl .



$$\begin{array}{l} \text{Para Na}^+ \\ 12 \text{ aristas} \times \frac{1}{4} = 3 \\ 1 \text{ centro} \times 1 = 1 \\ \hline \text{total} = 4 \end{array}$$

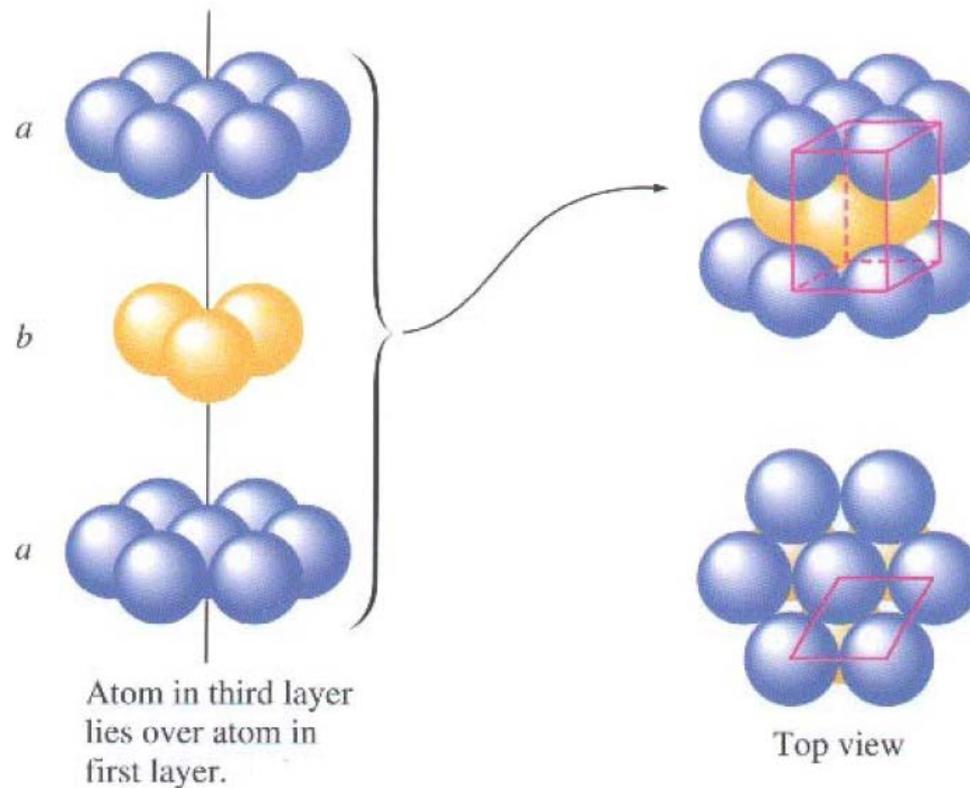


$$\begin{array}{l} \text{Para Cl}^- \\ 8 \text{ vértices} \times \frac{1}{8} = 1 \\ 6 \text{ caras} \times \frac{1}{2} = 3 \\ \hline \text{total} = 4 \end{array}$$

3.3 Parámetros de red, números de átomos por celda, número de coordinación y factor de empaquetamiento

Ejercicio:

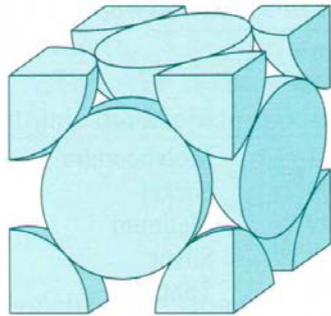
Calcule la cantidad de átomos por celda en el sistema cristalino HC.



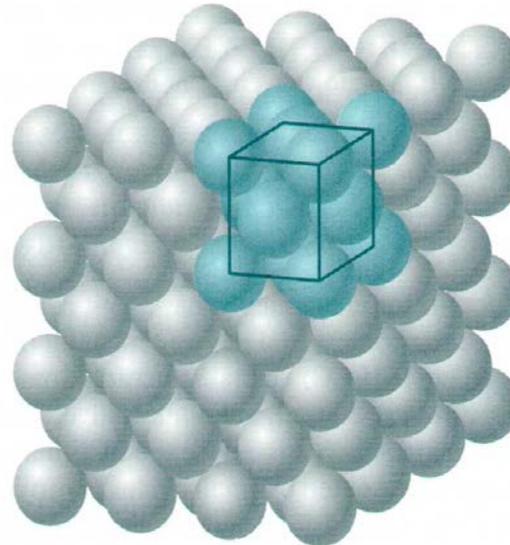
3.3 Parámetros de red, números de átomos por celda, numero de coordinación y factor de empaquetamiento

Ejercicio:

Un metal cristaliza en la red cúbica centrada en las caras. Si su radio atómico es 1.38 \AA . ¿Cuántos átomos existirán en 1 cm^3 ?



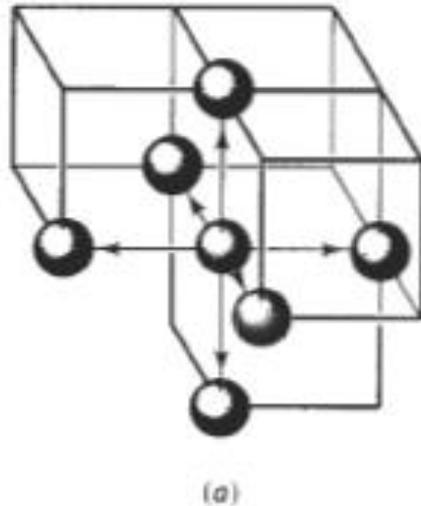
(a)



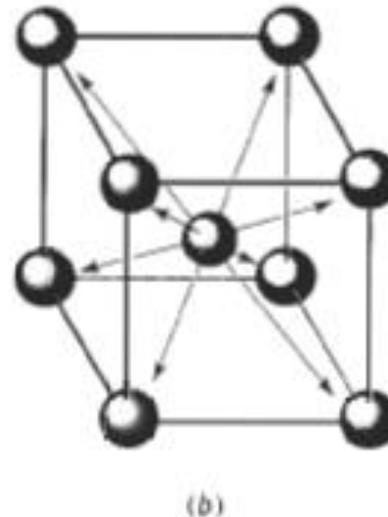
(b)

3.3 Parámetros de red, números de átomos por celda, número de coordinación y factor de empaquetamiento

Número de coordinación: es el número de átomos que tocan a otro en particular; es decir, el número vecinos mas cercanos, es el número de coordinación y es un indicio de que tan estrecha y eficazmente están empaquetados los átomos.



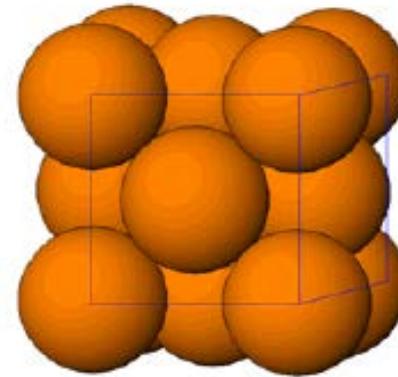
Nº coordinación CS = 6



Nº coordinación BCC = 8

3.3 Parámetros de red, números de átomos por celda, número de coordinación y factor de empaquetamiento

Número de coordinación



Nº coordinación FCC = 12

Determine el número de coordinación de la estructura hexagonal compacta

3.3 Parámetros de red, números de átomos por celda, número de coordinación y factor de empaquetamiento

Factor de empaquetamiento: Es la fracción de espacio ocupado por átomos, suponiendo que son esferas duras que tocan a su vecino más cercano.

$$\text{Factor de empaquetamiento} = \frac{(\text{cantidad de átomos por celda})(\text{volumen de átomos})}{\text{volumen de la celda unitaria}}$$

Ejercicio:

Calcular el factor de empaquetamiento de la celda CS, BCC y FCC.

TAREA : Calcular el factor de empaquetamiento de la celda HC

3.3 Parámetros de red, números de átomos por celda, número de coordinación y factor de empaquetamiento

Densidad: El conocimiento de la estructura cristalina de un sólido metálico permite el cálculo de su densidad mediante :

$$\rho = \frac{nA}{V_C N_A}$$

donde

n = número de átomos asociados a cada celdilla unidad

A = peso atómico

V_C = volumen de la celdilla unidad

N_A = número de Avogadro ($6,023 \times 10^{23}$ átomos/mol)

3.3 Parámetros de red, números de átomos por celda, número de coordinación y factor de empaquetamiento

Ejemplo:

Determina la densidad volumétrica para el aluminio, cuya masa atómica es 26.98 g/mol, con un radio atómico de 0.143 nm, y que presenta una estructura cúbica centrada en las caras, se ha de considerar que los átomos están en contacto directo a lo largo de las diagonales de la celdilla unidad (direcciones compactas).

$$a = 2r\sqrt{2} = 2 \cdot 0,143 \text{ nm} = 0,405 \text{ nm}$$

$$V_c = a^3 = 0,405^3 \text{ nm}^3 = 0,06626 \text{ nm}^3 = 6,63 \cdot 10^{-23} \text{ cm}^3$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{n_c \cdot M}{V_c \cdot N_A} = \frac{4 \text{ átomos} \cdot 26,98 \text{ g/mol}}{6,63 \cdot 10^{-23} \text{ cm}^3 \cdot 6,023 \cdot 10^{23} \text{ átomos/mol}} = 2,70 \text{ g/cm}^3$$

REFERENCIAS

1. **Donald R. Askeland, “Ciencia e Ingeniería de los Materiales”, International Thomson Editores, 4ta edición México D.F. 2004.**
2. **Michael F. Ashby, David R. H. Jones. “Engineering Materials1. An Introduction to Properties, Applications and Design”, Editorial Reverte, 1ra edition, Barcelona España 2008.**
3. **William D. Callister, Jr. “Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales”, Editorial Reverte, 1ra edición, Barcelona España 2004.**
4. **James F. Shackelford, “Introducción a la Ciencia de Materiales para Ingenieros”, Editorial Pearson, 6ta edición, Madrid España 2005.**