Montaje de un viscosímetro de caída de bola para determinar la viscosidad de líquidos viscosos

Objetivos del experimento

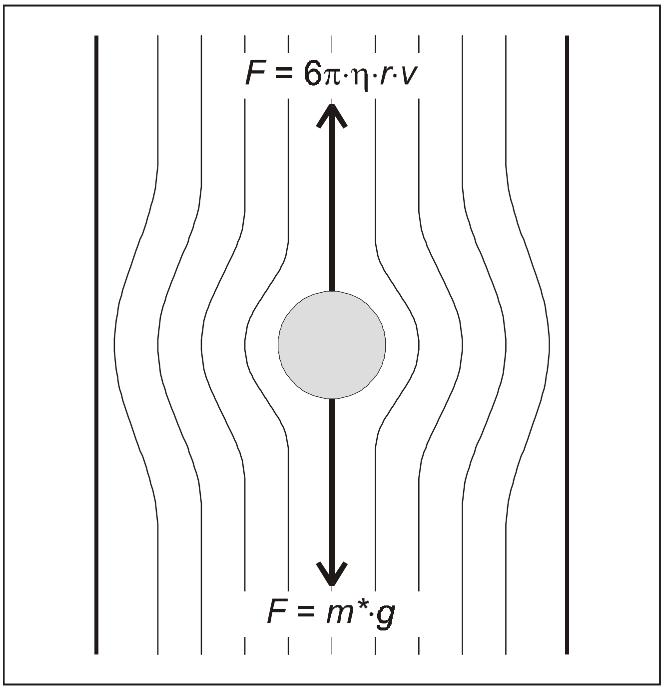
- Montaje de un viscosímetro de caída de bola
- Determinación de la viscosidad de la glicerina

Fundamentos

En todo cuerpo que se mueve en un líquido actúa una fuerza de rozamiento de sentido opuesto al movimiento. Su valor es función de la geometría del cuerpo, de su velocidad y del rozamiento interno del líquido. Una medida del rozamiento interno la da la viscosidad dinámica η. Para una bola de radio r y velocidad v en un líquido infinitamente extenso de viscosidad dinámica η, *G. G. Stokes* calculó la fuerza de rozamiento como

$$F_1 = 6\pi \cdot \eta \cdot v \cdot r \qquad \text{(I)}$$

Si la bola cae verticalmente en el líquido, luego de un cierto tiempo se moverá con velocidad constante v y todas las fuerzas que actúan sobre ella se encontrarán en equilibrio: la fuerza ascencional de rozamiento F_1, la fuerza también ascencional



$$F_2 = \frac{4\pi}{3} \cdot r^3 \cdot \rho_1 \cdot g \qquad \text{(II)}$$

y la fuerza del peso, que actúa hacia abajo

$$F_3 = \frac{4\pi}{3} \cdot r^3 \cdot \rho_2 \cdot g \qquad \text{(III)}$$

ρ_1: densidad del líquido
ρ_2: densidad de la bola
g: aceleración de la gravedad

En este caso vale:

$$F_1 + F_2 = F_3 \qquad \text{(IV)}$$

Luego, la viscosidad se puede determinar midiendo la velocidad de caída v.

$$\eta = \frac{2}{9} \cdot r^2 \cdot \frac{(\rho_2 - \rho_1) \cdot g}{v} \qquad \text{(V)}$$

donde se averigua la velocidad de caída en el segmento s y en el tiempo de caída t. Entonces, para la viscosidad se tiene

$$\eta = \frac{2}{9} \cdot r^2 \cdot \frac{(\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot t}{s} \qquad \text{(VI)}$$

La ecuación (I) debe ser corregida en la práctica, dado que no es realista suponer un líquido de extensión infinita y que la distribución de la velocidad de las partículas del líquido respecto de la superficie de la bola se encuentra afectada por las dimensiones finitas del líquido. Para el movimiento de la bola a lo largo del eje de un cilindro de líquido infinitamente largo y de radio R, entonces

$$F_1 = 6\pi \cdot \eta \cdot r \cdot v \cdot \left(1 + 2{,}4 \cdot \frac{r}{R}\right) \qquad \text{(VII)}$$

La ecuación (V) adopta luego la forma

$$\eta = \frac{2}{9} \cdot r^2 \cdot \frac{(\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot t}{s} \cdot \frac{1}{1 + 2{,}4 \cdot \frac{r}{R}} \qquad \text{(VIII)}$$

Si se toma en cuenta la longitud finita L del cilindro de líquido, se agregan otras correcciones, que son del orden de magnitud $\frac{r}{L}$.

Materiales

1 bola metálica, ∅ 16 mm	200 67 288
1 tubo de caída	379 001
6 glicerinas, 99 %, 250 ml	672 121
1 contador electrónico P	575 45
1 imán de retención	336 21
1 fuente de alimentación de baja tensión 3, 6, 9, 12 V	522 16
1 manipulador morse	504 52
1 base de soporte grande en forma de V	300 01
1 varilla de soporte, 100 cm	300 44
1 varilla de soporte, 25 cm	300 41
1 manguito Leybold	301 01
1 pinza con mordaza	301 11
1 cinta métrica enrollable, 2 m	311 77
1 par de imanes, cilíndricos	510 48
Cables	500 442
además se recomienda:	
1 calibre	311 54
1 probeta graduada, 100 ml, plástica	590 081
1 balanza electrónica LS 200, 200 g: 0,1 g	667 793

Montaje

El montaje del experimento se muestra en la figura 1.

– Armar el sistema de soporte.
– Sostener torcido el tubo de caída, llenar a lo largo y casi hasta el borde con glicerina sin que, en lo posible, se formen burbujas.

Indicación:
Las burbujas de aire alteran la viscosidad y la densidad del líquido.
En caso de que se hayan formado pequeñas burbujas de aire durante el llenado, esperar unas horas hasta la realización del experimento.

– Asegurar el tubo de caída – apoyado sobre la mesa de experimentación – con la pinza con mordaza **(c)**.
– Girar hacia abajo el tornillo de cabeza moleteada **(a)** del imán de retención, de manera que el núcleo de hierro **(b)** salga de la bobina.
– Conectar el imán de retención a la salida de CC de la fuente de alimentación de baja tensión uniendo el polo negativo al manipulador Morse, de forma que el circuito esté cerrado cuando el manipulador Morse se encuentre desactivado.
– Aplicar una tensión de salida de 12 V y enganchar la bola de acero al núcleo de hierro **(b)**.
– Hacer subir el tornillo de cabeza moleteada **(a)** dándole aproximadamente cinco vueltas.
– Ubicar sobre la columna de líquido el imán de retención con la bola de acero enganchada de forma que ésta se halle centrada sobre el eje del cilindro y esté completamente sumergida en el líquido.
– Marcar el tubo algunos centímetros por encima de su fondo y medir la distancia entre el borde inferior de la bola y la marca tomándola como segmento de caída *s*.

Conexión del contador electrónico P:

– Unir la conexión de masa del contador electrónico P con el casquillo de entrada **(d)** del manipulador morse, y unir también la entrada de inicio con el casquillo **(e)** y la entrada de detención con el casquillo **(f)**.
– Seleccionar la escala de tiempo en ms.

Realización

– Con el botón “0”, poner el contador electrónico P en cero.
– Abrir el manipulador Morse y observar la caída de la bola.
– No bien la bola haya alcanzado la marca **(c)**, soltar el manipulador Morse.
– Leer el tiempo de caída *t* en el contador electrónico P y anotar.

En caso de que la bola no caiga o lo haga con atraso:

– Controlar el interruptor.
– Girar el núcleo de hierro un tanto más hacia arriba.
– Seleccionar una tensión más baja para el imán de retención.

En caso de que la bola caiga sin haber abierto el manipulador Morse:

– Girar el núcleo de hierro un tanto hacia abajo.

Repetición de la medición:

– Seleccionar una tensión de 12 V para el imán de retención y girar hacia abajo el tornillo de cabeza moleteada **(a)** hasta el tope.
– Ir subiendo la bola de acero desde el fondo del tubo con el par de imanes (marca roja hacia fuera), deslizándolo desde afuera a lo largo del tubo hacia arriba, hasta llegar al imán de retención. Ubicar la bola, con ayuda de por ejemplo un alambre doblado, exactamente debajo del núcleo de hierro (ver figura 2).
– Girar nuevamente hacia arriba el tornillo de cabeza moleteada, poner en cero el contador electrónico P y repetir la medición del tiempo de caída.

En caso de disponer, además, de los elementos recomendados (ver arriba):

– Determinar el diámetro interno *D* y el interno *d* del tubo, además de la masa m_2 de la bola de acero.
– Ubicar la probeta en la balanza electrónica y pesarla.
– Verter en la probeta 100 ml de glicerina y determinar la masa.

Ejemplo de medición

Tabla 1: Tiempos de caída *t*

n	$\frac{t}{\text{ms}}$
1	2084
2	2110
3	2104
4	2036
5	2116

segmento de caída: s = 66,6 cm

diámetro de la bola: d = 16,0 mm*)

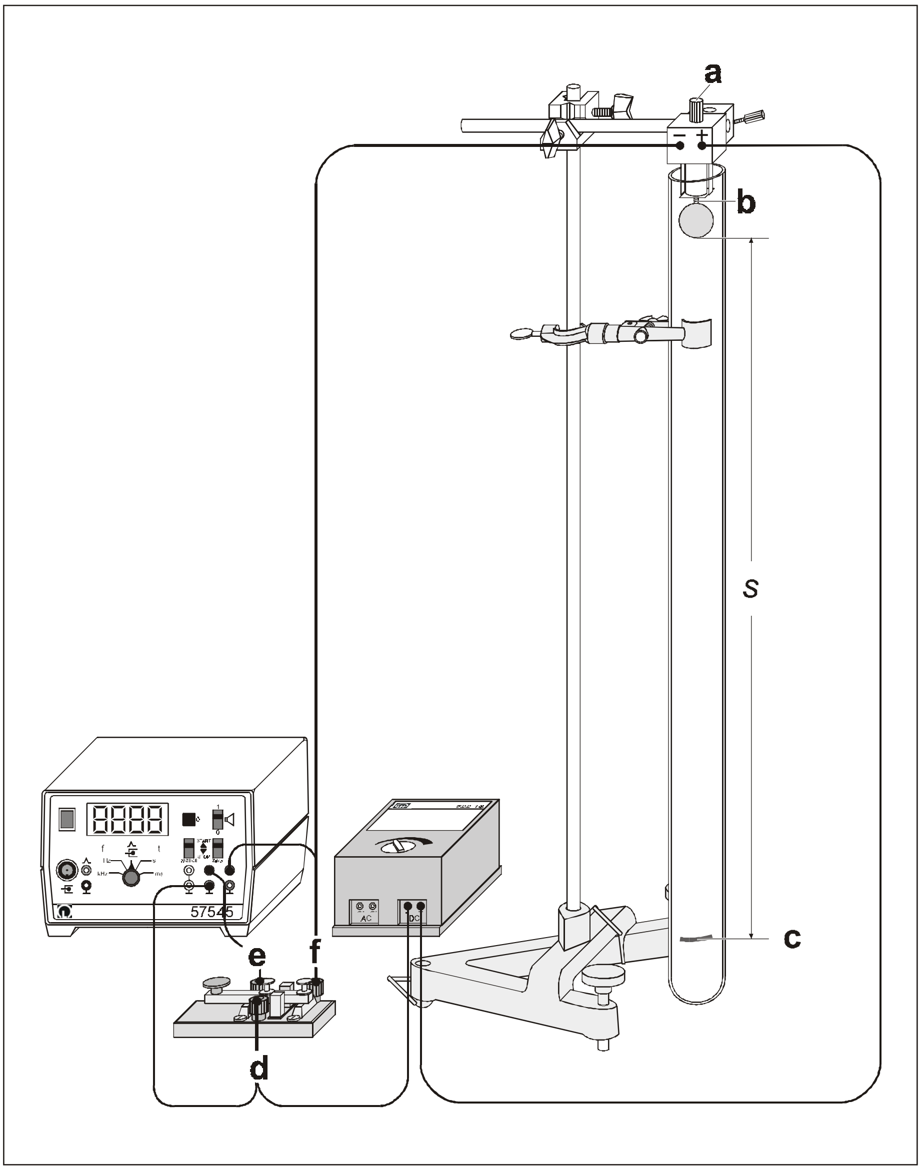
diámetro del tubo de caída: D = 44 mm*)

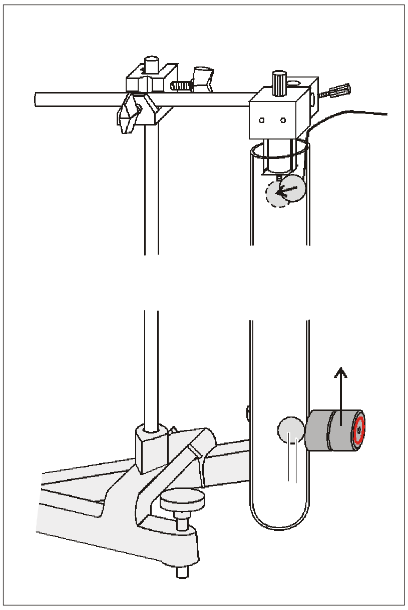
masa de la bola: m_2 = 16,7 g*)

masa de 100 ml de glicerina: m_1 = 125,4 g*)

*) En caso de que estas medidas no sean realizadas, se usarán los siguientes valores para el análisis posterior:

r = 8 mm, R = 22 mm, ρ_1 = 1260 kg m^{-3}, ρ_2 = 7790 kg m^{-3}





▲

Fig. 2 Regreso de la bola de acero al punto de partida

◄

Fig. 1 Montaje del experimento para determinar la viscosidad de la glicerina

Análisis y resultado

Tiempo de caída:

Valor medio de las mediciones de la tabla 1: t = 2,090 s

Densidad de la bola:

En base a las mediciones puede calcularse

V_2 = 2,14 cm^3 y $\rho_2 = \dfrac{m_2}{V_2}$ = 7787 kg m^{-3}

Densidad de la glicerina:

ρ_1 = 1254 kg m^{-3}

Entonces, de acuerdo con la ecuación (VIII), se obtiene para la viscosidad:

η = 1,53 kg m^{-1} s^{-1}

Valor de tabla para ϑ = 20º C:

η = 1,480 kg m^{-1} s^{-1}

Comparando con el valor de tabla se observa que la viscosidad de la glicerina depende fuertemente de la temperatura.

Información adicional

La ecuación de movimiento de la bola que cae:

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = F_3 - F_2 - F_1$$

puede, aplicando las ecuaciones (II), (III) y (VII), expresarse como la ecuación diferencial siguiente:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} \cdot g - \frac{v}{\tau}$$

con la constante de tiempo

$$\tau = \frac{2}{9} \cdot \frac{r^2 \cdot \rho_2}{\eta} \cdot \frac{1}{1 + 2{,}4 \cdot \frac{r}{R}}$$

cuya solución para la condición inicial $v(t = 0) = 0$ es:

$$v = \frac{2}{9} \cdot \frac{r^2 \cdot (\rho_2 - \rho_1) \cdot g}{\eta} \cdot \frac{1}{1 + 2{,}4 \cdot \frac{r}{R}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

Con los parámetros de la medición se obtiene τ = 39 ms; el tiempo total de caída es de 2,1 s. Así, encontramos justificado, dada la buena aproximación, el haber supuesto una velocidad de caída constante.