

DEMO 120

Caída de un sólido en fluidos



Fig. 1 Montaje experimental

Autores de la ficha	Roberto Pedrós, Chantal Ferrer, Juan Pastor y Pablo Velasco
Palabras clave	Fluidos; velocidad límite, fuerza de viscosidad; fuerza aerodinámica o hidrodinámica, sedimentación
Objetivo	Observar/medir el tiempo de caída de un sólido en tres fluidos diferentes y explicar las diferencias utilizando la fuerza hidrodinámica que depende de la forma del sólido y de la viscosidad del fluido. Comentar sus aplicaciones, en particular la velocidad límite o de sedimentación
Material	Montaje con tres tubos de ensayo llenos de agua (tapón rojo), aceite (tapón verde) y glicerina (tapón azul). Tres sólidos iguales de aluminio. Cronómetro
Montaje	Nulo

Descripción

Vamos a hacer una serie de observaciones y medidas que pueden explicarse considerando que la acción del fluido sobre el sólido se puede representar mediante una fuerza de rozamiento que depende de la velocidad, la forma del sólido y la viscosidad del fluido.

Velocidad de caída

Colocamos el soporte como aparece en la fotografía. Giramos los tubos y cronometramos los tiempos de caída. Vemos que el mismo sólido tarda tiempos diferentes en hundirse para los distintos líquidos. Del orden de los segundos cuando el líquido es agua, del orden de los minutos en aceite y del orden de las horas en glicerina.

Podemos hacer una estimación de la velocidad de caída teniendo en cuenta que el tubo de ensayo mide 30 cm. Por simplicidad, en aceite y glicerina podemos medir el tiempo que tarda en recorrer 1 o 2 cm.

Analicemos los factores de los que depende la velocidad de caída. Consideramos un sólido de masa m_s que se hunde bajo la acción de la gravedad en un fluido viscoso. Las fuerzas que se oponen al movimiento son el empuje de Arquímedes y la fuerza de rozamiento entre el sólido y el fluido o fluidodinámica (hidrodinámica en agua, aerodinámica en aire) Aplicando la 2ª Ley de Newton, la relación entre las fuerzas involucradas y la aceleración a será

$$peso - empuje - F_{hidrodinámica} = m_s a \quad [1]$$

La fuerza viscosa o fluidodinámica es $\vec{F} = -b \vec{v}$ en régimen laminar y $\vec{F} = -b \vec{v}^2$ en régimen turbulento, donde b es el coeficiente fluidodinámico y v la velocidad. El signo menos en la expresión indica que esta fuerza va en sentido contrario al del movimiento (Fig. 2). Consideraremos que nos encontramos en régimen laminar:

$$m_s g - \rho_f g V_s - b v = m_s a \quad [2]$$

siendo V_s el volumen del sólido ; ρ_f es la densidad del fluido; y g es la aceleración de la gravedad.

Cuando a no es nulo, la velocidad del sólido va aumentando a medida que desciende, y con ella también la fuerza hidrodinámica (la

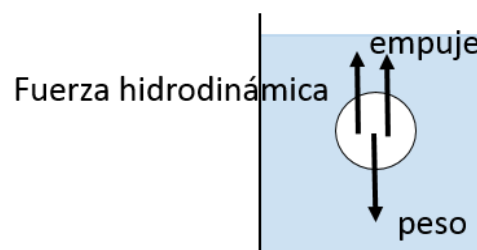


Fig. 2. Diagrama de fuerzas

fuerza de empuje no cambia apreciablemente para estas distancias) De esta manera en un cierto punto la fuerza hidrodinámica iguala al peso menos empuje, con lo que $a=0$, y se alcanza una velocidad v_{lim} (velocidad límite). Usando que la densidad del sólido es $\rho_s = m_s / V_s$ tendremos

$$\rho_s V_s g - \rho_f g V_s - b v_{lim} = 0 \text{ y de ahí } v_{lim} = \frac{(\rho_s - \rho_f) g V_s}{b} \quad [3]$$

Por ejemplo, muchos de los cuerpos que se lanzan desde gran altura en el aire o los paracaidistas, alcanzan la velocidad límite. En algunos ámbitos de Ciencia y Tecnología la velocidad límite se llama también velocidad de sedimentación.

El coeficiente aerodinámico b es proporcional a la viscosidad del fluido η y a cómo se comporta el sólido dentro del fluido (a través del factor de forma del sólido K). De esta manera a mayor viscosidad, mayor fuerza de resistencia aerodinámica. Por ejemplo, si el cuerpo que cae fuera una esfera, $b = 6\pi r \eta$ (resultado obtenido analíticamente en 1851 por George Stokes para una esfera de radio $r < 1 \text{ mm}$) la velocidad límite sería

$$v_{lim} = \frac{2r^2 g (\rho_s - \rho_f)}{9\eta} \quad [4]$$

Dependencia con la viscosidad

Las velocidades límites (o de sedimentación) a temperatura ambiente (en verano) para nuestro sólido son del orden de 2 cm/s en agua, 0,2 cm/s en aceite y 0,012 cm/s en glicerina. Las diferencias provienen (ver ec. [3]) de las distintas densidades de los líquidos (0,998 para el agua, 0,923 para el aceite de girasol y 1,26 g/cm³ para la glicerina) y sobre todo de las distintas viscosidades (1 para el agua, 68 para el aceite y 1500 mPa s para la glicerina). La relación entre velocidades límite y viscosidades es difícil de determinar si no se conoce el factor de forma, pero en el caso de nuestro sólido la observación directa nos indica que velocidad límite y viscosidad son inversamente proporcionales (y quizá haya un exponente en la viscosidad).

Dependencia con el factor de forma

Medir el tiempo que tarda en hundirse el sólido en agua cuando lleva por delante el lado puntiagudo y el lado romo. Observaremos que el sólido se hunde un poco más rápidamente cuando lleva por delante el lado romo, no el puntiagudo como erróneamente podríamos haber supuesto (Fig. 1).

El coeficiente aerodinámico del sólido depende de la forma con la que penetra en el fluido (mayor cuanto mayor resistencia ofrece la forma al movimiento). Al observarse un tiempo menor de caída en el lado romo (mayor velocidad límite), tendremos que concluir que el coeficiente y fuerza fluidodinámicas en el lado romo son menores

El coeficiente aerodinámico es complejo de obtener analíticamente. Por ello habitualmente para el aire se determina de manera empírica en un túnel de viento. En él se estudia el comportamiento de los objetos (desde cascos, coches, motos, hasta aviones y palas de turbinas eólicas) cuando se encuentran en una corriente de aire creada artificialmente.

El resultado que hemos obtenido respecto a la forma del objeto no es sorprendente si pensamos en cómo se diseñan los cascos de los ciclistas para altas velocidades (Fig. 3).

En el caso de fluidos se hacen ensayos controlados en cubetas o grandes piscina. Cuando se conoce el factor de forma es posible utilizar la caída de sólidos y la velocidad límite para determinar la viscosidad de fluidos. Es en lo que se basa el viscosímetro de caída de bola (Fig. 4)



Fig. 3 Casco aerodinámico de ciclista.

Aplicaciones

Las ecuaciones que hemos descrito fueron cruciales para entender muchos fenómenos como el movimiento browniano. También en Biología se aplicó para describir cómo nadan en un fluido los microorganismos y el esperma.

Los paracaidistas conocen muy bien la velocidad límite, que es del orden de 320 km/h. En 2012 Felix Baumgartner consiguió aumentar la velocidad límite alcanzada por un paracaidista hasta 1357 km/h. Para ello ascendió hasta 39 km de altitud en un globo y saltó donde la atmósfera es muy poco densa. Aplicando la ec. [3] vemos que al disminuir la densidad del fluido aumenta la velocidad límite, en el caso de Baumgartner hasta romper la barrera del sonido.

En Tecnología de Alimentos la velocidad límite (en este caso llamada velocidad de sedimentación) es de interés. Muchos productos están constituidos por elementos sólidos en suspensión en un líquido y pueden caer hasta el fondo del recipiente que lo contiene, es decir, pueden sedimentar. Esto sucede en salsas (hierbas y especias, ver Fig.



4). También en emulsiones de agua y aceite, el que el agua o los sólidos que contiene tienden a sedimentar (p.e. alimentos untables como la *gianduja* – como Nutella – o el *hummus*) y desestructuran la preparación.

Fig. 4. Viscosímetro de caída de bola



Fig. 4. Salsa

Un problema semejante aparece en el diseño de medicamentos en los que el principio activo no es soluble en agua (como en jarabes o en muchos antibióticos que se administran con agua), o para estabilizar emulsiones (cremas). La velocidad de sedimentación ha de ser suficientemente pequeña como para que el principio activo no sedimente al fondo del recipiente antes de su administración.

Para los sólidos que sedimentan, como normalmente no es fácil variar su densidad, hay tres posibles soluciones a la vista de la ec. [4]: (1) añadir un excipiente (o aditivo) que aumente la densidad del fluido, como el azúcar y que además suele mejorar el sabor; (2) reducir lo máximo posible el radio de las partículas (p.e. el principio activo se muele fino; la avellana se pica fina en la *gianduja*; los garbanzos se trituran mucho en el *hummus*); (3) aumentar la viscosidad del fluido. Hay muchos espesantes en el mercado (agar-agar, carragenatos, xanthana, gellan...) En el caso de las cremas corporales se utiliza mucho el carbopol.

En la concentración adecuada algunos espesantes son también gelificantes. Aunque no incluida en el enfoque anterior, la gelificación resulta de interés. Los gelificantes – proteínas o hidratos de carbono – constituyen una estructura tridimensional que atrapa el agua y reduce mucho la sedimentación, además de dar una textura deseable al producto. Así que una solución habitual al problema de la sedimentación es gelificar el producto.

Advertencias

- Almacenar el montaje con los tapones de colores hacia arriba.
- Se puede dejar el sólido en glicerina cayendo durante el resto de la clase y volver a él luego.
- Ya que cuanto menor es la temperatura mayor es la viscosidad de los líquidos, se apreciarán cambios en las velocidades límite entre invierno y verano.