

# La balanza electrónica: la opción más rentable para realizar distintas prácticas de laboratorio de física de fluidos



**Jesús Delegido, Manuel Dolz, María Jesús Hernández y Alejandro Casanovas**

*Departamento de Física de la Terra i Termodinàmica, Universitat de València,  
Av. Vicent Andrés Estellés, 46100 Burjassot (Valencia). España*

**E-mail:** delegido@uv.es

(Recibido el 18 de Diciembre de 2007; aceptado el 9 de Enero de 2008)

## Resumen

Las prácticas de laboratorio son una importante herramienta pedagógica para los estudiantes de física de cualquier licenciatura de ciencias o ingeniería. Las prácticas de física de fluidos son especialmente costosas y a veces no muestran la física del proceso. Puesto que la balanza electrónica mide masas y fuerzas con precisión, puede ser utilizada de distintas maneras para estudiar los fluidos. Basándose en el principio de Arquímedes y midiendo el empuje sobre un sólido, nos permite medir las densidades de sólidos y líquidos. Midiendo la fuerza sobre una esfera metálica en un fluido en movimiento, la balanza nos permitirá calcular la fuerza de Stokes y la viscosidad de un fluido, y además podremos distinguir entre fluidos Newtonianos y no Newtonianos. Y midiendo la fuerza de arranque de un anillo metálico de la superficie de un líquido, nos va a permitir medir su tensión superficial. En este trabajo se muestran distintos experimentos sencillos y didácticos, de bajo coste económico, que nos permiten estudiar todas las características fundamentales de los fluidos.

**Palabras clave:** Prácticas de laboratorio, física de fluidos, densidad, viscosidad, tensión superficial.

## Abstract

Student's laboratory work is a significant pedagogical tool for the physics teaching in natural sciences or engineering. Experiments on fluids physics are often obscure to show the physics of the process and expensive. Masses and forces are accurately measured by electronic balances and can be adapted to the study of fluids; e.g., to measure the densities of solids and liquids measuring the push on a solid and applying the principle of Archimedes or to measure the Stokes' force on a sphere in a fluid in movement and the viscosity of the fluid, and even to distinguish between Newtonian and non Newtonian fluids. The tear-off force of a metallic ring placed on the surface of a liquid allows us to determine the surface tension. In this paper several inexpensive and simple didactic experiments are proposed to study the fundamental properties of fluids.

**Keywords:** Laboratory experiments, fluid physics, fluid mechanics, density, viscosity, surface tension.

**PACS:** 01.50.My, 01.50.Pa, 47.15.Rq, 47.50.Ef.

**ISSN 1870-9095**

## I. INTRODUCCIÓN

La física de fluidos forma parte de los programas de física de la mayoría de los estudios de ingeniería y de licenciaturas de ciencias puras y de ciencias de la salud. Sin embargo, a veces se introducen conceptos abstractos difíciles de entender por los estudiantes. Para ayudar a resolver este problema son muy útiles las prácticas de laboratorio pues permiten a los estudiantes manipular y observar el comportamiento de los fluidos, por lo que las prácticas tienen un alto contenido pedagógico [1, 2].

Sin embargo, las prácticas de física de fluidos son a veces de alto coste económico pues utilizan instrumentos muy caros como puedan ser reómetros o tensiómetros, que además tienen el inconveniente de que el estudiante no "ve" cómo el aparato transforma un fenómeno físico, como el rozamiento de un fluido en un cilindro o el arranque de un sólido de la superficie de un líquido, en una

medida que aparece en la pantalla electrónica del instrumento.

El objetivo del presente artículo es hacer una revisión de distintas prácticas de laboratorio diseñadas por la Unidad de Investigación de Reología Aplicada de la Universitat de València, que, utilizando como principal instrumento de medida la balanza electrónica, permita obtener las propiedades más importantes de los fluidos, tanto en reposo como en movimiento. Dichas prácticas están hechas de forma que su montaje sea económico y sobre todo que sean didácticas y permitan a los estudiantes ver la influencia de cada variable en el fenómeno físico considerado, y vienen realizándose varios años, siendo muy bien valoradas por nuestros estudiantes.

Dividiremos las prácticas en cuatro grandes grupos: por un lado el estudio de la densidad de sólidos y líquidos a partir del principio de Arquímedes, en otro grupo el estudio de la tensión superficial de un líquido y las variables que influyen en ello, en un tercer grupo, el

estudio de la viscosidad de un fluido y de la fuerza de rozamiento viscosa en un sólido que se mueve en el seno de un fluido, y por último el estudio de la viscosidad basado en la ley de Poiseuille. En estos dos últimos casos, los experimentos diseñados nos va a permitir además distinguir entre fluidos newtonianos y no newtonianos, e incluso obtener modelos matemáticos para la caracterización reológica, con lo que los estudiantes ven todos los pasos del método científico [3, 4].

## II. DENSIDAD DE SÓLIDOS Y LÍQUIDOS

Aunque existen distintos métodos de medida de la densidad tanto de sólidos como de líquidos, las dos prácticas mostradas a continuación se basan en el principio de Arquímedes de manera que sirvan también para entender dicho principio. Estas prácticas se llevan realizando durante muchos años, con ligeras modificaciones, en la asignatura de física de 1º de la Licenciatura en Farmacia y de Ingeniería Química de la Universidad de Valencia.

### A. Práctica nº 1: densidades de sólidos

Se trata de medir la densidad de cuerpos irregulares (distintos trozos de hueso o de aluminio). Para ello se pesa cada cuerpo,  $M_c$ , y después se introduce en un frasco lleno de agua destilada situado sobre la balanza previamente tarada (Figura 1).

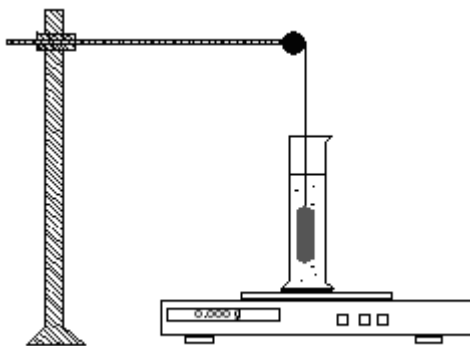


FIGURA 1. Montaje experimental Prácticas 1 y 2.

Por el Principio de Arquímedes, el agua ejerce un empuje hacia arriba igual al peso del líquido desalojado y por el principio de acción y reacción de Newton, el cuerpo ejerce una fuerza igual y hacia abajo sobre el agua, por tanto lo que mide la balanza es la masa de líquido desalojado,  $M$ , de forma que la densidad,  $\rho$ , se calcula

$$\rho = \frac{M_c}{V_c} = \frac{M_c}{M / \rho_a} = \frac{M_c}{M} \rho_a, \quad (1)$$

en donde  $\rho_a$  es la densidad del agua, que se puede suponer  $1 \text{ g/cm}^3$  o se puede interpolar a partir de una tabla de densidad del agua en función de su temperatura.

La práctica se completa midiendo tres trozos distintos de hueso y tres trozos distintos de aluminio y realizando el cálculo de errores para obtener la densidad del hueso y del aluminio con su error.

### B. Práctica nº 2: densidades de líquidos

Tradicionalmente, la medida de la densidad de un líquido se realiza con la balanza de Mohr, instrumento diseñado únicamente para este propósito.

Nuestra propuesta no incluye ningún gasto extra, pues se trata de medir la densidad de un líquido utilizando el mismo montaje anterior, pero ahora sumergiendo un objeto de volumen conocido. En el mercado se pueden encontrar inmersores pero también pueden ser fabricados de forma sencilla con cualquier material de alta densidad que se pueda cortar y lijar fácilmente. Nosotros hemos construido unos con un volumen de  $10 \text{ cm}^3$  de forma que al introducirlos en el líquido que se encuentra en una probeta sobre una balanza tarada, miden directamente la densidad del líquido en  $\text{g/cm}^3$  sin más que dividir lo que marca la balanza por 10.

Para que la práctica sea más completa, se aplica el anterior método de medida al problema de buscar la relación entre concentración de agua con sal y su densidad, y la determinación de la concentración en sal de una disolución problema. Para ello se preparan varias disoluciones de sal en agua de concentraciones conocidas, se mide su densidad y se representa gráficamente la densidad en función de la concentración, ajustándolos a una recta por mínimos cuadrados. A partir de la ecuación de la recta, midiendo la densidad de una disolución problema de sal en agua, se calcula su concentración. En la Figura 2 se muestra la recta obtenida por un grupo de estudiantes de Farmacia del curso 2007-2008.

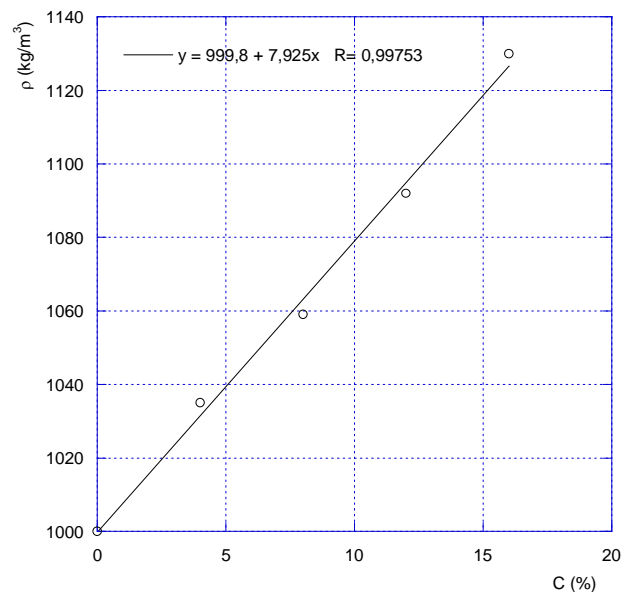


FIGURA 2. Densidad en función de la concentración de distintas mezclas de agua y sal.

### III. TENSIÓN SUPERFICIAL DE LÍQUIDOS

La medida de la tensión superficial se realiza con equipos especializados muy costosos, que no siempre se pueden adquirir para un laboratorio de estudiantes. Se ha propuesto [5] un montaje experimental que permite medir la tensión superficial de un líquido con buena precisión y que se puede montar en cualquier laboratorio con bajo coste económico. Además ayuda a los estudiantes a entender el concepto de tensión superficial pues ellos “ven” la superficie que se rompe y miden la fuerza necesaria con ayuda de la balanza electrónica.

El montaje experimental se muestra en la Figura 3. La balanza electrónica (B) tiene un gancho del que se cuelga un anillo de aluminio sujetado con tres hilos. El líquido se introduce en un recipiente con forma de embudo (E) que tiene una llave de paso (P) en su parte inferior. El embudo con el líquido se sujeta mediante un soporte (T). El líquido se recoge en un recipiente (R).

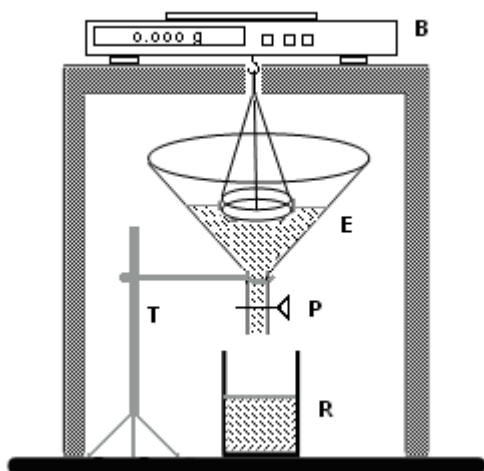


FIGURA 3. Montaje experimental para medir la tensión superficial de un líquido.

El proceso de medida es el siguiente: con el anillo horizontal colgado de la balanza y fuera del líquido, se tara ésta. Con la llave de paso P cerrada, se llena el embudo E con el líquido problema hasta una altura media. Se sujeta en la pinza del soporte T y se sube hasta que la superficie del líquido queda tocando al anillo, sumergido unos 2 mm y centrado de forma que esté alejado de las paredes. Cuando el líquido está en reposo se abre la llave de paso P dejando salir el líquido lentamente. Mientras un estudiante observa el líquido, otro observa la pantalla en donde la balanza marca la fuerza que el líquido va ejerciendo sobre el anillo: dicho valor irá aumentando progresivamente ya que cada vez será menor el empuje sobre el anillo. Después se observará un ligero descenso y bruscamente marcará de nuevo cero. El estudiante tiene que anotar la última medida antes de caer a cero, que corresponde a la fuerza necesaria (multiplicando por 9,8 la masa marcada expresada en kg) para vencer la fuerza que actúa sobre el anillo debido a la tensión superficial del líquido. Si el anillo tiene de radio R, la fuerza necesaria para separar el anillo de esta superficie sería, teóricamente

$$F = 4\pi R \sigma, \quad (2)$$

en donde  $\sigma$  es la tensión superficial del líquido. Sin embargo, se observa experimentalmente que la fuerza no sigue exactamente esta ley y que, debido a factores de curvatura de la superficie, que el estudiante puede llegar a visualizar, la longitud a tener en cuenta no es la longitud del anillo, sino una “longitud efectiva”,  $L_{ef}$ , que se puede calcular experimentalmente midiendo la fuerza necesaria en el caso de un líquido de tensión superficial conocida, a partir de la fórmula

$$\sigma = \frac{F}{L_{ef}}. \quad (3)$$

De manera que una vez calculada la longitud efectiva, se puede medir la tensión superficial de cualquier líquido sin más que aplicar (3).

Como líquido de referencia para calcular la  $L_{ef}$ , utilizamos la acetona, pues el agua tiene el inconveniente de que cualquier impureza (el mismo polvo del ambiente) hace variar sensiblemente su tensión superficial. De esta manera, midiendo la fuerza necesaria para arrancar el anillo de la acetona, y calculando la tensión superficial de la acetona por interpolación de la tabla (I), se calcula  $L_{ef}$ .

TABLA I. Tensión superficial de la acetona en función de la temperatura.

Temperatura (°C)	$\sigma_{\text{acetona/aire}}$ (N/m)
0	0,0262
20	0,0237
40	0,0212

La práctica se completa midiendo la tensión superficial de varios líquidos y estudiando cómo intervienen distintos factores en la tensión superficial, por ejemplo la temperatura o la presencia de sustancias tensioactivas.

### IV. VISCOSIDAD DE LÍQUIDOS A PARTIR DE LA FUERZA DE ARRASTRE DE STOKES

La viscosidad es una propiedad que indica la resistencia de los fluidos a fluir y que está relacionada con el rozamiento entre capas del fluido. Se define por la ley de Newton de la viscosidad:

$$\frac{F_x}{A_{xy}} = \eta \frac{dv_x}{dz} \Rightarrow \sigma = \eta \dot{\gamma}, \quad (4)$$

en donde  $\sigma$  es el esfuerzo de cizalla  $F/A$ ,  $\eta$  la viscosidad y  $\dot{\gamma}$  la velocidad de cizalla.

Es común en los laboratorios de primer curso universitario la medida de viscosidades de líquidos newtonianos, cuya viscosidad no depende de  $\dot{\gamma}$ , como alcohol, agua, acetona, etc., con viscosímetros de vidrio de tipo Ostwald. Existen, sin embargo, otros fluidos cuya viscosidad cambia al variar  $\dot{\gamma}$ . Estos reciben el nombre de fluidos no newtonianos. Muchos de estos fluidos

responden a una ley potencial, o modelo de Ostwald-de Waele en vez de

$$\sigma = K \dot{\gamma}^n \Rightarrow \begin{cases} n = 1 & \text{newtoniano} \\ n \neq 1 & \text{no newtoniano} \end{cases} \quad (5)$$

Las representaciones  $\sigma = f(\dot{\gamma})$ , llamadas reogramas, son lineales en los newtonianos y curvas en los no newtonianos. El estudio de estos últimos requiere viscosímetros que permitan variar la velocidad de cizalla, como los rotatorios, cuyo coste los hace casi inaccesibles en un laboratorio de primer curso. En este trabajo se presenta una alternativa mucho menos costosa basada en la medida, con una balanza electrónica, de la fuerza ejercida por un fluido sobre una esfera metálica.

La fuerza  $F$  ejercida sobre una esfera que se mueve en el seno de un fluido es proporcional a la viscosidad del fluido,  $\eta$ , al radio de la esfera,  $R$ , y a la velocidad relativa con la que se mueve,  $v$ . Dicha fuerza se describe mediante la ley de Stokes

$$F = K R \eta v. \quad (6)$$

La constante de proporcionalidad  $K$  para el caso de un medio fluido infinito y una esfera sólida, es  $6\pi$ , según se obtiene de la ecuación de Navier-Stokes para números de Reynolds  $Re \ll 1$ .

En el sistema experimental diseñado por nosotros [6] que se muestra en la Figura 4, la balanza electrónica permite medir con precisión la fuerza que actúa sobre una esfera colgada de su gancho inferior, como consecuencia del arrastre del fluido que se desplaza a su alrededor. Para ello, se hace fluir el líquido a través del tubo T abriendo la llave A, y se mide la velocidad de descenso  $v$  de la superficie libre del fluido en el recipiente CF. Para medir esta velocidad, utilizamos una escala graduada en mm, S, dispuesta sobre el frasco CF y con un cronómetro medimos el tiempo entre dos marcas cuando el régimen se ha estabilizado. Este montaje permite variar la velocidad del fluido abriendo más o menos la llave A.

El sistema experimental diseñado, nos permite realizar dos prácticas distintas dirigidas a estudiantes de Ciencias o Ingeniería. Por una parte, la práctica número 1 sirve para deducir de forma experimental la ley de Stokes, mientras que la número 2 estaría orientada hacia la distinción entre fluidos newtonianos y no newtonianos, la elaboración de reogramas y la caracterización reológica de fluidos.

### A. Práctica nº 1: deducción experimental de la ley de Stokes

El montaje de la Figura 4 permite variar todas las magnitudes que intervienen en la ley de Stokes (fórmula 6). Se puede diseñar una práctica simplemente para comprobar esta ley, o para deducirla de un modo constructivista. Para ello se propone a los estudiantes elaborar hipótesis sobre cuales son las magnitudes de las que depende la fuerza de arrastre de un fluido sobre una esfera. Distribuidos en grupos, cada grupo puede estudiar la influencia de una magnitud dejando fijas las otras: un

grupo hará el experimento con un líquido de viscosidad conocida y esferas de distintos radios. Midiendo la fuerza de arrastre para distintas velocidades se obtendrán rectas de distintas pendientes. Otro grupo puede medir la fuerza de arrastre para una esfera fija, con fluidos de distinta viscosidad para distintas velocidades. Igualmente se obtendrán rectas de distintas pendientes (Figura 5). Además, representando gráficamente dichas pendientes en función de la viscosidad, se obtiene una recta cuya ecuación sirve para determinar el valor de  $K$ .

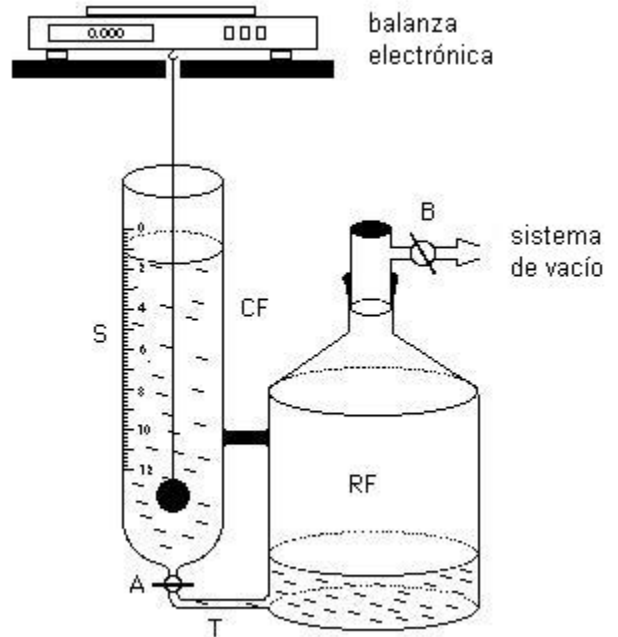


FIGURA 4. Montaje experimental para el estudio de la viscosidad de un líquido.

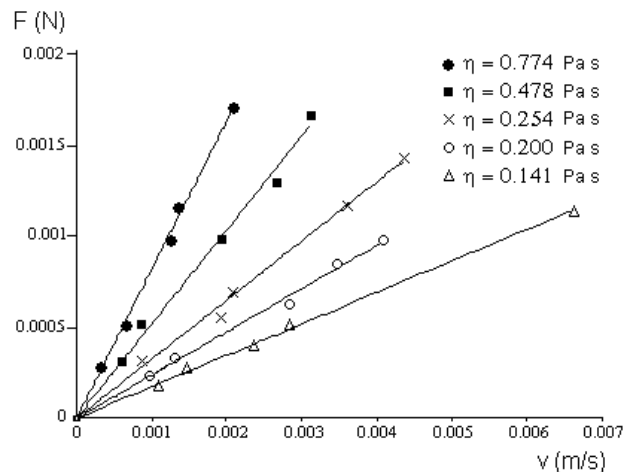


FIGURA 5. Fuerza de arrastre sobre una esfera en función de la velocidad  $v$  de fluidos de distinta viscosidad.

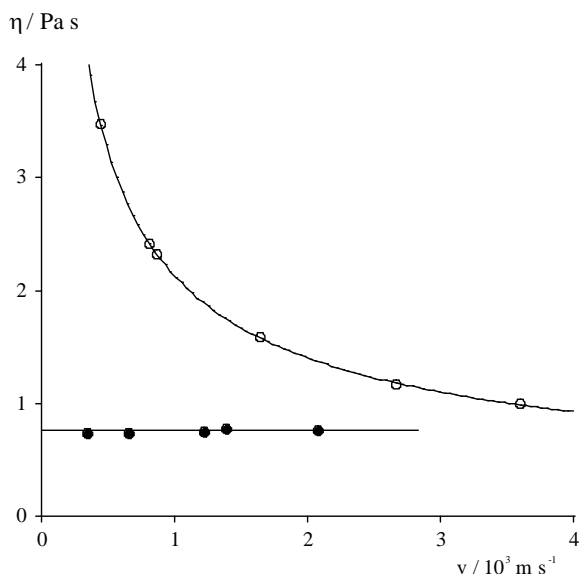
Para la realización de la práctica se pueden utilizar varias disoluciones de glicerina en agua que permiten obtener distintos líquidos newtonianos de diferente viscosidad. Se comienza con una disolución, y después de medir, se añade agua obteniendo mezclas más diluidas y menos viscosas. Los valores de viscosidad de las distintas disoluciones utilizadas se muestran en la Figura 5. Se han

utilizado 3 esferas de acero de 5, 7, 5 y 10 mm de radio. Con estos datos se puede demostrar que el valor de  $K$  es muy próximo a  $6\pi$  [6].

### B. Práctica nº 2: elaboración de reogramas y distinción entre fluidos Newtonianos y no Newtonianos

El montaje experimental de la Figura 4 permite variar la velocidad relativa del fluido respecto a la esfera. Utilizando una esfera fija, y midiendo la fuerza sobre dicha esfera en un determinado fluido para distintas velocidades, podemos observar distintos comportamientos teniendo en cuenta la ecuación (5), considerando que el esfuerzo de cizalla  $\sigma$  es proporcional a la fuerza de arrastre medida en la balanza electrónica, mientras que la velocidad de cizalla  $\dot{\gamma}$  es proporcional a la velocidad relativa  $v$  [7].

El experimento se puede realizar con glucosa líquida y con una dispersión acuosa de goma xantana al 0,25%, que es un polímero viscosizante [8]. Se mide cada fluido a distintas velocidades de cizalla, y se calcula su viscosidad utilizando la ecuación (6). En la Figura 6 se aprecia la constancia de la viscosidad de la glucosa (líquido newtoniano) con el aumento de la velocidad del fluido, mientras que para la xantana, polímero que forma dispersiones no newtonianas, el comportamiento es muy diferente, pseudoplástico, ya que  $\eta = f(v)$  es una curva que va disminuyendo al aumentar la velocidad.



**FIGURA 6.** Viscosidad aparente en función de la velocidad de la superficie libre del fluido en CF. (●) Glucosa líquida, (○) 0,25 % Xantana.

La gráfica nos permite distinguir perfectamente el diferente comportamiento de los fluidos newtonianos y no newtonianos. Además, los ajustes de las curvas mediante una función potencial como la ecuación (5), permite obtener el valor de  $n$ , resultando  $n = (0,96 \pm 0,05)$  para el caso de la glucosa y  $n = (0,40 \pm 0,01)$  para la dispersión de xantana. Teniendo en cuenta que para fluidos

newtonianos  $n = 1$ , el valor obtenido para la glucosa permite afirmar que se trata de un líquido newtoniano [7].

### V. VISCOSIDAD DE LÍQUIDOS OBTENIDA A PARTIR DE LA LEY DE POISEUILLE

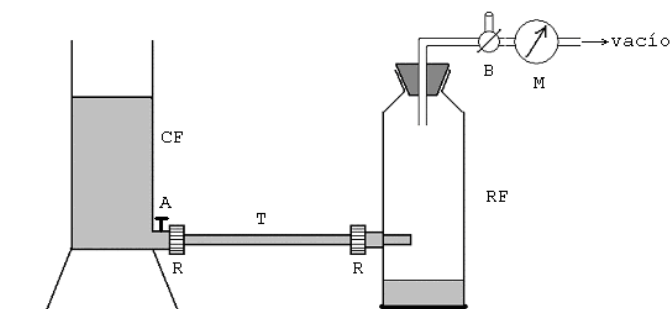
El estudio del flujo de fluidos reales a través de tuberías reviste un considerable interés tanto en Ciencias Básicas como en Ciencias Biomédicas o diferentes áreas de Ingeniería. La ley que regula el flujo laminar a través de un tubo cilíndrico para números de Reynolds pequeños se debe a Poiseuille y se expresa en la forma

$$G = \frac{\pi R^4}{8\eta L} \Delta P, \quad (7)$$

en donde  $G$  es el gasto cúbico o volumen fluido por unidad de tiempo,  $R$  y  $L$  el radio y la longitud de la tubería respectivamente,  $\eta$  la viscosidad del fluido y  $\Delta P$  la diferencia de presiones establecida entre los extremos del tubo.

Para estudiar dicho flujo, proponemos el montaje de la Figura 7 que permite la variación de esas cuatro magnitudes [9]. Consiste en un frasco contenedor CF donde se sitúa el líquido a medir y un frasco receptor RF donde se recoge el líquido que pasa por el tubo T, en un tiempo  $t$ . En este último frasco se puede modificar la presión, que se mide en un manómetro M, mediante un sistema regulador de vacío. El tubo T se puede cambiar fácilmente, mediante las tuercas R de ambos frascos, permitiendo emplear longitudes o diámetros diversos. El frasco RF se debe poder separar del resto del montaje con gran facilidad. Para conectar RF al sistema de vacío o a la atmósfera se usa la llave B. Se disponen de varios tubos de longitudes y radios distintos.

Para medir, se sitúa un líquido de viscosidad y densidad conocida en el frasco CF y se tara el frasco RF. Se conecta el sistema de vacío y se lee en el manómetro M la diferencia de presión  $\Delta P$ . Se abre la llave A y el líquido se derrama en RF después de pasar por T. Al cabo de un tiempo  $t$ , se cierra la llave A y se pesa RF. Con estos datos, y conocida la densidad del líquido, se calcula el gasto  $G$ .



**FIGURA 7.** Montaje experimental para deducir la ley de Poiseuille.

Este montaje permite realizar dos prácticas distintas: tanto para deducir la ley de Poiseuille de forma parecida a como lo hizo el propio Poiseuille, como para obtener reogramas

$\sigma = f(\dot{\gamma})$  y poder distinguir entre fluidos newtonianos y no newtonianos.

### A. Práctica nº 1: deducción experimental de la ley de Poiseuille

Para el desarrollo de la práctica, en primer lugar, el profesor ha de plantear el problema: debido a sus múltiples aplicaciones, es interesante conocer una ley para calcular el gasto en una tubería. Proponemos a los estudiantes elaborar hipótesis sobre la cuestión: ¿de qué depende ese gasto? Al cabo de un tiempo de reflexión y discusión es fácil llegar a la conclusión de que buscamos una función

$$G = f(\Delta P, R, L, \eta). \quad (8)$$

Puesto que el montaje experimental nos permite la variación de las cuatro variables, la práctica consiste en medir el gasto manteniendo fijas tres variables de ellas cada vez y variando la cuarta, de forma que podamos estudiar su dependencia en (8). Por ejemplo, para analizar la dependencia del gasto con la viscosidad se han medido 6 concentraciones distintas de glicerol en agua con un mismo tubo y una misma  $\Delta P$ . En la Figura 8 se observa, al ajustar los datos mediante una función  $y = k/x$ , que el gasto será inversamente proporcional a la viscosidad.

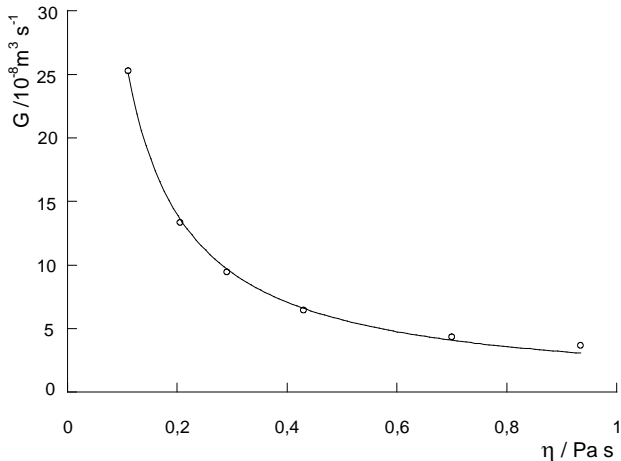


FIGURA 8. Representación gráfica del gasto ( $G$ ) en función de la viscosidad ( $\eta$ ) en un tubo de 30 cm de longitud y 0,91 mm de radio.

De igual manera, variando la longitud de la varilla y manteniendo constantes las otras variables, se demuestra la relación inversa del gasto con dicha longitud.

Para estudiar la dependencia con el radio del tubo, se ha medido una determinada muestra con la misma  $\Delta P$  y utilizando tubos de igual longitud y diferente radio. Los resultados se muestran en la Figura 9. En ella se observa que los datos experimentales se pueden ajustar a una función del tipo  $G = k R^4$ . Por último, manteniendo fijo el líquido y un tubo cualquiera y variando  $\Delta P$ , se puede demostrar que la dependencia del gasto con la diferencia de presiones es lineal.

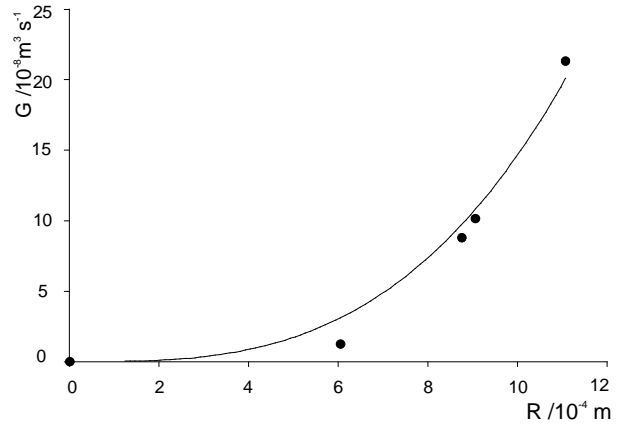


FIGURA 9. Representación gráfica del gasto ( $G$ ) en función del radio  $R$  para tubos de igual longitud y una misma disolución de glicerol.

Con todo lo anterior se puede concluir que la ecuación (8) ha de ser de la forma

$$G = K \frac{R^4 \Delta P}{\eta L}. \quad (9)$$

Introduciendo todas las medidas en (9) se puede calcular  $K$ . El valor obtenido con nuestros datos ha sido  $K = 0,41 \pm 0,04$  que es, dentro del margen de error, igual al valor  $\pi/8 = 0,393$  propuesto por Poiseuille [9].

### B. Práctica nº 2: elaboración de reogramas de fluidos Newtonianos y no Newtonianos

El montaje experimental anterior nos permite calcular la viscosidad de un fluido para distintas velocidades de cizalla.

Sin embargo, para representar un reograma, debemos conocer el esfuerzo de cizalla y la velocidad de cizalla. Para ello, usaremos la fórmula de la distribución de velocidades en el interior de un tubo cilíndrico. En una tubería cilíndrica de radio  $R$ , la velocidad,  $v$ , de un fluido de viscosidad  $\eta$  a una distancia  $r$  del centro de la tubería, viene dada por la siguiente expresión [10] que puede ser deducida en clase, incluso para estudiantes universitarios de primer curso:

$$v(r) = \frac{\Delta P}{4 \eta L} (R^2 - r^2), \quad (10)$$

de forma que se puede calcular la velocidad de cizalla junto a la pared de la tubería, derivando la expresión anterior para  $r = R$

$$\left( \frac{dv}{dr} \right)_R = - \frac{2 r \Delta P}{4 \eta L} \Big|_R \Rightarrow \dot{\gamma} = \frac{R \Delta P}{2 \eta L}, \quad (11)$$

y teniendo en cuenta la ecuación (4), el esfuerzo de cizalla se puede calcular como

$$\sigma = \frac{R \Delta P}{2 L}. \quad (12)$$

Las anteriores ecuaciones nos permiten calcular  $\eta$  y  $\sigma$  de cualquier fluido, y por consiguiente la obtención del

reograma que proporciona su caracterización reológica [11].

Se han preparado dos dispersiones acuosas de concentraciones 0,25 y 1 % peso/peso de goma xantana, que como hemos concluido anteriormente, tiene comportamiento no newtoniano, y dos disoluciones de glicerina en agua al 90 y 80 % de concentración peso/peso, que presentan un comportamiento newtoniano.

Se les pide a los estudiantes que, en grupos, elaboren un protocolo para poder medir las variables reológicas necesarias para hacer los reogramas de estas cuatro preparaciones que nos permitan conocer su comportamiento reológico, a la temperatura estudiada. La forma más sencilla sería la de escoger un tubo de geometría bien definida ( $R$  y  $L$ ) y mediante el montaje de la Figura 7, variar la diferencia de presión  $\Delta P$  entre sus extremos y medir al gasto correspondiente en cada caso. Se pueden obtener unos 8 o 10 puntos experimentales uniformemente separados.

El siguiente paso sería la confección de una tabla en cualquier hoja de cálculo, como Excel o Kaleidagraph, que de forma automática, introduciendo los valores de  $\Delta P$  y de  $G$  nos calcule la viscosidad con la ecuación (7), la velocidad de cizalla,  $\dot{\gamma}$ , con la ecuación (11) y el esfuerzo de cizalla (aunque este no es imprescindible) con la ecuación (12). A continuación se construyen los reogramas representando la viscosidad  $\eta$  en función de  $\dot{\gamma}$ . Con un tubo de longitud  $L = 40$  cm y radio interno  $R = 1$  mm, y  $\Delta P$  entre 6000 y 50000 Pa los resultados obtenidos se presentan en la Figura 10, mientras que para las dos disoluciones de glicerina se obtienen dos rectas horizontales.

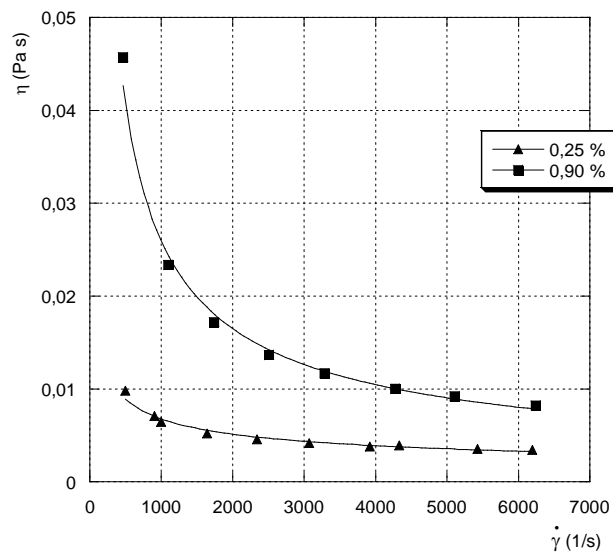


FIGURA 10. Viscosidad,  $\eta$ , de las dos dispersiones de goma xantana para distintas velocidades de cizalla,  $\dot{\gamma}$ .

## VI. CONCLUSIONES

La balanza electrónica es un instrumento muy preciso, disponible en cualquier laboratorio de estudiantes, que permite la realización de distintas prácticas para el estudio

de las principales características de los fluidos: la densidad, la tensión superficial y la viscosidad. Se han presentado distintos montajes experimentales utilizando una balanza electrónica, con un alto contenido pedagógico y fáciles de implementar en un laboratorio de estudiantes con poco gasto económico. Los montajes del estudio de la densidad, permiten medir densidades de sólidos y líquidos y observar la ley de acción-reacción de Newton y el principio de Arquímedes. En el montaje para el estudio de la tensión superficial, el estudiante puede ver y medir la fuerza de arranque de un anillo con un sencillo montaje que sustituye a los caros tensiómetros. Otro montaje nos permite medir la fuerza de arrastre de un fluido sobre un sólido, deducir la ley de Stokes, medir la viscosidad y elaborar reogramas, cosa que se suele realizar con los viscosímetros rotatorios en cursos especializados. Y por último, otro montaje nos permite estudiar el flujo en tuberías, deducir la ley de Poiseuille y también la caracterización de los fluidos a partir de reogramas.

## REFERENCIAS

- [1] Hofstein, A and Lunetta, V. N., *The laboratory in science education: Foundations for the twenty-first century*, Science Education **88**, 28-54 (2004).
- [2] Jimenez, L., Font, J. and Farriol, X., *Unit Operations Laboratory Using III-Posed Problems*, Int. J. Engng. **19**, 717-720 (2003).
- [3] Aufschnaiter, C. and Aufschnaiter, S., *University students' activities, thinking and learning during laboratory work*, Eur. J. Phys. **28**, S51-S60 (2007).
- [4] Planinsic, G., *Project laboratory for first-year students*, Eur. J. Phys. **28**, S71-S82 (2007).
- [5] Dolz, M., Delegido, J., Hernández, M. J. and Pellicer, J., *An inexpensive and accurate tensiometer using an electronic balance. An experiment on surface tension and critical concentration*, Journal of Chemical Education **78**, 1257-1259 (2001).
- [6] Dolz, M., Casanovas, A., Delegido, J. and Hernández, M. J., *An experimental setup to verify Stokes' law using an electronic balance*, Revista Mexicana de Física **50**, 29-32 (2004).
- [7] Dolz, M., Delegido, J., Casanovas, A. and Hernández, M. J., *A low cost experiment on Newtonian and non-newtonian fluids*, Journal of Chemical Education **82**, 445-447 (2005).
- [8] Ferguson, J. and Kemblowski, Z., *Applied Fluid Rheology* (Elsevier Applied Science, London, 1991).
- [9] Dolz, M., Hernández, M. J., Delegido, J. and Casanovas, A., *A laboratory experiment on inferring Poiseuille's law for undergraduate students*, Eur. J. Phys. **27**, 1083-1089 (2006).
- [10] Sears, F. W. and Zemansky, M. W., *Física* (Ed. Aguilar, Madrid, 1981).
- [11] Steffe, J. F., *Rheological methods in food process engineering* (Freeman Press, US, 1996).