

I. CIENCIA DE LOS MATERIALES

Por: Diana Alejandra Rojas Avellaneda
Fundación Universitaria Juan de Castellanos

1.1 INTRODUCCIÓN

El hombre, los materiales y la ingeniería han evolucionado en el transcurso del tiempo y continúan haciéndolo. Es por esto que, a lo largo de la historia, el desarrollo de los materiales usados en las diferentes áreas del conocimiento, están directamente relacionados con el desarrollo del ser humano y sus necesidades. El descubrimiento de los materiales ha ido evolucionando con el pasar de los años, en la medida en que se han ido reconociendo los materiales disponibles en la naturaleza como la piedra, madera, huesos y pieles. Como lo han narrado muchos autores, los primeros materiales usados están principalmente relacionados con herramientas y armas necesarias para su sustento. En el primer período de la evolución del hombre, conocido como la Edad de Piedra (2,5 millones de años hasta el año 3000 a. C.), los primeros homínidos cortaban piedras con el fin de utilizarlas como armas de caza; así mismo, el hombre del neolítico descubrió que la arcilla (barro) se ablandaba al mezclarse con agua, y se endurecía al secarse, dando como resultado a los primeros cerámicos. También, se dio uso a las partes de restos de animales como sus huesos y pieles. Posteriormente, desde el 4000 a. C. hasta el 1500 a. C., se realizaron los primeros descubrimientos del cobre, metal disponible en la naturaleza, maleable y dúctil, que sería usado en el desarrollo de las primeras aleaciones. En la Edad de Bronce, que corresponde aproximadamente al período comprendido entre los años 2000 a. C. y 1000 a. C., se origina el inicio de la metalurgia, con el descubrimiento de aleaciones de cobre y estaño para producir mejores armas y herramientas. En la Edad del Hierro (comprendido entre los años 1000 a. C. y 1 a. C.), hacia el año 500 a. C. las aleaciones de hierro fueron reemplazando ampliamente al bronce en las herramientas y armas realizadas. Este período se extendió hasta el año 1900, donde descubrieron que el calentamiento del hierro en presencia de carbono, daba como resultado un material con propiedades diferentes, que se denominó acero.

En el siglo XVII, durante la Revolución Industrial, la metalurgia tuvo un avance significativo gracias al desarrollo de maquinarias que reemplazaron la mano de obra del hombre, el desarrollo del ferrocarril, de los barcos de vapor y de la construcción de puentes. Adicionalmente, en esta época se dio el inicio al desarrollo de la industria de los plásticos sintéticos, principalmente por el

proceso de vulcanización para obtención del caucho, usado en la elaboración de neumáticos. Esta industria ha seguido avanzando con los años hasta la actualidad, descubriendo nuevos polímeros sintéticos en diferentes aplicaciones. En la Figura 1 se presenta la importancia relativa de los materiales para la ingeniería en el transcurso de la historia humana. Como se puede evidenciar, el desarrollo de nuevos materiales presenta una evolución rápida, resaltando el uso de nuevas aleaciones de metales en la época de la Segunda Guerra Mundial. Después de este período, se puede observar la demanda de nuevos y sofisticados materiales no metálicos, con el fin de disminuir costos y peso. Esto ha llevado al crecimiento de materiales compuestos, poliméricos y cerámicos.

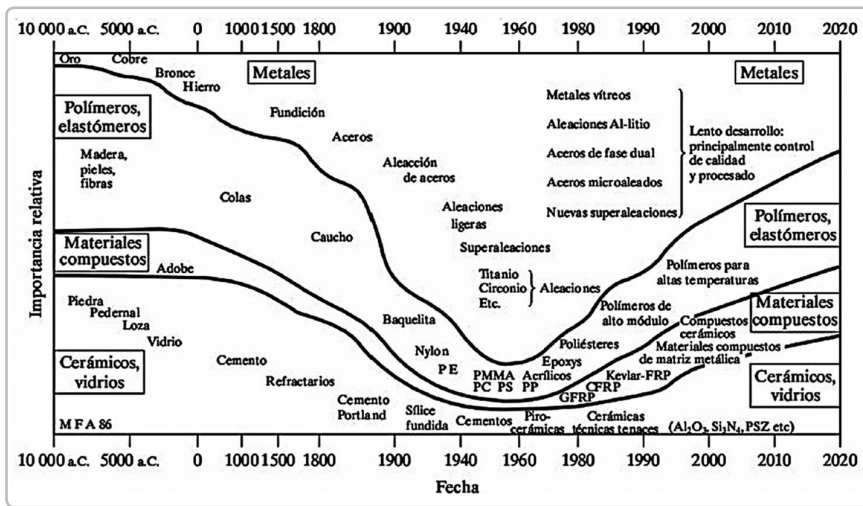


Figura 1. Evolución de los materiales a lo largo de la historia.

Fuente: adaptado de Shachelford, 2005, p. 31.

1.2 CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES

Esta rama de la ingeniería concerniente a los materiales, combina de forma específica los conocimientos científicos, básicos y de la práctica ingenieril, dando herramientas a los ingenieros para la elección y uso de materiales. Específicamente, la ciencia de los materiales implica el estudio de la estructura interna de los materiales y la relación con sus propiedades. La información que este nivel de estudio ofrece está relacionada con las propiedades observables a simple vista, los enlaces químicos de los átomos enlazados entre sí, el ordenamiento estructural de los átomos y la interacción entre las partículas subatómicas; es decir, los electrones y su interacción con el núcleo. A partir de estos aspectos, es posible entender la respuesta de los diferentes materiales ante los estímulos externos a los que serán sometidos cuando estén en servicio. Por otro lado, la ingeniería de materiales se interesa principalmente por el empleo del conocimiento fundamental y

aplicado, acerca de los materiales; con esta información, es posible relacionar las propiedades-estructuras, para diseñar o proyectar nuevos materiales y productos necesarios para el desarrollo.

1.3 FUNDAMENTOS

El conocimiento de la ciencia de los materiales, como se mencionó anteriormente, es de gran importancia para tener criterios al momento de elegir o aplicar un material, es por esto que en este apartado se presentan los conceptos básicos para entender la relación entre la estructura de un material y sus propiedades.

1.3.1 Estructura atómica

Como resultado del estudio de las diferentes estructuras atómicas expuestas por los científicos de la historia, se puede adoptar una visión sencilla del átomo, el cual está constituido por tres partículas subatómicas: el protón, el neutrón y el electrón. La presencia de estas partículas y su interacción, determinan el comportamiento químico de los diferentes materiales. En la Figura 2, se observa la estructura planetaria de un átomo de Sodio, con la ubicación de sus partículas subatómicas. Los protones y los neutrones están ubicados en el núcleo del átomo, que es pequeño en comparación al volumen de los electrones. Los electrones ubicados en los orbitales del átomo, son atraídos hacia los protones del núcleo, por la fuerza que existe entre partículas con carga eléctrica opuesta. Las masas de los átomos son extremadamente pequeñas, el protón y el neutrón tienen masas casi iguales, y ambas son mucho mayores que la del electrón. Con respecto al tamaño, los átomos son considerablemente pequeños; en su mayor parte, tienen diámetros de entre $1 \cdot 10^{-10}$ m y $5 \cdot 10^{-10}$ m.

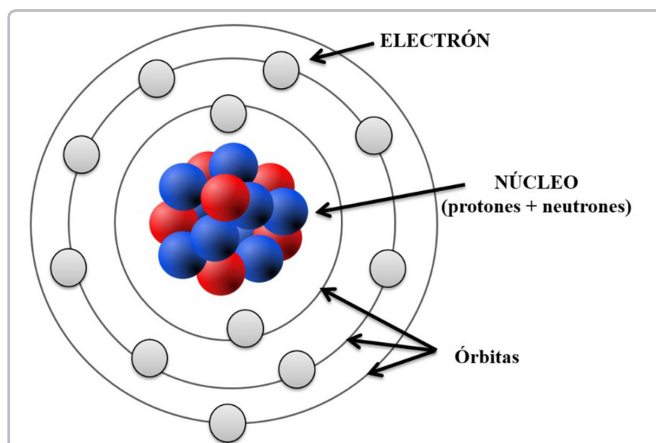


Figura 2. Estructura atómica del elemento Sodio.
Fuente: adaptado de William & Callister, 1995, p. 19.

Todos los átomos se pueden identificar por el número de protones y neutrones que contiene, por lo que se ha generado la forma de identificarlos. El número atómico (Z) es el número de protones presentes en el núcleo del átomo de un elemento, que para el caso de un átomo neutro, sería igual al número de electrones del mismo átomo. El **número de masa (A)** define el número total de protones y neutrones presentes en el núcleo de un átomo de un elemento:

$A = \text{número de protones} + \text{número de neutrones} = Z + \text{número de neutrones}$

$$\text{número de neutrones} = A - Z$$

Por ejemplo, para el átomo de hierro (formula química Fe), que es un metal ampliamente usado como material estructural, el número atómico es 26 y el número de masa es 55,84; tiene 26 electrones, 26 protones y 30 neutrones. También, existen algunos átomos de la misma naturaleza que no tienen la misma masa pero sí el mismo número atómico, estos son conocidos como **isotopos**. El hidrógeno tiene tres isótopos, el primer isótopo tiene un protón y no tiene neutrones (hidrógeno); el segundo, un protón y un neutrón (deuterio); y el tercero, un protón y dos neutrones (tritio). La medida de la masa de los átomos se da en **unidades de masa atómica (uma)**, que es equivalente a 1.66064×10^{-24} g. La masa atómica promedio de cada elemento (expresada en uma) también se denomina peso atómico.

A partir de estas propiedades, es posible determinar la configuración electrónica, información útil para estimar el comportamiento de los elementos y la formación de enlaces químicos. La configuración electrónica determina la forma en que los electrones se distribuyen entre los diferentes orbitales de los átomos. El principio de exclusión de Pauli afirma que, en un átomo no puede haber dos electrones que tengan el mismo conjunto de cuatro números cuánticos, n , l , m_l y m_s (definidos según la mecánica cuántica para describir la distancia del electrón del núcleo, la forma del orbital, la orientación del orbital en el espacio y el giro del electrón en su eje), por lo que se desarrolló el diagrama de Moeller (Figura 3), el cual ayuda a establecer la configuración electrónica de los elementos. En la Figura 3, se presenta la configuración electrónica para el átomo de silicio, junto con la representación de sus orbitales y la ubicación de los electrones. Como se puede observar, este elemento cuenta con 4 electrones de valencia (electrones del último nivel de energía), los cuales intervendrán en la combinación química de este elemento.

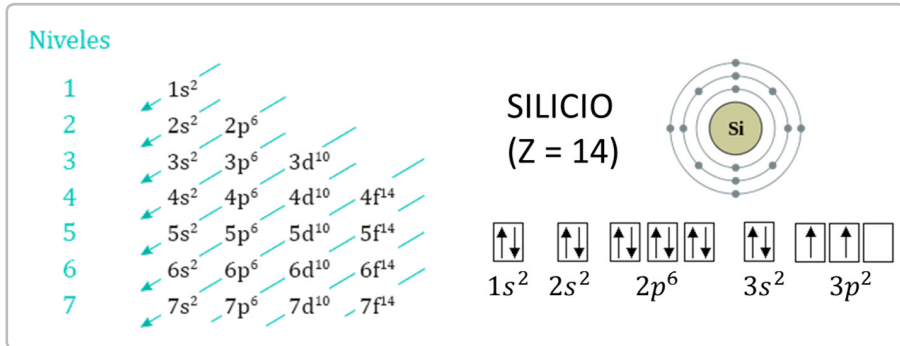


Figura 3. Diagrama de Moeller y configuración electrónica para el átomo de silicio.

Fuente: adaptada de Chang, 2010, p. 330.

A medida que los diferentes elementos fueron descubiertos, surgió la necesidad de organizar la información, por lo que se desarrolló la **tabla periódica** en la que los elementos se encuentran agrupados de acuerdo con la semejanza de sus propiedades físicas y químicas. Esta organización se da acuerdo a su número atómico de los elementos en grupos (columnas) y periodos (filas), Figura 4. La tabla periódica además de presentar los aspectos básicos de cada elemento, también presenta información importante sobre los elementos, tales como: radio atómico de los átomos y sus iones, la energía de ionización que representa la energía a mínima, necesaria para eliminar un electrón, la configuración electrónica abreviada, la afinidad electrónica, electronegatividades, etc.

De acuerdo con su naturaleza, los elementos se pueden clasificar en metales, no metales y metaloides. Aproximadamente, tres cuartas partes de los elementos son metales, y están situados en la parte izquierda y media de la tabla periódica. Los no metales se encuentran en la esquina superior derecha, y los metaloides están entre los metales y los no metales.

Los metales en general conducen electricidad y calor, son maleables y dúctiles. Todos son sólidos a temperatura ambiente con excepción del mercurio. La mayoría de los metales se funden a temperaturas muy altas, a excepción del cesio (28.4 °C) y el galio a (29.8 °C). Al ionizarse, los metales tienden a formar iones positivos, por lo que se oxidan (pierden electrones) cuando participan en reacciones químicas. Al unirse un compuesto metálico con un no metal, se forman compuestos iónicos como el caso del cloruro de sodio (NaCl), que se da por la unión de un catión de sodio y un anión de cloro Cl^- .

Por su lado, los no metales generalmente son malos conductores de calor y electricidad, tienen puntos de fusión más bajos que los metales. Debido a su afinidad electrónica, al reaccionar con elementos metálicos, tienden a ganar

electrones para llegar a una configuración electrónica estable. Al reaccionar con otros no metales, tienden a formar gases, líquidos o sólidos de bajo punto de fusión a temperatura ambiente. Por otro lado, los metaloides tienen propiedades intermedias entre las de los metales y los no metales. Varios de los metaloides, siendo el más destacado el silicio, son semiconductores eléctricos y constituyen los principales elementos empleados en la fabricación de circuitos integrados.

1A 1																	8A 18
1 H	2A 2											3A 13	4A 14	5A 15	6A 16	7A 17	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg	3B 3	4B 4	5B 5	6B 6	7B 7	8B 8 9 10			1B 11	2B 12	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110	111	112	114		116			
Metales		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb		
Metaloides		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No		
No metales																	

Figura 4. Tabla periódica de los elementos con la clasificación de metales, no metales y metaloides.

Fuente: adaptado de Brown, 2004, p. 227.

1.3.2 Enlaces químicos

Un enlace químico se da por la unión fuerte entre varios átomos o iones, por medio de fuerzas interatómicas que los enlazan. A partir de estos, se puede comprender muchas propiedades físicas de los materiales, ya que la naturaleza de los enlaces, la fuerza y la longitud determinan su comportamiento al ser sometidos a diferentes condiciones de trabajo, por ejemplo, las temperaturas de fusión y las propiedades cohesivas de los materiales dependen de la magnitud de la energía del enlace químico. Existen dos tipos de enlaces, los primarios y los secundarios. Los enlaces primarios están relacionados con la unión química de los átomos para la formación de moléculas, por el contrario, los enlaces secundarios se asocian generalmente con la atracción entre moléculas.

Para los sólidos, objeto de estudio de este libro, existen tres tipos de enlaces primarios: enlaces iónicos, covalentes y metálicos. La formación de estos enlaces implica la relación entre los electrones de valencia, por lo que la formación de cada tipo de enlace depende de la estructura electrónica de los átomos constituyentes y de su tendencia en adquirir la configuración electrónica más estable; es decir, la del gas noble más cercano y de cumplir la ley del octeto. Esta ley afirma que los átomos tienden a ganar, perder o compartir electrones hasta estar rodeados por ocho electrones de valencia.

Los **enlaces iónicos** se dan por la unión de iones con cargas opuestas por medio de fuerzas electrostáticas. En este enlace, los átomos con el fin de cumplir la ley del octeto y para llegar a su configuración más estable, transfieren electrones de un átomo a otro formando un anión (ion de carga negativa, ganó electrones) y un catión (ion de carga positiva, perdió electrones), que posteriormente por fuerzas de atracción forman en el enlace iónico. Un ejemplo de esto es la formación del cloruro de sodio NaCl. El sodio es un metal con un $Z=11$ y 1 electrón de valencia; por su lado, el cloro es un no metal con $Z=17$ y 7 electrones de valencia. Para que estos átomos lleguen a su configuración electrónica más estable y cumplan la ley del octeto, es necesario que el Na ceda un electrón y el cloro reciba un electrón, formando así el catión de sodio Na^+ y el anión de cloro Cl^- . Al unirse varios aniones y cationes, se forma la estructura cristalina del cloruro de sodio (ver Figura 5).

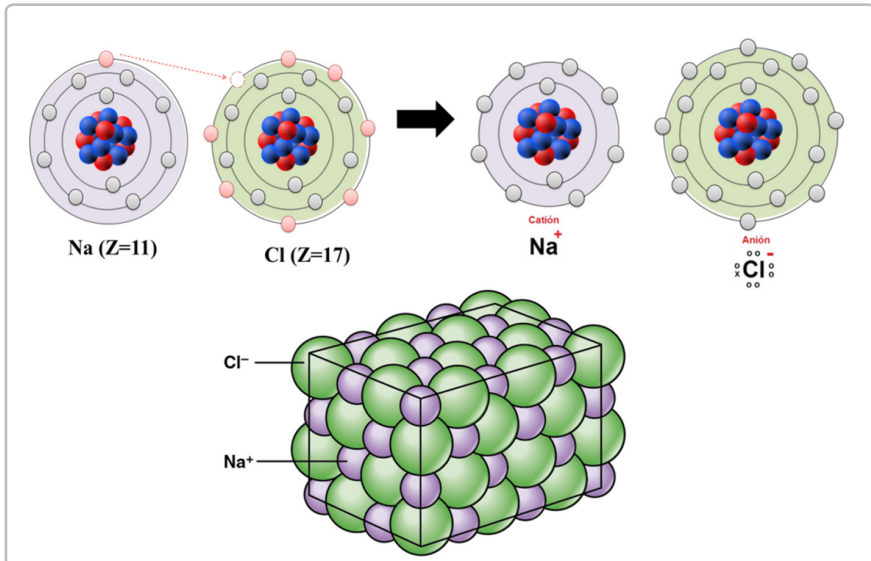


Figura 5. Formación del enlace iónico de cloruro de sodio (NaCl).

Fuente: adaptada de Chang (2010) y Callister & Rethwisch (1995).

Estos iones, al tener cargas opuestas, son atraídos por medio de atracción coulombica. La magnitud de esta fuerza depende principalmente de la distancia de separación entre los iones y la valencia de los átomos que están involucrados en el enlace. Además de la fuerza de atracción, en los enlaces iónicos se presenta, al mismo tiempo, una fuerza de repulsión debido a los campos eléctricos de carga negativa que se forman por las nubes de electrones de cada ion. Por lo anterior, la fuerza neta del enlace se da por la suma de la fuerza de atracción con la de repulsión. A partir del resultado de energía neta del enlace, se determina la longitud del enlace, parámetro importante para determinar las propiedades del compuesto. Este tipo de enlace es no direccional, por lo tanto, entre los átomos no existe orientación en el espacio en relación del uno con el otro. Para que un enlace iónico sea estable, es necesario que todos los iones positivos tengan un vecino más próximo, iones negativos y viceversa, para así formar una estructura tridimensional, como se muestra en la Figura 5. La formación de sustancias iónicas se da generalmente por la interacción entre metales de la extrema izquierda de la tabla periódica y no metales de la extrema derecha. Las energías de enlace suelen ser altas y estar alrededor de 600 a 1800 KJ/mol. Teniendo en cuenta esto y el tipo de estructura que forman los compuestos iónicos, los materiales que cuentan con enlaces iónicos reflejan altas temperaturas de fusión, dureza, fragilidad, y por ser aislantes térmicos y eléctricos.

Los **enlaces covalentes** se dan como resultado de compartir electrones entre dos átomos, con el fin de alcanzar su configuración electrónica más estable. En este enlace químico, cada átomo debe contribuir al menos con un electrón, considerando así que los electrones compartidos son de los dos átomos. Debido a la afinidad electrónica, estos enlaces se dan entre elementos no metálicos con electronegatividades cercanas. Como se puede observar en la Figura 6, pueden existir enlaces sencillos, dobles o triples dependiendo del número de electrones que intervienen en la formación del enlace. En el caso de la molécula de agua H_2O , el átomo de oxígeno, con 6 electrones de valencia, comparte dos de sus electrones con dos átomos de hidrógeno, cada uno con un electrón de valencia. En esta molécula se forman dos enlaces covalentes sencillos, en donde se comparte $2 e^-$ en cada uno. En el caso de la molécula diatómica del oxígeno O_2 , cada átomo de oxígeno comparte 2 de sus e^- de valencia formando un enlace doble, interviniendo en la formación del enlace en total $4 e^-$. Por último, el nitrógeno diatómico, N_2 , se forma cuando cada átomo de hidrógeno comparte 3 de sus 5 e^- de valencia, formando así un enlace triple. En este enlace están interviniendo $6 e^-$. Para todos los casos mencionados, la formación del enlace lleva a que los átomos cumplan la ley del octeto, por lo tanto que sean estables.

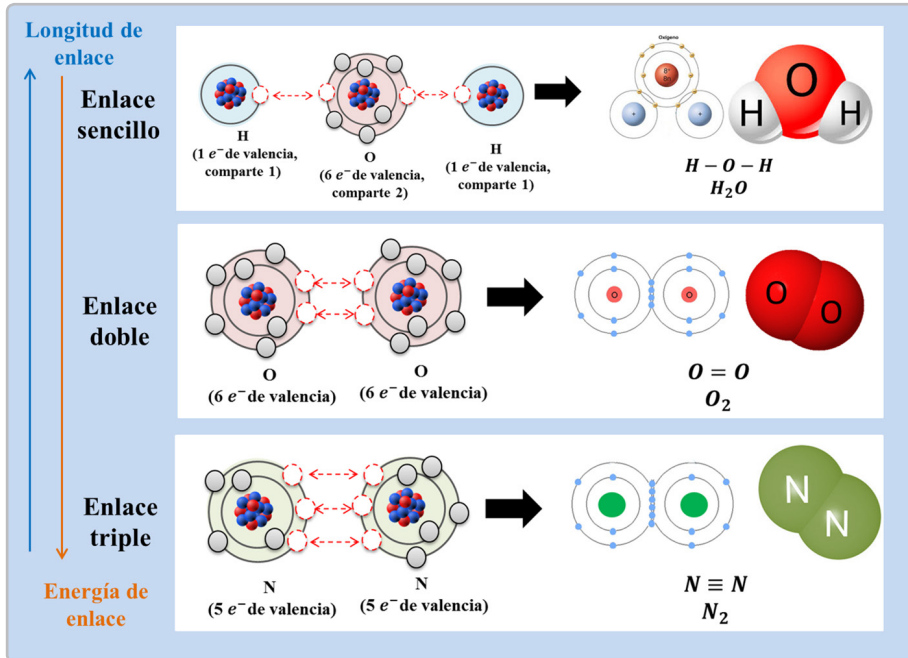


Figura 6. Formación de enlaces covalentes sencillos, dobles y triples, para el caso del agua (H₂O), oxígeno (O₂) y nitrógeno (N₂) diatómico, respectivamente.

Fuente: adaptada de Chang (2010) y Callister & Rethwisch (1995).

El número de enlaces covalentes que puede formar un átomo depende del número de electrones de valencia, así que para N electrones de valencia, el átomo puede enlazarse covalentemente con 8-N átomos. En este tipo de enlace, la energía de enlace (energía necesaria para romper la unión) aumenta a medida que aumenta de sencillo a triple. De modo contrario, la longitud del enlace aumenta de enlace triple a sencillo. Por otro lado, este enlace es altamente direccional, lo que significa que solo existe entre átomos específicos, y solo se da en la dirección que hay entre los electrones compartidos. Dado lo anterior, los materiales que tienen este tipo de enlaces tienen propiedades variadas. Al ser enlaces fuertes, pueden llegar a formar materiales duros y con altos puntos de fusión como el diamante, pero también los enlaces débiles pueden llevar a materiales con bajos puntos de fusión a poseer propiedades flexibles, como es el caso de algunos polímeros.

Finalmente, en el **enlace metálico** existe una distribución compartida de los electrones de forma no direccional. En este caso, se dice que los electrones de valencia son electrones deslocalizados, lo que significa que la probabilidad de que estén asociados a uno u otro de un gran número de átomos adyacentes, es la misma. En los metales típicos, esta deslocalización está asociada a todo el

material, lo que da lugar a un fenómeno conocido como el *mar de electrones*. La movilidad de los electrones de valencia, conlleva a que se formen iones cargados positivamente, en donde los electrones actúan como elementos de unión. Cuando los cationes metálicos se agrupan, tienden a hacerlo de forma ordenada formando una red rodeada de la nube de electrones. Estos cationes metálicos toman una posición fija dentro del material, formando estructuras cristalinas y llevando a que todos los metales, a excepción del mercurio, sean sólidos a temperatura ambiente (Figura 7).

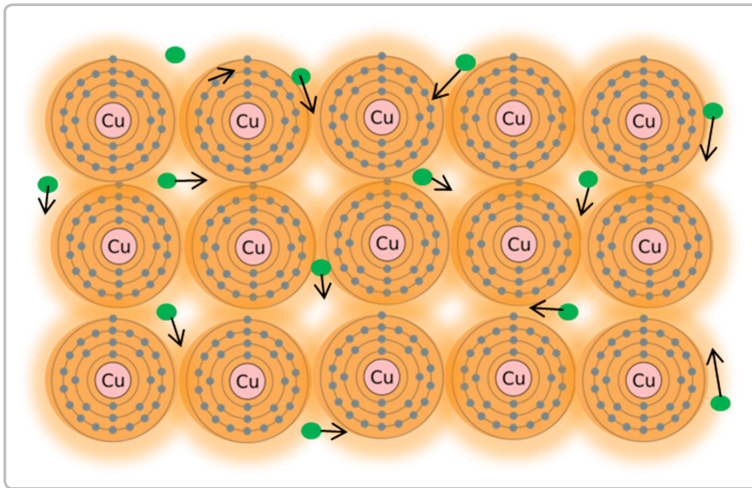


Figura 7. Representación de enlace metálico para el metal del cobre, donde se observa la deslocalización de los electrones de valencia.

Fuente: adaptada de Chang (2010) y Callister & Rethwisch (1995).

Dada las características de este tipo de enlace, los electrones tienen una movilidad libre a lo largo del material, llevando a que los metales tengan alta conductividad térmica y eléctrica. Adicionalmente, la fuerte red formada por estos cationes metálicos, hace que los metales sean insolubles en agua, sean duros, resistentes, maleables y dúctiles, ya que, al ser sometidos a un esfuerzo, la red de cationes se puede deformar, pero la nube de electrones los mantiene unidos.

1.3.3 Clasificación de materiales

De forma general, los materiales pueden ser de origen natural o sintético. Los primeros se relacionan con aquellos que se encuentran en la naturaleza, por ejemplo, los metales, la arena, agregados pétreos, cauchos, la madera, el asfalto, entre otros. Por otro lado, los sintéticos son aquellos creados por el hombre a partir de materiales naturales, por ejemplo, el acero, algunos polímeros, los cerámicos, el concreto. Específicamente, los materiales sólidos se clasifican en

metales, cerámicos y polímeros, teniendo como referencias sus propiedades y tipos de enlace. La mayoría de los materiales se pueden incluir en estos grupos; sin embargo, se han desarrollado otros subgrupos tales como los materiales compuestos y los superconductores.

Los **materiales metálicos** son sustancias inorgánicas compuestas por uno o más elementos metálicos unidos por medio de enlaces metálicos. La naturaleza de este tipo de enlace, hace que tengan gran número de electrones deslocalizados, dotando al material de propiedades únicas. Una de las propiedades principales de todos los metales, es la alta conductividad de calor y electricidad, adicionalmente tiene una estructura cristalina que los hace opacos a la luz visible, resistentes y al mismo tiempo deformables. También, es típico de los materiales metálicos su fácil conformación, ductilidad y superficies brillantes.

En ingeniería, los materiales metálicos se han constituido como materiales fundamentales a nivel estructural, por lo que la comprensión de estos es importante para su aplicación. Los metales y aleaciones suelen dividirse en dos tipos: los metales ferrosos y los metales no ferrosos. En los primeros, el principal componente es el hierro y es el material de mayor interés en la construcción. Este tipo de metales son ampliamente usados, debido a que en la corteza de la tierra abundan los minerales de hierro los cuales se reducen en el proceso siderúrgico para obtener el hierro. Adicionalmente, estos se fabrican mediante técnicas relativamente económicas tales como la extracción afino, aleación, y conformación. Finalmente, debido a su gran variedad de aleaciones, los metales ferrosos son versátiles y pueden adaptarse a múltiples propiedades físicas y mecánicas. La principal desventaja de este tipo de materiales es su susceptibilidad a la corrosión.

Las aleaciones ferrosas tienen dos tipos de materiales: los aceros y las fundiciones. Los *aceros* son aleaciones de hierro-carbono (generalmente entre 0.005 – 2.11 % en peso de carbono) con concentraciones apreciables de otros elementos maleables. Existen muchos tipos de aceros hasta el momento, los cuales difieren entre sí por su composición y tratamientos térmicos realizados: aceros de bajo, medio y alto carbón y aceros inoxidable. De acuerdo con lo anterior, es posible obtener aceros blandos y poco resistentes, pero con alta ductilidad y tenacidad, fáciles de mecanizar, soldables y baratos, usado en la conformación de vigas, láminas, tuberías, puentes y latas. También, es posible la obtención de aceros más resistentes con mayores porcentajes de carbono y aleaciones, útiles en la fabricación de ruedas, railes, engranajes y otros componentes estructurales que necesiten alta resistencia al desgaste y tenacidad. Adicionalmente, es posible por medio de aleaciones obtener el acero resistente a la corrosión usando principalmente cromo, níquel y molibdeno. Por otro lado, las *fundiciones* se

clasifican como aleaciones férreas con un contenido de carbono superior a 2.11 %. A diferencia de los aceros, este tipo de metales debe conformarse por moldeo, ya que, debido a su contenido de carbono, son frágiles.

Por otro lado, los segundos, los metales no ferrosos, contienen cantidades relativamente pequeñas de hierro y son usados para suplir los principales inconvenientes de los metales ferrosos, que son: la alta densidad, baja conductividad térmica, y la susceptibilidad a la corrosión. La clasificación de este tipo de metales se hace en función del componente mayoritario. Las aleaciones más usadas son las de cobre, aluminio, magnesio y titanio. Para el caso de la industria de la construcción, uno de los metales no ferrosos más usados es el aluminio, ya que cuenta con baja densidad, elevadas conductividades eléctricas y térmicas, y resistencia a la corrosión. La principal desventaja de este material es su baja temperatura de fusión, que limita su campo de aplicación.

Por su parte, los **materiales cerámicos** son materiales inorgánicos formados por la unión de un elemento metálico y uno no metálico, por medio de enlaces iónicos y en algunos casos puntuales por enlaces covalentes. Debido a la naturaleza de este enlace, los materiales cerámicos y su tipo de estructura tienen altos puntos de fusión, son duros y frágiles, tiene resistencia al calor y al desgaste, poca fricción y propiedades aislantes. Esta última hace que una de las aplicaciones más amplias de los materiales cerámicos sea en el revestimiento de hornos para tratamientos térmicos y fusión de metales. Generalmente, las propiedades de estos materiales son alcanzadas por medio de un tratamiento térmico o cocción, tal como la elaboración de ladrillos, cemento, entre otros.

La estructura de los materiales cerámicos puede ser cristalina o amorfa (sección 1.3.4) y pueden ser sólidos, densos, polvos finos, películas, fibras, etc. En cuanto a su clasificación, aún no está unificada; sin embargo, diferentes autores reportan tres tipos: las cerámicas cristalinas, los vidrios y las vitrocerámica. Los **cerámicos cristalinos** incluyen los silicatos tradicionales y los compuestos oxídicos y no oxídicos. Este tipo de cerámicos están basado principalmente en SiO_2 y se encuentra tanto en cerámicas tradicionales y avanzadas como las cerámicas blancas, la arcilla, los refractarios, la porcelana eléctrica y el cemento portland. Dentro de los cerámicos de óxido se incluyen materiales como la magnesita (MgO), refractario usado en la producción del acero, los óxidos de aluminio, la zirconia, entre otras. Por otro lado, **los vidrios** son sólidos amorfos, cuya estructura es alcanzada por medio de diferentes técnicas de producción, dando como resultado una variedad de propiedades ópticas. Al igual que los cerámicos cristalinos, los vidrios también pueden ser de silicato de óxidos. Dentro de los vidrios de silicatos, se encuentra la *sílice vítrea*, la cual puede soportar temperaturas de servicio superiores a 1000 °C por lo que es usada típicamente

en crisoles; los vidrios de borosilicatos usados en la elaboración de recipientes de laboratorios; adicionalmente, se encuentran los esmaltes cerámicos usados para recubrimientos de impermeabilización de otros materiales. Por otro lado, los vidrios de óxidos, debido a su alta reactividad, tienen poca importancia comercial, por lo que se usan como adiciones para los vidrios de silicato. Finalmente, las **vitrocerámicas** combinan las propiedades de los cerámicos cristalinos y amorfos, logrando propiedades de gran interés comercial como la resistencia al impacto mecánico y al choque térmico. Principalmente, esto se logra por la disminución de los poros presentes en la estructura de la cerámica.

Finalmente, los **materiales poliméricos** se dan por la unión química entre muchas unidades repetitivas conocidas como monómero. A medida que aumentan el número de monómeros adjuntos a la cadena principal de polímero, se alcanzan altos pesos moleculares, propiedad que define su resistencia mecánica, elasticidad, temperaturas de transición vítrea y de fusión. Esta unión química se da por medio de un enlace covalente entre elementos no metálicos, este enlace es direccional y puede originar diferentes estructuras en los materiales poliméricos. Dado lo anterior, la diversidad de este tipo de material es muy amplia y sigue creciendo con el desarrollo de ser humano, por lo que definir unas propiedades en común no es posible. De forma general, se puede decir que los polímeros tienen baja densidad debido a la presencia de átomos pequeños y largas distancias entre los mismos, por lo que son útiles en ciertas aplicaciones que requieran bajo peso en las estructuras. Adicionalmente, debido a la ausencia de electrones libres en el tipo de enlace, estos materiales tienen baja conductividad eléctrica y térmica, convirtiéndose en materiales usados como aislantes tanto de calor como de electricidad. A diferencia de los materiales metálicos y cerámicos, los materiales poliméricos tienen alta susceptibilidad al calor, por lo que sus aplicaciones están limitadas a ciertas temperaturas de trabajo debido a sus bajos puntos de fusión. Con respecto a la resistencia mecánica, en las estructuras, los polímeros son usados para absorber y aislar los impactos y las vibraciones; adicionalmente, debido a la naturaleza de los polímeros, pueden ser sometidos a tensión durante largos períodos de tiempo sin deformarse.

Los polímeros pueden ser de origen *natural* como el caucho, el almidón, la celulosa entre otros o *sintético*, como el nylon, polietileno, poliestireno, entre otros. Estructuralmente, los polímeros son generalmente amorfos, y pueden alcanzar diferentes formas estructurales de acuerdo con la forma en que van creciendo la cadena, alcanza así diferentes propiedades. Los **polímeros lineales** tienen largas cadenas de polímeros no entrecruzados, como el polietileno usado en envases de alimentos y tuberías para agua potable, el cual presenta buena resistencia química pero baja resistencia térmica, alta resistencia al impacto y flexibilidad. Los **polímeros ramificados** presentan algunas ramificaciones que salen de la

cadena principal, reduciendo la cristalinidad del polímero, causando cambios en sus propiedades, principalmente en la densidad. El polietileno de baja densidad es un ejemplo de este tipo de materiales, el cual presenta buena resistencia química y térmica, alta resistencia al impacto, alta flexibilidad y fácilmente procesable, lo que es usado en bolsas plásticas, juguetes, tuberías y botellas. Finalmente, los **polímeros entrecruzados** son aquellos donde las cadenas se unen transversalmente por medio de enlaces covalentes obteniendo una red tridimensional insoluble y sin punto de fusión. Esas redes entrecruzadas se obtienen cuando existen muchos puntos de unión para cada cadena primaria, logrando que al ser sometidos a esfuerzos no presenten una deformación permanente; sin embargo, al calentarse no se rompen ni plastifican, sino que se queman. A medida que aumenta el grado de entrecruzamiento, las cadenas de polímero se hacen menos flexibles. Un ejemplo de este tipo de materiales es el caucho.

Por otro lado, los polímeros también se pueden clasificar de acuerdo con sus propiedades, en: termoplásticos, termoestables y elastómeros. Los **polímeros termoplásticos** están constituidos por largas de cadenas, principalmente de átomos de carbono, enlazados mediante enlaces covalentes. Este tipo de polímeros, debido a la longitud de sus cadenas, experimentan la formación de enlaces secundarios, los cuales son fuerzas más débiles resultado de interacciones electrostáticas entre grupos funcionales adyacentes, tales como puentes de hidrógeno y fuerzas de Van der Waals. Estas características hacen que los polímeros termoplásticos al ser calentados, las cadenas se desarmen fácilmente y se restablezcan al enfriarse, lo que hace posible que se les pueda dar forma al calentarlos y después al enfriarlos. Estos materiales se pueden calentar un sinnúmero de veces, para darles nuevas formas sin que haya un cambio significativo en sus propiedades, haciéndolos fácilmente reciclables. El poliestireno cristal es un ejemplo de este tipo de materiales, el cual es un plástico transparente, con alto brillo, rígido y frágil, usado en la elaboración de piezas de electrodomésticos, envases alimentarios y no alimentarios, entre otros. Este polímero es posible procesarlo a partir de los 100° C.

Los **polímeros termoestables** están constituidos por cadenas entrecruzadas, que causan impedimento en los movimientos de las cadenas poliméricas evitando el alargamiento del material. Cuando estos polímeros son sintetizados, adquieren una forma permanente a medida que avanza la reacción química. Esta naturaleza hace que estos polímeros sean rígidos y frágiles; adicionalmente, al ser sometidos al calor no se funde, sino que sus cadenas se descomponen perdiendo la integridad y propiedades del material causando que solo se puedan fabricar una vez y sean poco reciclables. A pesar de esta desventaja operacional, estos polímeros son de gran importancia para la ingeniería, ya que tienen una amplia gama de propiedades únicas y un bajo costo. Los poliuretanos son ejemplo de polímeros termoestables, los cuales están constituidos por cadenas de polioles

($C_nH_{2n+2}O_n$) entrecruzados por la presencia de diisocianatos (R-NCO). Estos polímeros son usados para obtención de espumas flexibles, productos aislantes para la construcción, muebles, calzado, recubrimientos y adhesivos, entre otras. Finalmente, los *elastómeros* son polímeros con propiedades intermedias entre los termoplásticos y termoestables, haciendo que tengan flexibilidad, propiedades de adherencia y baja dureza. Ejemplo de estos polímeros, son los cauchos naturales y sintéticos.

Este libro solo presenta los aspectos importantes de los principales materiales; no obstante, esta información se puede profundizar en libros cuyo objetivo es la explicación de los diferentes materiales.

1.3.4 Estructura de los materiales

Identificar la estructura de los materiales ayuda a entender sus propiedades. Según la distribución de los átomos, iones o moléculas dentro de un material sólido, pueden tener dos tipos de estructura principalmente: cristalinas y amorfas (Figura 8). Las estructuras cristalinas presentan un ordenamiento simétrico, regular y repetitivo de los átomos, en donde cada átomo está enlazado con su vecino más próximo. Generalmente, los metales y los cerámicos presentan estructuras cristalinas. En el caso de los polímeros, en casos limitados pueden llegar a presentar cristalinidad. De modo contrario, las estructuras amorfas no presentan un ordenamiento atómico simétrico y regular, sino que presentan distancias atómicas grandes, dada esta naturaleza pueden llegar a tener una estructura atómica variada y compleja. Los materiales poliméricos presentan principalmente estructuras amorfas, dado principalmente por la presencia de enlaces covalentes y por el poco control en el crecimiento de las cadenas. A continuación, se presentan los conceptos generales de las estructuras cristalinas y amorfas.

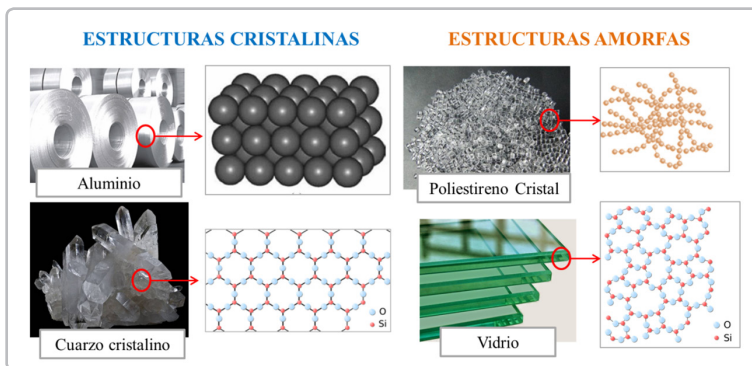


Figura 8. Ejemplo de materiales con estructura cristalina y amorfa, en donde se puede evidenciar el orden y aleatoriedad de cada uno de estos tipos de estructuras.

Fuente: adaptada de Billmeyer, 2004.

1.3.4.1 Estructuras cristalinas:

Para estudiar las estructuras cristalinas de los materiales, es necesario entender la geometría cristalina que es aplicable para todos los sólidos cristalinos. Para lo anterior, es importante mencionar que, en el estudio de las estructuras cristalinas, se asume el modelo atómico de esferas rígidas, en donde los átomos son asumidos como esferas macizas, en donde estos pueden ser idénticos o no. Como se mencionó anteriormente, los materiales con estructura cristalina presentan un ordenamiento repetitivo y periódico de los átomos que se extiende a lo largo del material, generando un patrón. En función de este patrón que se repite, en los diferentes materiales se han planteado unidades repetitivas denominadas celdas unitarias, las cuales representan la forma tridimensional en que están dispuestos los átomos. Al unirse de forma periódica, esta celda unitaria forman una red que define por completo la estructura del material. En la Figura 9 se presenta una celda unitaria de un material cristalino metálico con forma cubica, en la que los átomos están ubicados en las vértices del cubo y un átomo en el centro. Para definir una celda unitaria se usan dos propiedades, el parámetro de red que son las longitudes de los lados de la celda unidad y los ángulos α , β y γ , que son los ángulos formados por los ejes adyacentes en la celda unidad, donde α es el ángulo visto a lo largo del eje a (es decir, el ángulo formado por los ejes b y c).

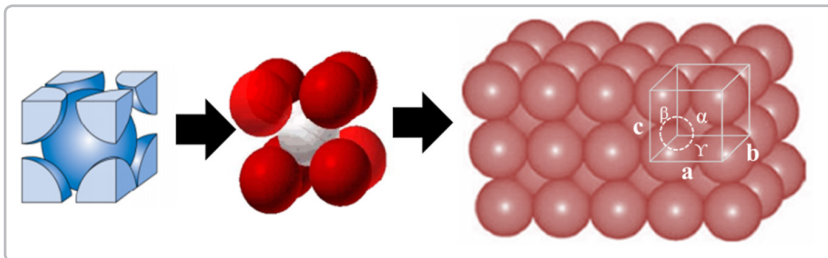


Figura 9. Celda unitaria: celda aislada, celda de esfera rígida, estructura repetitiva equivalente a muchas celdas unidad adyacente.

Fuente: adaptado de Chang (2010) y Callister & Rethwisch (1995).

Todas las estructuras cristalinas pueden ser definidas por un número pequeño de geometrías, conocidas como las 14 redes de Bravais. Estas redes no solo contemplan la forma geométrica que puede tener las agrupaciones atómicas, sino también el número de átomos dentro de las celdas atómicas. Están tres celdas cúbicas se caracterizan por tener un parámetro de red igual y los ángulos α , β y γ igual a 90° . La diferencia entre las tres celdas cúbicas, es la ubicación de los átomos dentro de la celda unitaria: la cúbica tiene un átomo en cada vértice del cubo, la celda cúbica centrada en el cuerpo tiene un átomo en cada vértice y uno en el centro de la celda, y la cúbica centrada en las caras tiene un átomo en cada

vértice y átomos en cada una de las seis caras del cubo. Las celdas tetragonales se caracterizan por tener los parámetros de red a y b iguales, pero c diferente. En función del acomodamiento de los átomos, la tetragonal simple presenta un átomo en cada vértice y la tetragonal centrada en el cuerpo, además de los átomos en los vértices, tiene uno en el centro de la celda unitaria. Las celdas ortorrómbicas se caracterizan por que todos sus lados son diferentes y sus ángulos iguales. Al igual que las celdas cúbicas y tetragonales, la acomodación de los átomos se da en cuatro formas, las cuales se pueden apreciar en la Figura 10.

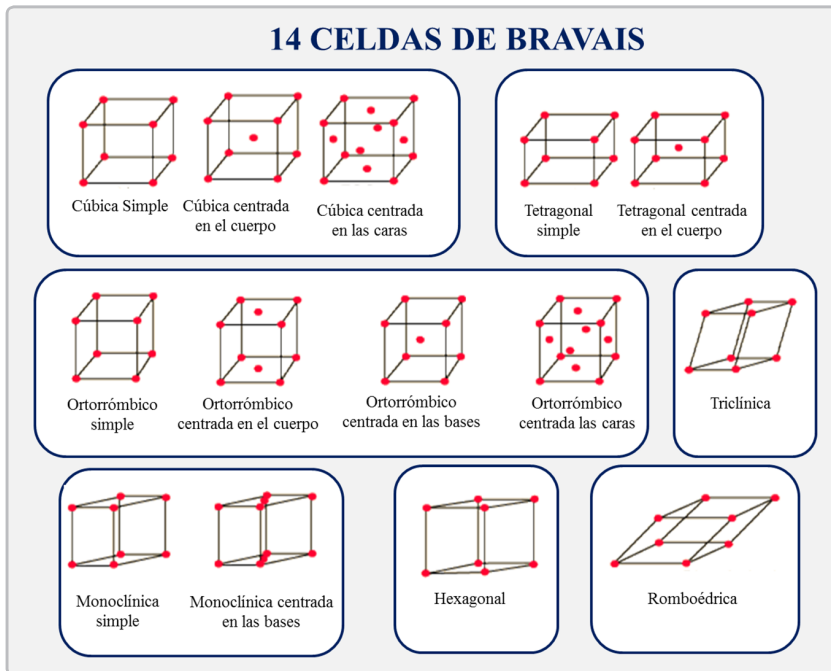


Figura 10. Las catorce celdas de Bravais.

Fuente: adaptado de Shackelford (2005).

Las celdas monocíclicas tienen los lados diferentes y dos de sus ángulos diferentes de 90° . Adicionalmente, las celdas triclínica, hexagonal y romboédrica difieren en las longitudes de sus parámetros de red y sus ángulos. A continuación, se van a mencionar algunas características de las estructuras cristalinas de los metales y de algunas cerámicas.

- **Estructuras cristalinas de los metales:** la mayoría de los metales están asociados principalmente a tres estructuras cristalinas: cúbica centrada en el cuerpo (BCC), cúbica centrada en las caras (FCC) y hexagonal compacta (HCP), ver Figura 11. Para definir las características de cada una de estas

celdas y relacionarlas con las propiedades de los metales, es necesario definir algunos parámetros. El primero es el *número de átomos* por celda, el cual cuenta la porción de cada átomo que está dentro de la celda unitaria. El segundo parámetro es la *relación R/a*, la cual relaciona el radio atómico del elemento y el parámetro de red de la celda unitaria. Adicionalmente, se incluye el factor de empaquetamiento (APF), el cual indica la fracción de volumen de la celda unitaria que está ocupada por los átomos. Este factor se calcula con la siguiente ecuación:

$$APF = \frac{\text{Volumen de átomos en la celda Unitaria}}{\text{Volumen de la celda unitaria}} * 100$$

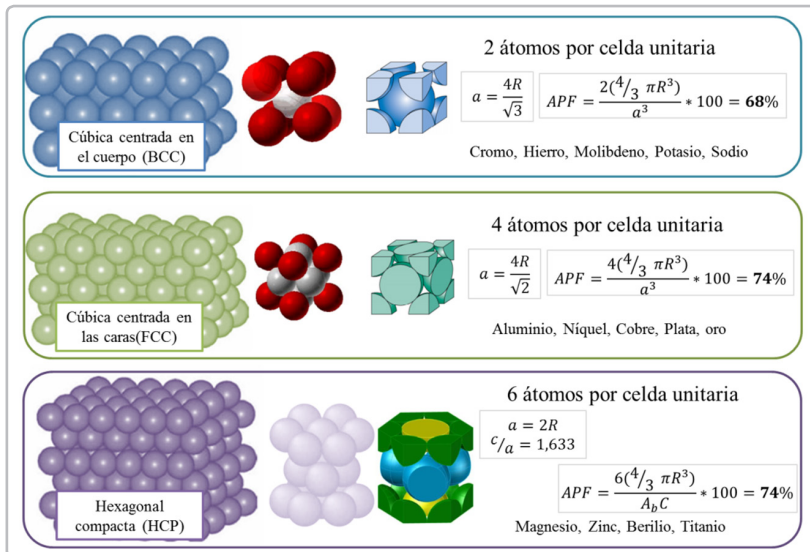


Figura 11. Estructuras cristalinas de los metales y sus principales características: BCC, FCC y HCP. Donde a: parámetro de red; R: radio atómico; c: altura de la celda hexagonal; A_b : área de la base del hexágono.

Fuente: adaptado de Shackelford (2005), Chang (2010) y Callister & Rethwisch (1995).

Dado lo anterior, en la Figura 11 se presenta la información básica para cada una de las celdas unitarias que pueden presentar los metales. El conocimiento de estas estructuras cristalinas, es la base para la determinación de las propiedades de muchos metales, ya que a partir de estas se pueden hacer un análisis cristalográfico para identificar las diferentes fases de los metales. Para este análisis, normalmente se usa la técnica de Difracción de Rayos X (DRX). Esta técnica se basa en la identificación de planos cristalográficos, los cuales determinan las propiedades magnéticas, eléctricas y mecánicas de los materiales.

- **Estructuras cristalinas de los cerámicos:** como se ha mencionado en secciones anteriores, los materiales cerámicos están formados por la unión química de un anión y un catión, los cuales se van agrupando en forma de estructuras cristalinas, particularmente los cerámicos cristalinos. Aunque no es posible generar una lista completa con las diferentes estructuras cristalinas de los cerámicos, sí se pueden presentar algunas de las estructuras más representativas. En la Figura 12 se presentan las estructuras cristalinas de la fluorita (CaF_2), cristobalita (SiO_2) y la perovskita (CaTiO_3), minerales usados en materiales de construcción.

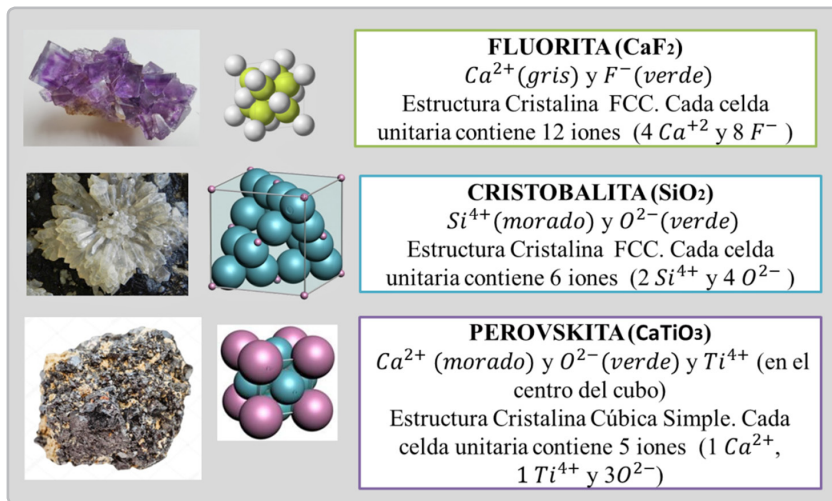


Figura 12. Estructuras cristalinas de algunos materiales cerámicos representativos: fluorita, cristobalita y perovskita.

Fuente: adaptado de Shackelford (2005), Chang (2010) y Callister & Rethwisch (1995).

En la estructura de los materiales cerámicos, se define el tipo de celda unitaria de acuerdo con la ubicación de los iones dentro de la celda. Por ejemplo, la Fluorita (CaF_2), formada por las uniones de iones de calcio (Ca^{2+}) y de flúor (F^-), tiene una estructura cristalina cúbica centrada en las caras FCC formada por los iones de calcio, mientras que los iones de flúor se ubican en los intersticios o espacios vacíos dentro de la celda.

1.3.4.2 Estructuras amorfas:

Los materiales amorfos no tienen orden en sus estructuras atómicas. Generalmente, este desorden atómico se da por la presencia de factores que impiden la formación de estructuras simétricas, llevando así a la formación de cadenas aleatorias con diferentes grados de desorden. Desde el punto de vista estructural, los

materiales amorfos pueden ser redes tridimensionales no periódicas, como en el caso del vidrio y moléculas individuales de cadenas largas, tales como los polímeros y plásticos. Generalmente, los materiales amorfos tienen enlaces químicos covalentes, caracterizados por la longitud y flexibilidad de los enlaces; sin embargo, en el caso de los vidrios se presentan enlaces iónicos que, ante la presencia de modificadores de red, no permiten la formación de estructuras cristalinas. En la Figura 13 se presentan ejemplos de algunos materiales con estructura amorfa.



Figura 13. Estructuras amorfas de algunos materiales representativos: vidrios de borosilicato, poliuretano flexible y polietileno de baja densidad.

Fuente: adaptado de Billmeyer (2004).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Askeland, D., Fulay, P., & Wright, W. (2010). The Science and Engineering of Materials. *Materials Science and Engineering: B*, 12(4). DOI: [https://doi.org/10.1016/0921-5107\(92\)90012-X](https://doi.org/10.1016/0921-5107(92)90012-X)
- Barroso Herrero, S., & Ibáñez Ulargui, J. (2014). *Introducción al conocimiento de materiales*. Madrid, España: UNED.
- Billmeyer, F. (2004). *Ciencia de los Polímeros*. España, Reverté
- Brown, B. (2004). *Química La Ciencia Central*. México. Person Education
Recuperado de <http://physics.nist.gov/PhysRefData/contents.html>
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (1995). *Ciencia e ingeniería de los Materiales*. España, Reverté.
- Carriazo, J. G., Saavedra, M. J., & Molina, M. F. (2016). ¿Hacia dónde debe dirigirse la enseñanza de la Ciencia de Materiales? *Educación Química*, 28(2), 107-115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eq.2016.10.002>
- Chang, R., College, W. (2011). *Fundamentos de Química*. México. McGraw-Hill.
- Mamlouk, M. S., & Zaniewski, J. P. (2009). *Materiales para Ingeniería Civil*. Madrid. Pearson Educación S.A.
- Sánchez Vergara, M. E., & Campos Silva, I. E. (2010). *Tecnología de materiales*. México. Trillas.
- Shackelford, J. F. (2005). *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros* (6.ª ed.). Madrid: Pearson Educación.
- Smith, W. F., Hashemi, J., Cázares, G. N., & González-Caver, P. A. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. México, DF: McGraw-Hill.
- William, D., & Callister, J. (1995). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. España Reverté.