

TRANSPORTE DE PARTÍCULAS NO TRAZADORAS EN FLUJOS SIMPLES

TRANSPORT OF NON TRACER PARTICLES IN SIMPLE FLOWS

M. Brabat ^a, V.M. Freytes ^{b,c}, M.A. Cachile ^{b,c}, M.V.D'Angelo ^{b,c,*}

a ENSEIRB-MATMECA, Graduate School of Engineering, Talence, France

b Universidad de Buenos Aires, Grupo de Medios Porosos - LIA. Av. Paseo Colón 850, CABA.

c CONICET

Recibido: 05/04/18; aceptado: 28/04/18

Se realizó un estudio experimental del comportamiento de partículas transportadas en un flujo simple. Para ello se utilizaron pares de canales milimétricos con un ángulo de intersección de 0°, y un segmento de comunicación entre ellos, por los cuales se inyectan simultáneamente dos fluidos miscibles. Uno de los fluidos es una solución de agua que contiene un colorante (trazador pasivo) y microesferas (partículas no trazadoras) de flotabilidad neutra, el otro fluido está formado por la misma solución, pero sin ningún tipo de trazador. Para el análisis sistemático de las trayectorias de las partículas, se implementó un dispositivo experimental con técnicas de rastreo de partículas. Los experimentos fueron filmados con alta resolución temporal y espacial utilizando una cámara de alta resolución acoplada a una lupa de laboratorio. Las imágenes se analizaron con un programa de procesamiento desarrollado en el laboratorio. Se analizaron las trayectorias de las partículas para distintos número de Reynolds, obteniéndose la distribución, las velocidades y la concentración de microesferas a la salida de cada canal en función de los parámetros estudiados

Palabras clave: milifluídica, transporte de microesferas, trazadores activos.

An experimental study on the behaviour of transported particles in a flow of simple geometry has been developed. A pair of millimetric channels that cross at 0°, with a shunt between them where two miscible fluids are injected at constant flow rate. One of the fluids is a solution of dye (passive tracer) as well as microbeads (non passive tracer) of neutral buoyancy. The other fluid is made of the same solution but without any tracer. For the systematic study of the particle trajectories an experimental tracking method has been set up. The experiments have been recorded with a high spatial and temporal resolution camera coupled to a low power microscope. The images have been analysed with a coded processing program developed in our laboratory. The trajectories of the particles, with different Reynolds number, have been analysed, in order to obtain the distribution, speed and bead concentration at each outlet as a function of the used parameters and have been compared with previous results on similar geometries and miscible fluids.

Keywords: milimetric fluids, microbeads transport, active tracer

I. INTRODUCCIÓN

El comportamiento de los fluidos en la intersección de canales y el comportamiento de partículas que son transportados por dichos fluidos es crítico en procesos tales como mezcla, reacciones químicas o intercambio de calor.

Muchas aplicaciones industriales utilizan propiedades de flujos en medios porosos y del transporte de partículas en dichos medios. La intersección de gargantas porales en dichos medios puede modelarse, de manera simplificada, como la intersección de dos canales rectos. En este sentido el presente trabajo permite estudiar, de manera local, el movimiento de partículas en dichos medios.

En las industrias del petróleo o en el sector energético, por ejemplo, la extracción de materias primas se logra mediante la perforación e inyección de fluidos, gases y partículas [1]. Los procesos de descontaminación en suelos se basan en los mismos principios, ya que debe realizarse la inyección de flujos de numerosas especies químicas en el suelo [2].

Por otro lado, la separación y clasificación de partículas es de importancia fundamental en las ciencias biológicas, ya que son pasos esenciales en la investigación en biología celular y en muchos métodos de diagnóstico y terapéuticos [3]. Ejemplos de aplicaciones en métodos de diagnóstico son, por ejemplo, el conteo con células limpias, libres de plasma, para la detección temprana del cáncer a través de biomarcadores transmitidos en el flujo sanguíneo [4], o la posibilidad de utilizar células fetales que están presentes en cantidades limitadas en el sistema circulatorio materno o el cordón umbilical en el diagnóstico prenatal no invasivo [5]. Entre las aplicaciones terapéuticas podemos mencionar la transfusión de plaquetas purificadas durante cirugías [6]. En biología celular muchas veces es necesario aislar subpoblaciones de células para reducir la heterogeneidad en muestras, tales como células madre, células cancerígenas o glóbulos blancos [7].

En el presente trabajo se estudia el transporte de partículas pequeñas (microesferas rígidas), pero de diámetro tal que puede contener varias líneas de corriente,

* vdangelo@fi.uba.ar

por lo que se llaman “no trazadoras”, y que son transportadas por un fluido en un flujo de geometría simple. Se estudia el apartamiento de sus trayectorias al de seguidas por las partículas de fluido.

En trabajos previos [8] se estudió experimentalmente la transferencia de fluido y solutos en juntas-X entre dos canales rectos. En éstos se inyectaban, a un mismo caudal, dos soluciones de agua idénticas, salvo por la presencia de un trazador pasivo (rodamina) en una de ellas para caracterizar el flujo.

El movimiento de partículas en flujos no uniformes ha sido estudiado en diversas ocasiones a lo largo de los años [9-11]. En estos trabajos se encontró que si una partícula se encuentra en una zona de flujo donde la velocidad cambia a lo largo de una distancia comparable a su tamaño, aparece una fuerza en el sentido de disminución de dichos gradientes. Dicha fuerza aumenta con la velocidad media del flujo, con el cociente entre el diámetro de la partícula y el ancho del canal y, en el caso de un flujo parabólico, se anula en el centro del canal, donde los gradientes de velocidad se anulan.

II. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

El sistema experimental consiste en un par de canales paralelos que se intersecan formando un ángulo de 0° entre si, lo que define un plano de simetría. Los canales, de sección cuadrada, son maquinados en una placa de plexiglás transparente mediante una fresadora numérica; con ancho y profundidad de 3mm. La distancia entre canales en el punto de intersección de los mismos es $L=2l=9\text{mm}$. Los fluidos se inyectan simultáneamente por dos canales adyacentes de tal manera que la salida se encuentra a 180° de la entrada (ver Figura 1). Uno de los fluidos es una solución que contiene un colorante (trazador pasivo, dado que es un colorante) y microesferas de flotabilidad neutra y tamaño comparable al ancho de los canales, es decir partículas no trazadoras ya que debido a su tamaño es mucho mayor que la longitud característica de variación del campo de velocidades. El otro fluido es la misma solución, pero sin ningún tipo de trazador ni partículas.

Cada entrada está conectada a una de las jeringas de una bomba Harvard 55-2226 de doble jeringa que inyecta los fluidos a un mismo caudal constante. El dispositivo se ilumina desde su parte inferior de manera uniforme mediante un arreglo de luces led de manera tal de poder distinguir las partículas y su posterior seguimiento.

En nuestro estudio se utilizaron partículas en pequeñas concentraciones, a las cuales se podrá seguir de manera individual mediante PTV (Particle Tracking Velocimetry). Como se mencionó anteriormente se desea estudiar si existe una desviación en las trayectorias de dichas partículas respecto de las líneas de corriente. Para una primera serie de experiencias realizadas se eligió entonces un caso extremo, que produce el mayor efecto dinámico en el fluido y las partículas: Una configuración-H con $\alpha=0^\circ$ que produce un giro en la trayectoria del fluido de 180° , y una distancia entre canales $L=9\text{mm}$ (ver Figura 1).

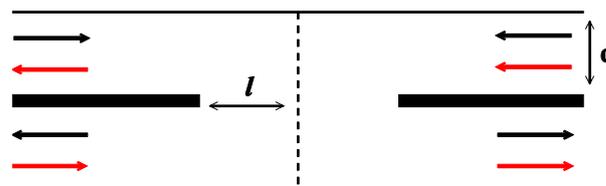


Figura 1: Dispositivo experimental [8]. Las flechas negras corresponden a la inyección en la configuración-H y las flechas rojas a la inyección en la configuración-X. La distancia entre canales es $L=2l$

Los fluidos inyectados son soluciones de glicerina-alcohol, una de las cuales posee un trazador pasivo, rodamina 6G y microesferas de poliestireno en suspensión de $500\mu\text{m}$ y densidad $1,02\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. La rodamina permite verificar visual y rápidamente la simetría del flujo durante el transcurso de la experiencia. Esto permite asignar que una desviación de las trayectorias de las microesferas con respecto a las trayectorias de flujo esperadas no se debe a una asimetría presente en el flujo si no a un comportamiento debido a que el tamaño de las mismas es mayor que las longitudes características presentes en el flujo. Inicialmente se utilizaron diversas soluciones de agua y glicerina, sin embargo las microesferas en presencia de soluciones acuosas se aglomeran, pero este hecho no se observa en las soluciones utilizadas. Por esta razón se utilizó una solución, no polar, de glicerina-alcohol (49% glicerina y 51% etanol) con una densidad igual a la de las microesferas utilizadas. A partir de las viscosidades de los fluidos, y utilizando la ley de Kendall Monroe se obtiene una densidad y viscosidad para la solución igual a $\rho=1,1\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ y $\mu=0,43\text{mPa}\cdot\text{s}$, respectivamente, y posee comportamiento newtoniano.

Los canales se colocan sobre la platina de una lupa Leica (aumento 4X) que posee una cámara de alta resolución, uye IDS, conectada a una computadora, lo que permite registrar la evolución de las experiencias a 130 imágenes por segundo. El sistema de iluminación consiste en un arreglo de leds, situado debajo de la lupa, que permite la visualización de las partículas.

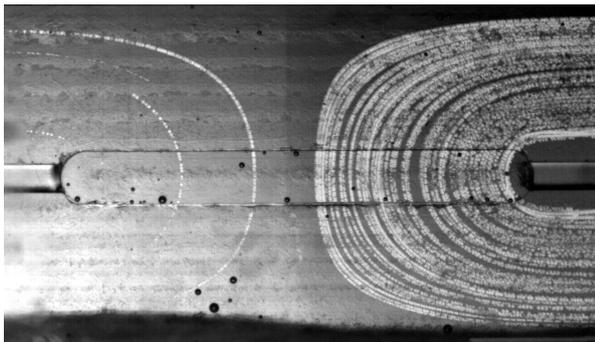
III. DETERMINACIÓN DE LAS TRAYECTORIAS

Una vez registradas las imágenes para cada experimento, se analizan utilizando el programa ImageJ. Un primer análisis consiste en realizar una superposición de las imágenes para observar cualitativamente el comportamiento de las trayectorias. En la figura 2 se muestran distintas superposiciones, para los caudales extremos $Q=5\text{mL}/\text{min}$ y $Q=14\text{mL}/\text{min}$.

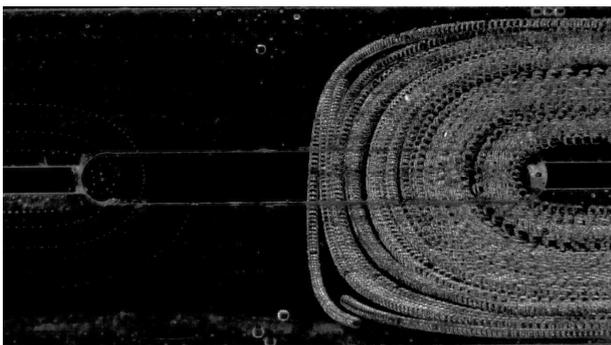
En la figura 2 puede observarse que, para caudales de inyección pequeños, las trayectorias de las partículas son simétricas con respecto al plano horizontal de la imagen mientras que, para caudales más altos, las trayectorias de las partículas se desvían del comportamiento simétrico, distinto del flujo, que sigue siéndolo [8]. Estudiaremos, entonces, en qué condiciones el comportamiento de las micropartículas sigue la trayectoria esperada del fluido o no.

Para la detección de las partículas se utilizó el "plugin Mozaic", que permite detectar todas las partículas que cumplen con determinadas condiciones.

Por un lado en el proceso de seguimiento de partículas se tienen que considerar 3 parámetros: el diámetro mínimo y máximo aceptado para las partículas y un parámetro llamado "el percentil". El percentil determina qué píxeles brillantes son aceptados como partículas. Este último parámetro hace las veces de un umbral, y es un parámetro muy sensible ya que su valor afecta la detección de las partículas. Sin embargo este plugin no es adecuado para construir las trayectorias. Por esta razón se decidió diseñar un programa en C++ que puede construir las trayectorias a partir de las coordenadas de las partículas. Este programa se basa en observaciones simples, pero efectivas para construir las trayectorias, que tiene por objetivo simplificar el tratamiento de datos y el análisis del comportamiento de las partículas. Para construir las trayectorias se almacenan los datos de cada coordenada para cada imagen. Una trayectoria será una serie de coordenadas de diferentes imágenes. El objetivo principal para la construcción de las trayectorias es determinar qué coordenada de la imagen $i+1$ podría estar vinculada (o no) a una coordenada de la imagen i .



(a)



(b)

Figura 2: Superposición de imágenes de experiencias
(a) $Q=5\text{mL/min}$, (b) $Q=14\text{mL/min}$

El flujo estudiado es un flujo simple por lo que se conoce con cierta precisión el comportamiento del mismo. Es por eso que para construir las trayectorias de las partículas se decidió separar el problema por zonas en las que el flujo admite un comportamiento general previsible, lo que facilita el estudio del problema. Se definieron

entonces distintas áreas en el plano del dispositivo que permiten facilitar la identificación de las trayectorias y que se observan en la figura 3. Para cada área se tiene entonces una "dirección del desplazamiento de partículas" esperada, lo que permite agilizar el tratamiento de los datos.

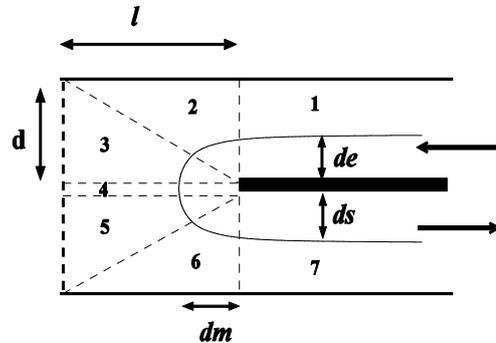


Figura 3: Regiones para determinar la dirección de las partículas para la construcción de las trayectorias y distancias utilizadas para definir parámetros de simetría

El esquema de velocidades es simétrico respecto de la horizontal. En la zona 1 (respectivamente zona 7) el desplazamiento de la partícula es horizontal. En la zona 2 (respectivamente zona 6) el desplazamiento de la partícula tiene una inclinación de un ángulo α_1 respecto de la horizontal. En la zona 3 (respectivamente zona 5) el desplazamiento de la partícula tiene una inclinación de un ángulo α_2 respecto de la horizontal. En la zona 4 el desplazamiento de la partícula es vertical.

Para la construcción de las trayectorias de las partículas se deben tener presente diferentes aspectos. Aparte del ángulo, se utilizó otro parámetro que representa la distancia característica que recorre una partícula entre una imagen y la siguiente, d_{max} , que depende tanto del caudal como de la cadencia de imágenes y que es determinado para cada experiencia. Entonces, para la construcción de las trayectorias de las partículas se diseñó el siguiente algoritmo. Cada partícula se representa por su posición en la imagen i : $(x,y)_i$ y para cada experiencia se calcula d_{max} .

1. Se calcula la distancia entre cada $(x,y)_i$ y todas las $(x,y)_{i+1}$.

Si la distancia es menor que d_{max} la coordenada se guarda.

Si sólo se guarda una coordenada, $(x,y)_{i+1}$ se agrega a la trayectoria que termina en $(x,y)_i$.

- Si no se guarda una coordenada, la trayectoria que finaliza en $(x,y)_i$ se da por terminada. Si hay más de un coordenada posible, el algoritmo pasa al próximo paso.

2. En este paso se elige, como posible posición en la imagen $i+1$ a aquella que está más cercana a las direcciones de la figura 3. Si ninguna cumple con esa condición, se da por terminada la trayectoria.

Como se explicó previamente, las trayectorias de las partículas se determinan gracias al seguimiento de las mismas y al procesamiento de imágenes.

En una primera etapa se obtienen todos los puntos que pueden construir una trayectoria, figura 4(a). Algunos puntos no aparecen en la zona central debido al diseño de estos canales con la fresadora, lo que impide que los programas de detección encuentren allí las partículas. Luego se analizan todas las trayectorias creadas por el programa en el procesamiento. Algunas trayectorias que no tienen sentido físico o son demasiado cortas son descartadas. Se decidió filtrar estas trayectorias a través del código de procesamiento. Se filtran las trayectorias más cortas, con menos de 7 puntos, porque son demasiado pequeñas para ser usadas. Luego se analiza el radio de curvatura, una trayectoria no puede variar abruptamente su dirección, por lo tanto las trayectorias que poseen radio de curvatura muy pequeño son eliminadas. Este proceso da como resultado lo que llamamos "trayectorias limpias", figura 4(b).

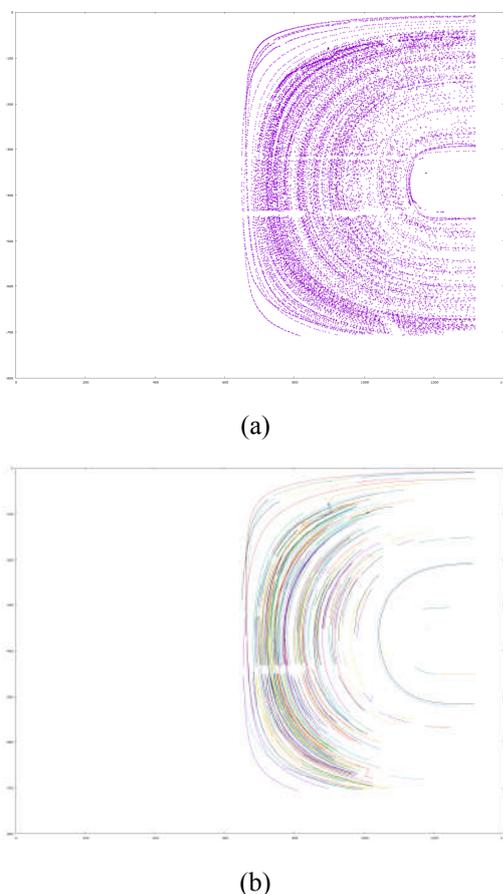


Figura 4: (a) Configuración H - Todos los puntos en desplazamiento, z-project, (b) Configuración H - Trayectorias "limpias"

IV. DETERMINACIÓN DE LEYES LOCALES Y PARÁMETROS PARA DETERMINAR LA SIMETRÍA DE LAS TRAYECTORIAS

En esta sección se describirá cómo se determinó una ley que caracteriza la simetría de las trayectorias en función del número de Reynolds. La principal dificultad es que el programa no construye suficientes trayectorias completas (desde el principio hasta el final). Por lo tanto, se ha decidido determinar una ley global a partir de "leyes

locales", que pueden obtenerse a partir de trayectorias parciales.

En la figura 3 se observan distintos parámetros que serán utilizados para construir las leyes locales. La distancia de entrada, d_e , es la distancia de la partícula respecto de la pared en el canal de entrada. La distancia media, d_m , es la distancia de la partícula a la pared que separa ambos canales. La distancia de salida, d_s , es la distancia de la partícula a la pared en el canal de salida.

A partir de estas distancias se pueden realizar análisis que permiten visualizar la presencia o ausencia de simetría en las trayectorias de las partículas. Consideremos la distancia de entrada, d_e , en función de la distancia media d_m , y la distancia media, d_m , en función de la distancia de salida, d_s . Si las trayectorias son simétricas, las funciones anteriores deberían ser lineales, con pendientes tales que una es igual a la inversa de la otra. Llamaremos a las respectivas pendientes, a_1 y a_2 . Recordando que en caso de tener simetría en las trayectorias $a_1 = 1/a_2$, podemos construir, entonces, una función que caracterice la simetría del comportamiento de las partículas, en la entrada y la salida, analizando el apartamiento del producto $a_1 \cdot a_2$ respecto de un valor igual a 1. Definimos entonces la siguiente función

$$\phi = 1 - a_1 a_2 \quad (1)$$

Hay que recordar que esta función no tiene un sentido físico real, si no que fue construida con el objetivo de reflejar a través de un cambio de comportamiento de la función, una ruptura en la simetría de las trayectorias. Esto es, si la función cambia drásticamente mostrará una ruptura de la simetría. En la figura 5 se grafica la evolución de ϕ en función del número de Reynolds.

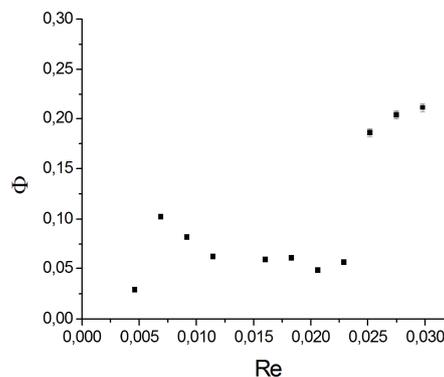


Figura 5. Gráfico de la evolución de la función ϕ en función del número de Reynolds.

Se puede ver que la función aumenta para valores de Re entre 0,025 y 0,03, y este comportamiento permite deducir que existe ruptura de la simetría. A partir de los valores medidos no se observa que esta función se incrementa gradualmente, si no más bien de manera abrupta.

Para poner en evidencia este comportamiento se muestra la evolución de las trayectorias mediante el proceso de imágenes, en la figura 6. En esta figura se muestra el detalle de la imagen resultante de superponer la mitad inferior de la imagen sobre la mitad superior de

la misma, con el eje horizontal medio como eje de reflexión. Si existe simetría de reflexión entre las trayectorias, éstas se presentarán en la superposición en tono claro, y aquellas que no posean dicha simetría se presentarán en tono más oscuro. De esta manera, si hay una ruptura de simetría, se notará en las imágenes en esta superposición, como se muestra en la figura 6. Como se puede observar, hay una ruptura de simetría en la imagen 6(c) para un caudal igual a 11ml/min que corresponde a un $Re=0,025$ y aumenta de manera notoria para los caudales más altos.

V. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Como se ha mencionado anteriormente, hay numerosos parámetros numéricos que son claves para el buen procesamiento de los datos en estudio, algunos de ellos están relacionados entre sí, y su elección es crucial para una buena identificación de las partículas y sus trayectorias. Por ello fue necesario realizar varias pruebas para obtener buenos resultados y equilibrio entre todos ellos.

En primer lugar, se han fabricado y caracterizado las soluciones de fluido que permite el uso de los trazadores PTV. Se ha diseñado un programa para procesar las coordenadas de las partículas y obtener las trayectorias con el objetivo de poner de manifiesto las propiedades de su comportamiento. El programa de procesamiento logra explotar los datos de seguimiento de partículas, e identificar las trayectorias. Este proceso se basó en comportamientos conocidos a priori debido a estar trabajando con un flujo simple utilizado en trabajos anteriores.

Se corroboró que el número de partículas PTV no debe ser demasiado alto porque si lo fuera, el proceso de seguimiento y la determinación de las leyes no sería posible debido a la dificultad de determinar las trayectorias. Para la configuración analizada (que corresponde al caso más crítico) se observó el comportamiento de las partículas es el mismo que el comportamiento de los fluidos hasta un número de Reynolds del orden 0,025. En este sentido deben realizarse experiencias alrededor de este valor para verificar los resultados obtenidos. En trabajos futuros se analizarán, además, los casos para la configuración-X y se definirán para esta configuración una función de simetría, para compararse con los resultados obtenidos para la configuración-H

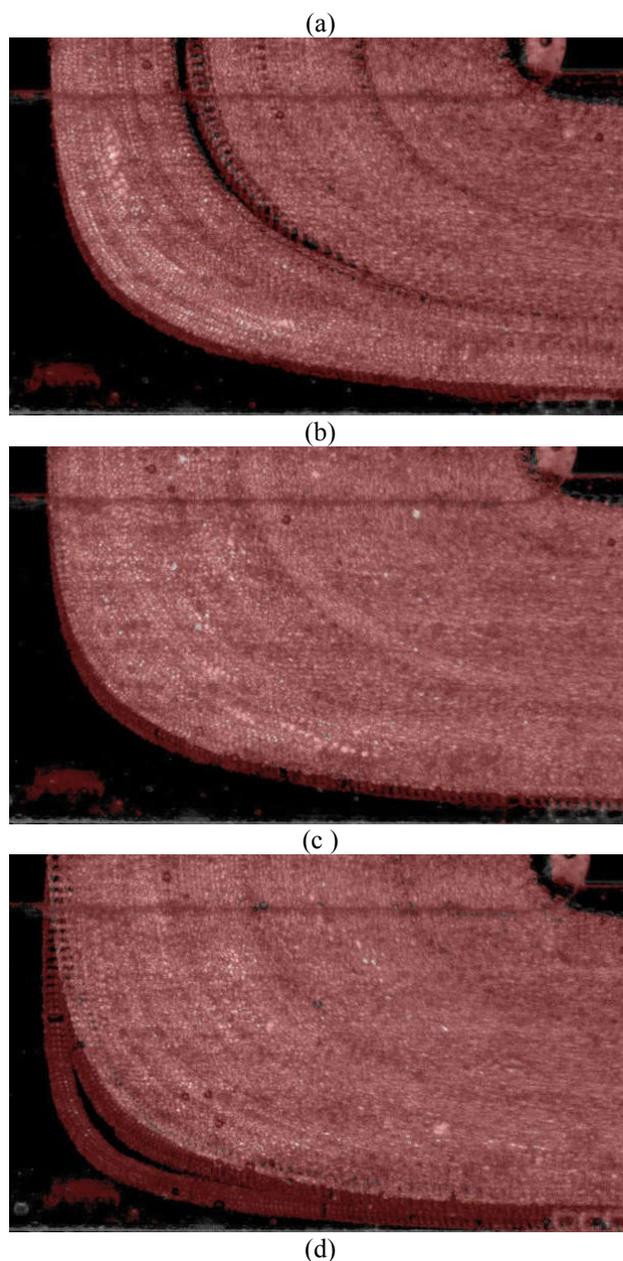
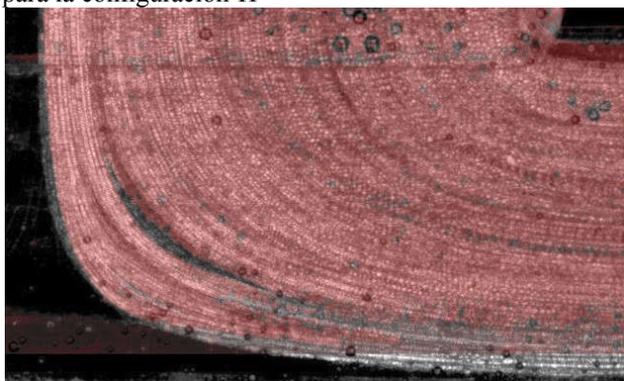


Figura 6: Manipulación de imágenes para mostrar el comportamiento no simétrico, superposición de imágenes (a) $Q=4\text{mL/min}$, $U=9,26\text{mm/s}$, (b) $Q=10\text{mL/min}$, $U=18,52\text{mm/s}$, (c) $Q=11\text{mL/min}$, $U=20,37\text{mm/s}$, (d) $Q=14\text{mL/min}$, $U=25,93\text{mm/s}$.

VI. REFERENCIAS

- 1 - Guo, T. K., Zhang, S. C., Xiao, B., Liu, G. Q., Wang, F., Zhang, J. C. Bian, X. B. *Transp. Porous Media* **94**, 243–257 (2012).
- 2 - Toscoa, T, Petrangeli Papinib M, Cruz Viggib, C., Seth R. *Journal of Cleaner Production*, Volume **77**, 10–21 (2014)
- 3 - Gossett, D.R. Westbrook Weaver M., Mach A.J., Hur, S.C. Tat Kwong Tse, H., Lee, W., Amini, H., Di Carlo, D.. *Anal Bioanal Chem* **397**:3249–3267 (2010).
- 4 - Li J, Zhang Z, Rosenzweig J, Wang YY, Chan DW, *Clin Chem* **48**:1296– 1304 (2002).

- 5 - Krabchi K, Gros-Louis F, Yan J, Bronsard M, Massé J, Forest JC, Drouin R, Clin Genet **60**:145– 150. (2001).
- 6 - Sethu P, Sin A, Toner M "Microfluidic diffusive filter for apheresis (leukapheresis)". Lab Chip **6**:83–89. (2006).
- 7 -El-Ali J, Sorger PK, Jensen KF. Cells on chips. Nature.;**442**:403–411, (2006).
- 8 - Cachile, M., Talon, L., Gomba, J., Hulin, J-P., Auradou. H.. Physics of Fluids, **24** (2), .021704. (2012).
- 9 - T. V. Starkey J. Appl. Phys. **7** 2, 52-55 (1956).
- 10 - B. Yang, J. Wang, D. Joseph, H. Hu, T. Pan, R. Glowinski, J. Fluid Mech **540**, 109-131, (2005)
- 11- D. Di Carlo, D. Irimia, R. Tompkins, M. Toner, Proceedings of Nat. Acad. of Sci. **104** 48, 18892–18897 (2007)