

Disipación de energía en régimen transitorio: análisis y caracterización del fenómeno físico

Tema C (primera opción), tema B (segunda opción)

José Manuel Abreu

IMAR, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra

jabreu@dec.uc.pt

Enrique Cabrera

ITA, Universidad Politécnica de Valencia

ecabrera@ita.upv.es

La "**correcta**" modelación del término de fricción en las ecuaciones 1-D del flujo no estacionario a presión en el interior de un conducto es un problema complejo, pero de gran interés práctico y científico, al que en las últimas décadas se le viene prestando gran atención coincidiendo con el advenimiento de los ordenadores. En el análisis de la resistencia interna (fuerza de rozamiento) y de la consiguiente disipación de energía (perdida de carga) los dos obstáculos mayores a superar son la variabilidad temporal del flujo y la turbulencia. Al contrario que en los flujos estacionarios y tal cual se demostrará en régimen variable los conceptos *resistencia por rozamiento* y *disipación de energía* no son completamente coincidentes.

El análisis del problema se inicia partiendo de la modelación física del fenómeno, planteando en primer lugar el modelo clásico del golpe de ariete (modelo unidimensional o 1D), resuelto con las ecuaciones promediadas a la sección transversal de la tubería. Bien conocidas son las que seguidamente se detallan:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{4\tau_w}{\rho D} = 0 \quad (2)$$

Pero debido a la excesiva simplificación, ignoran la estructura vertical del flujo y son incapaces de reproducir el campo de velocidades, un inconveniente que acostumbra a soslayarse incorporando a la tensión tangencial en la pared de la tubería, τ_w , toda la estructura vertical del flujo. A cambio hay que pagar el peaje de añadir una nueva incógnita a las dos existentes en cada sección de la tubería, la velocidad media referida a la dirección axial $V(x,t)$ y la altura piezométrica instantánea, $H(x,t)$, abriéndose un sistema de ecuaciones antes cerrado. Para volver a hacerlo es menester añadir una ecuación adicional que exprese el esfuerzo en la pared, τ_w , en función de la velocidad media, V , y, en ocasiones, de sus derivadas.

Por otra parte, hay que tener presente que τ_w se obtiene teóricamente evaluando la derivada en la pared del perfil de velocidades:

$$\tau_w = \rho \nu \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)_{r=R} \quad (3)$$

una expresión general, válida para flujos estacionarios y transitorios, laminares o turbulentos. No en vano los únicos esfuerzos tangenciales en la pared son viscosos (el esfuerzo turbulento es nulo en la pared, pues la condición de adherencia hace que sobre ella sean nulas las fluctuaciones de velocidad). Es resumen, la expresión (3) evidencia que, en general, solo es posible calcular de forma exacta el valor de $\tau_w(x,t)$ si se dispone del perfil $u(r)$ de velocidades en cada sección transversal, x , y en cualquier instante, t . Dicho de otro modo, sólo con un modelo que contemple la estructura vertical del flujo - *modelo de fricción distribuida* - se puede calcular correctamente el valor de $\tau_w(x,t)$.

En definitiva, la solución del problema exige obtener "modelos" específicos que proporcionen expresiones de τ_w en función de las variables medias del fenómeno y de unas derivadas que, a vez, representen adecuadas aproximaciones de (3), modelos que llamaremos *de fricción concentrada*.

En régimen no estacionario no demasiado rápidos (aceleración discreta) es razonable aceptar la *hipótesis cuasi-estacionaria*, que equivale a admitir que los valores instantáneos de las tensiones tangenciales y de las pérdidas de carga, en cada instante y en cada sección de la tubería, y para cada valor de la velocidad media instantánea V , se pueden asimilar a los correspondientes valores de tales magnitudes en un pseudo régimen permanente uniforme con idéntica velocidad media V (régimen uniforme tangente).

Estos modelos de fricción cuasi-estacionaria ofrecen resultados razonables para transitorios lentos. Para flujos periódicos de alta frecuencia o en flujos transitorios rápidos el mecanismo del flujo provoca que el término de fricción variable difiera de forma significativa del término de fricción permanente (Ramaprian y Tu, 1980). Se ha comprobado que, en general, la resistencia de fricción (disipación de energía) condiciona de forma directa el amortiguamiento de las fluctuaciones de presión a lo largo de las tuberías y, de una forma indirecta, los valores extremos de las presiones instantáneas (Figura 1). En maniobras muy rápidas el pico máximo de sobrepresión (o el mínimo de depresión) puede superar el pulso de Allievi-Joukowski. La explicación a ello se encuentra aplicando principios físicos conocidos, tal cual las aportaciones incluidas en este artículo tratarán de evidenciar.

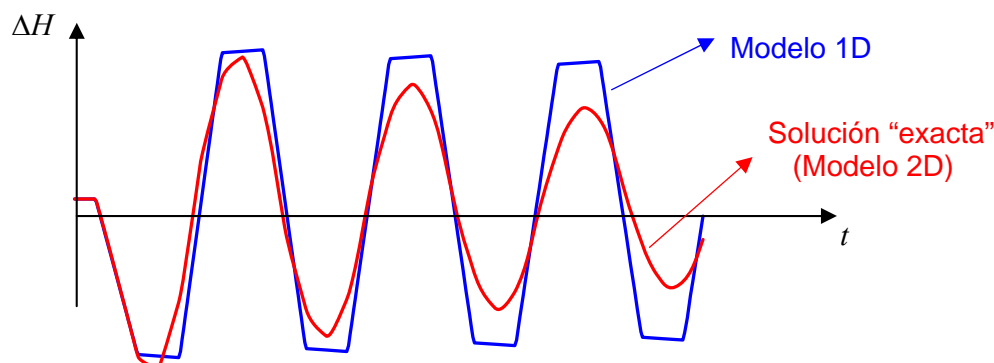


Figura 1: Historiales "típicos" de la variación de alturas piezométricas correspondientes a modelos 1D y 2D

Cuando las aceleraciones son demasiado importantes para que la hipótesis cuasi-estacionaria pueda ser utilizada, el valor instantáneo de la tensión tangencial en la pared, τ_w , exige una evaluación más rigurosa que tenga en cuenta los efectos de la variación del campo de velocidades en el tiempo. Y para ello hay que recurrir a modelos 2D o cuasi 2D (Abreu, 2004).

En definitiva el artículo describe la necesidad de recurrir a modelos axisimétricos eventualmente acoplados a modelos de turbulencia (Abreu y Betâmio de Almeida, 2009), práctica poco habitual porque implica elevados costos computacionales tanto en términos de volumen de almacenamiento como en tiempo de procesamiento. En consecuencia, este tipo de modelos no puede aún competir con la versatilidad y economía (en tiempo de cálculo) de los modelos 1D, excepción hecha de algunas situaciones en que la simplicidad del sistema hidráulico a analizar o la precisión de los resultados deseados así lo exijan. Una situación de esta naturaleza justifica la obtención de modelos más satisfactorios y realistas que, sin dejar de compartir las ventajas del modelo 1-D, se reproduzcan mejor la realidad que la hipótesis cuasi-estacionaria, siempre y cuando la resolución del problema no se complique en exceso.

El artículo justifica que la componente no estacionaria del esfuerzo viscoso sobre la pared se puede asimilar a la resultante de superponer dos efectos o procesos bien distintos. El primero tiene un carácter *disipativo* (el trabajo de las fuerzas viscosas convierte energía mecánica en energía interna, no recuperable, mientras propicia la transferencia de calor). El segundo representa los *efectos inerciales*, es decir, el trabajo requerido para acelerar capas de fluido con diferentes velocidades debido a la no uniformidad del perfil de velocidad en cada sección. Esta separación de los efectos de disipación de energía e inercia constituye, como se justifica, una propiedad de la gran importancia práctica pues no en vano contribuye, desde un punto de vista físico, a un mejor conocimiento del fenómeno, al fin y a la postre, el principal objetivo de este trabajo.

Referencias

- Abreu, J. (2004). *Estudio de Flujos No Estacionarios a Presión con Modelos 1-D y 2-D*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia.
- Abreu, J. y Betâmio de Almeida, A. (2009) – "Timescale behavior of the wall shear stress in unsteady laminar pipe flows", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 135 (5), pp. 415-424.
- Ramaprian, B.R. y Tu, S. (1980). "An experimental study of oscillatory pipe flow at transitional Reynolds number". *J. Fluid Mechanics*, Vol.100, Part 3, 513-544.