

¿Por qué flota el hielo?

Juan Segurola · Todos los derechos reservados

QUE · Artículo 002 · Preguntas sencillas, respuestas profundas · Versión 0.1 ES

Un cubito de hielo flota en un vaso de agua aunque está formado por la misma sustancia que lo rodea. Casi todo queda sumergido y una pequeña parte sobresale. La respuesta breve es que el hielo corriente es menos denso que el agua líquida. Pero esa frase deja dos preguntas: por qué la densidad determina dónde queda en equilibrio el cubito y por qué congelar el agua cambia su densidad en ese sentido.

Hay que especificar la situación. Hablamos de hielo de agua corriente, sin grandes bolsas de aire, en agua dulce cerca de la congelación y a presión atmosférica. No afirmamos que todo sólido llamado hielo flote en cualquier líquido o bajo cualquier presión.

1. Qué estamos comparando

La densidad es la masa dividida por el volumen: $\rho = m/V$. Comparar densidades significa comparar cuánta masa ocupa volúmenes iguales. Una montaña de hielo puede tener mucha más masa que el agua de un vaso y, aun así, menor densidad. «Pesa menos» no basta si no especificamos las cantidades que comparamos.

También podemos seguir la misma cantidad de agua antes y después de congelarse. Sin pérdida de materia, su masa se conserva a efectos de la precisión de este experimento cotidiano. Si aumenta su volumen, disminuye su densidad. El cubito no necesita perder agua para volverse menos denso. Tampoco necesita llenarse de burbujas: estas pueden modificar la densidad de una muestra, pero el hielo corriente no las necesita para flotar.

Las propiedades dependen de las condiciones. La formulación de referencia de la IAPWS para el hielo hexagonal da aproximadamente $916,72 \text{ kg/m}^3$ en su punto de fusión a presión normal [1, tabla 6]. El agua líquida cerca de la congelación tiene una densidad próxima a 1000 kg/m^3 [2]. En los cálculos sencillos siguientes utilizaremos 917 y 1000 kg/m^3 . Son valores redondeados, no constantes universales ni un par de mediciones nuevas.

2. Por qué la densidad determina la flotación

Un líquido en reposo ejerce presión sobre la superficie de un objeto sumergido. La presión aumenta con la profundidad. Sumar las fuerzas sobre toda la superficie produce un empuje hacia arriba igual al peso del líquido desplazado. Esta es la forma hidrostática del principio de Arquímedes.

Si el volumen total del hielo es V y el volumen sumergido es V_s , su peso es $\rho_i V g$ y el empuje es $\rho_l V_s g$. Los subíndices i y l indican hielo y líquido; g es la aceleración de la gravedad. En equilibrio, despreciando el empuje del aire y las fuerzas capilares:

$$\rho_l V_s g = \rho_i V g; \text{ por tanto, } V_s/V = \rho_i/\rho_l.$$

Con los valores redondeados, $V_s/V = 917/1000 = 0,917$. Aproximadamente el 92 % del volumen queda sumergido y el 8 % sobresale. Esta afirmación se refiere al volumen, no a la altura. Una pieza irregular puede sobresalir una distancia considerable de la superficie mientras casi todo su volumen permanece bajo el agua.

Si empujamos ligeramente hacia abajo una pieza que flota libremente, desplaza más líquido mientras su peso apenas cambia. El empuje adicional favorece su retorno hacia arriba. Si la levantamos un poco, desplaza menos líquido y su peso favorece el descenso. Este argumento explica el equilibrio vertical; no determina por sí solo la orientación estable de una pieza irregular.

Una pieza completamente sumergida y más densa que el líquido no puede sostenerse únicamente mediante ese empuje. En cambio, una pieza menos densa puede equilibrar su peso antes de quedar completamente sumergida. Para cuerpos pequeños u objetos sometidos a otras fuerzas, es necesario ampliar el modelo. Un cubito de hielo libre es una buena aproximación, pero eso no convierte cualquier objeto que permanezca en la superficie en una prueba de menor densidad.

3. Qué cambia entre las moléculas

Las moléculas de agua no se convierten en otra sustancia al congelarse. Cambia su organización. En el hielo hexagonal corriente, los enlaces de hidrógeno favorecen una red abierta con coordinación aproximadamente tetraédrica: cada molécula tiene cuatro vecinas enlazadas en esa disposición. Esta proporciona más volumen por molécula que el líquido cerca de la fusión [3].

«Abierta» describe la organización molecular. No significa que el cristal sea una esponja con cavidades llenas de aire. La menor densidad pertenece a la estructura del hielo incluso sin burbujas visibles.

El líquido también tiene enlaces de hidrógeno. No es una colección de moléculas completamente independientes ni una copia rígida del cristal. Su estructura se reorganiza continuamente y permite un empaquetamiento medio más compacto. Un sólido más ordenado no tiene por qué ocupar menos volumen: el orden y la densidad son propiedades distintas [3].

Esta descripción explica el sentido del cambio, pero un dibujo de tetraedros no calcula por sí solo una densidad precisa. Para ello hacen falta distancias, organización tridimensional y condiciones termodinámicas. El modelo molecular y la densidad medida deben concordar cuantitativamente; una imagen atractiva no sustituye esa comprobación.

4. Cómo conocemos la estructura

Hay dos líneas de evidencia distintas. Medir masa y volumen determina la densidad. Observar la flotación pone a prueba su consecuencia mecánica. Ninguna de las dos operaciones revela por sí sola cómo se disponen los átomos dentro del cristal.

La difracción proporciona información estructural. Los investigadores miden cómo un cristal dispersa radiación o partículas y comparan las intensidades con las predichas por modelos de posiciones atómicas. La estructura se infiere a partir de esos patrones; el resultado no es una fotografía corriente de bolitas unidas por varillas.

Un estudio de Chodkiewicz y sus colaboradores mediante difracción de electrones en hielo hexagonal ilustra por qué importa esta distinción. Los autores compararon métodos de refinamiento estructural y encontraron que el tratamiento de la dispersión múltiple afectaba a la exactitud de las distancias O-H obtenidas [4]. Se trata de incertidumbre en detalles de la reconstrucción, no de una refutación de la existencia del cristal o de su menor densidad.

La concordancia entre métodos no exige que todos tengan la misma sensibilidad a los mismos átomos. Tampoco una estructura media describe todos los movimientos instantáneos. Podemos tener pruebas sólidas de una disposición cristalina mientras seguimos mejorando la precisión de sus detalles.

5. Qué podemos calcular y qué no

El equilibrio de flotación proporciona otra comprobación. Con los mismos valores redondeados, un kilogramo de agua líquida ocupa un litro, mientras que un kilogramo de hielo ocupa aproximadamente 1,09 litros. El aumento de volumen ronda el 9 %. Esa expansión y la fracción que sobresale, cercana al 8 %, no son el mismo porcentaje: sus denominadores difieren.

Para la expansión, comparamos el aumento con el volumen original del líquido: $1000/917 - 1 \approx 0,091$. Para la parte que sobresale, comparamos con el volumen total del hielo: $1 - 917/1000 = 0,083$. Confundir las preguntas puede producir números parecidos con explicaciones incorrectas.

También podemos predecir qué sucede en un recipiente ideal. El hielo puro que flota en agua pura ya desplaza una masa de agua igual a la suya. Tras fundirse, esa misma masa ocupa el volumen que antes desplazaba. Dentro de este modelo, el nivel no cambia, siempre que no haya pérdidas y que comparemos a la misma densidad final del líquido. El calentamiento del sistema, las sales o los materiales atrapados requieren correcciones. El argumento no se aplica sin cambios al hielo apoyado en tierra que después entra en el agua.

6. Dónde termina la respuesta cotidiana

El agua tiene otras fases sólidas. Cambios suficientes de presión y temperatura pueden favorecer estructuras de hielo más densas que la forma corriente [3]. Un dibujo tetraédrico no debe convertirse en una prohibición de cualquier otra disposición. Decidir qué fase existe y si flotaría requiere sus condiciones de estabilidad y la densidad del líquido concreto con el que se compara.

Tampoco podemos trasladar sin más el porcentaje calculado al agua salada o a una muestra que contenga aire, sales o sedimentos. El criterio sigue siendo el equilibrio entre peso y empuje, pero cambian los datos de entrada. Las limitaciones de un ejemplo no invalidan la ley; delimitan su aplicación.

La respuesta al título tiene, por tanto, dos niveles conectados. El hielo corriente flota porque desplaza suficiente agua para sostener su peso antes de quedar completamente sumergido. Eso es posible porque su organización molecular lo hace menos denso que el agua líquida cerca de la fusión. La primera explicación es mecánica; la segunda conecta esa mecánica con la materia. Ninguna exige que el frío pese menos ni que todos los sólidos se comporten igual.

Lectura relacionada

QTC-003 desarrolla la pregunta general sobre la solidez. Es una lectura asociada opcional; el problema específico aquí es la densidad relativa y el equilibrio de flotación.

Referencias

- [1] IAPWS. Revised Release on the Equation of State 2006 for H₂O Ice Ih. R10-06(2009), septiembre de 2009. <https://iapws.org/technical-guidance/release/Ice-2009>
- [2] IAPWS. Revised Release on the IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use. R6-95(2018), septiembre de 2018. <https://iapws.org/documents/release/IAPWS-95.download>
- [3] Brini, E. et al. How Water's Properties Are Encoded in Its Molecular Structure and Energies. Chemical Reviews 117, 12385–12414 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00259>
- [4] Chodkiewicz, M. L. et al. Hirshfeld atom refinement and dynamical refinement of hexagonal ice structure from electron diffraction data. IUCrJ 11, 730–736 (2024). <https://doi.org/10.1107/S2052252524006808>