

FLUJO AXIAL SOBRE VORTICES DE TAYLOR-COUETTE

A. Barrantes, M. Piva, A. Calvo,

*Grupo de Medios Porosos, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires,
Paseo Colón 850, 1063 Buenos Aires.*

J. E. Wesfreid

Ecole Supérieure de Physique Chimie de la Ville de Paris, Paris, Francia.

Se presentan los resultados experimentales sobre el comportamiento en función del tiempo de un trazador inyectado en un flujo de Taylor-Couette sobre el que se superpuso un flujo axial continuo.

Se trabajó con un equipo de Taylor-Couette de *gap* pequeño. La longitud es $L=32\text{cm}$, el radio del cilindro interior es de 45mm y el cociente entre los radios del cilindro interior y exterior es $\eta=R_1/R_2=0.79$.

Se inyectó un pulso de fluorescencia a $t=0$ cerca del cilindro interior en la posición $L/2$.

Por medio de secuencias fotográficas se estudió la estabilidad y propagación de los vórtices de Taylor en función del caudal del flujo lateral.

Con el objeto de estudiar la dispersión del trazador inyectado, se midió la concentración del mismo en función del tiempo en el líquido efluente.

INTRODUCCION

En un fluido en movimiento, el transporte de materia se debe a la combinación de la difusión molecular y de la convección, conociéndose al efecto total con el nombre de dispersión hidrodinámica.

En particular, en el desplazamiento de fluidos en medios porosos, la presencia de zonas con líneas de corrientes cerradas o vórtices, afecta al transporte de materia debido al fenómeno de entrapamiento. El objetivo de este trabajo es el estudio de este fenómeno en un flujo que presenta zonas de recirculación, cuantificando la manera en que éstas modifican la dispersión.

Se estudia, por medio de secuencias fotográficas y de medidas de la dispersión de un trazador en el líquido efluente, la dispersión del mismo sobre vórtices de Taylor-Couette a los que se les superpone un flujo axial continuo.

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Se trabajó con un equipo de Taylor-Couette⁽¹⁾ que consta de dos cilindros concéntricos de longitud $L = 32\text{cm}$; el mismo está en posición horizontal. El cilindro interior de 45mm de radio gira mientras el exterior, de 57mm , permanece en reposo. El espacio entre ambos cilindros (*gap*) está ocupado por agua destilada. Cuando la velocidad del cilindro interior supera un determinado valor

crítico (en nuestro caso $\Omega \approx 10\text{rpm}$), tiene lugar la formación de una estructura espacialmente periódica y estacionaria denominada vórtices de Taylor-Couette (fig.1).

A esta configuración se suma, por uno de los extremos del sistema, un flujo axial que produce una estructura de vórtices propagantes. El flujo axial es homogéneo sobre todo el *gap*, lo que se logra colocando un distribuidor de fluido sobre la tapa de ingreso del mismo. En $L/2$, se inyecta un pulso de fluorescencia de concentración conocida. La punta de la aguja utilizada para la inyección se ubica sobre el cilindro interior.

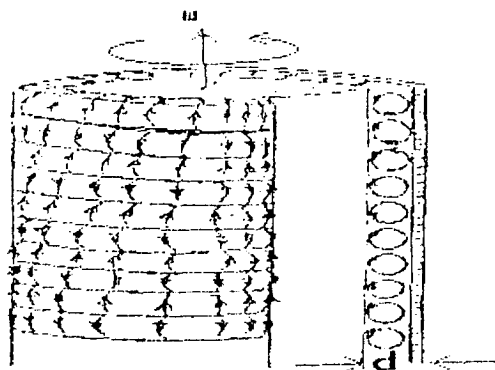


Figura 1: Flujo de vortices de Taylor-Couette

A la salida del equipo, un sistema de detección permite determinar la concentración de trazador en el líquido efluente. El detector está compuesto de una celda rectangular con dos ranuras a 90° (fig.2). Por una de ellas se hace incidir un haz de luz ($\lambda \approx 4900 \text{ \AA}$ correspondiente a la excitación de la fluoresceína) y por la otra ranura se detecta la fluorescencia por medio de un fotodetector. La señal obtenida, proporcional a la concentración, se registra a intervalos regulares de tiempo (10 seg).

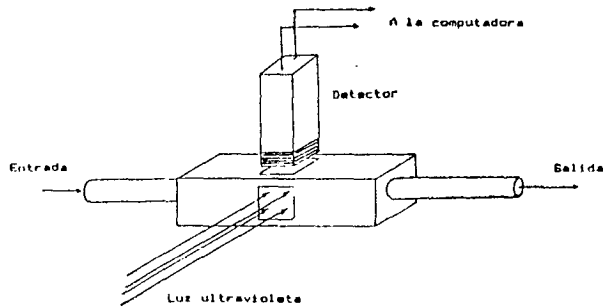


Figura 2: Esquema del equipo de detección de fluoresceína.

Simultáneamente, se ilumina la zona de inyección con un haz plano de luz que permite fotografiar un corte longitudinal de la estructura. Las secuencias fotográficas obtenidas permiten determinar la velocidad de avance del frente de trazador así como también la velocidad de avance de los vórtices para cada experiencia.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Se realizaron experiencias manteniendo constante la velocidad angular del cilindro interior para distintos caudales de inyección. El número adimensional que caracteriza al flujo axial es el número de Reynolds definido como $Re = q/A \cdot v$, donde q es el caudal, d el *gap*, A es el área de flujo y v la viscosidad del fluido.

En la fig. 3 se muestra la secuencia de fotografías correspondiente a $Re=0.53$. En la tabla I se indican las tres velocidades medidas experimentalmente para cada Re estudiado: la velocidad volumétrica ($V_{vol}=q/A$), la velocidad de desplazamiento de la estructura (V_{est}) y la velocidad de avance de la fluoresceína en las líneas periféricas (V_{frente}).

Re	V_{vol} cm/s	V_{est} cm/s	V_{frente} cm/s
0.37	0.0033	0.0037	0.0026
0.53	0.0047	0.0052	0.0043
0.68	0.0062	0.0065	0.0051
1.1	0.0093	0.0100	0.0293
1.6	0.0143	0.0149	0.0343

Tabla I

La velocidad de desplazamiento de la estructura coincide, dentro del error de medición ($\Delta v = 0.005 \text{ cm/seg}$), con la velocidad volumétrica. La velocidad de avance del frente de trazador, por el contrario, es en todos los casos mucho mayor que la volumétrica, llegando en las experiencias de menor caudal a superarla en un orden de magnitud. Esto se debe, como se observa en las fotos iniciales, a que parte del trazador inyectado es transportado por las líneas de corriente periféricas de los vórtices, desde el punto de inyección hacia los extremos del equipo. Como resultado, quedan coloreadas las líneas de corriente entre dos vórtices consecutivos (separatrices) y las próximas a las paredes de ambos cilindros.

En las fotos siguientes se observa como el trazador invade el interior de las celdas por difusión molecular⁽²⁾.

En la fig. 4 se muestran los resultados obtenidos durante las mismas experiencias, de la variación de la concentración del trazador con el tiempo en el líquido efluente.

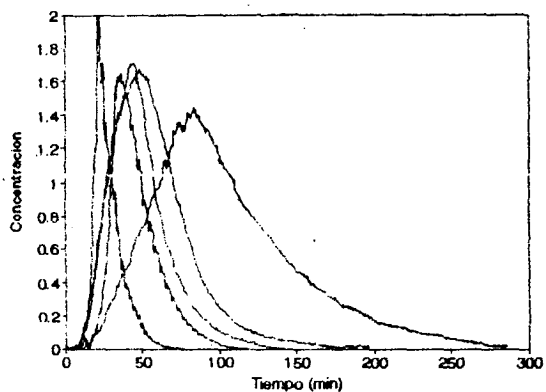


Figura 4: Concentración de fluoresceína en función del tiempo para los Re indicados en la Tabla I.

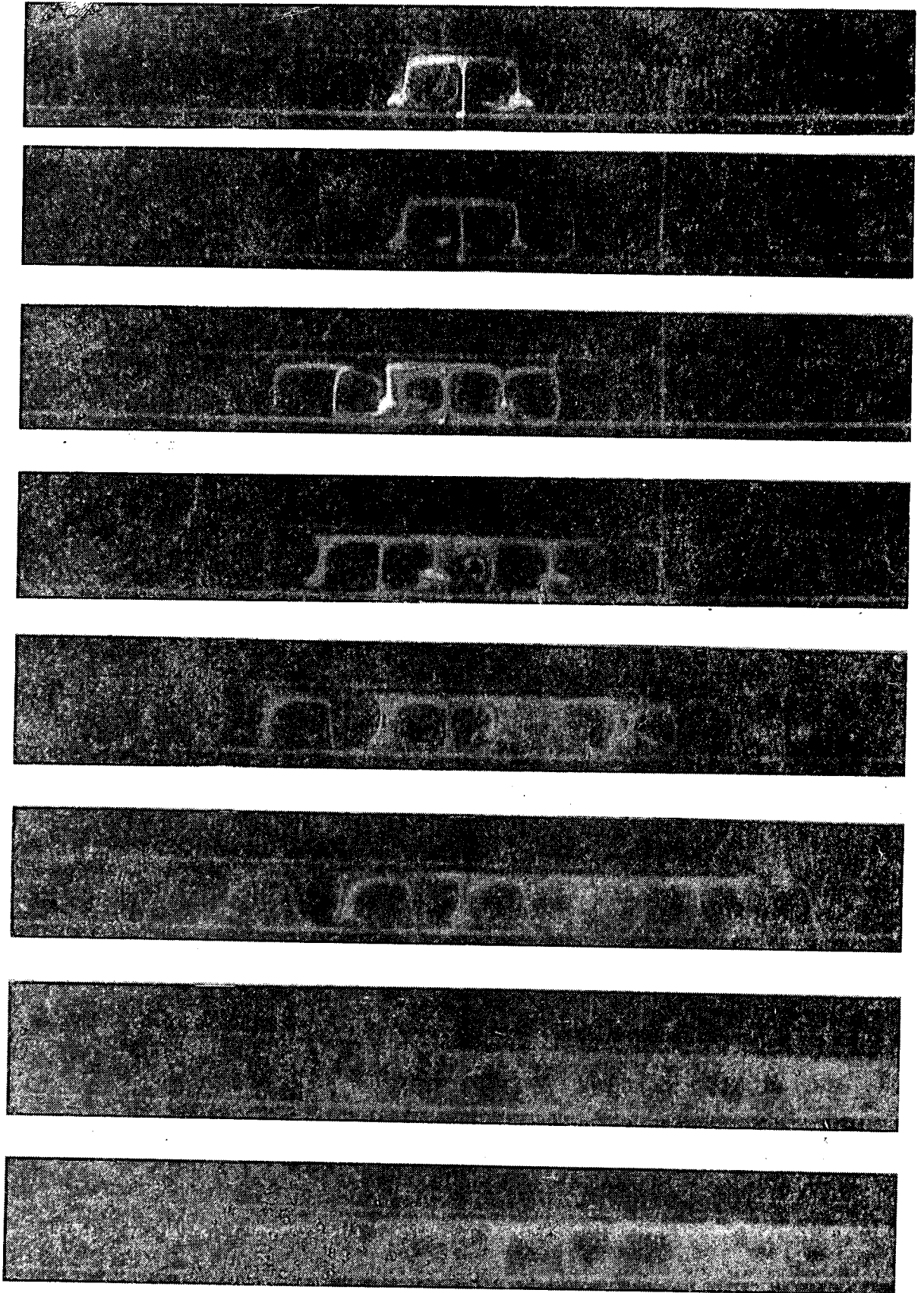


Figura 3: Secuencias de fotografías de la estructura. $Re=0.53$

$$Re = 0,53 \quad V_{vol} = 4,7 \cdot 10^{-3} \text{ cm/sg} \quad V_{sp} = 5,2 \cdot 10^{-3} \quad V_{frente} = 4,3 \cdot 10^{-2} \text{ cm/seg}$$

A caudales más altos, el máximo de la curva de dispersión aumenta, lo que indica que la concentración en el vórtice de inyección es mayor. Esto es así porque el trazador no alcanza a salir del mismo. Simultáneamente, el semiancho de las curvas disminuye, lo que indica que el tiempo requerido para expulsar todo el trazador del sistema es menor.

En las curvas se detectan irregularidades periódicas que corresponden al paso por el detector de la fluoresceína que se encontraba en las separatrices entre los vórtices. Esto pone de manifiesto la sensibilidad del equipo de detección frente a pequeñas diferencias de concentración.

Para cuantificar el efecto dispersivo se ha modelizado el sistema asimilándolo a un medio poroso equivalente de longitud $L/2$. Se realizó un ajuste de los datos experimentales utilizando la solución analítica de la ecuación de convección-dispersión⁽³⁾:

$$C(x,t) = \frac{M}{(4\pi Dt)^{1/2}} e^{-x^2/4Dt}$$

donde C es la concentración, M es la masa de trazador inyectado por unidad de área transversal, D el coeficiente de dispersión, y la velocidad volumétrica y t el tiempo. Esta ecuación da cuenta del comportamiento de un trazador en un medio en el que una fuerza exterior aplicada, produce su desplazamiento (convección) y la geometría aleatoria la dispersión.

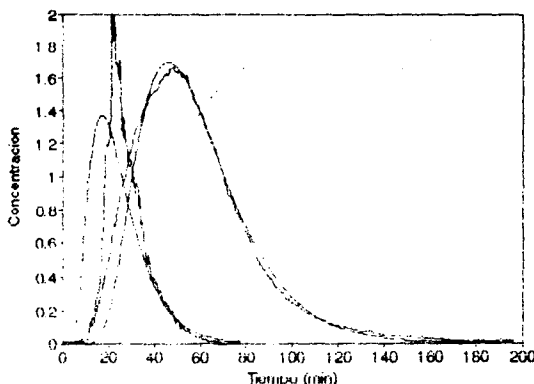


Figura 5: Ajuste teórico de los datos experimentales mediante la solución analítica de la ecuación de convección-dispersión.

En la fig. 5 se muestra el resultado de dicho ajuste para los Re extremos. Se ve que la concordancia entre los resultados experimentales y la solución analítica es muy buena para Re bajos y mala para Re altos. La mayor discrepancia, en este último caso, se presenta en el valor máximo de la concentración. Efectivamente, como se explicó más arriba, para velocidades grandes, el trazador no tiene tiempo de dispersarse a los vórtices vecinos, a través de las líneas de corriente periféricas, quedando atrapado en los vórtices centrales. Este fenómeno no es tenido en cuenta en la ecuación de convección-dispersión utilizada, ya que la misma no preve la existencia de zonas de atrapamiento. Por el contrario, para bajas velocidades, este efecto de atrapamiento se ve disminuido debido a que el tiempo de tránsito es mucho mayor y el trazador atrapado en el vórtice de inyección alcanza a incorporarse a los vórtices vecinos.

Es ilustrativo analizar el orden de magnitud de los coeficientes de dispersión obtenidos y su comportamiento en función del número de Reynolds (fig. 4). Se observa que los mismos varían, para las velocidades estudiadas, entre $7 \cdot 10^{-3} \text{cm}^2/\text{seg.}$ y $3 \cdot 10^{-2} \text{cm}^2/\text{seg.}$ Estos valores indican el alto grado de dispersividad de este sistema, ya que son comparables a los obtenidos en medios porosos de baja permeabilidad a altos flujos. En cuanto a la variación de los coeficientes de dispersión con la velocidad, la dependencia encontrada es aproximadamente cuadrática, mientras que en medios porosos es lineal para este rango de velocidades.

CONCLUSIONES

Se ha estudiado cuantitativamente la dispersión de un trazador en un flujo de vórtices de Taylor-Couette al que se le superpuso un flujo axial. Se obtuvieron coeficientes de dispersión, suponiendo que este sistema es equivalente a un medio poroso sometido a flujo axial en el que se inyecta un trazador. El ajuste obtenido resultó aceptable dentro de las limitaciones del modelo utilizado. Coats y Smith⁽⁴⁾ han propuesto un modelo para dispersión en medios porosos, que modifica la ecuación de convección-dispersión agregándole un término que tiene en cuenta la presencia de zonas de recirculación. Actualmente se está trabajando con este modelo, lo que permitirá evaluar más ajustadamente las propiedades de dispersión de

este sistema.

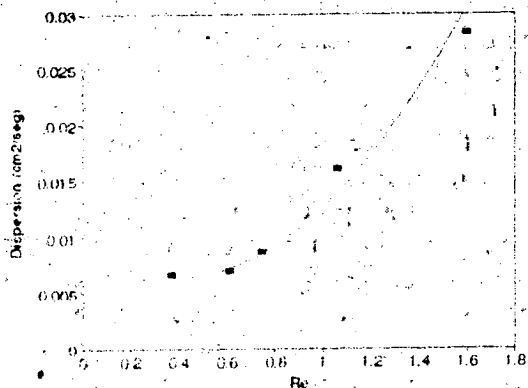


Figura 6: Coeficiente de dispersión en función del número de Reynolds.

REFERENCIAS

- 1- Tesis de Licenciatura, A. Barrantes, FCEyN; UBA (1989).
- 2- O. Cardoso, P. Tabeling, *Europhys. Lett.* 7, 3, 225 (1988).
- 3- J. Bear, *Dynamics of fluids in porous media*, Ed. American Elsevier (1967).
- 4- K. Coats, B. Smith, *Soc. Pet. Eng. J. Trans. AIME*, 231, 73 (1964).1