

ESTUDIO DE INTERACCIÓN FLUIDO-ESTRUCTURA EN CONDUCTOS CIRCULARES

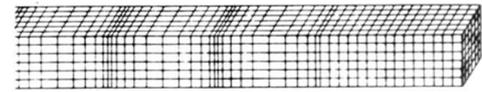
ALAN OLVERA, GERARDO JUÁREZ
Y ENRIQUE GUZMÁN

La interacción fluido-estructura se presenta en diversos procesos naturales⁵. En breve, ésta se refiere a la interrelación dinámica producida entre un sólido deformable y un flujo interno o externo. Algunos casos concretos incluirían, por ejemplo, los tremores ocasionados por el flujo magmático en el interior de conductos volcánicos, el transporte de hidrocarburos en sistemas de producción, el flujo sanguíneo en el sistema circulatorio, el nado de un pez e incluso el aleteo en las superficies de control de los aviones⁴. Debido a la complejidad del fenómeno, una buena parte de las investigaciones contemporáneas son de tipo experimental y numérico^{8,10}. No obstante, los tratamientos de tipo teórico constituyen una imprescindible vía de análisis.

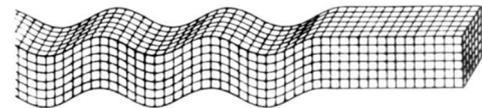
El trabajo en curso se refiere a los efectos inducidos por un flujo pulsante en un conducto elástico de sección circular⁷. El objetivo es obtener un modelo analítico que permita relacionar las deformaciones de la pared externa del conducto con las características del flujo. Aunque la aplicación que motiva el estudio concierne específicamente a los flujos en conductos volcánicos, la generalidad del modelo permitiría, en principio, estudiar casos interesantes en otras ramas; por ejemplo, en la ingeniería biomédica, la ingeniería aeronáutica, la ingeniería hidráulica y la ingeniería petrolera. Como paso previo a la elaboración de un modelo sofisticado que contemple los efectos viscosos y el espesor finito del tubo, aquí se considera el modelo simplificado de Womersley¹².

Los efectos físicos que se busca cuantificar están determinados por la naturaleza de las ondas que se propagan a través del fluido y del conducto. Estas ondas se manifiestan como perturbaciones de las propiedades de ambos medios. En función de su dirección de propagación, las ondas en cuestión pueden ser clasificadas como³: ondas longitudinales (ondas P), ondas transversales (ondas S) y ondas superficiales. Las ondas longitudinales producen desplazamientos paralelos a la dirección de propagación (Fig. 1a).

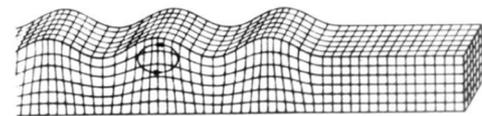
En contraste, las ondas transversales (Fig. 1b) verticales y horizontales provocan desplazamientos perpendiculares a la dirección de propagación. Las ondas superficiales, por su parte, se propagan a través de la interfase que separa dos



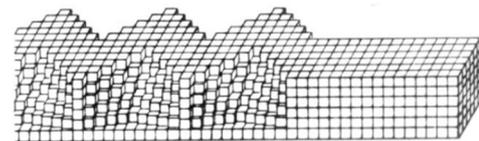
a) Onda longitudinal P



b) Onda transversal S



c) Onda superficial de Rayleigh



d) Onda superficial de Love

Figura 1. Características de los tipos de onda de mayor interés (tomado de Castillo Cruz, 2005)

medios. Cuando los desplazamientos son normales a la superficie se producen ondas de Rayleigh (Fig. 1c), mientras que los paralelos producen ondas de Love (Fig. 1d). La interacción del fluido con el conducto que lo confina implica la coexistencia de todos estos tipos de onda. Por ejemplo, las ondas longitudinales se manifiestan en el fluido, las ondas longitudinales y transversales en el sólido, y las ondas superficiales en las paredes interna y externa del conducto. En principio, los efectos físicos de estas ondas se podrían registrar mediante acelerómetros, o a través de sensores piezoeléctricos colocados en la pared externa del conducto.

El caso que nos ocupa concierne a un flujo viscoso confinado por un tubo, sobre el que actúa un gradiente de presión que varía periódicamente en el tiempo. En este breve artículo revisamos exclusivamente el caso límite en el que el conducto

es rígido. No obstante, este caso simplificado establece el punto de partida para elaborar modelos más sofisticados aptos para analizar conductos deformables. Esta aproximación reduce enormemente, tanto la complejidad experimental (con sus respectivos costos), como la de modelado. Para estas condiciones se obtuvo el modelo base a partir de las ecuaciones de Navier-Stokes¹¹.

La validación correspondiente se llevó a cabo en un dispositivo experimental que consta de una bomba peristáltica, un sistema de tuberías transparentes de acrílico y dos depósitos de fluido, uno que alimenta al sistema y otro de descarga (Fig. 2). La bomba contiene tres rodillos (con separación angular de 120°) que, al rotar sobre una manguera fija, forman una cavidad progresiva que impulsa al fluido en la dirección del movimiento. El motor a pasos se controla a través de un microcontrolador Arduino. Por último, la sección de pruebas está compuesta por un tubo de acrílico de 0.0075 m de diámetro interno. Todo el sistema fue nivelado mediante soportes con abrazaderas metálicas.

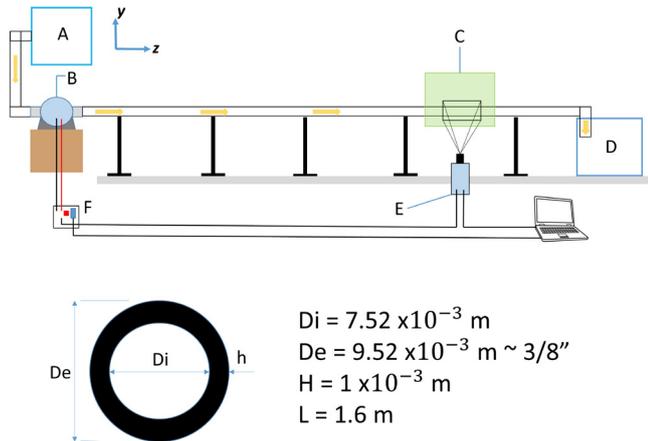


Figura 2. Arreglo experimental A: Depósito de alimentación, B: Bomba peristáltica, C: Hoja láser, D: Depósito de descarga, E: Cámara de alta velocidad, F: Circuito de control

El fluido de trabajo, constituido por una mezcla diluida de glicerina y agua a 50 % V, permitió realizar los experimentos de interés en el régimen laminar. A fin de medir el campo de velocidades se agregaron al fluido partículas huecas de vidrio (con un diámetro medio de 10 μm) recubiertas de plata. Una hoja de luz láser, cuya longitud de onda mide 532 nm, se hizo pasar a través de la sección de visualización para iluminar

las partículas (Fig. 3). La reflexión causada por las partículas en movimiento permitió que sus respectivas trayectorias fueran registradas por una cámara de alta velocidad Phantom Miro-321S.

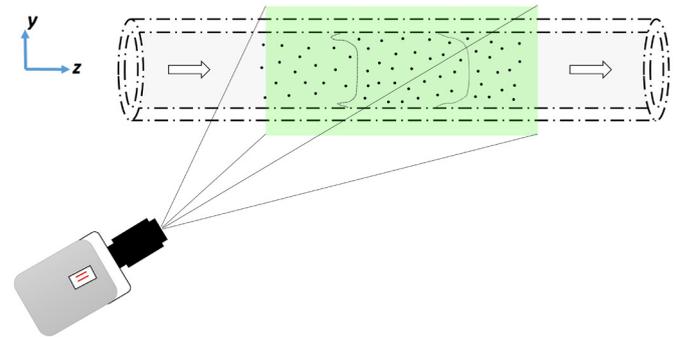


Figura 3. Método de iluminación con una hoja láser

Pares consecutivos de fotogramas sirvieron, entonces, para determinar las posiciones relativas de las partículas. Con base en ellas y en los tiempos entre imágenes (la tasa de muestreo fue de 2000 cuadros por segundo) se calculó el campo de velocidades en la región de visualización. La técnica descrita se conoce como velocimetría por imágenes de partículas (o PIV por sus siglas en inglés)⁹.

La validación global del modelo se muestra en la figura 4. Las gráficas representan los flujos volumétricos experimental (curva negra de puntos) y teórico (curva roja). Esta última está dada, en forma aproximada, por los primeros cinco términos de la expansión de Fourier. El acuerdo entre ambos flujos es razonablemente bueno. Cabe notar que las escasas validaciones reportadas en la literatura científica se concentran únicamente en este tipo de comparación. No obstante, en el presente caso también se decidió llevar a cabo una validación local (Fig. 5). En ella se analizó detalladamente el perfil de velocidades a través de varias secciones transversales. Todos los datos medidos se procesaron estadísticamente para cada posición radial, para cada tiempo, y para cada una de las secciones. Con la información obtenida se estimaron las bandas de incertidumbre experimental. De la misma manera se realizó una simulación de Monte Carlo, empleando la solución analítica, a fin de establecer las bandas de incertidumbre teóricas. La figura 5 muestra la comparación entre los perfiles de velocidad experimental y teórico, con sus respectivas bandas de incertidumbre.

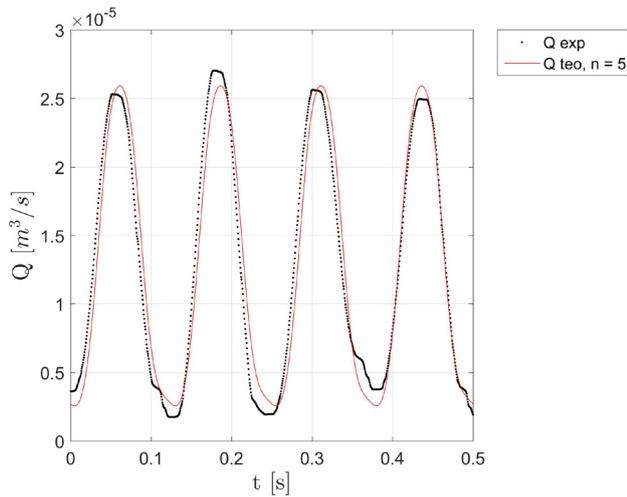


Figura 4. Validación global del modelo. La línea roja representa la predicción teórica, y la línea punteada negra los datos experimentales

Existe un buen acuerdo para la fase impulsiva del flujo (con velocidades positivas). Sin embargo, debido a las dificultades técnicas para medir las velocidades cerca de las paredes del conducto, así como a los efectos inerciales de las partículas trazadoras, los perfiles correspondientes al flujo de retroceso (con velocidades negativas) difieren ostensiblemente. Además de la asimetría en las bandas de incertidumbre, se introduce un desfase significativo en las velocidades durante el reflujos y un incremento en las incertidumbres. Se concluye que estos efectos espurios distorsionan artificialmente la medición de las propiedades locales del flujo de retroceso. Por tal motivo, se da por buena únicamente la validación de la parte impulsiva del flujo.

En una etapa posterior del estudio se llevará a cabo una validación similar para el modelo refinado. Hasta donde sabemos, la solución analítica desarrollada para ese modelo es distinta de las que ya han sido reportadas en la literatura científica. Las principales limitaciones de los modelos existentes es que consideran: a) flujos ideales en conductos sin espesor ⁶,

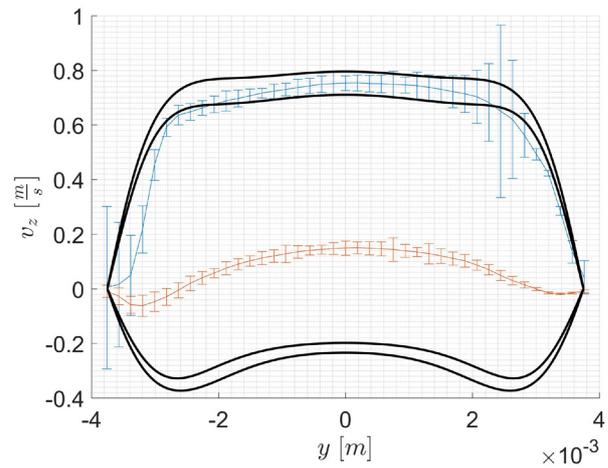


Figura 5. Validación local. El perfil de velocidades en la fase impulsiva se compara favorablemente con la predicción teórica. En la fase de retroceso del flujo se produce un desfase del perfil, probablemente ocasionado por limitaciones asociadas a la técnica PIV

b) flujos ideales en medios estratificados ⁸, y c) flujos viscosos interactuando con membranas ^{10,12}.

El modelo refinado considera un sólido isótropo. Además, es capaz de predecir los desplazamientos de las paredes con respecto a los radios neutros (es decir, los que corresponden al estado sin deformación). Sin duda, lo más destacable es que el modelo refinado predice las propiedades de las diversas ondas descritas anteriormente. Desde el punto de vista experimental las dificultades principales para su validación son: a) la imposibilidad de emplear la técnica de PIV, b) determinar la longitud de las ondas que se propagan, c) discriminar las ondas debido a la direccionalidad de los sensores piezoeléctricos, y d) la dificultad de caracterizar todas las magnitudes físicas involucradas (por ejemplo, los módulos de Young y de Poisson).

Estas dificultades no son insorteables y se espera que, una vez validado, el modelo sirva para estudiar la sismología volcánica. El objetivo es relacionar las mediciones hechas en campo con los fenómenos de flujo en el interior del volcán. |

Referencias

1. Arfken, G. B.; Weber, H. J. (2005). *Mathematical Methods for Physicists*. Academic Press. EE UU.
2. Sakhr, J.; Chronik, B. A. (2018). Solving the Navier-Lamé Equation in Cylindrical Coordinates Using the Buchwald Representation: Some Parametric Solutions with Applications. *Advances in Applied Mathematics and Mechanics*, 10(4), p. 1025-1056.
3. Eringen, A. C.; Erdogan, S. S. (1974). *Elastodynamics Volume I: Finite Motions*. Academic Press. EE UU.
4. Fung, Y.C. (1993). *An Introduction to the Theory of Aeroelasticity*. Dover Publications Inc. EE UU.
5. Galdi, G.; Rannacher, R. (2010). *Fundamental Trends in Fluid-Structure Interaction. Contemporary Challenges in Mathematical Fluid Dynamics and Its Applications*, 1. World Scientific. Singapur.
6. Lin, T. C.; Morgan, G. W. (1956). Wave Propagation through Fluid Contained in a Cylindrical, Elastic Shell. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 28(6), p. 1165-1176.
7. Païdoussis, M. P. (2014). *Fluid-Structure Interactions Volume 1: Slender Structures and Axial Flow*. Academic Press. Reino Unido.
8. Perton, M.; Sánchez-Sesma, F. J. (2012). Numerical and Ultrasonic Experimental Simulations of Elastic Wave Propagation Around a Hollow Cylinder. *Journal of Computational Acoustics*, 13(39).
9. Raffel, M. *et al.* (2007). *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*. Springer. EE UU.
10. Tambaca, J. et al. (2005). Effective model of the fluid flow through elastic tube with variable radius. *Grazer Math. Ber.*
11. Womersley, J. R. (1955). Method for the Calculation of Velocity, Rate of Flow and Viscous Drag in Arteries when the Pressure Gradient is known. *Journal of Physiology*, 127(3), p. 553-563.
12. Zamir, M. (2000). *The Physics of Pulsatile Flow*. Springer. EE UU.