

Modelación numérica de flujo mixto y bolsas de aire atrapado en colectores pluviales

José Luis Aragón-Hernández

Instituto de Investigación FLUMEN (UPC y CIMNE)

jose.luis.aragon@upc.edu

Ernest Bladé

Instituto de Investigación FLUMEN (UPC y CIMNE)

ernest.blade@upc.edu

Manuel Gómez

Instituto de Investigación FLUMEN (UPC y CIMNE)

manuel.gomez@upc.edu

1 Introducción

La mayoría de los colectores pluviales de una red de drenaje urbano son diseñados para operar en condiciones normales con flujo en lámina libre considerando eventos de precipitación bajos ($2 \leq T_R \leq 10$ años); en estos casos la capa de aire entre la superficie del agua y la cota del colector se encuentra a presión atmosférica, por lo que no afecta la dinámica del flujo de agua y no necesita ser considerado. Cuando la capacidad de uno o más colectores es excedida por un evento de precipitación ($T_R > 10$ años) o por cambios bruscos en las condiciones de contorno (operación de compuertas, estaciones de bombeo, etc.), el tipo de flujo en los colectores puede cambiar de lámina libre a flujo en presión (flujo mixto).

Durante la transición de flujo en lámina libre a flujo en presión en colectores pluviales puede quedar aire atrapado capaz de generar transitorios con picos de alta presión especialmente cuando ocurre la liberación de aire y que pueden ser importantes para el comportamiento hidráulico del colector y por lo tanto deben ser considerados en el análisis. Estos transitorios de presión son una de las principales causas de daños a la infraestructura, entre ellos la expulsión de tapas de los pozos de visita (Li and McCorquodale 1999; Zhou et al. 2002).

En la modelación de flujo mixto existen diferentes aproximaciones clasificadas en: el método de la columna rígida (Li and McCorquodale 1999) y modelos dinámicos completos. Entre estos últimos se encuentran aquellos métodos que utilizan uno o dos sistemas de ecuaciones. Los modelos que utilizan un sólo sistema de ecuaciones requieren una aproximación para considerar flujo en presión: el más conocido es el método de la ranura de Preissmann (Aragón-Hernández et al. 2009; Preissmann 1961) y el método TPA (*Two-component Pressure Approach*) que recientemente propusieron Vasconcelos et al. (2006) y quienes modificaron las ecuaciones de Saint Venant para permitir flujo a presión asumiendo un comportamiento elástico de la tubería (densidad del flujo constante). Dentro de los modelos que utilizan dos sistemas de ecuaciones (uno para flujo en lámina libre y otro para flujo en presión), se encuentra los propuestos por Bourdarias and Gerbi (2007) y León et al. (2010), quienes para considerar flujo en presión asumen flujo compresible (densidad del flujo variable). En los modelos dinámicos, las discontinuidades presentes en la interfase entre los dos tipos de flujo pueden ser tratadas con dos aproximaciones: los métodos de aislamiento del frente de onda (*shock fitting or interphase tracking methods*) o los métodos directos que capturan automáticamente las discontinuidades (*shock capturing methods*).

En este trabajo para simular numéricamente flujo mixto se presenta un modelo que se clasifica dentro de los modelos dinámicos que utiliza dos sistemas de ecuaciones considerando flujo incompresible (Aragón-Hernández 2009), por lo que para considerar el almacenamiento debido a la presión permite un comportamiento elástico de la tubería. Por otro lado para modelar y propagar numéricamente las bolsas de aire atrapado con liberación del mismo se emplea la ley de gas ideal asumiendo un proceso isotérmico (Martin 1976; Zhou et al. 2002). La

solución numérica de las ecuaciones se realiza con la técnica de los volúmenes finitos a través del método de Godunov y el *Riemann Solver* de Roe (Bladé 2005).

Por otra parte, de las campañas realizadas en el Laboratorio de Hidráulica del DEHMA, UPC para estudiar la entrada en presión se seleccionó un experimento y se reprodujo con el modelo numérico de flujo mixto con y sin la formulación de la fase de aire; la carga de presión calculada fue comparada con la medida y de esta manera evaluó la actuación del modelo.

2 Aire atrapado

El aire atrapado en los colectores tiene repercusiones importantes sobre la dinámica del flujo de agua y principalmente presenta dos comportamientos: el primero es cuando el aire está mezclado con el agua y se suele modelar como flujo en dos fases. Las ecuaciones que describen el flujo en dos fases pueden ser simplificadas en gran medida cuando la cantidad de gas existente en el conducto es pequeña. En este caso la mezcla agua aire puede ser tratada como un sólo fluido equivalente, por lo tanto, las ecuaciones son las mismas que para un flujo en presión de una fase (Wylie and Streeter 1993).

La segunda es cuando no existe una mezcla de agua/aire o esta es de muy poca importancia, pero el aire existente puede formar bolsas por un lado entre dos frentes de onda en presión generadas por la dinámica del flujo mixto y la geometría del colector (por ejemplo discontinuidades existentes en la clave), y/o por el otro delante de un sólo frente de onda en presión, cuando el aire presente en la zona de flujo en lámina libre es transportado distancias importantes por el frente de onda del flujo en presión, debido a la coexistencia de una ventilación inadecuada y una velocidad de onda de presión importante. Esta última situación es la tratada a lo largo de este trabajo.

Para calcular las oscilaciones de presión en una bolsa de aire atrapado en una tubería con liberación del mismo, la ecuación para la fase de aire es (Martin 1976; Zhou et al. 2002):

$$\frac{dH^*}{dt} = -k \frac{H^*}{V_a} \left(\frac{dV_a}{dt} - Q_a \right) \quad (1)$$

Donde H^* es la carga de presión absoluta del aire, V_a el volumen de aire, k el coeficiente politrópico; determina el tipo de la evolución del aire durante el proceso de compresión y expansión (adopta el valor de 1 si el proceso es isotérmico y 1.4 si es adiabático (Carlos et al. 2011)) y Q_a el caudal de aire liberado que puede ser expresado por:

$$\begin{aligned} Q_a &= C_d A_0 Y \sqrt{2g \frac{\rho_w}{\rho_a} (H^* - H_0)} & \text{Si } \frac{H^*}{H_0} \leq 1.89 \\ Q_a &= C_d A_0 \sqrt{g \frac{\rho_w}{\rho_a} H^*} \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{(k+1)/(k-1)}} & \text{Si } \frac{H^*}{H_0} > 1.89 \end{aligned} \quad (2)$$

Donde H_0 es la carga de presión absoluta del aire inicial, la cual es considerada igual a la presión atmosférica, C_d el coeficiente de descarga del aire; que puede ser obtenido experimentalmente o de tablas de la literatura técnica, ρ_w la densidad del agua, ρ_a la densidad del aire y Y el factor de expansión del flujo de aire que puede ser expresado como:

$$Y = \left[\frac{n}{n-1} \left(\frac{H_0^*}{H^*} \right)^{2/n} \frac{1 - (H_0^*/H^*)^{(n-1)/n}}{1 - H_0^*/H^*} \right]^{1/2} \quad (3)$$

Donde n es el coeficiente isentrópico para flujo compresible a través de un orificio y adopta el valor de 1.4 para aire seco (Carlos et al. 2011).

3 Flujo mixto

El flujo mixto es el fenómeno de transición de flujo en lámina libre a flujo en presión en muchas situaciones como en: colectores pluviales, túneles, tuberías de obras de toma de instalaciones hidroeléctricas, etc. Este fenómeno puede ser inducido por un cambio brusco en las condiciones de contorno (variación de caudales de entrada, bloqueo o reducción de la capacidad de la tubería, sumersión de la salida de la tubería, operación de elementos de control, fallo de estaciones de bombeo, presencia de pozos de caída, inestabilidades de Helmholtz, geométrica y falta de aire) (Bourdarias y Gerbi, 2007; Li y Mccorquodale, 1999).

Entre los modelos dinámicos existentes en la literatura para modelar flujo mixto los que mejor se comportan para este tipo de flujo son aquellos que capturan automáticamente las discontinuidades (*shock capturing methods*), ya que pueden ser aplicados a ambos tipos de flujo (lámina libre y flujo en presión) y son potencialmente capaces de reproducir el comportamiento hidráulico.

Las ecuaciones utilizadas en este trabajo para modelar flujo en lámina libre y flujo en presión responden a:

$$\frac{\partial}{\partial t} U + \frac{\partial}{\partial x} F = S \quad (4)$$

Donde U es el vector de variables, F el vector de flujo y S el vector del término fuente.

Comparado las ecuaciones para flujo en lámina libre y flujo en presión, se encuentra que la única diferencia entre ambos sistemas de ecuaciones es en el término debido a la presión en las ecuaciones de cantidad de movimiento (Aragón-Hernández 2009), lo cual permite acoplar un sólo sistema de ecuaciones a través de este término con gradiente discontinuo en función del área máxima del colector (Bourdarias and Gerbi 2007); el almacenamiento a consecuencia de la carga de presión se asume considerando un comportamiento elástico de la tubería a través de un cambio en el área de su sección transversal (Vasconcelos et al. 2006), lo cual no es físicamente cierto del todo, al menos para colectores pluviales, pero en un futuro próximo se espera contar con un modelo que considere la compresibilidad del fluido y las propiedades elásticas del material.

De esta forma, un modelo para simular flujo mixto se puede escribir como (Bourdarias and Gerbi 2007):

$$U = \begin{bmatrix} A \\ Q \end{bmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{A} + p(h) \end{bmatrix} \quad S = \begin{bmatrix} 0 \\ gA(S_0 - S_f(h)) \end{bmatrix} \quad (5)$$

Donde A es el área de la sección mojada, Q el caudal, g la aceleración de la fuerza de gravedad, S_0 la pendiente del fondo del canal, S_f la pendiente de fricción, $p(h)$ el término debido a la presión del agua en una sección; estos dos últimos responden a:

$$\begin{aligned}
\text{Si } A < A_{\max} & \begin{cases} p(h) = gI_1 + gA_{\max} H \\ S_f(h) = \frac{v^2 n^2}{R_h^{2/3} (A)} \end{cases} & \text{Flujo en lámina libre} \\
\text{Si } A > A_{\max} & \begin{cases} p(h) = gI_1 + a^2 (A - A_{\max}) \\ S_f(h) = \frac{v^2 n^2}{R_h^{2/3} (A_{\max})} \end{cases} & \text{Flujo en presión}
\end{aligned} \tag{6}$$

Donde A_{\max} es el área del colector, a la velocidad de la onda en presión, I_1 la fuerza debida a la presión del agua en lámina libre en una sección, R_h el radio hidráulico de la sección mojada, v la velocidad del flujo y H la carga de presión del aire.

La manera de incluir la formulación de la fase de aire es similar a la empleada por Vasconcelos et al. (2006) y/o Leon et al. (2010).

Para la solución numérica de las ecuaciones se utiliza la técnica de los volúmenes finitos mediante el esquema numérico de primer orden, a través del método de Godunov y el *Riemann Solver* de Roe, el cual se expresa como (Bladé 2005):

$$U_i^{n+1} = U_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_{i+1/2}^* - F_{i-1/2}^*) + \frac{\Delta t}{\Delta x} H_i^* \tag{7}$$

Donde U_i^n y U_i^{n+1} son los valores medios del vector U en la celda i en el instante de tiempo t^n y t^{n+1} , F^* es el flujo numérico, y H_i^* un valor representativo del promedio de H en la celda i en el paso de tiempo de t^n a t^{n+1} . F^* y H_i^* en general dependen de las variables de las celdas contiguas a la celda i en los instantes de tiempo t^n y t^{n+1} ; esto es en definitiva lo que hace la diferencia de un esquema numérico a otro.

4 Caso de estudio

Para evaluar el comportamiento del modelo se utilizaron los experimentos reportados por Silvestre (1998) quien realizó una amplia campaña en el laboratorio de Hidráulica del DEHMA, ETSCCPB, UPC, para analizar el fenómeno de entrada en presión. La instalación se compone de una tubería de metacrilato transparente con 12.00 m de longitud, diámetro interior de 0.153 m, pendiente del 0.10 % y un coeficiente de Manning de $0.011 \text{ s/m}^{1/3}$, con dos válvulas localizadas en los extremos de la tubería que permiten crear frentes de onda por ambos extremos.

Para este trabajo se seleccionó el ensayo etiquetado como 210417 y clasificado como tipo I, que corresponde a la entrada en presión desde aguas abajo. El ensayo se inicia con un flujo permanente para un caudal de $0.00439 \text{ m}^3/\text{s}$ y un calado aguas abajo de 0.118 m; en un instante de tiempo a lo largo del ensayo se realiza un cierre brusco de la válvula del extremo aguas abajo, provocando la formación de un frente de onda en presión que avanza hacia aguas arriba.

Datos de las cargas de presión fueron medidas en las estaciones localizadas en $x=0.00 \text{ m}$, $x=4.00 \text{ m}$, $x=8.00 \text{ m}$ y $x=12.00$ desde el extremo aguas arriba. Los datos de las estaciones 0.00 y 12.00 m son utilizados como condiciones de contorno. Además se midió una velocidad del frente de onda de presión de 1.135 m/s .

En los ensayos, durante el avance del frente de onda se generó inestabilidad del flujo provocando un transitorio de presión, asimismo por el aire existente adelante del frente de onda y mezclado con agua (Silvestre 1998).

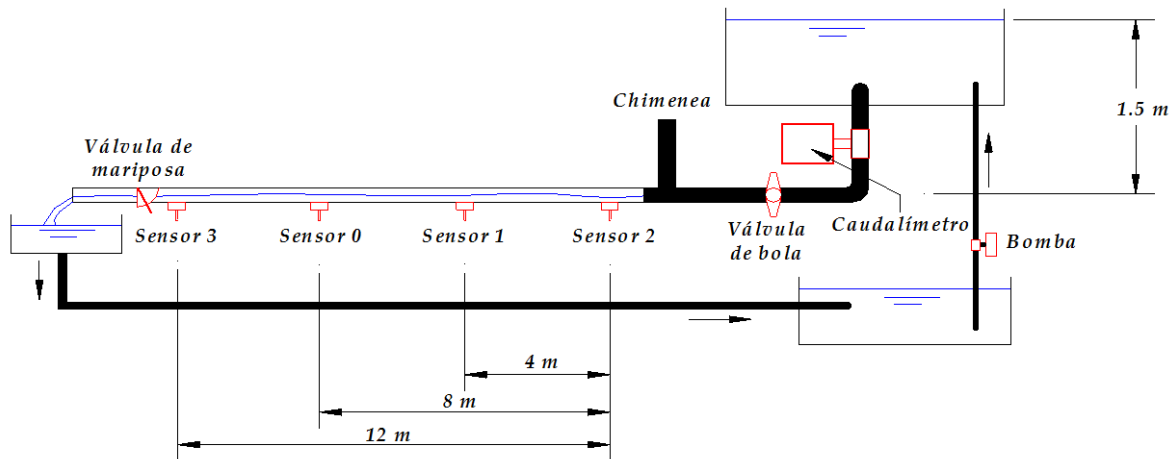


Figura 1 Esquema de la instalación

5 Resultados

Para la reproducción del ensayo descrito, la tubería se discretizó en 121 volúmenes finitos y se utilizó un coeficiente de CFL de 1.00. En la Figura 1 se presenta en primer lugar la carga de presión medida en las estaciones 4.00 y 8.00 m desde el extremo aguas arriba; en segundo lugar se muestran los resultados del modelo numérico para simular flujo mixto sin considerar la fase de aire; y finalmente los resultados considerando el aire atrapado delante del frente de onda en presión.

De la figura es importante destacar que el cierre de la compuerta ubicada en el extremo aguas abajo genera un frente de onda brusco que hace que el colector entre en carga prácticamente de forma instantánea, que se propaga hacia aguas arriba hasta alcanzar el extremo contrario, generando oscilaciones de presión importantes. Además, silvestre (1998) reporta la existencia de una alteración de carácter oscilatorio amortiguada que se presenta en el momento en el que se produce el cierre brusco y que afecta la señal de los sensores que oscilan en fase hasta que el frente ha recorrido alrededor de 5 m; este tipo de oscilación podría ser propia de la estructura provocada por una insuficiente fijación de la tubería

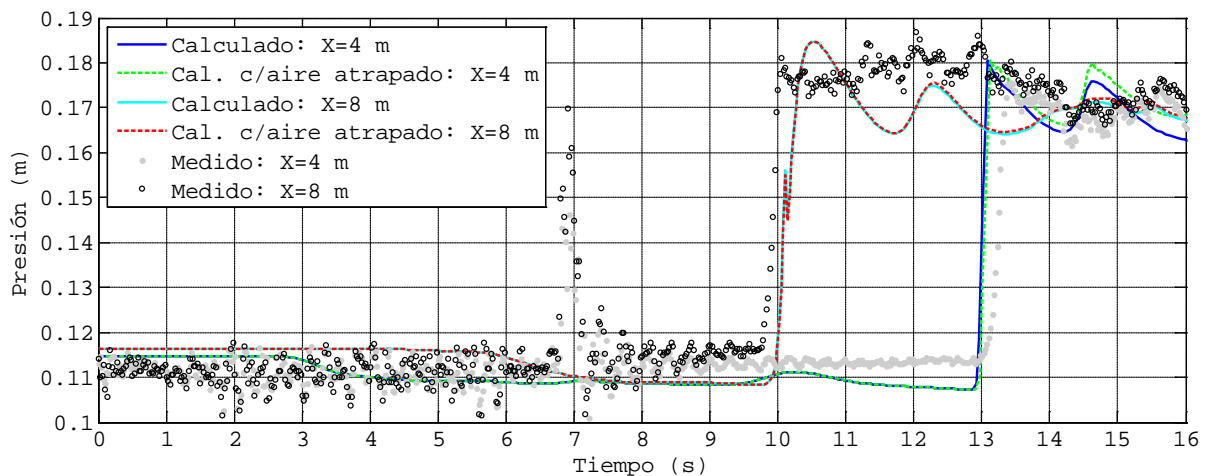


Figura 1 Comparación numérico experimental de la entrada en presión desde aguas abajo

Comparando la carga de presión medida con la calculada con los modelos numéricos sin/con aire observamos que ambos capturan bastante bien el instante en que arriba el frente de onda en presión, así como también la carga de presión del prime pico del transitorio. Los siguientes picos así como las oscilaciones de presión no son reproducidos correctamente (longitud y altura de ondas calculadas mayores a las medidas), pero el modelo es capaz de simular los valores medios de la carga de presión de dichas oscilaciones.

En la figura 2 se presentan tres instantes (instante de llegada a la estación, 8, 4 y 0 m) del avance del frente de onda en presión. De esta figura podemos destacar que el frente de onda en presión para ambos modelos llega a la estación 8 prácticamente al mismo tiempo, sin embargo a la estación 4 m el que incluye la fase de aire tiene un retraso de 0.10 m y en la estación 0 m un retraso de 0.30 m; el retraso del frente de onda en presión se debe a que presenta una velocidad menor provocada por la bolsa de aire existente delante del frente en presión y considerada en el análisis.

De los resultados de las figuras 1 y 2 podemos indicar que el modelo que incluye la fase de aire captura ligeramente mejor los instantes de llegada de los frentes de onda de presión, sobretudo en la estación 4 m. Las cargas de presión para el caso con aire atrapado son levemente mayores después de que la bolsa de aire ha sido propagada durante un cierto tiempo.

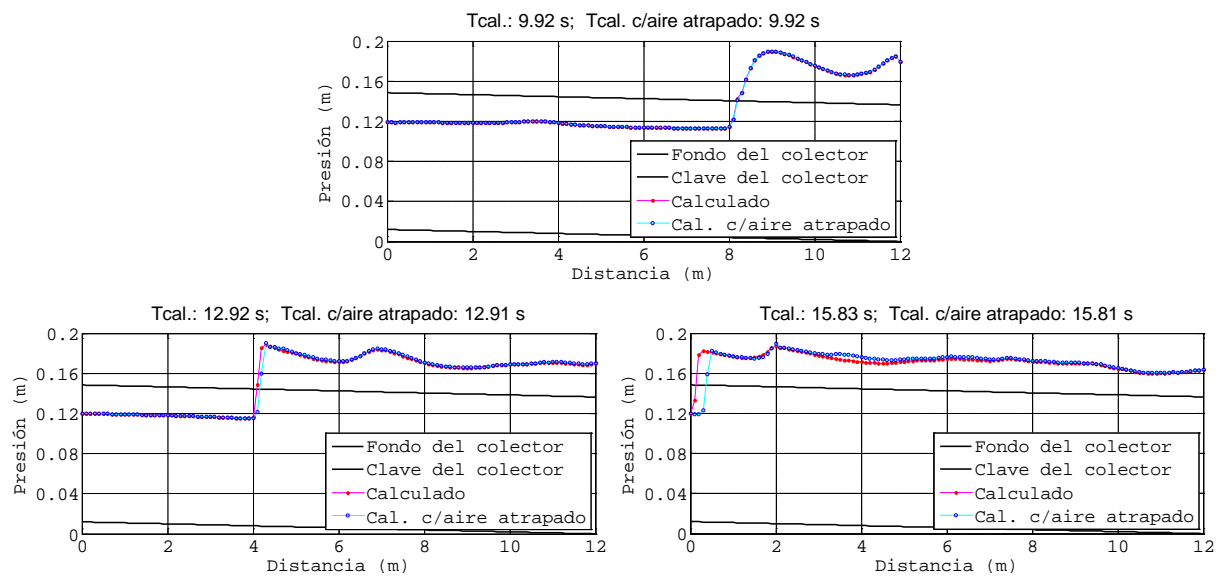


Figura 2 Frentes de onda en presión en diferentes instantes de tiempo

El aire atrapado delante del frente de onda en presión, como lo dejan ver las figuras anteriores juega un papel importante, por esta razón en la siguiente figura se presenta la evolución temporal de sus propiedades, desde el instante en que el colector entra en carga, donde se considera que el aire se encuentra a presión atmosférica hasta el instante en que el volumen es prácticamente cero debido a que el frente de onda está alcanzando el extremo del colector aguas arriba. En esta figura podemos destacar como la carga de presión del aire se va incrementando en función de la variación del volumen y densidad del aire.

El valor de la velocidad de la onda en presión utilizado fue el medido en el ensayo ($a=1.135$ m/s), al parecer bajo para flujo mixto, pero también es un parámetro indicativo de que en el ensayo existe una cierta cantidad de aire mezclado con el agua (Wylie and Streeter 1993). Un análisis de sensibilidad de este parámetro (resultados no incluidos), revelaron que tiene una influencia importante en la velocidad del frente de onda de presión y la carga de presión, ya que a mayor velocidad en la onda de presión mayor velocidad del frente de onda y viceversa.

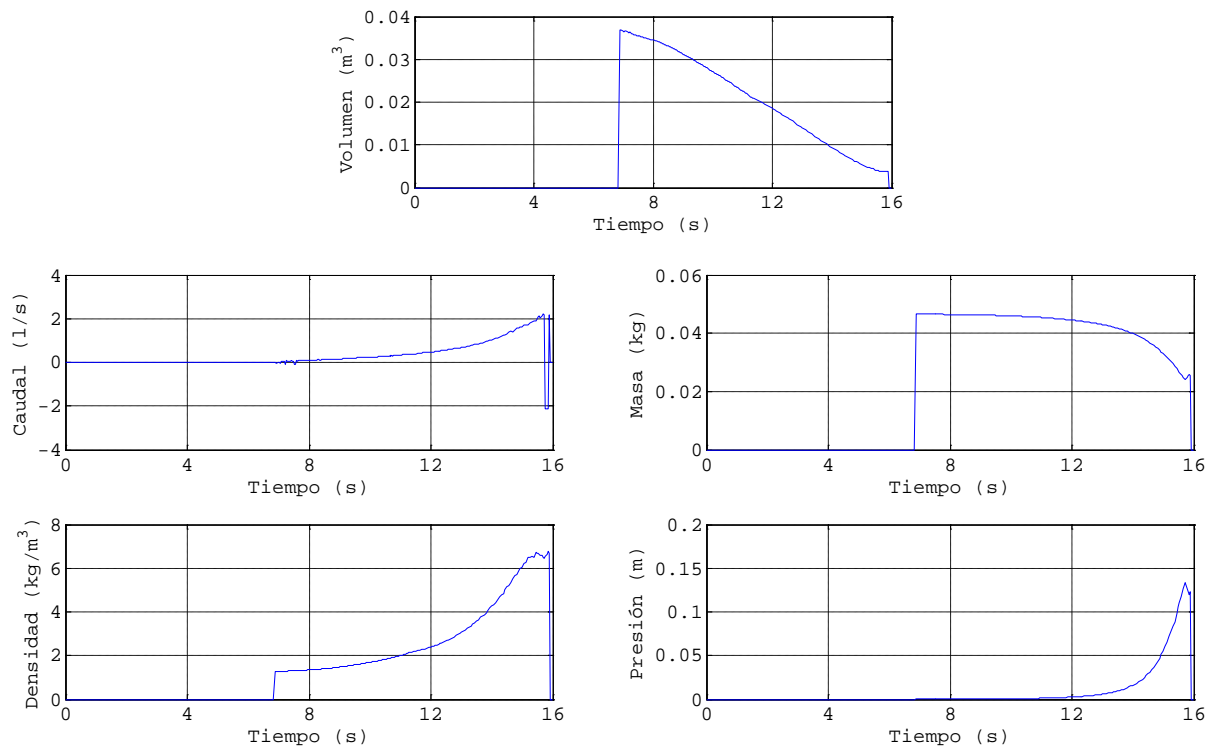


Figura 3 Propiedades del aire atrapado delante del frente de onda en presión

6 Conclusiones

En este trabajo se presentó un modelo numérico para modelar flujo mixto (flujo en lámina libre y flujo en presión), el cual ha sido comparado con un ensayo de laboratorio. El ensayo de laboratorio es especial, ya que en su desarrollo queda atrapado una cantidad de aire tanto mezclado con el agua como en bolsas de aire delante del frente de onda de presión, por lo que fue necesario incluir una formulación para considerar la fase de aire (mezcla agua/aire no incluido).

De la comparación de la carga de presión medida y calculada, podemos destacar que los modelos numéricos presentados son capaces de reproducir de forma bastante aproximada los ensayos de laboratorio, tanto la llegada del frente de onda de presión, así como la carga de presión del primer pico de presión del transitorio. El modelo numérico que incluye la formulación para considerar la fase de aire, se comportó ligeramente mejor frente al modelo que no la considera.

El ensayo presenta oscilaciones de presión, las cuales los modelos numéricos no fueron capaces de reproducir en su totalidad (longitud y altura de ondas calculadas mayores a las medidas), pero si los valores medios de la carga de presión de dichas oscilaciones.

Las bolsas de aire formadas delante del frente de onda provocan la disminución de la velocidad del frente de onda en presión así como un aumento en la carga de presión.

El hecho de que el modelo numérico que incluye la formulación de la fase de aire, tenga poca influencia sobre la dinámica del flujo de agua, es en primer lugar porque la longitud del colector es corta, (la figura 2 muestra que entre más alejado se está del extremo aguas abajo más importante es el efecto del aire atrapado delante del frente de onda de presión), y por el otro, como lo reportó Silvestre (1998), además del aire atrapado delante del frente de onda en presión, una cantidad de aire coexiste mezclado con el agua; este fenómeno no fue incluido en el modelo numérico, por lo que tiene que ser modelado como flujo en dos fases (agua y aire). Una opción de hacer esto es utilizando las ecuaciones que describen el flujo en dos fases de forma simplificada cuando la cantidad de aire presente es pequeña, en estos casos la mezcla agua/aire puede ser tratada como equivalente y modelarlo con las ecuaciones correspondientes a una fase.

Con el modelo numérico y la formulación de la fase de aire implementado, sin duda alguna se podrá realizar un mejor diseño de grandes colectores pluviales y sobre todo una buena localización de puntos de ventilación, en función de la carga de presión del aire, carga piezométrica permisible en función de la cota del terreno y material del colector; porque si no es posible diseñar colectores para caudales con periodos de retorno altos por lo menos se evite el daño de estas estructuras teniendo dentro de los mismos un flujo más controlado.

7 Referencias bibliográficas

- 1 Aragón-Hernández, J. L. (2009). *Modelación numérica de flujo mixto y drenaje dual en áreas urbanas. Proyecto de tesis doctoral*, DHEMA, ETSECCPB, Universitat Politècnica de Catalunya, 76 pp, Barcelona, España.
- 2 Aragón-Hernández, J. L., Concha, R., Bladé, E., and Gómez, M. (2009). “Comparación de dos esquemas numéricos en la modelación de flujo mixto en colectores pluviales.” *I Jornadas de Ingeniería del Agua*, Madrid, España, 1-9.
- 3 Bladé, E. (2005). “Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales. Análisis integrado con esquemas en volúmenes finitos en una y dos dimensiones.” *Tesis doctoral*, ETSECCPB, UPC, 315 pp.
- 4 Bourdarias, C., and Gerbi, S. (2007). “A finite volume scheme for a model coupling free surface and pressurised flows in pipes.” *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 209(1), 109-131.
- 5 Carlos, M., D. P., Arregui, F. J., Cabrera, E., and Asce, M. (2011). “Understanding Air Release through Air Valves.” *Water*, (April), 461-469.
- 6 León, A., Ghidaoui, M., Schmidt, A., and Garcia, M. (2010). “A robust two-equation model for transient-mixed flows.” *Journal of Hydraulic Research*, 48(1), 44-56.
- 7 Li, J., and McCorquodale, A. (1999). “Modeling mixed flow in storm sewers.” *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(1170-1180).
- 8 Martin, C. S. (1976). “Entrapped air in pipelines.” *2nd International Conference on Pressure Surges*, British Hydrodynamics Research Association, 15-28.
- 9 Preissmann, A. (1961). “Propagation des intumescences dans les canaux et rivières.” *First congress of French Association for Computation*, Grenoble, France.
- 10 Silvestre, F. (1998). *Estudio experimental de la entrada en presión por ambos extremos en conductos de redes de alcantarillado*. DHEMA, ETSECCPB, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España, 98 pp.
- 11 Vasconcelos, J. G., Wright, S. J., and Roe, P. L. (2006). “Improved Simulation of Flow Regime Transition in Sewers: Two-Component Pressure Approach.” *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(6), 553-562.
- 12 Wylie, E. B., and Streeter, V. L. (1993). *Fluid transients in systems*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New York, 463.
- 13 Zhou, F., Hicks, F. E., and Steffler, P. M. (2002). “Transient Flow in a Rapidly Filling Horizontal Pipe Containing Trapped Air.” *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(6), 625-634.