

# ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA MEZCLA DE DOS FLUIDOS EN LA INTERSECCIÓN DE CANALES MILIMÉTRICOS.

## EXPERIMENTAL STUDY OF THE MIXING AT THE INTERSECTION OF TWO MILLIMETRIC CHANNELS.

Etcheverry, F. <sup>(1)</sup>, Gomba, J. <sup>(2)</sup>, Wolluschek, C. <sup>(3)</sup>, Cachile, M <sup>(1)</sup>.

1Grupo de Medios Porosos, Facultad de Ingeniería, UBA, Buenos Aires, Argentina.

2Instituto de Física Arroyo Seco, UNCPBA, Tandil, Argentina.

3Mecánica de Fluidos e Ingeniería Térmica, Centro tecnológico Cemitec, Noáin, Navarra,  
e-mail:mcachil@fi.uba.ar

Recibido 20/12/2011; aprobado 30/07/2012

En este trabajo se presentan los resultados del estudio experimental de las propiedades de la mezcla de dos fluidos cuando interactúan dentro de canales circulares de 4 mm de diámetro interior, cuya intersección forma ángulos de 30, 60, 90, 120 y 150°. Se diseñó, puso a punto y calibró un sistema experimental con el que se puede administrar un caudal constante en ambos canales. Las propiedades de la mezcla se estudiaron inyectando una solución coloreada por uno de ellos, y agua pura por el otro. El análisis de las imágenes adquiridas se llevó a cabo mediante un sistema de visualización desarrollado a tal fin. Se investigó el efecto del ángulo de intersección en las características del mezclado para diferentes caudales. Se encontró que el comportamiento de la mezcla es función de ambos parámetros: caudal y ángulo de intersección. Se realizaron simulaciones numéricas, cuyo modelado considera tanto efectos difusivos como convectivos, comparándose sus resultados con los experimentales.

Palabras Claves: milichannels, dispersión

In this paper the results of experimental study of the properties of the mixture of two fluids as they interact within circular channels of 4 mm internal diameter, intersecting forms angles of 30, 60, 90, 120 and 150 ° are presented. We designed, tuned and calibrated an experimental system for which can a constant flow in both channels can be injected. The properties of the mixing was studied by injecting an aqueous dye solution through one of them, and pure water on the other. The analysis of the acquired images was performed by using a visualization system developed in the laboratory. The effect of the angle of intersection in the pattern of mixing for different flows has been investigated. It was found that the behavior of the mixing is a function of two parameters: flow rate and angle of intersection. Numerical simulations were performed, with a model that considers both diffusive and convective effects, and the results were compared to the experiments.

Key Words: millichannels, dispersion

### I. INTRODUCCIÓN

Los medios porosos están presentes en muchas ramas de la ciencia y la tecnología, como en la recuperación de petróleo, en la industria farmacéutica, en la geología y en la biología, etc [1,2]. Entre los parámetros más importantes que los caracterizan están la porosidad (cociente entre volumen libre sobre el total) y la permeabilidad, que es la resistencia que presenta al flujo y que para números de Reynolds suficientemente bajos es proporcional al cociente entre la diferencia de presión y el caudal que circula. Un efecto que tienen los medios porosos sobre los flujos aún a números de Reynolds bajos es, entre otros, el de producir dispersión debido a los diferentes caminos posibles a recorrer dentro de la matriz.

Tanto desde el punto de vista teórico como experimental, los medios porosos suelen ser modelados de diversas maneras: distribución de obstáculos o redes de canales de distintos tamaños. Los modelos de laboratorio están formados por celdas de Hele-Shaw, capilares, medios granulares, fracturas artificiales

(celdas de Hele-Shaw con espesor variable) [3-6]. Una aproximación adicional usualmente consiste en estudiar configuraciones bidimensionales para facilitar el análisis en un estudio teórico o la visualización experimental [7].

Por otro lado, un tema que ha recibido gran impulso en los últimos años es el de los mezcladores (mixers), en particular a escala micrométrica [8-14]. Si bien el presente trabajo no está orientado al estudio de los mismos, es importante resaltar que su investigación es fundamental para la comprensión de los fenómenos de transporte tanto en canales como en redes de canales.

Es en este campo en el que se han investigado diversas configuraciones geométricas que involucran interacciones entre dos o más flujos, y su influencia en las propiedades de mezclado o dispersión [13]. Cuando los números de Reynolds son bajos, como los utilizados habitualmente en microfluídica, la interacción se realiza con la difusión molecular como mecanismo preponderante. Por lo tanto, un factor esencial es el tiempo de contacto entre los flujos.

Un hecho a destacar es que, configuraciones simples, como las que se presentan aquí no han sido suficientemente investigadas en la literatura, por lo que resulta interesante su estudio.

La hipótesis principal de este trabajo es que la combinación sistemática de propiedades simples a escala del poro (poros individuales) resulta en propiedades complejas a nivel macroscópico, o escala del medio poroso.

La dispersión que produce un medio poroso tiene su origen principalmente en dos factores: la dispersión geométrica, que es el efecto que produce la diversidad de posibles caminos que puede recorrer el fluido entre dos puntos dados y la difusión molecular. El interés de las experiencias realizadas reside en poder controlar independientemente estos dos fenómenos. Si se ponen en contacto dos fluidos cuyas líneas de corriente son paralelas se producirá, en la zona de coexistencia, una región de mezcla difusiva [15]. Se espera entonces que la mezcla final, al cabo de cierto recorrido, dependa del tiempo durante el cual han estado en contacto, que también depende de la velocidad de los fluidos. En cambio, si los fluidos se ponen en contacto provenientes de canales que formen cierto ángulo distinto de cero, es razonable suponer que la difusión tenga un efecto mucho menor que en el caso anterior dado que el tiempo de interacción disminuye.

Puesto que para un régimen laminar (números de Reynolds bajos) y estacionario las líneas de corriente no se cruzan, la mezcla es producto principalmente de la difusión molecular.

En la primera etapa de este trabajo, que se presenta aquí, se utiliza la escala milimétrica, para pasar posteriormente a la escala micrométrica. Se tomó esta decisión con el objeto de explorar las características geométricas de los flujos en condiciones simples de implementar experimentalmente tanto para la visualización como para la inyección controlada de los fluidos.

## II. SISTEMA EXPERIMENTAL

El objetivo es estudiar el comportamiento de flujos líquidos cuando interactúan en geometrías restringidas, controladas y con configuraciones simples, tanto desde el punto de vista experimental como numérico.

Uno de los propósitos de este estudio es realizar el análisis del comportamiento del flujo y de su dispersión en la intersección de dos canales inicialmente separados variando los distintos parámetros geométricos: ángulo de la intersección, tamaños relativos, velocidades relativas, ruptura de la simetría, etc y finalmente la escala global del problema. Estos factores, en conjunción con las características de los medios porosos reales, determinan que la escala de los canales esté en el rango de las decenas de micrones hasta los pocos milímetros.

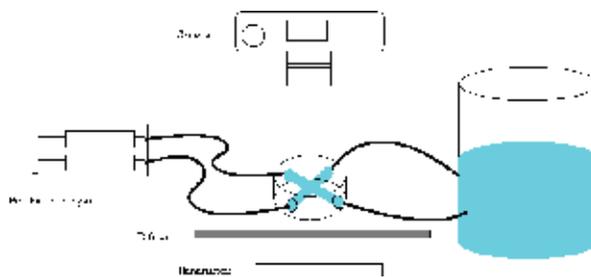


Figura 1. Esquema del dispositivo experimental

Las experiencias se realizaron en canales de escala milimétrica (Dinterno=4mm) construidos sobre un bloque cilíndrico de acrílico, perforados y pulidos internamente de manera tal que permitan una óptima visualización. Los líquidos utilizados son agua pura y solución acuosa de tinta de “water blue” que genera un contraste adecuado. Al ser de color azul es posible analizar la concentración de la misma utilizando solamente un canal de color de las imágenes, el color rojo que es el complementario al de la tinta. De esta manera, las imágenes a analizar son monocromáticas (niveles de gris), donde el nivel de gris más oscuro es una concentración mayor de tinta. En este aspecto, la uniformidad del sistema de iluminación es fundamental, dado que en los canales no es posible tener una zona de color “patrón” en todas las experiencias. La notación para los canales de entrada y salida de los líquidos se muestra en la figura 2, siendo EA y ET entrada de agua y tinta respectivamente, mientras que SA y ST representan las salidas correspondientes.

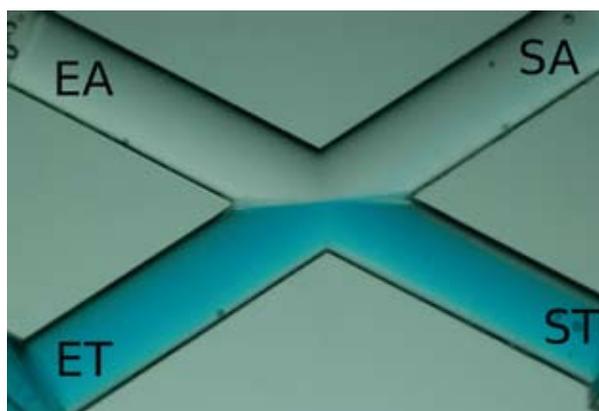


Figura 2. Vista superior, ángulo de intersección 60°

Como es usual en este tipo de mediciones, es necesario analizar las imágenes “diferencia” (imagen a tratar – imagen de “fondo”) con el objeto de eliminar todos los detalles superfluos y que solamente aparezca la zona del canal que se quiere medir, que es la que ha sufrido una variación en la concentración de tinta. Esta característica impone condiciones muy estrictas de estabilidad estructural al sistema de visualización. Utilizando el hecho de que el acrílico es transparente, la iluminación se realiza por transmisión, lo que facilita la cuantificación de la concentración de tinta en función de la posición y del tiempo.

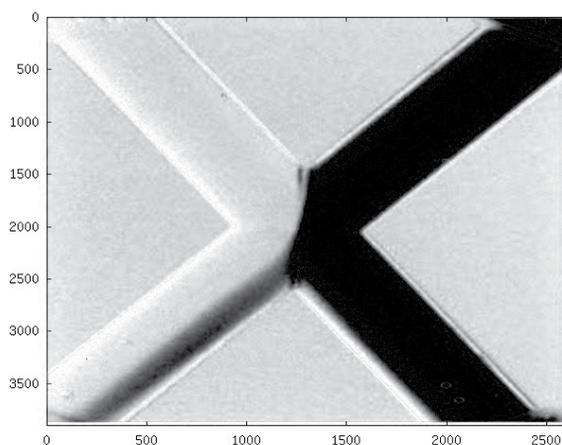


Figura 3. Vista superior, imagen a tratar-imagen de fondo.

Para la inyección se utilizó una bomba de dos jeringas de marca Harvard [16] que permite inyectar en ambas entradas igual caudal volumétrico. Las conexiones entre las jeringas y el sistema se hacen con cañerías de plástico standard para este tipo de experiencias. El empalme entre los tubos y los canales de acrílico se realiza de forma tal que no hay un salto en el diámetro interno y, al mismo tiempo, se mantiene estanco el mismo. Las tuberías a la salida del sistema son iguales en extensión y en curvatura de forma tal que la impedancia que presentan al flujo sea la misma. Cualquier diferencia entre ellas produce modificaciones en la simetría del flujo.

Un punto que se tuvo en cuenta es el de la inyección inicial de líquido, ya que las tuberías no pueden estar vacías antes del inicio de cada experiencia. Por esta razón, debían estar saturadas con los líquidos a utilizar, lo que lleva a la presencia de un comportamiento transitorio, cuyo efecto será analizado en trabajos posteriores. En el presente trabajo, sólo se presentan los resultados obtenidos en el régimen permanente, que se obtiene normalmente luego de la inyección de alrededor de 10 volúmenes de la zona de interacción.

### III. MODELO NUMÉRICO

Adicionalmente, se implementó un modelo numérico con el programa COMSOL. El modelo desarrollado puede verse en la referencia [17], aquí sólo se enumeran las condiciones básicas que se adoptaron

- Ambos fluidos son newtonianos
- Como condiciones de contorno se adopta un perfil parabólico de velocidad a la entrada, y presión constante ( $p=0$ ) a la salida de los canales.
- Condición de no deslizamiento en las paredes.
- Uno de los fluidos utilizados es agua, y el otro una solución acuosa de concentración tal que no se modifican los valores de densidad y viscosidad de la misma.

- La concentración es baja, de modo que las moléculas de soluto sólo interactúan con las moléculas de agua (sin interactuar con ellas mismas) y, por lo tanto, es posible utilizar la ley de Fick para describir el proceso de difusión.

- El diámetro de las cañerías es de 4 mm.

Los resultados obtenidos en el estudio numérico son los siguientes:

- Para todos los valores de Re (entre 5 y 150) y del ángulo de intersección, las líneas de corriente obtenidas son simétricas respecto del plano medio de inyección, lo que implica que para las mismas no existe cruzamiento entre canales de salida.

- La mezcla observada se debe exclusivamente a la acción de la difusión molecular. Este resultado implica que la mayor parte de la tinta, que entra por el canal ET, sale por el canal ST, tal como se muestra en la figura 4.

- Para números de Re altos, las líneas de corriente pierden la simetría upstream-downstream, manifestado por la aparición de una zona de baja velocidad como la mostrada en la figura 5.

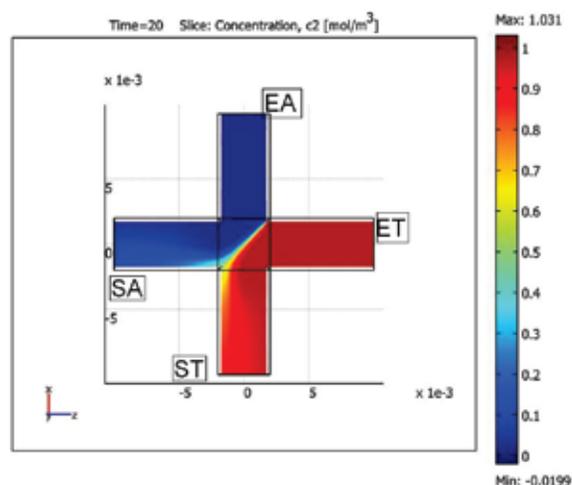


Figura 4: Gráfico de la concentración de tinta (en color azul, el agua en color rojo para mejor visualización), en régimen permanente.

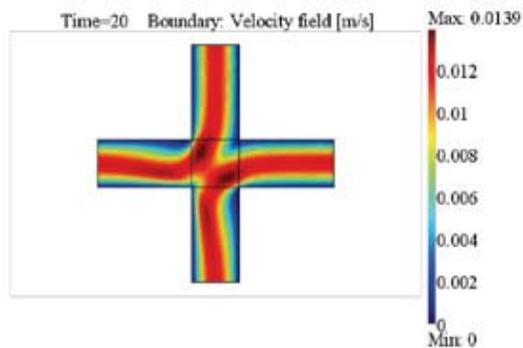


Figura 5. Módulo de la velocidad en régimen permanente.

#### IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se diseñó y puso a punto un sistema experimental que permite el estudio de la mezcla en la intersección de canales de 4mm de diámetro interno, cuya superficie interna fue tratada para la visualización de los líquidos. Se utilizó tinta “water blue”; soluble en agua, que en bajas concentraciones como las usadas en este trabajo produce una intensidad adecuada para la adquisición y tratamiento de las imágenes. Adicionalmente, se implementó un modelo numérico en COMSOL que utiliza dos fluidos miscibles con idénticas características físicas.

Dado el rango de números de Péclet estudiado ( $Pe > 10^3$ ), es razonable que la influencia de la difusión, tal como se observa en las experiencias, sea muy baja.

Este hecho es notable en la figura 6 donde se observa la presencia de tinta en el canal de salida del agua. En las figuras 7 y 8, donde la velocidad es mayor, ya no se observa ninguna presencia de tinta. En las simulaciones numéricas, también se observa la presencia de la tinta en la misma posición, según se muestra en la figura 4.

En las simulaciones numéricas, se observó que las líneas de corriente no se cruzan de canal (ver figura 4), lo que hace que el problema tenga un plano de simetría. En las experiencias no se observaron directamente las líneas de corriente, pero la “interfase” entre la tinta y el agua se encuentra en dicho plano de simetría.

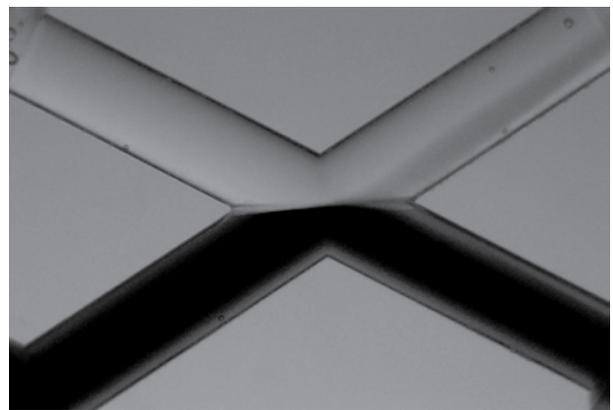


Figura 6: Ángulo de intersección: 60°, caudal: 1ml/min

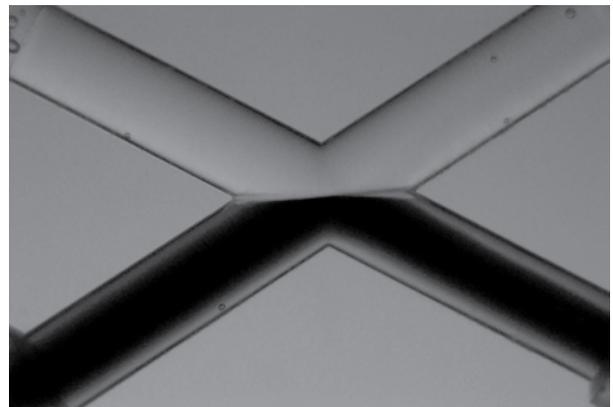


Figura 7: Ángulo de intersección: 60°, caudal: 5ml/min

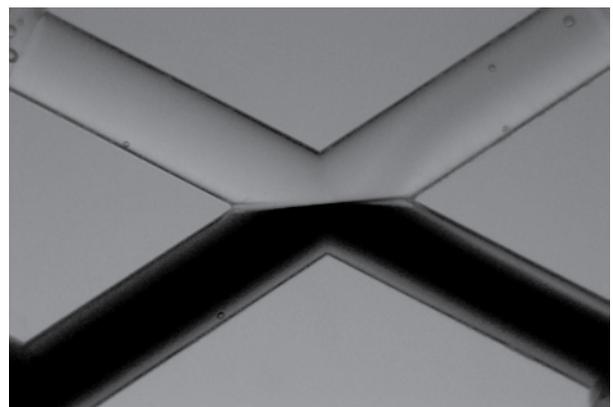


Figura 8: Ángulo de intersección: 60°, caudal: 10ml/min

Para  $Re$  suficientemente altos, se observa una oscilación en el flujo y evidencia de entrecruzamiento de las líneas de corriente, lo que se estudiará en una etapa posterior.

Resta cuantificar la concentración del colorante en función de la posición, principalmente en la zona de mezcla, con el objeto de compararla con los resultados obtenidos numéricamente.

En una etapa posterior de este trabajo, se utilizarán los resultados obtenidos a esta escala para el estudio a escala micrométrica.

## Referencias

1. - J. Bear, Dynamics of fluids in porous media, Elsevier New York, 1972.
2. - M. Blunt, Flow in porous media, pore-network models and multiphase flow, Curr. Op. in Coll. and Int. Sci., 6, 197-207, 2001.
3. - Lehmann et al., Impact of geometrical properties on permeability and fluid phase distribution in porous media, Adv. Wat. Res. 31, 1188-1204, 2008.
4. - A. Maximenko, V. Kadet, Determination of relative permeabilities using the network models of porous media, J. Pet. Sci and Eng., 28, 145-152, 2000.
5. - F. Teruel, Rizwn-Uddin, Characterization of a porous medium employing numerical tools: permeability and pressure-drop from Darcy to turbulence, Int. J. heat and mass transf. 52, 5878-5888, 2009.
6. - D. Córdoba, F. Gancedo, R. Orive, Analytical behavior of 2-D incompressible flow in porous media, J. Math. Phys. 48, 065296, 2007.
7. - P. Gaganis, E. Skouras, M. Theodoropoulou, D. Tsakiroglou, V. Burganos, On the evaluation of dispersion coefficients from visualization experiments experiments in artificial porous media, J. Hydrol., 307, 79-91, 2005.
8. - C. Chang, Y. Yang, T. Yen, C. Chen, Numerical investigation into thermal mixing efficiency in Y-shaped channel using Lattice Boltzmann method and field synergy principle, Int. J. Ther. Sci, 48, 2092-2099, 2009.
9. - H. Dogan, S. Nas, M. Muradoglu, Mixing of miscible liquids in gas-segmented serpentine channels, Int. J. Mult. Flow, 35, 1149-1158, 2009.
10. - S. Gokaltun, G. Dulikravich, Lattice Boltzmann computations of incompressible laminar flow and heat transfer in a constricted channel, Comp. Math. with Appl., preprint, 2009.
11. - V. Kumar, M. Aggarwal, K. Nigam, Mixing in curved tubes, Chem. Eng. Sci., 61, 5742-5753, 2006.
12. - P. Luo, Y. Cheng, Y. Jin, W. Yang, J. Ding, Fast liquid mixing by cross-flow impingement in millimeter channels, Chem. Eng. Sci., 62, 6178-6190, 2007
13. - N. Nguyen, Z. Wu, Micromixers - a review, J. Micromech. Eng., 15 R1-R16, 2005.
14. - H. Wang, W. Li, A novel 3D porous micromixer fabricated using selective ultrasonic foaming, J. Micromech and MicroEng. 17, 1835-1842, 2007.
15. - W. Jost; Diffusion in Solids, Liquids, Gases, Academic Press, 3rd Ed., NY, 1960.
16. - Harvard Apparatus, modelo de dos jeringas Nro. 55-2226, <http://www.harvardapparatus.com>
17. C. Wolluschek, F. Etcheverry, M. Cachile, J. Gomba, Experimental and numerical fluid flow study on an X-millichannel, Proceedings de la COMSOL Conference, Paris 2010.