

MODELO MATEMÁTICO PARA EL ESTUDIO DE LA EXPULSIÓN DE AIRE AL FINAL DE UNA CONDUCCIÓN. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS PRINCIPALES PARÁMETROS.

Carlos, M., Arregui de la Cruz, F., Cabrera Marcet, E.

Abstract

The operations which consist in filling and emptying pipe systems involve the movement of big quantities of water and air. This kind of operations, as the possible fluid pressure alterations during the normal operation of the installation are some of the possible causes that may provoke the presence of trapped air.

The air pocket presence in the system makes more difficult the study of the transient because the theoretic model must include the equations related to the water column and the ones related to the air pocket. In this kind of transients there are some unknown parameters.

The realisation of this sensitivity analysis has been possible thanks to an important work laboratory results. In this work a big quantity of air expulsion tests at the pipe end has been done.

In this document a sensitivity analysis is presented which is capable of fixing the values range of the principal parameters. With this sensitivity analysis it is possible to study the influence of each parameter in the transient final result.

Keywords: Expulsion, air, trapped, water, pipe, parameters, model, analysis, sensitivity.

Resumen

Las operaciones de llenado y vaciado de agua de una instalación conllevan el desplazamiento de grandes cantidades tanto de agua como de aire. Este tipo de operaciones son algunas de las posibles causas por las cuales pueden aparecer bolsas de aire atrapado en la misma.

La aparición de bolsas de aire atrapado hace que el estudio del transitorio hidráulico se complique ya que el modelo teórico debe incluir tanto las ecuaciones de la columna de agua como las de la bolsa de aire. En estos transitorios existen una serie de parámetros de los cuales se desconoce en principio su valor.

Gracias a los resultados de un importante trabajo práctico en el que se estudia la expulsión de aire atrapado al final de una conducción realizados bajo unas condiciones iniciales y de contorno controladas, se ha elaborado un análisis de sensibilidad de los principales parámetros que intervienen en el transitorio.

En este documento se presenta un análisis de sensibilidad mediante el cual se fijan los rangos entre los que varían los valores de los principales parámetros del modelo. Además mediante dicho análisis de sensibilidad se estudia la influencia de cada uno de estos parámetros en el resultado final del transitorio.

Palabras clave: Expulsión, aire, atrapado, agua, conducción, parámetros, modelo, análisis, sensibilidad

1. Introducción

La presencia del aire atrapado en tuberías es un fenómeno bastante común que puede agravar los efectos perjudiciales originados por los transitorios hidráulicos, acentuando los picos de presión. Las altas presiones pueden provocar rupturas en la instalación y en sus accesorios, lo cual tiene una importante repercusión económica, Fuertes V.S.[1]. Además, las bolsas de aire pueden causar otra serie de efectos negativos en las instalaciones tales como la reducción de la capacidad de transporte de la instalación, la disminución del rendimiento de las bombas, la dificultad en el funcionamiento de los filtros, las vibraciones en tuberías, la corrosión de las conducciones, el desgaste de las partes móviles de los accesorios, los errores en la medida de caudal etc, Cabrera E. [2]

Para profundizar en el estudio de transitorios hidráulicos con aire atrapado en sistemas que cuentan con la presencia de una ventosa se estima necesario crear un modelo propio para poder actuar sobre los diversos parámetros que caracterizan el fenómeno. El modelo matemático que se pretende elaborar debe ser capaz de reproducir el transitorio que se produce cuando se procede al llenado completo de una instalación que en el instante inicial se encuentra parcialmente llena de agua. El modelo representa la expulsión de aire de una instalación determinada a través de una ventosa situada al final de la misma que a su vez es el punto más elevado. Al considerar la presencia de un flujo bifásico, el modelo debe contener y enlazar las ecuaciones correspondientes a los dos fluidos que intervienen en el proceso, es decir, aire y agua.

Los diferentes resultados teóricos que aporte el modelo podrán ser contrastados posteriormente con una serie de resultados obtenidos a partir de ensayos prácticos realizados en las instalaciones de W.L.|Delft Hydraulics. Estos resultados experimentales son determinantes a la hora de calibrar el modelo teórico.

2. Objetivos

El principal objetivo de este documento es elaborar un modelo matemático que sea capaz de reproducir el transitorio que se produce cuando partiendo de una instalación parcialmente llena de agua se procede a su llenado completo. El modelo que se pretende confeccionar debe considerar la expulsión de aire a través de una ventosa comercial situada al final de la instalación que a su vez es el punto más elevado de la misma. De este modo, el modelo debe contener y enlazar las ecuaciones correspondientes tanto a la columna de agua que se pone en movimiento como a la bolsa de aire situada en el extremo final de dicha columna de agua.

Posteriormente, los diferentes resultados teóricos que aporte el modelo podrán ser contrastados con los resultados de los experimentos realizados en las instalaciones de W.L.|Delft Hydraulics.

En el modelo existen una serie de parámetros difíciles de cuantificar y que pueden ser decisivos a la hora de resolver el transitorio. Dichos parámetros no se pueden determinar con aparatos de medida convencionales en el laboratorio con lo cual, en la mayoría de los modelos consultados, se opta por asignarles valores empíricos que se extraen de la bibliografía existente.

En este trabajo se pretende elaborar además, un análisis de sensibilidad que sea capaz de aportar detalles de la influencia de los distintos parámetros que intervienen en el transitorio sobre el resultado final del mismo.

3. Metodología

Al plantear el sistema de ecuaciones que describe el comportamiento de los dos fluidos (agua y aire) que se encuentran en el interior de la tubería se deben tener en cuenta:

- ? Las ecuaciones de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento que rigen el comportamiento de la columna de agua.
- ? Las ecuaciones que describen el comportamiento de la bolsa de aire en cuanto a la compresión y expansión del mismo.
- ? Las condiciones iniciales que señalan el punto de partida para la evolución del transitorio.
- ? Las condiciones de contorno que describen el comportamiento de los elementos activos.

En el modelo teórico propuesto se establecen una serie de suposiciones básicas de partida, es decir:

- ? El movimiento de la columna de agua se calcula como si no hubiera aire disuelto en ella de manera que la columna de agua empuja la bolsa de aire situada aguas abajo de la misma.
- ? Tanto la columna de agua como la bolsa de aire ocupan toda la sección transversal de la tubería.
- ? La interfase aire-agua es en todo instante perpendicular al eje longitudinal de la tubería. Esta interfase se considera que permanece perfectamente definida.
- ? El aire se considera gas perfecto y su evolución es politrópica.
- ? El factor de fricción calculado como si se tratase de flujo estacionario es aplicable a las condiciones de flujo transitorio.
- ? La celeridad del fluido es constante a lo largo del tiempo y del espacio. Se suponen uniformes las características del agua y del aire (cada una por separado) en toda la longitud. Se considera una evolución lineal del coeficiente de descarga de la ventosa con el grado de apertura de la misma durante el intervalo de tiempo que dura el cierre. Dicha suposición se puede considerar válida tras los resultados obtenidos en el análisis de los ensayos experimentales.

Con todas estas suposiciones de partida, el sistema sobre el que se trabaja sería como el de la figura 1:

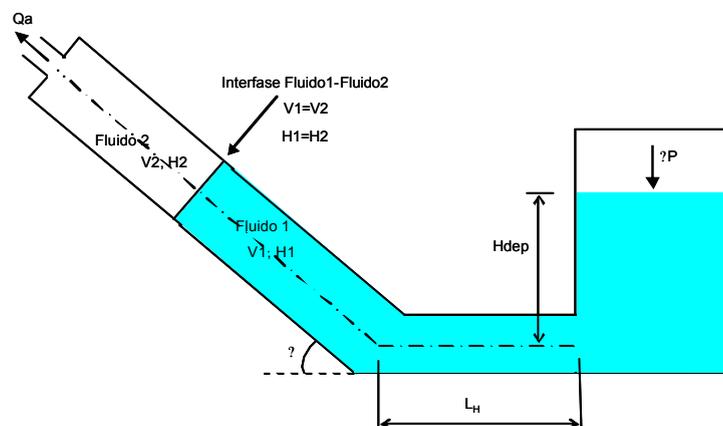


Figura 1. Esquema de la instalación

El procedimiento de trabajo seguido es el que se muestra en el esquema de la figura 2:

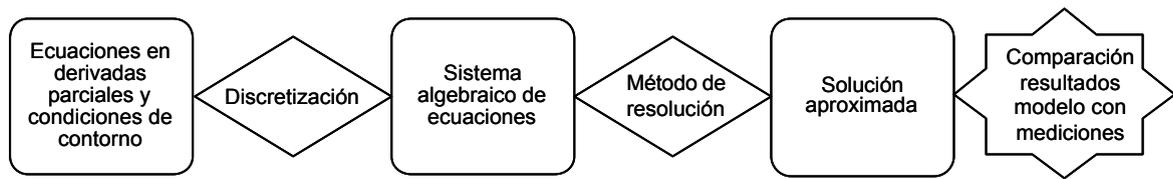


Figura 2. Esquema del procedimiento de cálculo

Las ecuaciones para la columna de agua se obtienen aplicando el balance diferencial de masa y el balance diferencial de fuerzas a un determinado volumen de control, Betamio de Almeida A. [3]. A partir del balance diferencial de masa, aplicando las transformaciones adecuadas se obtiene una expresión de la ecuación de continuidad que relaciona la altura piezométrica H , con la velocidad V del siguiente modo:

$$\frac{g}{a^2} \frac{dH}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{g}{a} V_{sen\theta} = 0 \quad (1)$$

Siendo a la celeridad del fluido y g la aceleración de la gravedad.

Procediendo del mismo modo con el balance diferencial de fuerzas aplicado al mismo volumen de control se obtiene:

$$\frac{dV}{dt} + f \frac{V|V|}{2D} + g \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

Donde f es el factor de fricción y D el diámetro de la tubería.

Así pues, se llega a la conclusión que para simular el comportamiento de la columna de agua se dispone del siguiente sistema de ecuaciones diferenciales:

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} + f \frac{V|V|}{2D} + g \frac{\partial H}{\partial x} &= 0 \\ \frac{g}{a^2} \frac{dH}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{g}{a} V_{sen\theta} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

El movimiento de la bolsa de aire se determina básicamente a partir del modelo teórico desarrollado por Martin (1976) [4] para calcular la oscilación de la presión de una bolsa de aire atrapada en una tubería sujeta a aperturas instantáneas de una válvula.

$$\frac{dH^*}{dt} + k \frac{H^*}{a} + \frac{dV_a}{dt} + k \frac{H^*}{a} = Q_a \quad (4)$$

En la expresión anterior la altura de presión de la bolsa de aire viene dada en términos de presión absoluta H^* . Por otro lado, Q_a es el caudal volumétrico de aire que es expulsado a través del orificio de la ventosa. El área del orificio de salida se representa como A_0 , V_a es el volumen de aire, mientras que k es el coeficiente politrópico.

Por otro lado la variación del volumen de la bolsa de aire está relacionada con la velocidad de la columna de agua del siguiente modo:

$$\frac{dV_a}{dt} = A V \quad (5)$$

Siendo A , el área de la sección transversal de la tubería de diámetro D .

El caudal de aire que se expulsa a través de la ventosa se puede obtener mediante las siguientes expresiones en función del carácter del flujo de aire:

En condiciones subsónicas, es decir, si $H^*/H_0^* \leq 1,89$, el caudal de aire se calcula como:

$$Q_a = C_d A_0 Y \sqrt{2g \frac{\rho}{\rho_a} H^* H_0^*} \quad (6)$$

Siendo C_d el coeficiente de descarga, Y el factor de expansión, ρ la densidad del agua, ρ_a la densidad del aire y H_0^* es la altura de presión del aire en el instante inicial, que en este caso es igual a la presión atmosférica en términos absolutos.

A su vez, el factor de expansión se puede expresar según Martin (1976) [4] como:

$$Y = \sqrt{\frac{k \left(\frac{H_0^*}{H^*}\right)^{2/k} - 1}{k - 1} \frac{1 - \left(\frac{H_0^*}{H^*}\right)^{(k-1)/k}}{1 - \frac{H_0^*}{H^*}}} \quad (7)$$

Donde k es el coeficiente politrópico.

Sin embargo, en condiciones de flujo supersónicas, es decir, si $H^*/H_0^* > 1,89$, la velocidad del aire en el cuello de la ventosa es constante, bloqueándose el caudal volumétrico expulsado:

$$Q_a = C_d A_0 \sqrt{2g \frac{\rho}{\rho_a} H^* \frac{2}{k-1} \left(\frac{H_0^*}{H^*}\right)^{\frac{k-1}{k}}} \quad (8)$$

En este caso, el coeficiente de expansión Y adopta un valor de 0.684

C_d es el coeficiente de descarga de la ventosa, el cual se puede determinar bien a partir de unas tablas hidráulicas convencionales para flujos compresibles a través de orificios o toberas o bien a partir de las recomendaciones de la American Gas Association (1978) [5]

La resolución del transitorio, considerando el modelo elástico, se realiza mediante métodos numéricos ya que el sistema de ecuaciones diferenciales no se puede resolver analíticamente. El método numérico de resolución adoptado ha sido el método de las características que consiste fundamentalmente en una discretización de las ecuaciones en derivadas parciales.

La discretización para definir el esquema en diferencias se efectúa en el plano (x,t) para cada variable dependiente velocidad, $V(x,t)$ y altura piezométrica, $H(x,t)$. La solución numérica se obtiene de una forma progresiva, para cada instante de tiempo $(0 < t < 8)$ y cada punto del sistema en $0 < x < L$ a partir de unos valores iniciales conocidos $V(x,0)$, $H(x,0)$ y de las condiciones de contorno.

En la instalación estudiada, se divide la columna de agua en un total de $N = 15$ tramos, cada uno con una longitud Δx metros. En cada instante de tiempo se calcula la presión y la velocidad en todos los puntos en los que ha quedado dividida la columna de agua,

desde $i=0$ hasta $i=15$. Una vez fijados el número de puntos de cálculo se determinan los saltos de longitud y de tiempo, Δx y Δt , del siguiente modo:

$$\Delta x = \frac{L(t)}{N} \quad (9)$$

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{a} \quad (10)$$

Como la longitud de la columna de agua cambia con el tiempo en su avance hacia la ventosa, también varían el incremento de espacio y consecuentemente el de tiempo. Por otro lado, se mantiene siempre el mismo número de puntos de cálculo independientemente de la longitud de la columna de agua.

Otras ecuaciones a tener en cuenta en el modelo son las condiciones iniciales y las condiciones de contorno del sistema. Inicialmente el fluido se encuentra en reposo, la ventosa se encuentra abierta y el depósito que contiene agua se encuentra comunicado al exterior, por lo que la presión inicial del sistema es igual a la presión atmosférica.

En el modelo, se ha supuesto que el inicio del cierre de la ventosa empieza cuando la longitud de la columna de agua es igual a la longitud de la tubería. El cierre completo se traduce en el modelo añadiendo una condición sobre el volumen de aire atrapado, especificando que éste sea menor a una cantidad predefinida. El valor de este volumen de aire crítico que queda atrapado es un valor cercano a los valores de aire atrapado resultantes en los ensayos de laboratorio.

$$\text{Volumen de aire crítico} < 0,04 \text{ m}^3 \quad (11)$$

Se ha supuesto que el coeficiente de descarga de la ventosa evoluciona de manera lineal con la posición del flotador en cada instante de tiempo, suposición válida una vez contrastados los resultados de las mediciones ofrecidas por transductor de posición del flotador.

El cierre de la ventosa se representa en el modelo de manera que a partir de un determinado instante t_o el coeficiente de descarga C_d empieza a disminuir linealmente del siguiente modo:

$$C_d(t) = C_{dini} \frac{t_c - t}{t_c - t_o} \quad t_o \leq t \leq t_c \quad (12)$$

4. Resultados

El análisis de sensibilidad llevado a cabo ha sido un proceso largo y complicado que se ha modificado paulatinamente a medida que se han extraído conclusiones razonadas. Se podría decir que dicho análisis se ha llevado a cabo siguiendo una serie de etapas en las cuales se han ido afinando los resultados.

Existen una serie de coeficientes de los cuales no se sabe a priori su valor. Es el caso de la celeridad (a), el factor de fricción (f), el coeficiente politrópico (k) y el volumen de aire atrapado en el sistema (Vol aire). Uno de los objetivos de este modelo es efectuar un análisis de sensibilidad en el cual se demuestre el efecto de todos y cada uno de los parámetros anteriores sobre la presión máxima en el sistema y la velocidad de la columna de agua. Además se pretende obtener una aproximación del valor numérico de cada uno de ellos que hace que el error de cálculo del modelo sea el menor posible. El modelo calcula la combinación óptima de estos factores con la cual se logra mínimo error de cálculo.

Los primeros cálculos realizados en el análisis de sensibilidad se efectuaron asignando a cada parámetro cinco valores numéricos diferentes, de manera que con cada combinación de parámetros se resolvía un transitorio diferente. Con este método, la cantidad de transitorios calculados con unas determinadas condiciones iniciales era de unos 5.000 transitorios. La selección de los valores numéricos de cada parámetro que proporcionen unos resultados que se ajusten a los resultados teóricos se basa principalmente en la definición de una función de error. Esta función calcula el error como la diferencia entre los valores calculados por el modelo y los valores medidos en los ensayos entre dos instantes de tiempo dados. Dichos instantes de tiempo son t_p y t_{p0} , siendo t_p el instante en el cual empieza la compresión de la bolsa de aire y t_{p0} el instante de tiempo en el cual se anula presión después de llegar a su valor máximo.

$$Error \text{ Presión} = \int_{t_p}^{t_{p0}} (Presión \text{ calculada} - Presión \text{ medida})^2 \quad (13)$$

$$Error \text{ Velocidad} = \int_{t_p}^{t_{p0}} (Velocidad \text{ calculada} - Velocidad \text{ medida})^2 \quad (14)$$

Seguidamente se presenta el mejor ajuste obtenido, en el gráfico se comparan los valores medidos en un ensayo determinado con los valores obtenidos con el modelo teórico propuesto. En la figura 3 se representa el transitorio desde el inicio del mismo, t_i hasta el instante en el cual se anula la presión después de haber alcanzado su valor máximo, t_{p0} . En esta misma figura se muestran los valores de los parámetros que logran el mejor ajuste entre las variables calculadas y las medidas.

En la figura, se entiende como P_{depo} la suma de la altura inicial de la columna de agua sobre el eje de la tubería y la sobrepresión inicial que se aplica en cada caso, k es el coeficiente politrópico, a es la celeridad del fluido, f es el factor de fricción con las paredes de la tubería, t_{cierre} es el tiempo que tarda en cerrar la ventosa, V_{aire} es la cantidad de aire que queda atrapado en el sistema, L es la longitud total de la tubería y C_d es el coeficiente de descarga.

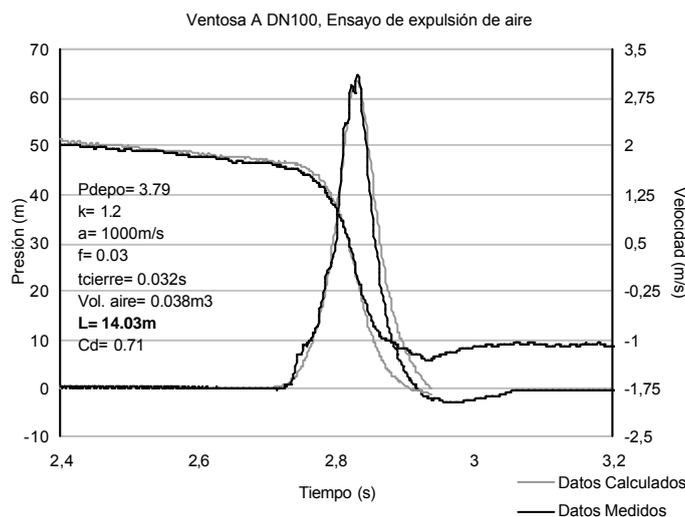


Figura 3. Ajuste de los datos calculados con los datos medidos

Además de calibrar el modelo, en este trabajo se plantea un análisis de sensibilidad que sea capaz de aportar detalles de la influencia de los distintos parámetros que intervienen en el transitorio sobre el resultado final del mismo.

El análisis siguiente tiene por objetivo mostrar cómo afecta la variación de un sólo parámetro al transitorio. Con este fin, se representa gráficamente el mismo ensayo cambiando en cada paso únicamente un parámetro dejando el resto con el valor del mejor ajuste. Se prueban dos valores de cada parámetro, uno menor y otro mayor que el valor presentado en la figura 3.

Influencia del coeficiente politrópico.

El coeficiente politrópico k determina el tipo de evolución que sigue el aire en su proceso de compresión y expansión. El coeficiente politrópico utilizado en el ajuste óptimo de la figura 3 ha sido $k=1,2$. Por tanto cabe analizar lo que sucede al considerar la evolución del aire isoterma $k=1$ o bien adiabática $k=1,4$. Al considerar $k=1$, el fenómeno se retrasa ligeramente en el tiempo mientras que con $k=1,4$ el fenómeno se adelanta. Si se tiene en cuenta que la escala de tiempos es del orden de milisegundos, realmente la diferencia de resultados entre ambos supuestos es mínima en cuanto a tiempos. Tampoco son considerables los cambios experimentados por el pico máximo de presión si bien con la evolución isoterma, $k=1$, la presión máxima calculada es ligeramente menor que la presión máxima medida. Por otro lado, la duración del proceso de compresión-expansión, es algo mayor. Así pues, al considerar un coeficiente politrópico, $k=1$, habría que reducir el volumen de aire atrapado para lograr un mejor ajuste del pico máximo de presión así como de la duración del proceso de compresión-expansión.

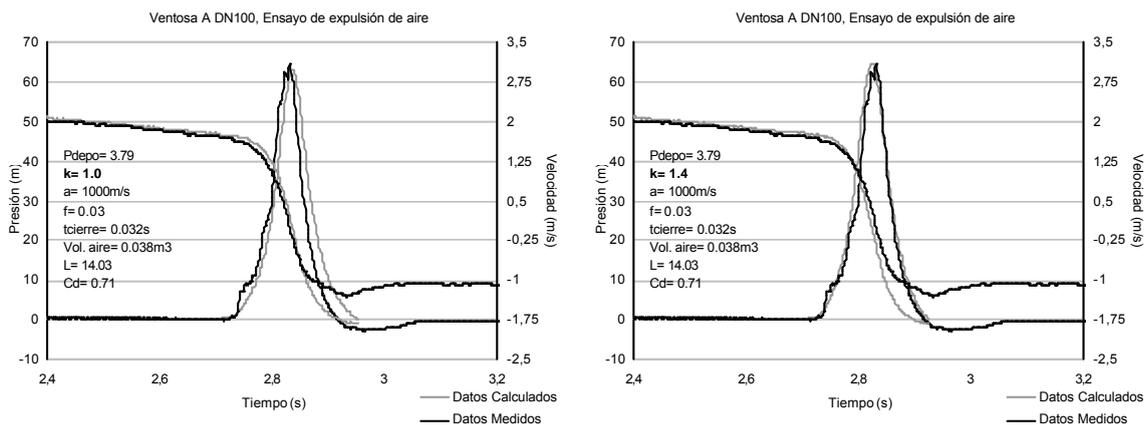
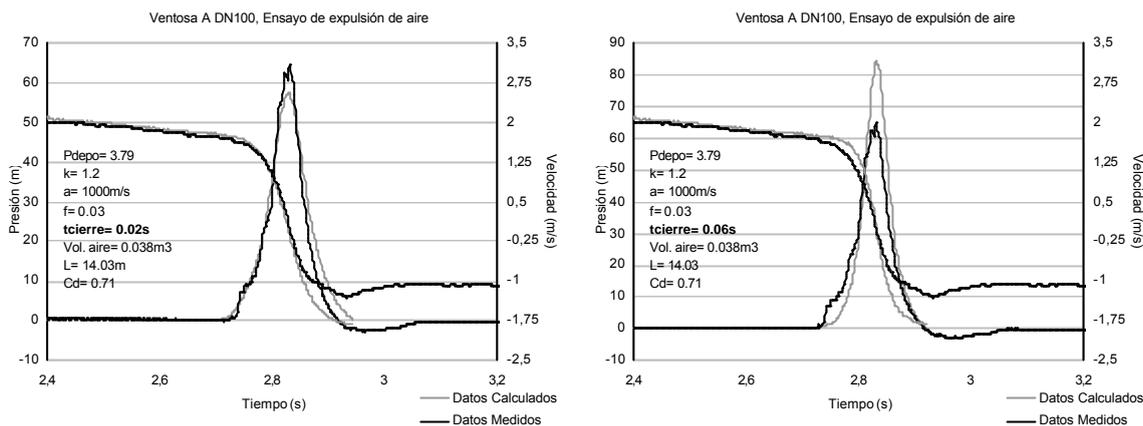


Figura 4. Efectos sobre el transitorio al modificar k

Influencia del tiempo de cierre de la ventosa.

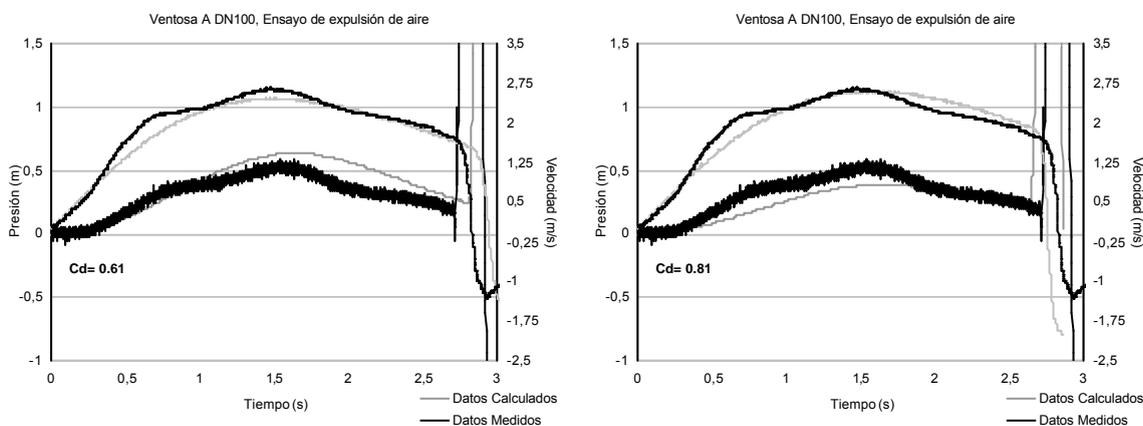
Se ha optado en este caso por comprobar lo que ocurre con dos tiempos de cierre $t_{cierre}=0,02 \text{ s}$ y $t_{cierre}=0,06 \text{ s}$, bastante alejados del tiempo de cierre utilizado en un principio en el ajuste óptimo. Con un tiempo de cierre de la ventosa más rápido $t_{cierre}=0,02 \text{ s}$, queda más aire atrapado en el interior de la conducción, lo cual se refleja en una mayor duración del proceso de compresión-expansión. Se considera que el aire atrapado ejerce un efecto colchón y por lo tanto, disminuye la magnitud del pico de presión máxima.

Al considerar un tiempo de cierre de la ventosa más lento, $t_{cierre}=0,06 \text{ s}$, se expulsa más cantidad de aire a través de la ventosa. Esto se traduce en que queda menor cantidad de aire atrapado en la instalación, lo cual afecta tanto a la magnitud del pico de presión máxima que es más elevado, como a la duración del proceso de compresión-expansión que disminuye. Del mismo modo se observa que la deceleración de la columna de agua aumenta como consecuencia de quedar menos aire atrapado en el sistema.

Figura 5. Efectos sobre el transitorio al modificar t_{cierre}

Influencia del coeficiente de descarga.

El tramo de la curva de presión donde realmente se aprecia la influencia del coeficiente de descarga de la ventosa es el tramo comprendido entre el instante inicial, t_i , y el instante en el cual empieza a subir realmente la presión t_p . Aplicando un coeficiente de descarga menor al obtenido con el mejor ajuste, $C_d=0,61$, la presión en dicho tramo aumenta como consecuencia de haber atribuido a la ventosa menor capacidad de descarga de aire. Además la llegada de agua a la ventosa se retrasa. Por otra parte, con un coeficiente de descarga mayor, $C_d=0,81$, coeficiente de descarga calculado a partir de los ensayos específicos para la determinación del coeficiente de descarga de aire de esta ventosa, la presión entre los instantes inicial y de inicio del aumento de la presión, t_i y t_p disminuye debido a que aumenta la capacidad para expulsar aire.

Figura 6. Efectos sobre el transitorio al modificar C_d

Influencia del factor de fricción.

El factor de fricción de la tubería, tanto su valor como su posible evolución a lo largo de la sección de la tubería y del tiempo, es difícil de determinar en cualquier transitorio hidráulico, y especialmente en este caso en el cual existe un flujo bifásico. En cualquier caso, en el presente trabajo el factor de fricción se ha considerado constante ya que su estudio se escapa de los objetivos previstos. Simplemente se procura ofrecer una visión bastante amplia de la influencia de dicho factor en este transitorio. De este modo se resuelve el transitorio con dos valores diferentes del coeficiente de fricción $f=0,02$ y $f=0,07$. Aunque este último valor no sea físicamente correcto, se ha considerado de manera que se permita observar la evolución de los resultados

obtenidos y establecer comparaciones. Además, se entiende que de este modo se incluyen las pérdidas menores de la instalación.

El factor de fricción menor $f=0,02$, adelanta el instante de cierre de la ventosa ya que la columna de agua llega antes al flotador que en los ensayos prácticos. Por otro lado, al considerar un factor de fricción mayor $f=0,07$ el instante de cierre de la ventosa se retrasa.

La única variable que experimenta un cambio considerable en el análisis anterior es la presión máxima registrada y el tiempo de llegada de la columna de agua a la ventosa. No se observa un cambio importante ni en la anchura del pico de presión ni en la deceleración de la columna de agua. Con un coeficiente de fricción $f=0,02$, el valor de la presión máxima es mayor que la medida mientras que cuando se supone $f=0,07$, la presión máxima disminuye, ya que la velocidad de llegada de la columna de agua al flotador en este último caso es menor.

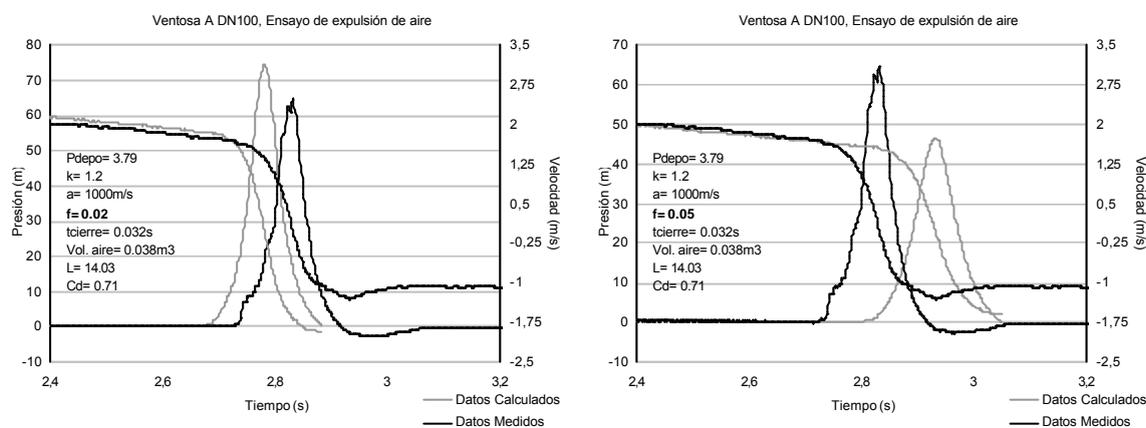


Figura 7. Efectos sobre el transitorio al modificar f

Influencia del volumen de aire atrapado.

En un transitorio en el cual aparecen dos fluidos, en este caso aire y agua, es fundamental la cantidad de aire que queda atrapado en el sistema a la hora de determinar la magnitud de la presión máxima. Cualquier cambio en el volumen de aire atrapado altera completamente los resultados de la simulación. Para mostrar los efectos del volumen de aire atrapado se presentan dos simulaciones realizadas con dos volúmenes de aire atrapado distintos: $\text{Vol. Aire}=0,02\text{ m}^3$ y $\text{Vol. Aire}=0,048\text{ m}^3$. Con el primer valor disminuye la duración del proceso de compresión-expansión calculado respecto del medido mientras que la presión máxima y la deceleración de la columna de agua aumentan. Por otro lado, al considerar más cantidad de aire atrapado, aumenta la duración del proceso de compresión-expansión y disminuyen la presión máxima y la deceleración de la columna de agua.

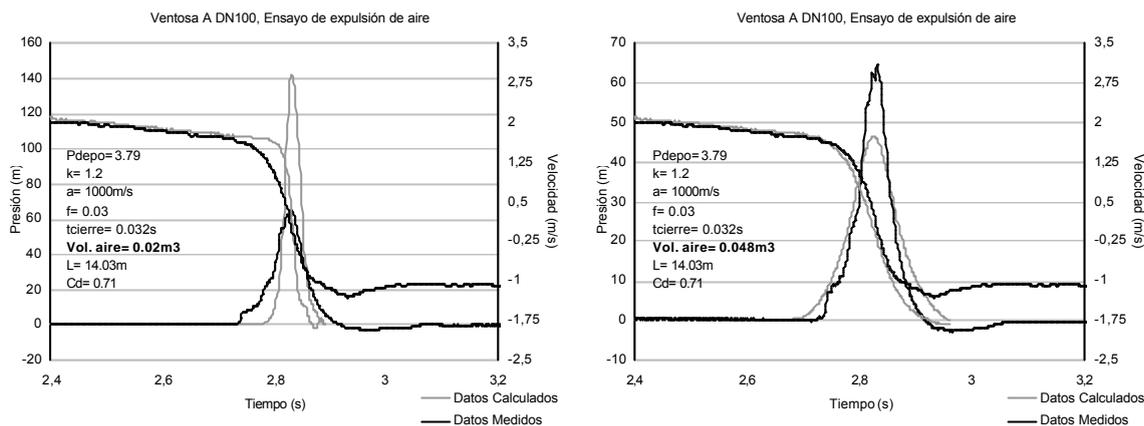


Figura 8. Efectos sobre el transitorio al modificar el volumen de aire atrapado

5. Conclusiones

Con el modelo teórico propuesto en el cual se han considerado una serie de simplificaciones, se han logrado ajustar los valores teóricos a unos valores medidos en un ensayo de laboratorio realizado bajo condiciones controladas.

Gracias al análisis de sensibilidad de los parámetros que intervienen en el evento estudiado, se ha establecido el rango de variación de cada uno de ellos en un transitorio concreto al tiempo que se analiza la influencia de los mismos en el resultado final. Todos los parámetros analizados modifican en cierta medida el resultado final del transitorio.

Del análisis individual de cada parámetro se observa en líneas generales que mientras unos valores inciden básicamente en la magnitud del pico máximo de presión, como es el caso del volumen de aire atrapado al final del evento o del tiempo que tarda en cerrar la ventosa, otros en cambio inciden en el avance o retraso del instante en el cual se produce este pico de presión máxima como es el caso del factor de fricción.

Por otro lado el coeficiente de descarga influye en la mayor o menor compresión de la bolsa de aire mientras la ventosa se encuentra abierta. El uso de un valor u otro del coeficiente politrópico no afecta en gran medida el resultado, si bien parece claro que no se trata de un fenómeno isoterma. Finalmente, en este transitorio se ha optado por mantener un valor constante de la celeridad de la onda, fijándolo igual a la del agua ya que dicho valor es el que ha proporcionado el mejor ajuste.

Aunque estas conclusiones sobre el modo la influencia de los diferentes parámetros son ciertas y de gran ayuda para analizar el fenómeno ocurrido, cabe decir, que el resultado final de los valores de presión máxima registrada en el sistema y de velocidad de la columna de agua varían según la combinación de los parámetros mencionados.

Referencias

- [1] Fuertes V.S. (2001) Transitorios hidráulicos con aire atrapado. Tesis doctoral. Universidad politécnica de Valencia.
- [2] Cabrera E., Fuertes V.S., García-Serra J., Iglesias P., Izquierdo J. (1997) Llenado de tuberías con aire atrapado. Ingeniería del agua. Vol. 4.
- [3] Betamio de Almeida A., Koelle E. (1992) Fluid transients in pipe networks. Computational mechanics publications. Elsevier applied science. Southampton. United Kingdom. ISBN 1 56252 096 2.

[4] Martin C.S. (1976) Entrapped air in pipelines. BHRA. Proc 2nd International conference on pressure surges. Bedford, England.

[5] American water works association (2001) Air release, air/vacuum, and combination air valves. Manual of water supply practices M51. First edition.

Correspondencia (Para más información contacte con):

Mar Carlos Alberola
Departamento de Ingeniería mecánica y construcción
Universitat Jaume I
Campus Riu Sec. Av. De Vicent Sos Baynat s/n. 12071 Castelló de la Plana
Tel. 34 964 728114
Fax. 34 964 728106
E-mail: ncarlos@emc.uji.es