

# Experimentos en Fluidos con Burbujas

Abigail Ganopol<sup>\*</sup>, Leandro Giuliani<sup>†</sup> y María Luz Martínez Ricci<sup>‡</sup>

Laboratorio de Física 5-Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Universidad de Buenos Aires

Febrero de 2002

**Este trabajo estudia la posibilidad de que un cuerpo flotante pueda hundirse debido a la introducción de burbujas en un fluido. Para ello se procedió al armado de un dispositivo y a la determinación de la densidad del agua con burbujas para la cual se hunde un cuerpo esférico. También se realizó un estudio para determinar si la presencia de burbujas en el agua modifica la viscosidad de la misma.**

## Introducción

En el presente trabajo se quiso verificar que un cuerpo puede hundirse si se introducen burbujas en el fluido en el cual flota.<sup>[1]</sup>

El principio de Arquímedes establece que todo cuerpo sumergido en un líquido ejerce una fuerza igual al peso del fluido desplazado por el cuerpo. Esto implica que la condición de flote es que la densidad del fluido sea mayor que la densidad promedio del cuerpo.

Si se tiene un recipiente con un líquido en el cual se introducen burbujas de aire uniformemente distribuidas, y pequeñas comparadas con las dimensiones de un cuerpo flotante, el mismo se hundirá si la densidad promedio del fluido con burbujas es menor que la suya.

El hecho de que un fluido pueda cambiar su densidad promedio por medio de la introducción de burbujas podría causar el hundimiento de barcos. En este caso, el burbujeo se produce por la liberación de metano ubicado en depósitos submarinos.

Otro fenómeno que las burbujas producen al introducirse en un fluido es una variación en la viscosidad del mismo. Este cambio provocaría que un cuerpo giratorio ubicado dentro del líquido tarde más o menos en detenerse.

---

\* mailto: [candelize@yahoo.fr](mailto:candelize@yahoo.fr)

† mailto: [leandroeg@yahoo.com](mailto:leandroeg@yahoo.com)

‡ mailto: [marliebe@yahoo.com](mailto:marliebe@yahoo.com)

## Marco Teórico

Sea un recipiente lleno de agua de sección circular en el cual se producen burbujas de manera uniforme desde el fondo, como se muestra en la siguiente figura.

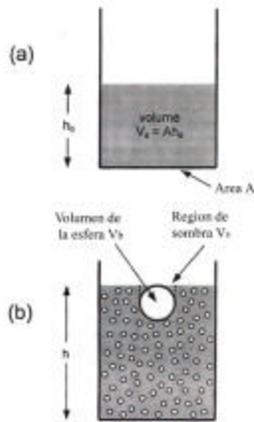


Figura 1: (a) Tanque con líquido sin burbujas. (b) Tanque con burbujas y esfera, en la que se puede observar la región de sombra

Se denominará densidad crítica ( $\rho_c$ ) al valor máximo de la densidad promedio del agua burbujeante tal que el cuerpo se hunda. Una expresión de dicha densidad puede obtenerse bajo las siguientes hipótesis:

- (a) La distribución de burbujas es uniforme dentro del líquido.
- (b) La sección de las burbujas es despreciable con respecto a las dimensiones del cuerpo.
- (c) Las burbujas no generan turbulencia.
- (d) No existe tensión superficial del líquido.
- (e) El flujo es cuasiestacionario.

Si el cuerpo utilizado es esférico, se encontrará tangencial a la superficie del fluido cuando el mismo alcance la densidad crítica. Sobre el cuerpo se observa una región de líquido sin

burbujas, llamada región de sombra, cuyo volumen es  $V_s = \pi R^3/3$  (figura 1.b).

Aplicando la condición de equilibrio para la esfera:

$$(\mathbf{r}_b V_b + \mathbf{r}_w V_s)g = \mathbf{r}_c (V_b + V_s)g$$

Donde:

- $\mathbf{r}_b$  = densidad promedio de la esfera hueca
- $V_b$  = volumen de la esfera hueca
- $\mathbf{r}_w$  = densidad promedio del agua en la región de sombra
- $V_s$  = volumen de agua en la región de sombra

Podemos obtener la densidad crítica del agua con burbujas:

$$\mathbf{r}_c = \frac{\mathbf{r}_b V_b + \mathbf{r}_w V_s}{V_b + V_s} \quad (1)$$

Teniendo en cuenta la figura 1.a, y llamando  $V_0$  al volumen inicial y  $A$  al área de la sección, se tiene

$$V_0 = h_0 A \quad (2)$$

Siendo además  $M$ , la masa del agua:

$$M = \mathbf{r}_w V_0 \quad (3)$$

Se tiene reemplazando (2) en (3):

$$M = \mathbf{r}_w h_0 A \quad (4)$$

Cuando la esfera está en el agua a punto de hundirse (figura 1b), el volumen de la región sin burbujas es  $[Ah - (V_b + V_s)]$ .

Si se desprecia la densidad del aire, la masa de agua es entonces  $M = \rho [Ah - (V_b + V_s)] + \rho_w V_s$ . Igualando esta expresión con la ecuación (4) se obtiene para la densidad crítica del agua con burbujas:

$$\rho_c = \frac{1 - \frac{V_s}{V_0}}{\frac{h}{h_0} - \frac{(V_b + V_s)}{V_0}} \rho_w \quad (5)$$

Que permite calcular  $\rho_c$  a partir de las magnitudes  $h$  y  $h_0$ .<sup>[1]</sup>

Si en el recipiente anteriormente descrito se hace girar un disco dentro del agua, la velocidad angular ( $\omega$ ) del mismo disminuirá exponencialmente con un factor de decaimiento  $\alpha$  proporcional a la viscosidad.

$$\omega = A \exp(-\alpha t) \quad (6)$$

## Arreglo Experimental

El experimento constó de dos instancias bien definidas:

1. Determinación de  $\rho_c$
2. Medición de la viscosidad

1.-

Para el armado del dispositivo se dispuso de una probeta de laboratorio sin base<sup>▲</sup> (diam: 8,5cm), una base acrílica, seis piedras porosas, mangueras, valvulitas y derivadores de pecera. Para cumplimentar con el requisito anteriormente mencionado de homogeneidad de burbujas en el agua se realizaron seis perforaciones en la base acrílica ubicadas en forma circular y equiespaciadas. En cada perforación fue ubicada una piedra porosa de pecera conectada a una manguera (Figura 2).

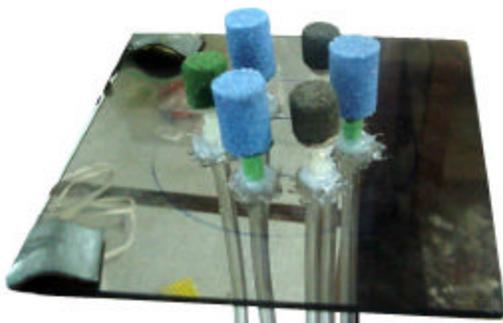


Figura 2: Disposición circular de las piedras porosas para una salida homogénea

Para asegurarse de que no existirían futuras pérdidas por las perforaciones realizadas anteriormente, se las sellaron con Fastix<sup>®</sup>. Con este mismo sellador se colocó y selló en la parte superior de la base acrílica la probeta, quedando el dispositivo como muestra la figura 3.



Figura 3: Dispositivo listo para ser utilizado

Para obtener la futura homogeneidad de las burbujas en el agua, se colocó en la parte terminal de cada una de las mangueras una pequeña válvula con la cual posteriormente se podría regular el caudal de burbujas de cada una de las piedras porosas. Para unir estas mangueras se colocaron unos divisores de manguera de pecera (figura 4).



Figura 4: Conexión de válvulas y derivadores del dispositivo

Para finalizar el armado del dispositivo se colocó en la parte externa de la probeta una sección de cinta métrica, dado que a la hora de realizar las mediciones de la densidad crítica del agua con burbujas se iba a necesitar medir la diferencia de nivel de agua.

Una vez transcurridas 48hs luego del armado del dispositivo para asegurar el fraguado del sellador, se llenó el dispositivo con agua y se comenzaron las mediciones.

Primeramente se procedió a regular cada una de las salidas de burbujas de las piedras porosas para asegurar la condición (a).

Para ello se conectó la manguera a una salida de aire comprimido\* que poseía una válvula. Se permitió la salida de cierta cantidad de aire a través de esta válvula principal y luego se reguló la salida de burbujas de las piedras mediante las valvulitas colocadas en los terminales de las mangueras hasta conseguir una salida de burbujas lo más homogénea posible.

Para esta segunda parte se necesitaba tener un objeto esférico al que se le pudiera variar la densidad. Para ello se consiguieron dos pelotitas huecas de diferente diámetro.

La densidad de la pelota se fue variando agregándole agua. Para la primer pelotita (Diám( $\phi$ ) = 3cm), se hizo variar la densidad de 0,84 a 0,98 y en el caso de la segunda ( $\phi$  = 3,7cm) de 0,8 a 0,98.

Para cada densidad de cada una de las pelotitas se realizó el siguiente procedimiento:

Primero se determinó la densidad de la pelotita pesándola en una balanza digital ( $\Delta P=0,1g$ ) y midiendo su diámetro para calcular el volumen correspondiente. Posteriormente, se colocó la pelotita en el agua y se fue aumentando el caudal de burbujas en la misma modificándolo

desde la válvula principal. A medida que el caudal aumentaba, el nivel del agua subía. La medición se realizaba en el instante en que la parte superior de la pelotita era tangencial al borde del agua (figura 5), en ese momento se consideraba que la pelotita comenzaba a hundirse y que por consiguiente esa era la densidad crítica del agua con burbujas.

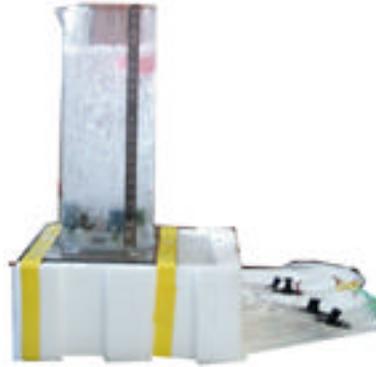


Figura 5: Momento en que el borde superior de la pelotita es tangencial al del agua. En este momento se define la densidad crítica.

A medida que se aumentaba el caudal de burbujas desde la válvula principal la presión sobre las mangueras aumentaba y dada una presión límite las mangueritas se separaban ya fuese de su respectiva valvulita o del derivador. Para solucionar este inconveniente se ajustó la unión con un alambre retorcido a modo de abrazadera. Realizando esta colocación en el dispositivo se pudo seguir aumentando el caudal sin mayores inconvenientes.

2.-

Se construyó un disco giratorio que se sumergió dentro del recipiente descrito en la sección anterior (figura 6). Este disco estaba en contacto con una ruedita que obstruía un fotosensor que, mediante el uso de una PC, permitía medir la velocidad angular del disco en función del tiempo.



Figura 6: Dispositivo para medir la viscosidad del agua sin y con burbujas

Para calcular la viscosidad del agua, se dio una velocidad angular al disco en forma manual y se levantó una curva de  $\omega$  en función del tiempo. Se repitió este procedimiento tres veces.

En segunda instancia, se agregaron burbujas al agua y se repitió la medición tres veces. En este caso, las burbujas fueron generadas soplando debido a la falta de aire comprimido.

## Desarrollo y Análisis

1.-

Luego de realizar el procedimiento anteriormente mencionado, se realizaron las mediciones pertinentes para cada una de las esferas huecas, variando la densidad respectiva. Al aumentar el caudal de burbujas se hacía cada vez más difícil determinar la altura del agua, entonces se realizó el siguiente procedimiento para lograr la mejor medición posible: se aumentó la cantidad de burbujas hasta lograr que la esfera estuviese tangencial con el borde superior de las burbujas. A continuación se aumentó levemente la cantidad de burbujas tal que la pelotita esta vez estuviese en contacto con el borde inferior de las burbujas. De esta manera se tomó el valor máximo y el mínimo de la altura y se promediaron ambos valores y el error es  $\frac{1}{2}$  de la diferencia.

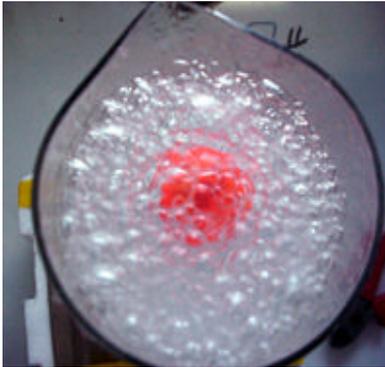


Figura 7: Instante en que la esfera hueca se encuentre tangencial al borde inferior de las burbujas

La siguiente figura (fig.8) muestra en línea azul la curva de predicción teórica correspondiente a la ecuación (1), en donde estamos considerando la región de

sombra  $V_s = \pi R^3/3$ . La línea punteada es la recta identidad correspondiente a cuando el agua tiene la misma densidad que la esfera, donde no se ha tenido en cuenta la región de sombra..

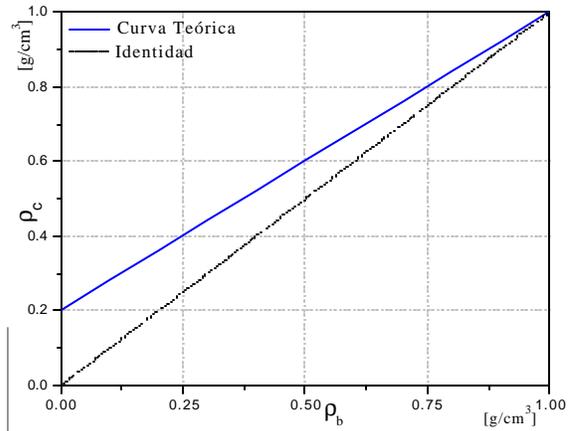


Figura 8: Curvas teóricas. La línea azul corresponde a considerar la región de sombra; la recta identidad a suponer que la densidad del agua es la misma que la de la esfera hueca al momento de hundirse.

- En el caso de la primer pelotita,  $\phi=3\text{cm}$ , se logró variar la densidad desde 0,8 hasta 0,98 obteniendo el siguiente gráfico (figura 9):

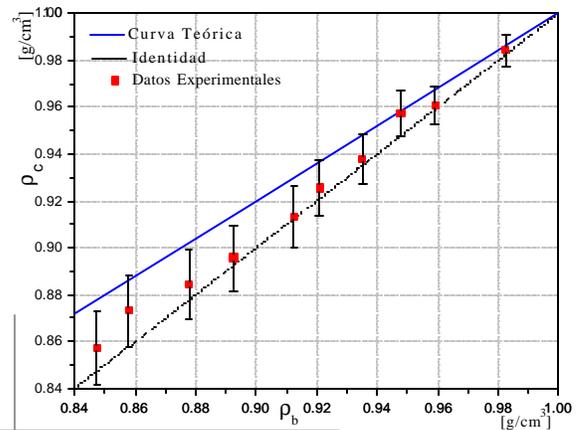


Figura 9: Gráfico que muestra las mediciones tomadas para la primer esfera ( $\phi=3\text{cm}$ ) en comparación con las curvas teóricas

- Para el caso de la segunda pelotita  $\phi = 3,7\text{cm}$ , el gráfico obtenido fue (figura 10):

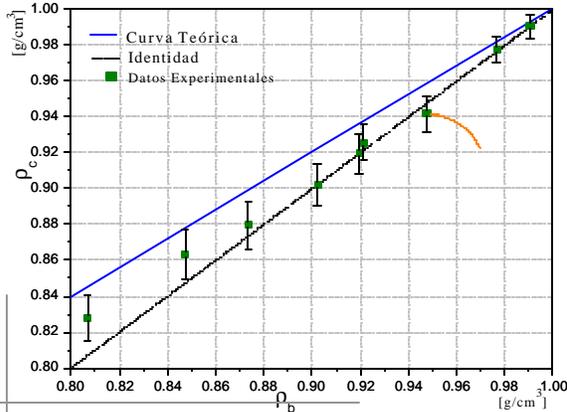


Figura 10: Gráfico que muestra las mediciones tomadas para la segunda esfera ( $\phi=3,7\text{cm}$ ) en comparación con las curvas teóricas

En ambas figuras se puede observar que los resultados obtenidos se encuentran entre las dos líneas teóricas anteriormente descritas, lo cual implicaría que la región de sombra real en nuestro experimento está presente pero no es perfecta como se supuso en el cálculo de la ecuación (1).

En la figura 10 se indica con una flecha un dato por debajo de la recta identidad; esto podría deberse a que la esfera hueca se encontraba bajo el nivel de flotación establecido anteriormente.

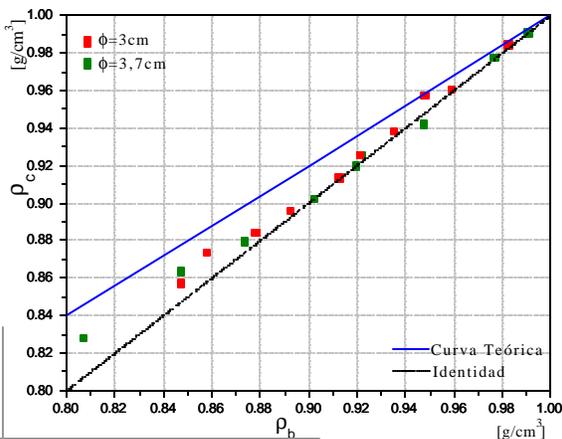


Figura 11: Gráfico comparativo de las mediciones tomadas para cada una de las esferas huecas. No se observa un cambio significativo por la variación del diámetro.

2.-

Posteriormente al armado del dispositivo con el disco, se procedieron a las mediciones como se indicó con anterioridad.

Las mediciones realizadas (independientemente de si se realizaba con o sin burbujas) mostraban una dependencia exponencial de la velocidad en función del tiempo como se indicó en la ecuación (6). Se realizaron estos gráficos en escala logarítmica y se ajustaron mediante una regresión lineal, donde la pendiente es proporcional a la viscosidad.

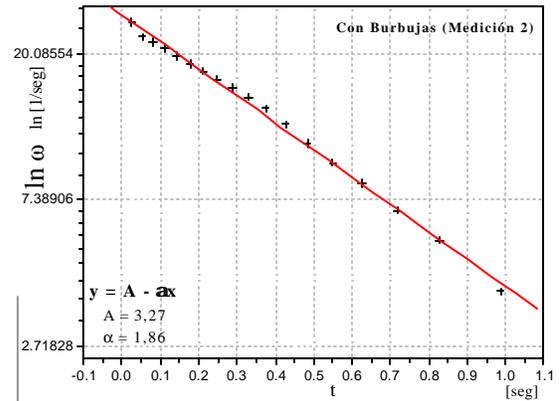


Figura 12: Gráfico de  $\ln \omega$  vs.  $t$ , en el cual se realizó un ajuste lineal

Los resultados arrojados en cada una de las mediciones para el parámetro  $\alpha$ , se muestran en la siguiente tabla:

Nº Medición	Sin Burbujas	Con Burbujas
1	1,43	1,79
2	1,37	1,86
3	1,11	1,45
<i>Promedio</i>	<i>1,30</i>	<i>1,7</i>

Tabla 1: Valores de parámetro  $\alpha$

Como existía mucha fuente de error de magnitud desconocida (ver conclusiones), las mediciones realizadas fueron de carácter cualitativo. Por lo tanto, se optó simplemente por mostrar los resultados obtenidos sin cuantificar el error en las mediciones.

## Conclusiones

En la experiencia realizada se demostró que efectivamente la introducción de burbujas en un líquido pueden hundir un cuerpo flotante.

Se puede observar que los resultados arrojados por la experiencia fueron satisfactoriamente descriptos por el modelo teórico propuesto. En las figuras 9 y 10, se puede observar que los datos se encuentran entre la recta identidad y la curva que considera la región de sombra. Este hecho se lo puede atribuir a que la región de sombra existente en el experimento fue menor que la considerada en el análisis teórico.

La figura 11 es un gráfico comparativo entre las mediciones realizadas para cada una de las esferas. En este gráfico se observa que con el método utilizado no es posible determinar una dependencia de la densidad crítica con el diámetro de las pelotitas ni realizar un estudio del empuje ascendente debido al impacto de las burbujas con el cuerpo. Asimismo tampoco fue posible apreciar los efectos de turbulencia o fuerzas de Bernoulli.

La mayor fuente de error se debió a la dificultad para determinar la altura de la columna de agua para un posterior cálculo de la densidad crítica. Se buscaron métodos alternativos para medir esta densidad y no se encontró ninguno más preciso que el utilizado.<sup>[2]</sup> Para obtener mayor información al respecto, se contactó al Dr. Bruce Denardo<sup>♦</sup>, autor del paper en que se basa este trabajo, para consultarle al respecto. El Dr. Denardo realizó pruebas con otros métodos, (a saber: medir la velocidad de

las burbujas mediante una filmación de video y sabiendo cuál era el caudal de aire entrante podía calcular la densidad crítica; otra alternativa que utilizó fue usar una señal acústica para medir la velocidad del sonido en el medio y también como otra posibilidad para medir esa densidad sumergió un capacitor de placas grandes para medir cómo varía la constante dieléctrica en función de las burbujas) pero concluyó que el método de calcular diferencias de altura, si bien es el más simple, también es el más preciso. El Dr. Denardo también llevó a cabo este experimento utilizando un tanque abierto, es decir, un tanque en el cual las burbujas no abarcan el total del recipiente sino que se encontraban bajo el cuerpo flotante. En este caso a pesar de confirmar que el cuerpo se hundía, no fue posible determinar la densidad del agua.<sup>[3]</sup>

Con respecto al estudio de la viscosidad del agua, se observa una tendencia de la misma a aumentar cuando se agregan burbujas en el líquido. Sin embargo no fue posible llegar a un resultado concluyente, ya que al tomar el promedio del factor  $\alpha$  con las tres mediciones realizadas sin burbujas y compararlo con el de las mediciones con burbujas se observa que la diferencia entre estos es del orden de las variaciones que se obtienen para cada una de estas situaciones.

Esto puede deberse al poco control que se tenía sobre las condiciones del sistema al realizar las mediciones. En primer lugar, la velocidad inicial que se le daba al disco se lograba manualmente sin poder controlar que sea la misma para cada medición. En segundo lugar, tampoco se pudo controlar que hubiese la misma

cantidad de burbujas en cada caso ya que estas eran creadas soplando al no disponer de la red de aire comprimido.

Por lo tanto, a pesar de haberse observado una tendencia a aumentar en la viscosidad del agua cuando se le agregan burbujas, recomendamos repetir las mediciones con más control sobre las condiciones arriba mencionadas.

#### **Bibliografía**

- [1] **Denardo, Bruce** -*When do bubbles cause a floating body to sink?*- Am.J. Phys.- **69** -1064 (2001)  
[2] **J. Fernández – E. Galoni**, Física Elemental, Nigar, Bs. As., 1962  
[3] **Denardo, Bruce**, Department of Physics, Naval PostGraduate School, Monterey, California 93943 - [denardo@physics.nps.navy.mil](mailto:denardo@physics.nps.navy.mil) (comunicación privada - March 2002)  
[4] [www.fisicareativa.com](http://www.fisicareativa.com). **S. Gil y E. Rodríguez**. *Métodos cuantitativos de análisis gráficos. Cap.3.3.*

---

\* Se agradece al Dr. Hugo Mosca por la colaboración en el armado de la probeta.

\* Se agradece al Dr. Carlos Acha y equipo por el préstamo y facilitación del material del Laboratorio de Bajas Temperaturas sin lo cual no hubiese sido posible este experimento.

\* Se agradece al Dr. Bruce Denardo, autor del paper [1], por la colaboración en la comunicación vía e-mail (Marzo2002)- ([denardo@physics.mps.navy.mil](mailto:denardo@physics.mps.navy.mil))