

# ESTUDIO EXPERIMENTAL DE FLUJOS MUY VISCOSOS UNIDIRECCIONALES

J. A. Diez\*, R. Gratton\*\*

*Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Pinto 399, 7000 Tandil*

J. Gratton\*\*

*Departamento de Física (Laboratorio de Física del Plasma), Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Pabellón I, Ciudad Universitaria, 1428 Buenos Aires*

Se estudió el desparramamiento de flúidos muy viscosos (aceites siliconados) inicialmente contenidos en una cubeta, que desemboca en un canal rectilíneo y horizontal. Después de una primera breve etapa subsiguiente al levantamiento de la compuerta, durante la cual las fuerzas inerciales tienen un rol importante, el flujo puede describirse por la aproximación de lubricación. Rapidamente, el flujo entra en régimen autosimilar en el cual el desplazamiento del frente en función del tiempo queda determinado por  $x_f \sim t^\delta$  con  $\delta = 1/5$ . Esta ley fue comprobada con muy buena precisión en distintas situaciones experimentales. Esto ocurre a pesar de que en el entorno del frente, la aproximación de lubricación pierde validez. Se realizaron una serie de experimentos tendientes a determinar la estructura del frente y la extensión de no validez de la aproximación de lubricación.

Este trabajo forma parte de una serie de estudios experimentales tendientes a verificar soluciones autosimilares en flujos de flúidos muy viscosos. En este caso se estudió el desparramamiento de una masa constante, cuya solución es bien conocida<sup>1,2</sup> y corresponde, para flúidos newtonianos, a un exponente de autosimilaridad  $d = 1/5$ . La posición del frente en función del tiempo ( $x_f \sim t^d$ ) viene dada por,<sup>1,2</sup>

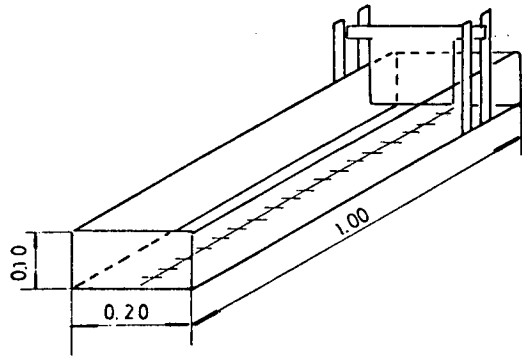
$$x_f = \xi_f \left( g A_0^3 / 3 \nu \right)^{1/5} t^{1/5}, \quad A_0 = h_0 x_0 \quad (1)$$

siendo  $\xi_f = 1.411$ ,  $g$  la gravedad,  $\nu$  la viscosidad cinemática y  $h_0, x_0$  la altura y longitud inicial del flúido, respectivamente.

En experimentos reportados en la literatura<sup>1</sup> ya ha sido medida la posición del frente en función del tiempo, comprobándose la validez de la ec. (1). Aquí, con el objeto de mostrar el grado de adecuación de técnicas experimentales para luego emplearlas en flujos más complejos<sup>6</sup>, se ha vuelto a medir  $x_f(t)$  y, además, se han añadido mediciones, a nuestro saber novedosas, referentes a los perfiles de altura y a la velocidad del flúido en la superficie libre del mismo.

Los experimentos se realizaron en un canal de acrílico de 20 cm de ancho y un metro de longitud, debajo del cual se colocó una escala milimetrada para medir la posición del frente (ver Fig.1). A 10 cm de uno de los extremos, una compuerta de acrí-

lico que corre por un par de guías situadas en los laterales, limita el reservorio inicial de aceite. La compuerta se abre manualmente y su tiempo de apertura es aceptablemente breve ( $\cong 0.1$  s). Se utilizó un aceite siliconado comercial (Agip 20W/50), cuya viscosidad, medida con un viscosímetro de Ostwald es  $\nu \cong 5 \text{ cm}^2 / \text{seg.}$  ( $\pm 10\%$ ) a  $20^\circ \text{ C}$  de temperatura.



**Figura 1: Esquema representativo del canal empleado para realizar los experimentos.**

Para observar la calidad de la superficie de escurrimiento empleada, se utilizó una sencilla técnica de medición basada en la ley de la reflexión de la luz y en el hecho de que la superficie de un líquido extenso en equilibrio es siempre plana y horizontal.

\* Becario del CONICET

\*\* Investigador del CONICET

Consiste en medir el ángulo que forman el rayo reflejado por la superficie y el rayo reflejado por una capa de agua depositada sobre la misma. El trabajo se realizó con incidencia normal sobre la superficie del líquido, lo cual se logró por autocolimación del haz de luz incidente con el haz reflejado.

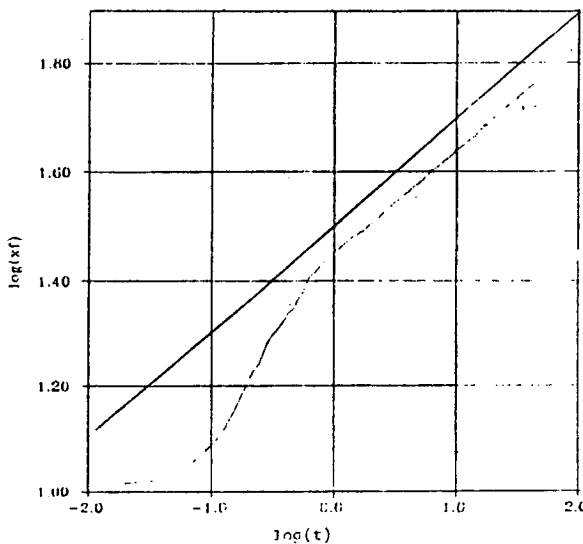
El corrimiento (X, Y) sobre una pantalla (situada a una distancia  $d = 2.5$  m.) del haz reflejado por la superficie rugosa respecto del reflejado por la superficie del líquido (agua) permite calcular las inclinaciones de la superficie en la forma,

$$\operatorname{tg} \alpha_x = -Y/D, \operatorname{tg} \alpha_y = -X/D, D = 2\eta(d+x) \quad (2)$$

siendo  $\eta = 1.33$ , el índice de refracción del agua, y  $x$  la coordenada horizontal medida desde el comienzo del canal. Entonces, si  $S(x, y)$  es la ecuación de la superficie rugosa, tenemos que:  $\operatorname{tg} \alpha_x = \partial S / \partial x$  y  $\operatorname{tg} \alpha_y = \partial S / \partial y$ . Las curvas de nivel así obtenidas muestran que la escala de las irregularidades corresponden a las décimas de milímetro.

Se obtuvieron mediciones de la posición del frente en función del tiempo empleando videograbaciones del frente y visualizándolas posteriormente cuadro por cuadro en un equipo reproductor profesional. El error en la posición es del orden de la mínima apreciación de la escala ( $\cong 0.5$  mm) y el tiempo se conoce con un error de 0.02 seg (50 cuadros por segundo).

En la Fig.2 se muestra la curva  $x_f(t)$  así obtenida para  $h_0 = 4.4$  cm y  $x_0 = 10$  cm ( $T = 18^\circ$  C). En to-



**Figura 2: Mediciones obtenidas por video-filmación de la posición del frente en función del tiempo con  $h_0 = 4.4$  cm y  $x_0 = 10$  cm ( $T = 18.4$  C).**

das las mediciones realizadas con diversos valores de  $h_0$  y  $x_0$  se obtuvieron valores para el exponente de autosimilaridad  $\delta$  que difieren en menos de un 1% del valor teórico  $\delta = 0.2$ . Para este caso, se tiene,

$$\delta = 0.2003 \pm 0.0002 \quad (3)$$

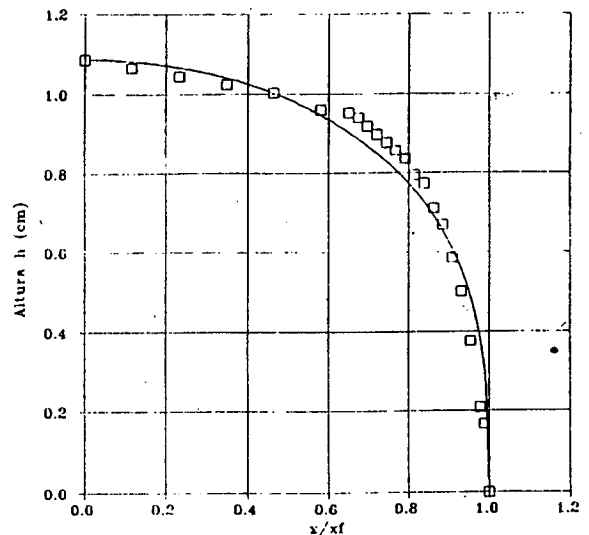
con 119 puntos a partir de  $t = 10$  seg., siendo  $t = 0$  el instante de apertura de la compuerta. Puede observarse que para  $t < 1$  s el flujo se ve muy influenciado por las condiciones iniciales, y que para  $t > 10$  s la tendencia hacia la ley de potencia autosimilar,  $x_f \sim t^\delta$ , es notoria.

Para medir la forma del perfil de altura del aceite se iluminó apropiadamente la corriente. El método utilizado consiste en registrar, fotográficamente o con una video-cámara, la forma que adopta la reflexión de un segmento luminoso, proyectada sobre la corriente. La línea se proyecta verticalmente sobre el eje del canal y la observación se realiza lateralmente. Las mediciones tomadas sobre una fotografía ampliada se muestran en la Fig.3. La línea de esa figura corresponde a la solución analítica,<sup>1,2</sup>

$$h = \left\{ \frac{9\nu}{10g} \frac{x_f^2}{t} \left( 1 - x^2/x_f^2 \right) \right\}^{1/3} \quad (4)$$

donde  $h(x/x_f)$  se ha calculado para  $t = 16.5$  seg. y  $x_f = 48.1$  cm.

Puede observarse que el acuerdo entre la curva



**Figura 3: Perfil de altura del fluido correspondiente a  $t = 16.5$  s y  $x_f = 48.1$  cm**

teórica y los puntos experimentales es aceptable mente bueno, y que la aproximación de lubricación,<sup>1,3,5</sup> describe cualitativamente bien esta zona.

Con el objeto de verificar el perfil de velocidades obtenido teóricamente de la aproximación de lubricación,<sup>1</sup>  $v = (3/10)(x/t)$ , donde  $v$  es la velocidad en la superficie del fluido, se midieron las líneas horarias de varias partículas superficiales (pequeñas burbujas). De acuerdo a la expresión anterior, la distancia  $\Delta x$  entre una dada partícula superficial y el frente viene dada por,

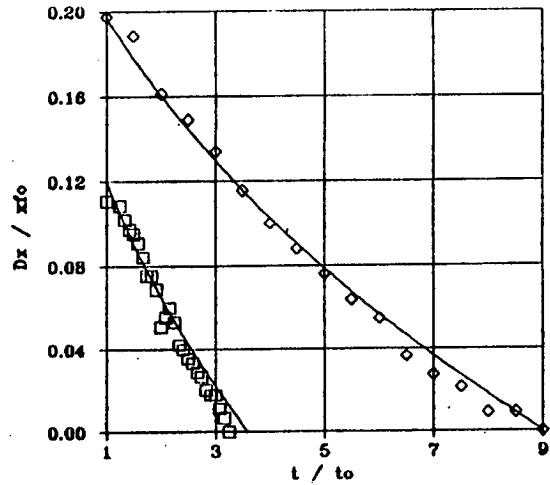
$$\frac{\Delta x}{x_0} = \tau^{1.5} (1 - \eta_0 \tau^{1/10}), \quad \tau = \frac{t}{t_0} \quad (5)$$

donde  $\eta_0 = x_{p0}/x_0$ , y  $x_{p0}$ ,  $x_0$  son la posición de la partícula y del frente, respectivamente, en un instante dado  $t_0$ . La comparación con los puntos experimentales, que se presenta en la Fig.4 para diversos valores de  $t_0$  y  $\eta_0$  muestra que la descripción teórica es muy buena hasta distancias muy próximas al frente ( $\cong 2-3$  mm).

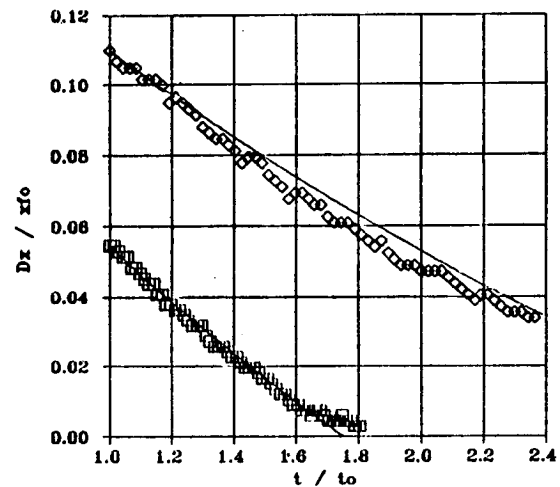
En conclusión, los experimentos realizados con flujos muy viscosos unidireccionales permitieron verificar con precisión varios aspectos de una solución autosimilar de primera especie conocida: la posición del frente en función del tiempo, el perfil de altura y la velocidad del fluido en la superficie. Se comprobó así que las técnicas experimentales utilizadas son adecuadas para el estudio de este tipo de flujos.

## REFERENCIAS

1. H. E. Huppert, *J. Fluid Mech* **121**, 43-58 (1982).
2. R. E. Pattle, *Q. J. Mech. Appl. Math.* **12**, 407-409 (1959).
3. J. Buckmaster, *J. Fluid Mech.* **81**, 735-756 (1977).
4. S. H. Smith, *Z. Angew. Math. Phys.* **20**, 556-560 (1969).
5. C. Nakaya, *J. Phys. Soc. Japan* **37**, 539-543 (1974).
6. J. A. Diez, R. Gratton y J. Gratton, Verificación Experimental de una Solución Autosimilar de Segunda Especie: Flujo de Lubricación Convergente, Reunión Nac. de Física, San Luis, 1989.



(a)



(b)

**Figura 4: Distancia entre el frente y una partícula superficial de fluido en función del tiempo para:**  
 (a)  $\eta_0 = 0.8891$  con  $t_0 = 12$  s,  $\eta_0 = 0.8024$  con  $t_0 = 2$  s,  
 (b)  $\eta_0 = 0.9455$  con  $t_0 = 47$  s,  $\eta_0 = 0.89$  con  $t_0 = 71$  s