

## Materiales Amorfos

Tratemos el tema de sólidos no cristalinos, amorfos o vítreos. En ocasiones también se les describe y denomina como líquidos sobreenfriados.

Consideremos en forma comparativa algunas características de los distintos estados de condensación clásicos de la materia, ver Tabla 1. Nótese que en el caso del estado sólido, en esta tabla sólo se considera el caso cristalino.

**TABLA 1**

<i>Estado</i>	<i>Densidad</i>	<i>Movilidad</i>	<i>Orden</i>
<b>Vapor</b>	Mediana a muy baja	Alta a muy alta	No hay
<b>Líquido</b>	Alta	Moderada	No hay orden de largo alcance, pero sí hay cierto orden de corto alcance.
<b>Sólido cristalino</b>	Alta	Moderada a altas temperaturas y baja a bajas temperaturas	Hay orden de corto y, consecuentemente, orden de largo alcance.

Las relativamente altas densidades de sólidos y líquidos, similares además entre sí, señalan que, en ambos casos, las distancias interatómicas son suficientemente pequeñas como para que los enlaces jueguen un rol relevante. Los enlaces contribuyen a ordenar los átomos del sólido según corresponda a ese tipo de enlace. Por el contrario, en un gas, los enlaces entre moléculas juegan un rol de orden limitado o prácticamente nulo.

En un cristal ideal, cada átomo tiene los vecinos que corresponden a satisfacer los enlaces en la condición de equilibrio, lo cual se manifiesta como un orden de corto alcance. Por ejemplo, en el C diamante, cada C tendrá 4 vecinos en disposición tetraédrica; por el contrario, en el caso de un metal puro es importante la no direccionalidad del enlace y el criterio de un arreglo atómico lo más compacto posible. Consecuentemente, al estar determinado el ordenamiento atómico en el corto alcance, también lo estará en el largo alcance. Los materiales cristalinos presentan orden de largo alcance, en términos de la posición y ordenamiento de los átomos o moléculas del cristal. De esta manera, si se conoce en forma precisa el arreglo atómico en

una zona del sólido, se conoce el arreglo atómico en forma exacta, en cualquier parte.

Por el contrario, en un líquido no hay orden de largo alcance. No obstante, normalmente sí hay un cierto orden de corto alcance; es decir, algunos primeros vecinos de un átomo cualquiera (e incluso, ocasionalmente, todos los vecinos de uno que otro átomo) estarán en las posiciones que corresponderían a satisfacer enlaces. Pero, al no ser perfecto el orden de corto alcance, consecuentemente, no habrá orden de largo alcance.

Se puede obtener un material amorfo al enfriar un líquido en forma suficientemente rápida, de modo que los átomos no alcancen a ordenarse al pasar al estado sólido. De esta manera, los sólidos amorfos tienen una estructura interna, en términos del grado de ordenamiento atómico, similar a la de un líquido (i.e., un cierto orden de corto alcance pero no de largo alcance). Sin embargo, por tratarse de un sólido, la movilidad atómica será de moderada a nula. Así, si obtuviésemos una instantánea fotográfica (imagen congelada) del ordenamiento atómico de un sólido amorfo y de un líquido, no podríamos establecer la diferencia. Por ello es que a los sólidos amorfos también se les denomina “líquidos sobreenfriados”.

Los factores que favorecen la formación de un sólido amorfo en el lugar de uno cristalino son:

- alta velocidad de enfriamiento desde el estado líquido al sólido
- alta direccionalidad del enlace
- baja pureza del material

De esta manera, será mucho más fácil obtener un sólido amorfo en el caso de un material de enlace covalente (dirigido) que en el de uno de enlace metálico (no direccional). También será más fácil formar un cristal de un elemento puro que cuando hay combinaciones de elementos.

Un ejemplo clásico de material amorfo es el vidrio de ventanas, la sílice:  $\text{SiO}_2$ , un sólido covalente. Este material presenta varias estructuras cristalinas, pero en todas ellas cada átomo de Si se relaciona con sus 4 enlaces tetraédricos con átomos de O: La sílice puede exhibir tres estructuras cristalinas básicas (cuarzo, tridimita y cristobalita, las que a su vez, presentan variantes). La Figura 1 representa la estructura del cuarzo llamada cristobalita alfa; allí se observa que esta estructura del  $\text{SiO}_2$  es similar a la del Si diamante, considerando que entre cada Si hay que incorporar un O. Dado

que cada O, de valencia 2, queda entre 2 Si, entonces sólo  $\frac{1}{2}$  de un O se asocia a cada Si vecino. Como cada Si tiene 4 O vecinos, entonces se concluye que a cada Si se le asocian  $4 \cdot (\frac{1}{2}) = 2$  átomos de O; esto es correcto, pues corresponde a la fórmula estequiométrica  $\text{SiO}_2$ . En estos cristales se tiene un enlace mixto covalente- iónico. La figura 2 representa en forma esquemática (en dos dimensiones, en lugar de en tres), el  $\text{SiO}_2$  en: a) estado cristalino y b) estado amorfo. Nótese que en este esquema conceptual 2D se ha omitido uno de los enlaces del Si. A la sílice industrial empleada para hacer vidrio, frecuentemente se agregan otros elementos, como Na, Ba y Al. En particular, el Na mejora la fluidez y baja la temperatura de fusión del material en la fábrica. A las moderadas velocidades de enfriamiento industriales, este material resulta amorfo.

Otra forma usual de denominar a los materiales amorfos (o no cristalinos) es materiales vítreos. Es decir, por vidrio no sólo podríamos referirnos al clásico material específico, basado en  $\text{SiO}_2$ , sino que también a toda una categoría de materiales.

Los cationes metálicos tienen un enlace no direccional, debido a su simetría electrónica muy próxima a la esférica. De manera que los metales puros, enfriados a altas velocidades industriales usuales (p.e.,  $10^3$  °C/s), resultan ser cristalinos. Así, por mucho tiempo se creyó que los metales siempre solidificaban como cristales. Sin embargo, cuando los metales puros o sus aleaciones habituales son enfriados, por métodos modernos, a altas velocidades ( $10^4$  a  $10^6$  °C/s), se logra tener materiales amorfos. Para lograr estas velocidades, normalmente se requiere enfriar pequeños espesores o bien gotas. De esta manera, los metales vítreos hoy disponibles industrialmente vienen bajo forma de huinchas, y sus aplicaciones actuales se relacionan con propiedades magnéticas. Sin embargo, muy recientemente se han fabricado aleaciones metálicas, formadas por hasta unos 8 elementos, que resultan ser amorfas a velocidades moderadas de enfriamiento ( $1$  °C/s). En este caso, para obtener el estado amorfo, se aprovecha el "alto grado de impureza" del material. Así se obtienen materiales macizos que permiten el estudio de sus interesantes propiedades mecánicas.

Los materiales poliméricos son ejemplos importantes de materiales parcialmente amorfos (o parcialmente cristalinos). En efecto, aquí hay una gran tendencia a que las cadenas no queden ordenadas totalmente, de hecho frecuentemente

sólo lo están en mínima parte. A diferencia de las otras familias materiales, donde el material es ya sea totalmente cristalino o totalmente amorfo, en el caso de los polímeros tiene sentido el concepto de grado (porcentaje) de cristalinidad. Mientras más cristalino es un polímero, más denso es él; en la práctica industrial de los polímeros se hace más bien alusión a la densidad, que al porcentaje de cristalinidad.

Cabe señalar que los sólidos no cristalinos también podrían estar incluidos en la Tabla 1.

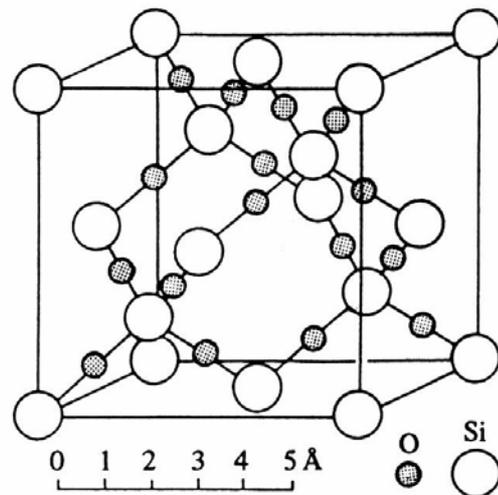


Figura 1. Celda cristalina del  $\text{SiO}_2$  como cristobalita alfa. Obsérvense los 4 enlaces del Si unidos a 4 átomos de O, además, cada átomo de O está entre 2 átomos de Si. Así, a cada átomo de Si se asocian  $4 \cdot (\frac{1}{2})$  átomos de O, en conformidad con la fórmula estequiométrica  $\text{SiO}_2$ . El  $\text{SiO}_2$  presenta varias estructuras cristalinas distintas, pero en todas ellas se cumple la relación estequiométrica anterior.

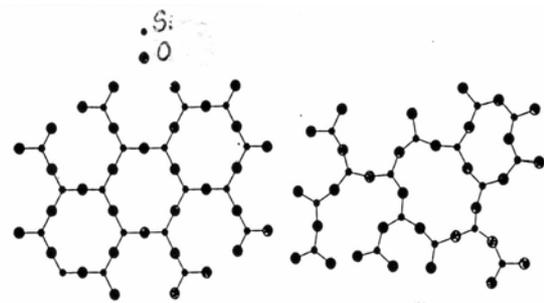


Figura 2. Representación bidimensional esquemática de la sílice,  $\text{SiO}_2$ . Se muestran conceptualmente dos formas del sólido: a) cristalino y b) amorfo. (Nótese que, por simplicidad de la representación, se consideran sólo 3 enlaces para el Si, cuya valencia es 4).