

XII Simposio Iberoamericano sobre planificación de sistemas de abastecimiento y drenaje

“INTERACCIÓN FLUIDO ESTRUCTURA EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO: ANÁLISIS DE UN ACCIDENTE EN LA ESTACIÓN DE BOMBEO DE TELHEIRAS”

Mariana Simão (1), Helena M. Ramos (2), Jesus Mora-Rodríguez (3)

(1) Instituto Superior Técnico, Lisboa, +351218418128, m.c.madeira.simao@ist.utl.pt

(2) Instituto Superior Técnico, Lisboa, +351218418151, hr@civil.ist.utl.pt

(3) Universidad de Guanajuato, Guanajuato, +524731020100, jesusmora@ugto.mx

RESUMEN

Las ondas causadas por golpes de ariete que impactan a las conexiones de instalaciones hidráulicas, pueden producir vibraciones que se traducen en una variedad de respuestas estructurales en sitios distantes de la unión. Además, la vibración en la unión, inducirá transitorios en la columna de fluido en forma de ondas acústicas alejándose desde la misma. El resultado será un movimiento interactivo complejo entre la tubería y el fluido, con formas de onda subsiguientes que dependerán principalmente de las características de la estructura. En este artículo se hace un análisis FSI (Interacción fluido-estructura) de la transferencia de impulso y fuerzas entre una tubería y el fluido contenido. Las ecuaciones y relaciones constitutivas del flujo de fluidos se acoplan a las relaciones de tensión-deformación.

Palabras clave: Golpe de ariete, respuestas estructurales, FSI, relaciones de tensión-deformación.

ABSTRACT

Water-hammer waves impacting at junctions may set up vibrations that, may translate to a variety of structural responses at locations distant from the junction. In addition, the vibrating junction will induce fluid transients in the contained liquid column, with acoustic waves traveling away from the junction. The result will be complex interactive motion in both the piping and liquid, with subsequent waveforms highly dependent on the characteristics of the structure. FSI deals herein with the transfer of momentum and forces between a pipeline and its contained fluid. The governing equations and constitutive relations of fluid flow are coupled to stress-strain relations.

Key words: Water-hammer, structural responses, FSI, stress-strain relations.

SOBRE EL AUTOR PRINCIPAL

Mariana Simão: Estudiante de doctorado en el Instituto Superior Técnico (Ingeniería Civil). Investigadora de CEHIDRO. Publicaciones (3 informes técnicos, 6 artículos, 3 revistas) en temas de Agua y Energía; Modelos experimentales y análisis computacional basado en modelos de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).

INTRODUCCIÓN

El fenómeno de movimiento de la tubería relacionada con el movimiento irregular del fluido se denomina interacción fluido-estructura, o simplemente FSI (Fluid Structure Interaction). Este fenómeno consiste en la transferencia de momento y de fuerzas entre la tubería y el líquido contenido durante el movimiento irregular del fluido, que se manifiesta por la vibración de la tubería y perturbaciones en la velocidad y la presión del líquido. De una manera sencilla, los efectos causados por el fluido en la estructura (axial elástica y deformación radial, axial y movimiento de torsión) afectan la presión y velocidad del fluido (Kratz, *et al.*, 2003). Cuanto más fuertes las vibraciones, más rápido ocurre la propagación de roturas, aumentando los costes de mantenimiento y el riesgo de operación.

En este trabajo se describe un violento accidente ocurrido en una estación principal de bombeo del sistema de distribución de agua de Lisboa (Portugal). Este grave accidente indujo desplazamientos de tubería poniendo la instalación fuera de servicio. La tarea principal de este documento consiste en reproducir las causas por detrás de este extraño accidente. Este trabajo es el resultado de la continuación de un estudio realizado en 2008.

FUNDAMENTOS

El golpe de ariete se produce cuando la energía cinética de un fluido se convierte en energía elástica. Pero sólo los cambios rápidos de la velocidad de flujo producen este efecto, por ejemplo, el cierre repentino de una válvula de compuerta o el fallo repentino o arranque de una bomba. Debido a la inercia del fluido, la velocidad de flujo de la columna de líquido en su conjunto ya no es capaz de ajustarse a la nueva situación. El fluido se deforma, con transitorios de presión que acompañan el proceso de deformación. La razón por la cual la sobrepresión es tan peligrosa es porque la misma

viaja en el orden de la velocidad del sonido (aproximadamente 1000 m/s para un gran número de materiales de tuberías) y causa la destrucción de cada parte del sistema de las tuberías que alcanza (Lüdecke y Kothe, 2006).

Para construir un modelo FSI, deben existir dos campos distintos, dominio líquido y dominio sólido, presentes durante todo el intervalo de tiempo del modelo. Los modelos FSI totalmente acoplados se crean para captar los fenómenos transitorios. Las ecuaciones subyacentes y las relaciones constitutivas del flujo de fluidos se acoplan a las relaciones de tensión-deformación. Con las fronteras apropiadas y las condiciones iniciales, estas ecuaciones se aplican en forma de ecuaciones diferenciales parciales (PDE – Partial Differential Equations) en un software de elementos finitos personalizable (Sheer, 2008).

La mayoría de los métodos FSI utilizan el abordaje de Gauss-Seidel (SGG) (Newman *et al.*, 1999) para el análisis acoplado, en el que el cálculo del fluido y el cálculo estructural son realizados de una manera secuencial para llegar a una solución multifásica. Los desafíos que se pueden encontrar cuando se realiza el cálculo a través de un procedimiento iterativo conjunto (acoplado) son el de mantener una transferencia de datos adecuada entre las fases y llegar a una solución convergente de forma eficiente.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Teniendo en cuenta la disposición de la estación de bombeo (Figura 1), este sistema comprende tres conjuntos de bombas en paralelo que son alimentados por un gran depósito de agua a través de dos tubos de acero, identificados por CRE y CRD. Estos tubos están conectados al tubo de acero de succión principal, CPC, colocado de forma horizontal con soportes de hormigón, que conecta a las bombas y al tubo de derivación E. El tubo CPC tiene dos válvulas de mariposa (V58 y V59) y una tercera válvula (V53) colocada en el tubo E.

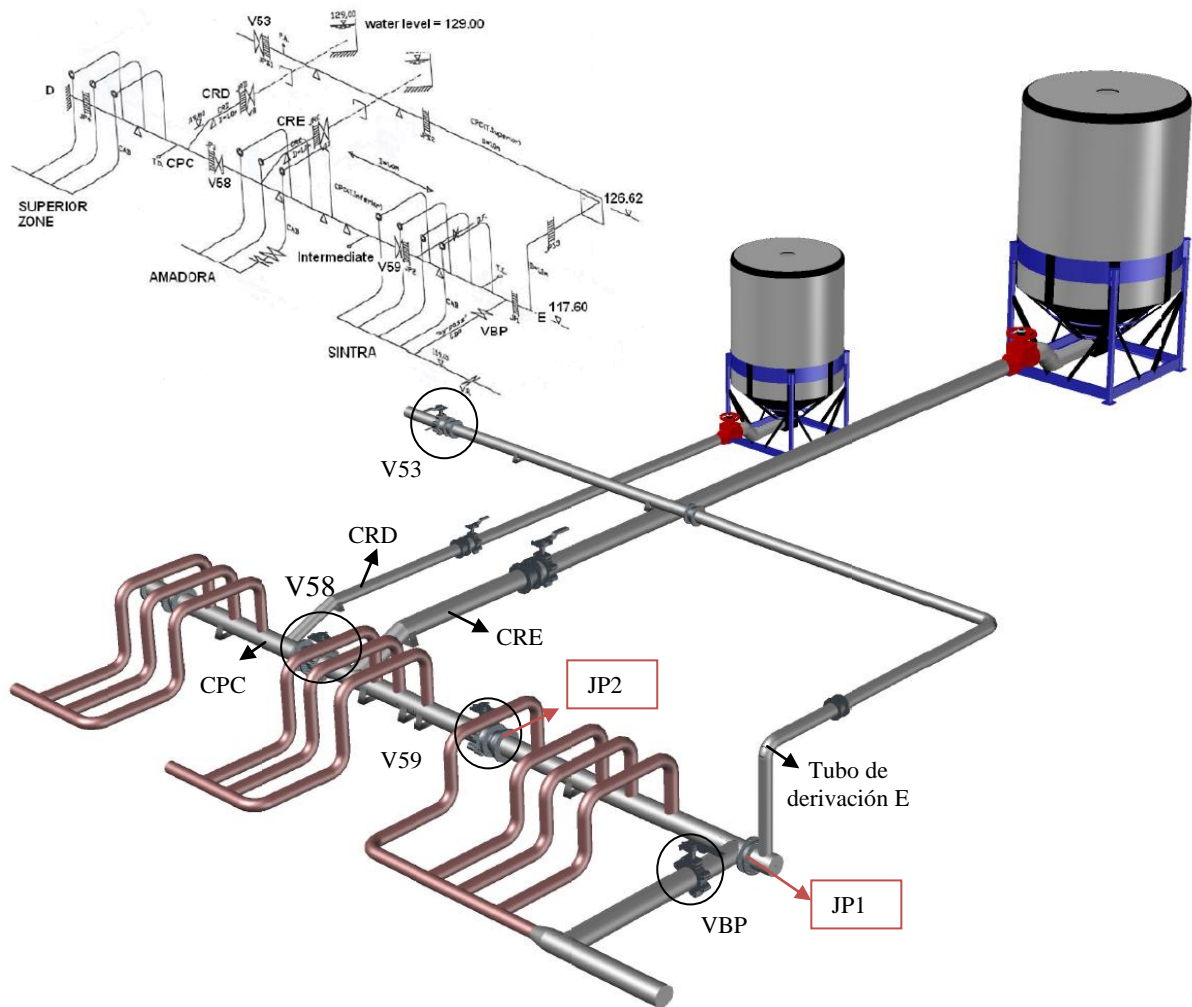


Figura 1. Esquema del bombeo (adaptado de Almeida & Ramos, 2007)

DESCRIPCIÓN DEL ACCIDENTE

Antes del accidente las condiciones de funcionamiento del sistema eran las siguientes (Tabla 1).

Tabla 1. Funcionamiento del sistema

Válvulas	V53, VBP – cerradas V58, V59, V8, V12 – abiertas
Equipo de bombeo	Sector superior – 2 bombas trabajando; Sector Amadora – 3 bombas trabajando; Sector Sintra – fuera de servicio
Nivel del depósito	129 m

Debido al mantenimiento de rutina y reemplazo de válvulas, las bombas de Sintra se pararon, y la válvula V59 se comenzó a cerrar de forma manual con el fin de aislar el tubo de derivación E. Después de 15 minutos, la válvula V59 se encontraba cerrada. De repente, en los instantes finales de la maniobra, el tubo CPC y la válvula V59 se movieron 0.065 m hacia la válvula V58 y la unión JP2 se abrió casi completamente (0.07 m). El conducto de derivación E se movió 0.015 m en la dirección opuesta. Por otro lado, se detectaron varios desplazamientos en el sistema de tubería (Ramos *et al.*, 2008) incluyendo los tubos CRE y CRD, así como las conexiones a las bombas (Figura 2). Después del accidente, la válvula V59 se abrió lentamente y el sistema se mantuvo sin más movimiento.

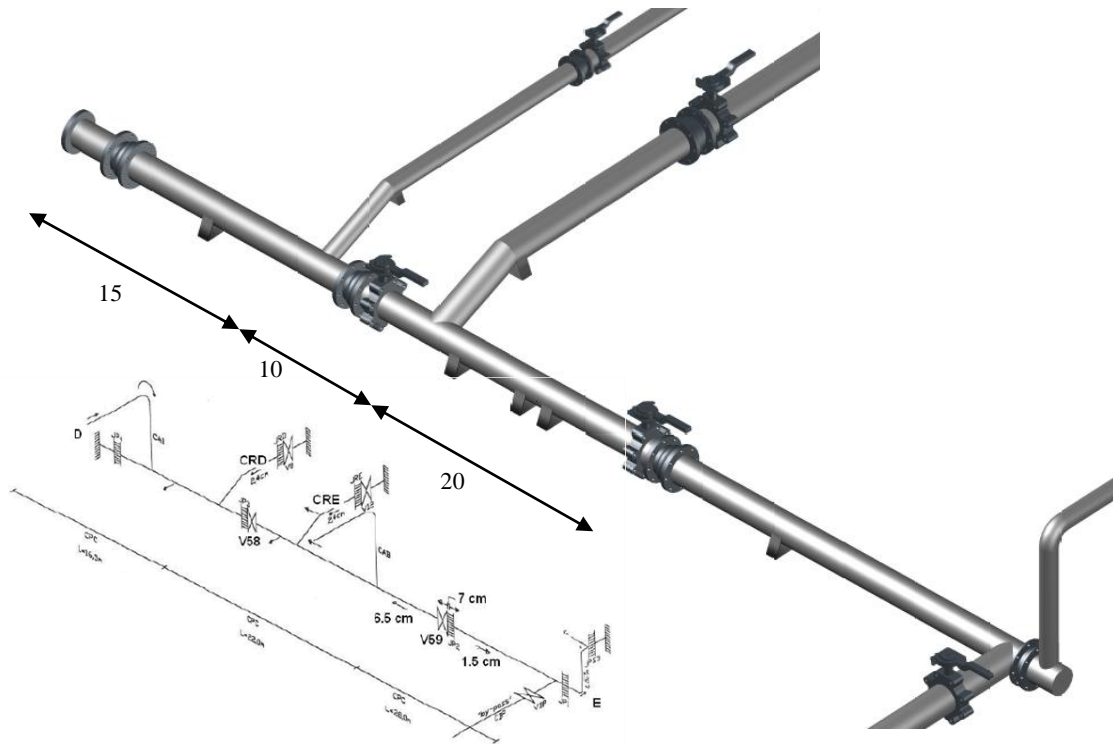


Figura 2. Desplazamientos detectados del accidente (adaptado de Almeida & Ramos, 2007)

SIMULACIÓN COMPUTACIONAL

Los mecanismos de transitorios hidráulicos pueden ser causados por cambios rápidos en el flujo y en la presión o pueden ser iniciados por la acción mecánica en la tubería. Con el fin de comprender y cuantificar la interacción mecánica entre el flujo transitorio en la tubería y la vibración resultante en la estructura, tres mecanismos de acoplamiento deben ser identificados en el FSI: acoplamiento de Poisson, acoplamiento de fricción y el acoplamiento de unión.

Para construir un modelo FSI, es necesario que haya un dominio fluido y un dominio sólido. Por lo tanto, se crearon dos dominios, con la geometría basada en el sistema donde ocurrió el accidente (Figura 3 y Figura 4). Con el fin de reducir al mínimo el número de elementos de malla asociados a todo el sistema, se hicieron las simulaciones cubriendo sólo la porción entre la V59 y el extremo D.

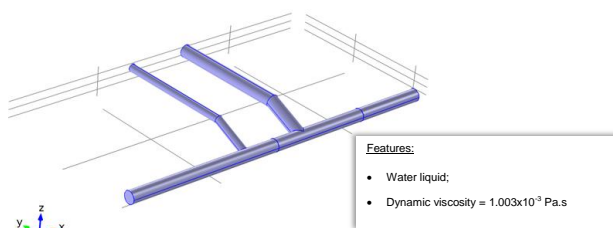


Figura 3. Dominio del fluido

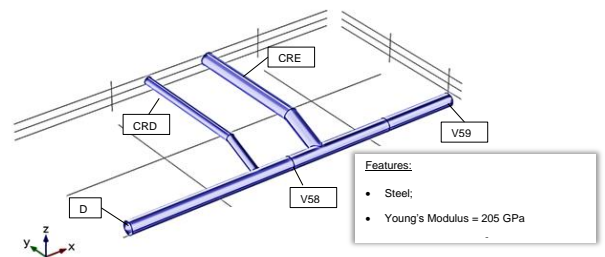


Figura 4. Dominio de la estructura

Como las partículas de fluido en movimiento interactúan con los límites del sólido, induciendo su deformación y este a su vez afecta el movimiento del flujo, se concluye que el problema es totalmente acoplado (Martí *et al.*, 2006). Teniendo en cuenta los flujos de fluidos reales, las ecuaciones de Euler se resuelven asumiendo un fluido compresible no viscoso, y las ecuaciones de Navier-Stokes se resuelven para fluidos compresibles o incompresibles. En cada caso, el flujo de fluido está completamente acoplado a la estructura (Bathe, 1998).

Los esquemas de solución utilizados para estos análisis se basan en formulaciones de Lagrange-Euler para el dominio de fluido. En general, una componente importante del análisis totalmente acoplado es que el dominio de fluido puede ser mallado de una forma mucho más fina que la estructura sólida (Bathe, 1998). Por lo tanto, se

emplean diferentes mallas en el fluido y en la estructura, las cuales deben unirse de una manera compatible. Además, la malla de fluido debe ser capaz de deslizarse sobre la malla de la estructura, ya que el momento de una interacción FSI puede cambiar durante el análisis (Bathe, 1998).

Con el fin de resolver las ecuaciones continuas en ambos dominios basado en el método de elementos finitos (FEM), se utilizó el software COMSOL Multiphysics.

ANÁLISIS HIDRÁULICO

El objetivo, es determinar la fuerza de presión que produjo el flujo y que condujo a los desplazamientos registrados en campo. En este caso, las ecuaciones del movimiento de fluidos (ecuaciones de Navier-Stokes) se reescriben en la forma Arbitraria Lagrange-Euler (ALE), por lo que, las ecuaciones de NS ALE son:

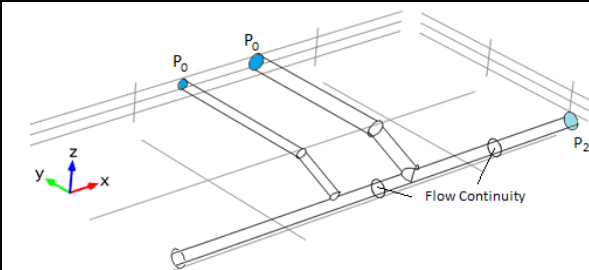
$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho((u - \hat{u}) \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pl + \mu(\nabla u + \nabla u)^T] + F; \quad (1)$$

$$\nabla \cdot u = 0$$

donde, t , u , p , ρ , μ y \hat{u} , son: tiempo, velocidad, presión, densidad, viscosidad dinámica del fluido y velocidad en cada nodo de malla, respectivamente. I representa la matriz diagonal unitaria y F , la fuerza que afecta al volumen de fluido.

Las condiciones de contorno utilizadas en el dominio de fluido se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Condiciones de frontera en el fluido

Dominio del fluido	
Condición de frontera	Expresiones
Inlet 1	$P_0 = P_{atm} = 101325$ [Pa]
Inlet 2	$P_0 = P_{atm} = 101325$ [Pa]
Outlet 1	$P_2 = 101325 \cdot \text{step1}(t[1/s])$ [Pa]
Turbulent flow, k- ϵ Propiedades del fluido	
Esquema	
	

Las condiciones de entradas (a la izquierda del esquema de la tabla 2) se representan con presión atmosférica, y en la condición de salida del flujo (a la derecha del esquema de la tabla 2), está dado por una condición de cierre de válvula, descrita por una maniobra lenta de cierre.

Con el fin de describir el accidente, se ha introducido una función en la condición de salida, para que represente la variación de la presión en la válvula. La función de maniobra, presentada en la Figura 5, describe el accidente que ocurrió. La función que se utiliza en la condición de frontera de salida es la misma indicada por Almeida y Ramos (2008).

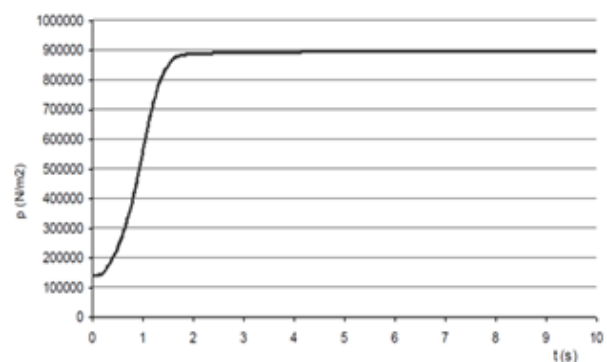


Figura 5. Variación de la presión en la tubería de alimentación (adaptado de Almeida & Ramos, 2007)

ANÁLISIS DINÁMICO

Se tienen diversas técnicas de métodos numéricos que permiten el estudio de situaciones complejas que contempla la formulación de las ecuaciones de la dinámica de movimiento y el análisis de la respuesta de una estructura. Entre las diversas técnicas, la formulación directa es la más intuitiva en el estudio de estructuras simples con un grado de libertad.

El comportamiento de este oscilador depende en general del desplazamiento $u(t)$ de la masa y de su velocidad $\dot{u}(t)$ con respecto al soporte. Si la fuerza de retorno P depende sólo del desplazamiento $u(t)$ y si hay proporcionalidad entre la fuerza y el desplazamiento, entonces el oscilador es elásticamente lineal (Correia, 2007). Este es el caso típico de una muelle, pero también representa el comportamiento de cualquier estructura cuando los desplazamientos están por debajo de un cierto límite de elasticidad lineal. En realidad, la amplitud de movimiento disminuye con el tiempo y la masa vuelve a su posición de equilibrio estático. De

hecho, una parte de la energía elástica almacenada en la muelle se disipa con el tiempo, este fenómeno se denomina amortiguamiento.

El amortiguamiento de un movimiento puede ser resultado de diferentes causas. Puede ser un amortiguamiento físico (por ejemplo, un amortiguador hidráulico que se usa en automóviles) o problemas de vibración en las estructuras de aislamiento. La disipación de energía también puede ser causada por efectos térmicos asociados con repetidas cargas de elementos estructurales, la fricción interna en el material o deformación plástica de los materiales y elementos estructurales (Correia, 2007).

Conociendo la ecuación de equilibrio dinámico, y teniendo en cuenta el efecto de amortiguamiento que se muestra en cada tramo, la solución de la ecuación de movimiento se puede obtener por cualquier método conocido en los estudios de oscilación con un grado de libertad.

La ecuación de movimiento de un oscilador lineal con un grado de libertad puede escribirse en su forma reducida dividiendo ambos miembros de la ecuación entre M .

$$\ddot{u} + 2\xi\omega_n\dot{u} + \omega_n^2u = P(t)/M \quad (2)$$

donde,

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad , \quad \xi = \frac{C}{2M\omega_n} = \frac{C}{2\sqrt{KM}} = \frac{C}{C_c}$$

Son frecuencia angular natural y factor de amortiguamiento, respetivamente.

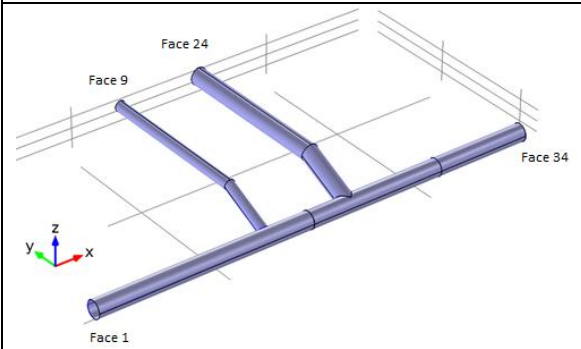
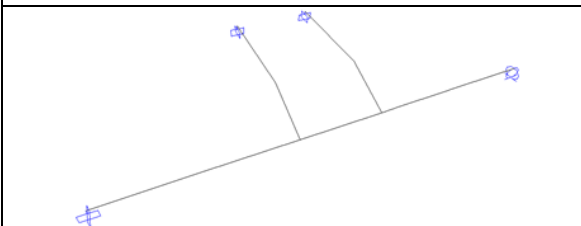
Cuando un movimiento oscilante es causado sólo por un desplazamiento inicial desde la posición de equilibrio estático o velocidad inicial, se llama libre de vibraciones. Cuando una carga se aplica directamente al cuerpo o debido al movimiento del soporte, las vibraciones generadas debido a una variable del sistema en el tiempo, que corresponde a una carga armónica aplicada directamente a una masa M , con amplitud P_m y frecuencia ω , la ecuación del movimiento se sustituye por un término armónico independiente, cambiando a:

$$\ddot{u} + 2\xi\omega_n\dot{u} + \omega_n^2u = \frac{P(t)}{M} \text{sen}(\omega_f t) \quad (3)$$

Para frecuencias bajas, el retraso es insignificante o cero, lo que significa que el sistema responde instantáneamente a la carga. Cuando se alcanza la resonancia hay un desfase de 90 grados entre la fuerza aplicada y el desplazamiento resultante, siendo nulo el desplazamiento cuando la fuerza es máxima, y viceversa. Para la vibración de alta frecuencia, la fuerza aplicada y el desplazamiento estarán al mismo tiempo en fase opuesta y ambos tendrán un valor máximo pero con signo contrario. Sin embargo, para las frecuencias altas, la amplitud del desplazamiento se acerca a cero (Correia, 2007).

En la Tabla 3 se presentan las condiciones de frontera utilizadas para simular la estructura:

Tabla 3. Condiciones de frontera en la estructura

Dominio de la estructura		
Condición de frontera	Consideraciones	Selección de dominio
Carga (Volumen)	$-g \times \rho_s$	Todo el volumen
Tensión al borde	T_x, T_y, T_z	Fuerzas de contacto entre fluido y estructura
Restricción fija	restricciones: $u_1, u_2, u_3, r_1, r_2, r_3$	Face 9, Face 24
Desplazamiento prescrito	$w_2=0$ m	Todas las fronteras
Muelle	$K = p^2 \times M$	Modelo Completo
Esquema		
		
Restricciones		
		

SIMULACIÓN COMPUTACIONAL

Como se ha mencionado, primero se resuelve el campo del fluido para un determinado período de tiempo, suponiendo una ubicación de la interfase. La presión del fluido resultante y la tensión, se aplican a la estructura como fuerzas externas. Estas fuerzas externas son el resultado de un operador identidad de acoplamiento y un coeficiente de frontera en la interface de PDE y son nombradas T_x , T_y , T_z . La utilización del operador identidad de acoplamiento permite unir la tensión del fluido con la superficie de la tubería. En otras palabras, acopla la carga límite del flujo, desde la geometría de fluido hasta la geometría del sólido.

El uso de una interface de PDE permite restringir la evaluación de la operación de acoplamiento a un solo instante e igualar el resultado del esfuerzo cortante total de fluido sobre la superficie sólida.

El cálculo estructural se lleva a cabo para actualizar la posición de la superficie sólida. Se genera una nueva malla de fluido para dar cabida a la nueva ubicación de la interfase. Por lo que se realiza un proceso iterativo para garantizar que las condiciones de desplazamiento de la interfase y de la fuerza se satisfagan en el instante de tiempo, y así consecutivamente para cada paso de tiempo.

RESPUESTA DINÁMICA

En relación a los diversos desplazamientos detectados *in situ* del sistema de tuberías, y sabiendo que el esfuerzo lateral aplicado en la pared del tubo y la tensión axial están dadas por las ecuaciones (4) y (5), respectivamente.

$$\sigma_t = \frac{\tau_f}{e} = \frac{\gamma HD}{2e} = \frac{PD}{2e} \quad (4)$$

$$\sigma_a = \frac{\gamma HA}{\pi De} = \frac{PD}{4e} \quad (5)$$

La contracción del tubo por efecto de Poisson debido a la presión interior en la tubería, se puede estimar en una dirección, conociendo los parámetros: coeficiente de Poisson (0.4), longitud entre soportes de la tubería, presión interior de la tubería, valor promedio del diámetro, módulo de elasticidad y espesor de la tubería. En la otra dirección, la expansión del tubo se genera debido a las fuerzas provocadas por la válvula cerrada. Por lo

tanto, las expansiones de la tubería se pueden describir con las ecuaciones (6) y (7).

$$\delta_y = \frac{\nu L p D}{2 E t} = 0.015 \text{ m} \quad (6)$$

$$\delta_x = \frac{L F}{\pi D E t} = 0.065 \text{ m} \quad (7)$$

Conociendo los desplazamientos de la tubería obtenidos en campo y, a la carga de presión generada en la válvula V59, la respuesta dinámica de la estructura se obtuvo mediante la aplicación de las fuerzas externas (inercia del fluido) en la estructura. Los resultados se presentan en las figuras 6 y 7.

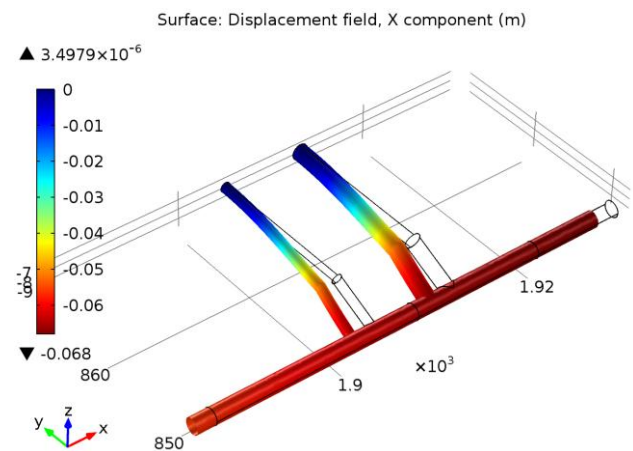


Figura 6. Configuración del desplazamiento en el eje x (m), para $\phi=0^\circ$

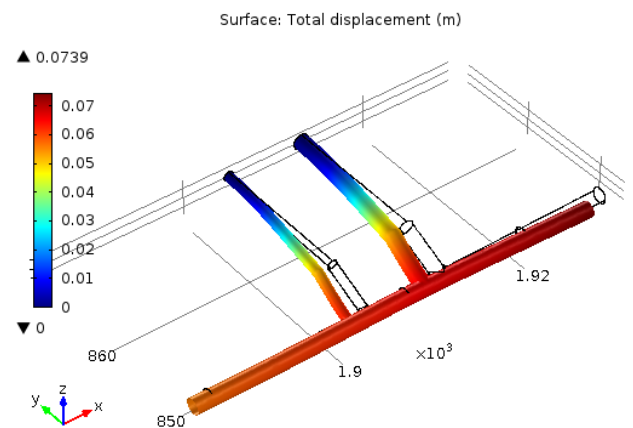


Figura 7. Configuración del desplazamiento total, para $\phi=0^\circ$

El desplazamiento en el eje x (figura 6) es prácticamente el mismo que se obtenido *in situ*. Esta similitud puede ser explicada por el análisis dinámico de la estructura (Figura 8), la cual se comporta como un muelle y un amortiguador.

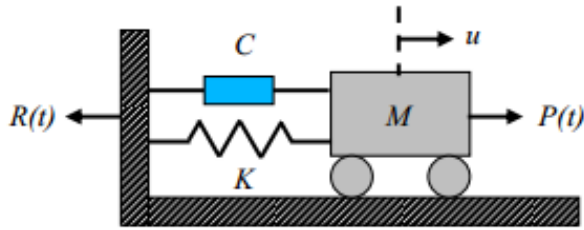


Figura 8. Oscilador lineal con un grado de libertad (Correia, 2007)

Este desplazamiento se obtuvo a través de la variación de la presión desarrollada a lo largo de la tubería durante un período de tiempo de 15 min. La Figura 9 describe la variación de la presión a lo largo de la tubería, donde cada línea representa la presión para cada instante de tiempo, de 1 min cada uno.

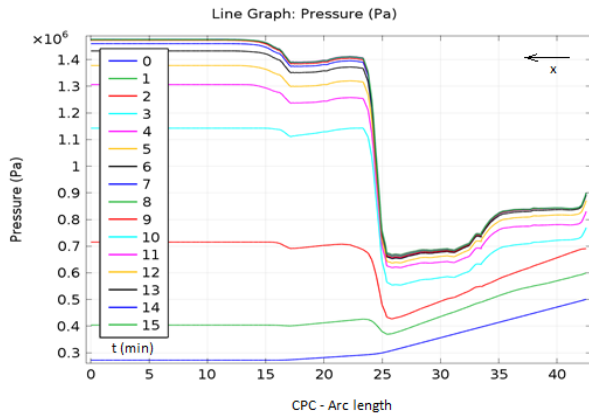
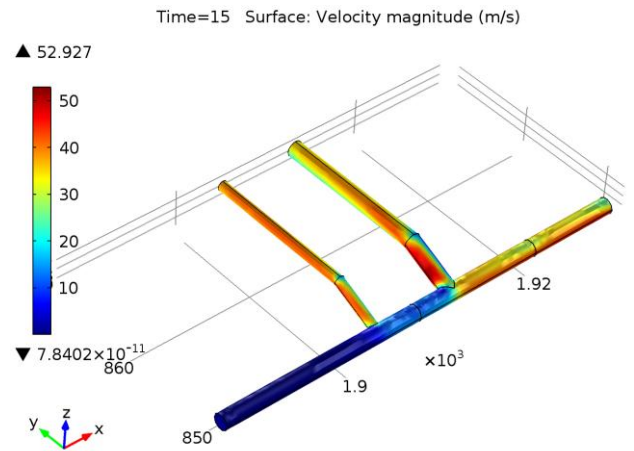


Figura 9. Variación de la Presión (Pa) en la tubería durante 15min

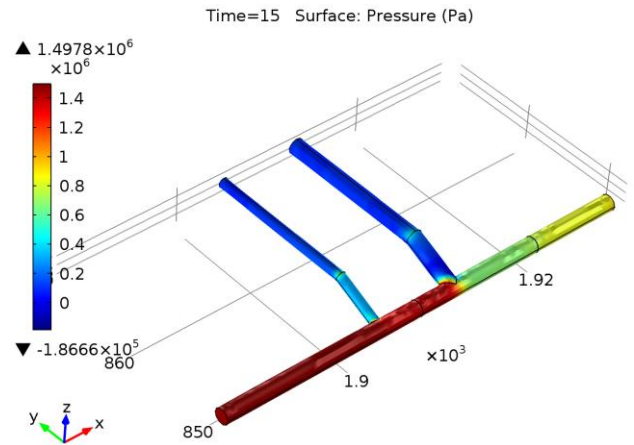
En el momento en que la válvula empieza a ser cerrada, la presión aumenta en el extremo de aguas abajo de la tubería, cambiando la condición inicial del sistema. En el instante de tiempo de 3 min (línea color cian de la figura 9), se puede observar un pulso de alta presión en la sección inmediatamente aguas abajo en la unión de la tubería principal CPC con la tubería CRE. Como la presión del depósito está a la atmosfera y se mantiene constante, existe una condición de desequilibrio en este punto. Con un cambio de signo, la onda de presión se refleja en la sección de tubo siguiente. Una onda de alivio viaja hacia la sección transversal siguiente, reduciendo la presión ligeramente debido a la diferencia en la sección entre los dos conductos. Por lo que se describe la misma condición entre ambas secciones (CRE y CRD) pero en menor medida para la sección CRD y hasta el extremo de la tubería principal.

La figura 10 representan los componentes de la velocidad (figura 10-a), presión (figura 10-b),

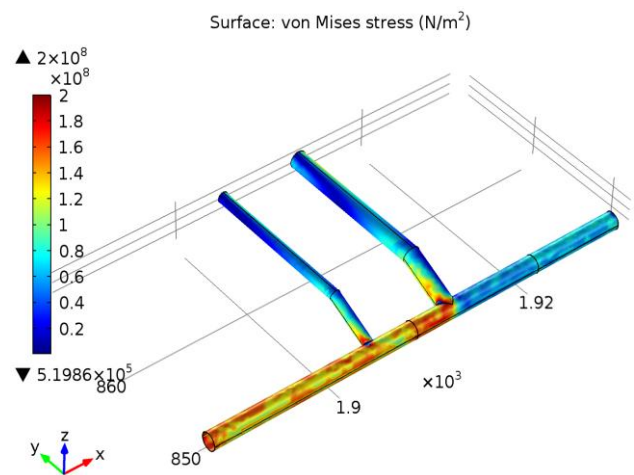
tensión de Von Mises a lo largo de la tubería (figura 10-c) y Tensión de Von Mises en la válvula V59 (figura 10-d), todas ellas para el último instante, equivalente al tiempo de 15 min.



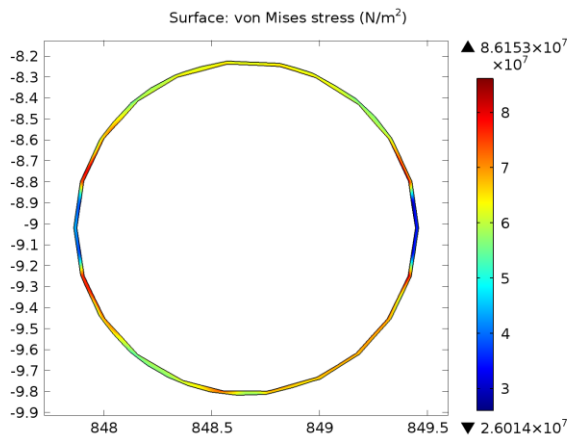
(a) magnitud de la velocidad (m/s)



(b) Presión (Pa)



(c) Tensión de Von Mises (N/m²)



(d) Tensión de Von Mises (N/m^2) en la sección transversal de la válvula V59

Figura 10. Configuraciones en el instante de tiempo 15 min.

Debido al desequilibrio de presión interior que provocó la válvula V59, la fuerza resultante que produjo el desplazamiento del sistema fue de aproximadamente 1.411 kN.

CONCLUSIONES

Las principales conclusiones que pueden extraerse de este artículo se resumen en que la respuesta de los soportes de una estructura debido a un transitorio de presión, puede presentarse en diferentes condiciones, pudiendo traducir esta respuesta en ecuaciones dinámicas asociadas a la fuerza de vibración.

El sistema analizado, funcionó como un oscilador elástico lineal en el que el sistema de vibración se refleja en la matriz de rigidez. Sin embargo, la respuesta de la estructura varía de acuerdo con el tipo de apoyo. Se comprobó que el desplazamiento real ocurrido, puede representarse como un muelle con una rigidez igual en todos los nodos de la estructura. Para este sistema en específico, la fuerza capaz de producir un desplazamiento equivalente al real fue de aproximadamente 1.411 kN.

La simulación numérica en CFD representó de forma adecuada los desplazamientos observados en campo. por lo que, con este tipo de modelos calibrados, se pueden obtener patrones numéricos para el control de maniobras de válvulas y con ello prevenir golpes de ariete que produzcan accidentes en las instalaciones.

REFERENCIAS

- Almeida, A. B. y Ramos, H. (2007). "Water supply safety: diagnosis of an abnormal accident in a main Lisbon pumping system." WST – Aqua.
- Bathe, K. J. (1998, April). "Fluid-Structure Interactions - The fully coupled solution of fluid flows with structural interactions." Mechanical Engineering, pp.66-68.
- Correia, A. (2007). Vibrações de sistemas com 1 grau de liberdade. IST.
- Kratz, J., Munch, W., Ungar, K. (2003, August). "The Influence of Fluid-Structure Interaction on Pipe System Loads." Transactions of the 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 17). Prague, Czech Republic, pp. 17 –22.
- Lüdecke, H. J. y Kothe, B. (2006) Water Hammer, Know-how, Volume 01. KSB Communications.
- Marti, J., Idelsohn, S., Limache, A., Calvo, N., D'Elía, J. (2006), "A Fully Coupled Particle Method for Quasi-incompressible Fluid-hypoelastic Structure Interactions". Mecánica Computacional Vol XXV, pp. 809-827.
- Newman III, J. c., Newman, P. A., Taylor III, A. C. and Hou, G. J.-W. (1999), "Efficient non-linear static aeroelastic wing analysis." International Journal of Computers and Fluids, Vol. 28, pp. 615-628.
- Ramos. H. M., Almeida. A.B., Cesteiro. A. (2008). Diagnosis analysis in the identification of an abnormal accident in a main Lisbon water pumping-station. Instituto Superior Técnico, Technical University of Lisbon (UTL), Lisbon, Portugal.
- Sheer, F. J., (2008). Fully Coupled Fluid-Structure Interaction Model of Active Eustachian Tube Function in Healthy and Cleft Palate Patients. A Thesis Presented to the Graduate and Research Committee of Lehigh University in Candidacy for the Degree of Master of Science. Mechanical Engineering and Mechanics.