

Aplicación y validación del Modelo Unidimensional de Sólido Lineal Estándar en tuberías de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) sometidas a golpe de ariete

Application and validation of Unidimensional Solid Standard Model in High-Density Polyethylene (HDPE) pipes subjected to water hammer

(Recepción 30/03/2022; Aceptación 19/12/2022)

Paniagua-Lovera D.¹; Carmona-Paredes R.B.²; Rodal-Canales E.A.²; Autrique-Ruiz R.³

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad de México, México

² Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad de México, México

³ Policonductos S.A. de C.V., Ciudad de México, México

Email: davidpaniagualovera@gmail.com

Resumen. Este artículo presenta un estudio de los efectos del golpe de ariete en una línea de conducción compuesta de tramos de acero y polietileno de alta densidad (PEAD), fabricados con resina codificada como ASTM 4710. Se muestra la comparación de las mediciones de la prueba experimental y los resultados de la simulación numérica utilizando una metodología simplificada para el análisis de transitorios hidráulicos en conductos a presión, basada en el empleo del modelo viscoelástico unidimensional de Sólido Lineal Estándar, con la finalidad de validar su precisión y ventajas para estimar la celeridad, presiones y deformaciones que ocurren en tuberías de PEAD durante el desarrollo del fenómeno transitorio.

Palabras clave. Conducciones a presión, transitorios hidráulicos, polietileno de alta densidad, viscoelasticidad lineal unidimensional.

Abstract. This paper presents a study of the effects of the water hammer on a pipeline composed of longitudinal sections of steel and high-density polyethylene (HDPE) fabricated with ASTM 4710 coded resin. It shows a comparison between experimental measurements obtained from testing and the results of numerical simulations using a simplified methodology for hydraulic transients in pressurized pipelines, based on the unidimensional viscoelastic solid standard model, to validate its precision and advantages in the estimation of celerity, pressures, and strains, that occurs in HDPE pipes during the phenomenon.

Keywords High density polyethylene, hydraulic transients, pressurized pipelines, unidimensional linear viscoelasticity

1. Descripción del modelo numérico

1.1. Modelo de Sólido Lineal Estándar (MSE)

El Polietileno de Alta Densidad (PEAD) ha sido ampliamente utilizado en diversas industrias por sus grandes ventajas tales como resistencia a la fatiga, propiedades dieléctricas, peso, etc. Llegando a ser muy competitivo en el mercado con respecto a materiales ya aceptados y bien establecidos en la producción las tuberías (Morales-Méndez, 2010). Una abstracción usada de manera convencional para el estudio del comportamiento observado de materiales termoplásticos en mecánica de medios continuos es a través del uso de elementos de tipo elástico para representar el comportamiento como sólido y amortiguadores viscosos con la finalidad de incorporar

al modelado el comportamiento que varía en el tiempo de forma muy similar al de un fluido (Sánchez-Vergara y Campos-Silva, 2009).

En trabajos anteriores (Paniagua-Lovera, 2017) y (Carmona-Paredes et al., 2019), se presentó una metodología para la estimación de golpe de ariete en tuberías de PEAD, codificada como 4710 de acuerdo con la *American Society of Testing Materials-ASTM* (PPI, 2008), basada en el modelo unidimensional de sólido lineal estándar descrito por la ecuación (1) e ilustrado en la Fig. 1. Dicho modelo consiste en un modelo de Maxwell conectado en paralelo a un elemento elástico, obteniéndose así una representación de las deformaciones totales ε [-] compuestas por deformaciones elásticas instantáneas y las deformaciones viscoelásticas a diferentes escalas temporales, que se pueden presentar ante una excitación de esfuerzos σ en el tiempo t [s] sobre el

material, en función del módulo elástico a largo plazo E_1 [Pa], módulo elástico de la rama de Maxwell E_2 [Pa], y el parámetro viscoso de Maxwell η [Pa · s]. Los valores y número de parámetros del modelo reológico están determinados de acuerdo con el tipo de plástico empleado en la fabricación de tubos, tal como se realiza en tuberías de Policloruro de vinilo (PVC) en Soares et al. (2008), extendiendo la aplicación de los modelos viscoelásticos en diversos materiales con comportamientos mecánicos similares.

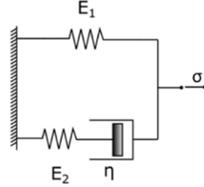


Figura 1. Modelo de sólido lineal (Carmona et al., 2019).

$$\frac{d\sigma}{dt} + \frac{E_2}{\eta}\sigma = (E_1 + E_2)\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_1 E_2}{\eta}\varepsilon \quad (1)$$

1.2. Modelo numérico de golpe de ariete

El golpe de ariete se define como un fenómeno de propagación de ondas las cuales perturban variables hidráulicas como la presión y velocidad del flujo, así como variables estructurales como las deformaciones y esfuerzos a los que se encuentra sometida la tubería que conduce al agua, donde los efectos de transmisión en los medios fluido-estructura se encuentran acoplados. El interés hacia el estudio y comprensión de las causas y consecuencias que provoca el fenómeno en cuestión, ha sido de gran importancia debido a que permiten conocer las condiciones de presiones extremas asociadas a los casos más críticos a los que puede estar sometido un sistema de conducciones a presión, permitiendo así diseñar alternativas de operación y la propuesta de dispositivos de control de transitorios para mitigar eficientemente los efectos adversos que puedan causarse en estos escenarios de flujo.

La teoría referente al tema está basada en los principios de conservación de la materia y las ecuaciones del equilibrio (Mancebo, 1992), expresada en las ecuaciones de continuidad y dinámica. Dichas ecuaciones son ampliamente utilizadas en la práctica de la Ingeniería Civil y normalmente emplean las suposiciones de tuberías de pared con comportamiento elástico lineal y cuantifican la pérdida de carga por fricción de forma estacionaria (Chaudhry, 1979; Wylie-Streeter, 1993; Thorley, 2004).

No obstante, en diversos trabajos se han realizado propuestas en las cuales se incluyen distintos efectos a los considerados en la teoría clásica, que toman importancia en la atenuación de la magnitud de los frentes de onda, como lo es el comportamiento viscoelástico de tuberías a través de diferentes modelos que difieren en el acomodo y número de elementos elásticos y viscosos con la finalidad de reproducir numéricamente con un modelo matemático

más robusto las observaciones obtenidas en pruebas experimentales en registros de presiones y deformaciones que no pueden reproducirse con el modelo clásico de golpe de ariete (Covas, 2004; Covas 2005).

La descripción matemática del golpe de ariete para materiales con comportamiento viscoelástico, tuberías de pared delgada sin transmisión de esfuerzos entre secciones contiguas y fricción estacionaria, está dada por las ecuaciones de continuidad y dinámica cuyo desarrollo es detallado por Paniagua-Lovera (2017). El método de las características (Chaudhry, 1979) permite transformar un sistema de ecuaciones diferenciales parciales hiperbólicas en ecuaciones diferenciales totales considerando que la celeridad permanece numéricamente constante durante el desarrollo de todo el fenómeno de flujo transitorio (Carmona et al., 2019). Finalmente, el sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias se resuelve en un esquema de diferencias finitas explícitas expresado por las ecuaciones (2)-(7) que se satisface a lo largo de las curvas características $\frac{dx}{dt} = \pm a$, sobre el plano $x - t$ que se muestra en la Fig. 2, donde se relacionan las variables hidráulicas de los puntos A, B, P y P' indicados en las ecuaciones por medio de subíndices.

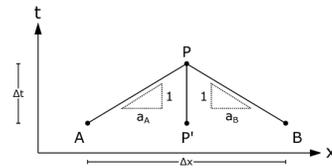


Figura 2. Nodos de cálculo para esquema explícito en diferencias finitas (Paniagua-Lovera, 2017).

$$(V_P - V_A) + \frac{g}{a}(H_P - H_A) + F_A = 0 \quad (2)$$

$$(V_P - V_B) - \frac{g}{a}(H_P - H_B) + F_B = 0 \quad (3)$$

$$\varepsilon_P = \varepsilon_{P'} + \frac{\frac{\gamma(H_P - H_{P'})D_0}{2e} + \frac{E_2}{\eta} \left[\frac{\gamma(H_{P'} - z_{P'})D_0}{2e} (1 + \varepsilon_{P'}) - E_1 \varepsilon_{P'} \right] \Delta t}{E_1 + E_2 - \frac{\gamma(H_{P'} - z_{P'})D_0}{2e}} \quad (4)$$

$$F_A = \left[\frac{f_A V_A |V_A|}{2D_0(1 + \varepsilon_A)} + \frac{2a \frac{E_2}{\eta} \left[\frac{\gamma(H_A - z_A)D_0}{2e} - E_1 \frac{\varepsilon_A}{1 + \varepsilon_A} \right]}{E_1 + E_2 - \frac{\gamma(H_A - z_A)D_0}{2e}} \right] \Delta t \quad (5)$$

$$F_B = \left[\frac{f_B V_B |V_B|}{2D_0(1 + \varepsilon_B)} - \frac{2a \frac{E_2}{\eta} \left[\frac{\gamma(H_B - z_B)D_0}{2e} - E_1 \frac{\varepsilon_B}{1 + \varepsilon_B} \right]}{E_1 + E_2 - \frac{\gamma(H_B - z_B)D_0}{2e}} \right] \Delta t \quad (6)$$

$$\frac{1}{a^2} \approx \frac{\gamma}{g} \left(\frac{1}{K} + \frac{D_0}{E_1 + E_2} \right) \quad (7)$$

Donde g es la aceleración de la gravedad [$m \cdot s^{-2}$], K módulo de compresibilidad del agua [Pa], H carga piezométrica [m], V velocidad [$m \cdot s^{-1}$], γ peso específico del agua [$N \cdot m^{-3}$], D_0 diámetro interior de la tubería sin deformarse [m], a celeridad de onda en líquido [$m \cdot s^{-1}$], z carga de posición [m], e espesor

de la tubería $[m]$, f factor de fricción de Darcy-Weisbach $[-]$, Δt paso de tiempo $[s]$ y x posición longitudinal $[m]$.

1.3. Ecuaciones de estimación de parámetros viscoelásticos

La estimación de parámetros se propone de acuerdo con los resultados de calibraciones experimentales correspondientes a registros de presión en 4 puntos de medición, obtenidas en Paniagua-Lovera (2017) y Carmona et. al. (2019), se expresan en las ecuaciones (8)-(12), que en contraste a otras metodologías (Carmona et al., 2014) permiten relacionar los parámetros del MSE con variables que pueden obtenerse a partir de las características físicas del sistema hidráulico en estudio, donde $E_1 = 220.6 [MPa]$ es el módulo elástico a largo plazo obtenido de pruebas uniaxiales de probetas de tensión en apego al método de ensayo estandarizado D-638 de la ASTM (2003) de acuerdo con PolyPipe (2009).

$$a = 1423.6RD^{-0.503} \quad (8)$$

$$RD = \frac{D_{ext}}{e} \quad (9)$$

$$E_2 = \frac{D_0}{e} \frac{Ka^2\rho}{K - \rho a^2} - E_1 \quad (10)$$

$$T = \sum_{i=1}^r \frac{2L_i}{a_i} \quad (11)$$

$$\eta = 2.3014E_2T^{-0.4556} \quad (12)$$

Donde $T [s]$ es el periodo del sistema, r el número total de tramos que componen el sistema, $\rho [kg \cdot m^{-3}]$ la densidad del agua, $D_{ext} [m]$ el diámetro exterior del tubo y $RD [-]$ la relación diámetro exterior-espesor.

2. Prueba experimental y condiciones de flujo estacionario

La instalación donde se llevó a cabo la prueba fue en San Luis Potosí, México, en el laboratorio de la empresa *Policonductos S.A. de C.V.* construida con asesoría técnica del *Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)*.

El modelo físico (mostrado en las Fig. 3 y 4) está conformado en sus extremos por dos tramos de tubería de PEAD unidos por un tramo central de tubería de acero. La tubería de acero tiene un diámetro exterior de 4", factor de fricción de Darcy-Weisbach $f = 0.022$ (obtenido por las mediciones experimentales) y relación espesor-diámetro RD 67, con 276 metros de longitud y las tuberías de PEAD, fabricadas con resina tipo 4710, con diámetro exterior de 4 1/2", RD 21, $f = 0.026$ que corresponde al factor de Manning $n = 0.010$ proporcionado por el PPI (2008), con 14 y 12 metros al inicio y final de la conducción, respectivamente. La combinación de tuberías de acero y PEAD se utilizó para obtener una celeridad

promedio alta con la finalidad de obtener sobrepresiones de mayor magnitud respecto a una instalación construida únicamente con PEAD. El modelo cuenta con dos bombas centrífugas, cada una de 11 kW, que pueden operarse en serie o en paralelo y que son alimentadas por un cárcamo subterráneo, con volumen de 80 m³ con flujo en recirculación. El control de las condiciones de frontera se logró mediante dos tanques hidroneumáticos, de 1 m³ de capacidad cada uno, llenos al 75% de agua, colocados al inicio y final de la conducción. Los ajustes de válvulas de control, colocadas antes y después de los hidroneumáticos, permitieron regular el gasto a 1 litro por segundo, manteniendo una carga constante de 44 metros columna de agua en el tanque hidroneumático al inicio del circuito. El gasto fue medido mediante placa-orificio, instalada en una tubería de 3 pulgadas de diámetro, espesor de 1/8", biselada a 45°, con diámetro de orificio de 5.715 cm instrumentada con manómetro diferencial de columna de agua, con tomas a un diámetro y medio diámetro aguas arriba y aguas abajo de la placa respectivamente, siguiendo la norma ISO/DIS 5167-2 emitida por (ISO, 2013). El coeficiente de gasto fue de 0.7826 para esta condición particular de experimentación. La maniobra de estudio se ejecutó por medio de una válvula de cierre automático inmediatamente aguas arriba del tanque del extremo aguas abajo. El experimento consistió en una secuencia de cierres y aperturas de la válvula automática, la cual tiene un tiempo de cierre de 0.2 segundos, manteniéndose 3 segundos cerrada y abriéndose nuevamente en 2 segundos, con el fin de fatigar el tramo de PEAD (Autrique y Rodal, 2014). En esta prueba se tomó un registro de presiones y de forma paralela de deformaciones unitarias externas a 2 metros aguas arriba de la válvula de cierre automático a través de transductores de presión y strain gauge de 350 ohm con una frecuencia de medición de 500 Hz.

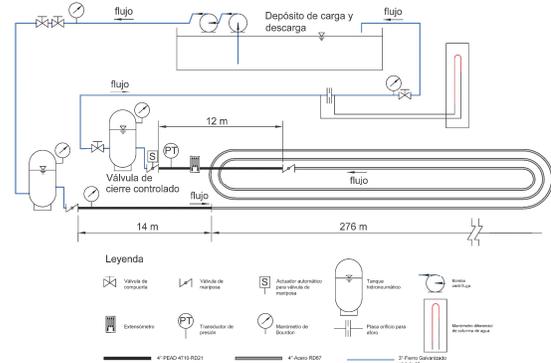


Figura 3. Esquema de la instalación de prueba.

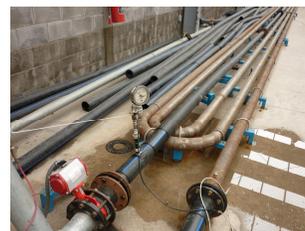


Figura 4. Tramo de prueba, válvula de cierre controlado, transductor de presión y condiciones de sujeción-apoyo. (Autrique y Rodal, 2014).

3. Comparación de resultados teórico-experimental.

A continuación, la Tabla 1 muestra los parámetros empleados para la simulación numérica calculados a partir de las ecuaciones (8) a (12) y las características físicas descritas de la instalación experimental. Obteniéndose los resultados mostrados en las Fig. 5 y 6 para el punto instrumentado en el tramo de PEAD.

Tabla 1. Parámetros de modelo numérico.

T [s]	a_{PEAD} [m/s]	a_{acero} [m/s]	E_2 [GPa]	η [GPa·s]
0.6560	307.83	1133.38	1.67	4.65

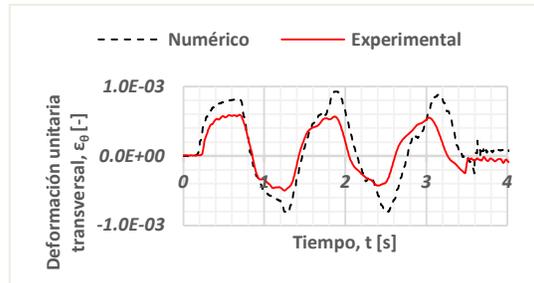


Figura 5. Comparación experimental y numérica de la deformación unitaria transversal en el tiempo para la sección de estudio.

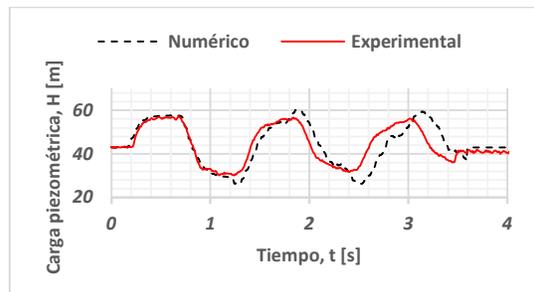


Figura 6. Comparación experimental y numérica de la carga piezométrica en el tiempo para la sección de estudio.

4. Conclusiones

De acuerdo con los resultados puede observarse que el modelo numérico estima correctamente la magnitud de las presiones, subestimando la celeridad y, como contribución principal del presente estudio y en contraste a Carmona et al. (2019), al disponer de registros experimentales de deformaciones de la tubería de PEAD es posible afirmar que se sobreestiman numéricamente la magnitud de las deformaciones transversales transitorias respecto a las mediciones. Por lo anterior, el modelo requiere mejoras en la formulación, como la inclusión de condiciones de sujeción de la conducción, interacción estructural entre secciones contiguas de tubo, fricción no estacionaria, efecto térmico en propiedades mecánicas y generalización a tubos de pared gruesa y delgada.

Referencias

American Society of Testing Materials. (2003). Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. *ASTM Standard D 638*.



Autrique, R.R. & Rodal, C.E.A. (2014). Estudio en laboratorio de fatiga en tuberías de Polietileno sometidas a presiones transitorias extremas. *Memorias, XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Santiago, Chile.

Carmona-Paredes L.G., Autrique, R.R. & Rodal, C.E.A. (2014). Comparación del Transitorio Hidráulico en tuberías de Polietileno de Alta Densidad con Resultados Numéricos. *Memorias, XXIII Congreso Nacional de Hidráulica*, Puerto Vallarta, Jalisco, México.

Carmona-Paredes, R.B., Autrique, R., Rodal-Canales, E.A. & Paniagua-Lovera, D. (2019). A new method to calculate hydraulic transients in HDPE pipes using the standard solid model to represent the HDPE viscoelastic behaviour. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 240(12), 052020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/240/5/052020>

Chaudhry, M.H. (1979). *Applied Hydraulic Transients*. Ed. New York: Van Nostrand Reinhold Company.

Covas, D. Stoianov, I., Ramos, H., Graham, N. & Maksimovic, C. (2004). The dynamic effect of pipe-wall viscoelasticity in hydraulic transients. Part I—experimental analysis and creep characterization. *Journal of Hydraulic Research*, 42(5). DOI: [10.1080/00221686.2004.9641221](https://doi.org/10.1080/00221686.2004.9641221)

Covas, D. Stoianov, I., Mano, J.F., Ramos, H., Graham, N. & Maksimovic, C. (2005). The dynamic effect of pipe-wall viscoelasticity in hydraulic transients. Part II—model development, calibration and verification. *Journal of Hydraulic Research*, 43(1). DOI: [10.1080/00221680509500111](https://doi.org/10.1080/00221680509500111)

International Organization for Standardization. (2003). Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular-cross section conduits running full — Part 2: Orifice plates. *ISO 5167-2:2003*

Mancebo, U. (1992). *Teoría del Golpe de Ariete y sus Aplicaciones en ingeniería hidráulica*. Ed. Limusa. ISBN: 968-18-2295-1

Morales-Méndez J.E. (2010). *Introducción a la Ciencia y Tecnología de los Plásticos*. Ed. Trillas. ISBN: 978-607-17-0624-9

Paniagua-Lovera, D. (2017). *Golpe de ariete en tuberías de pared con comportamiento viscoelástico*. Master Thesis. Posgrado de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Plastic Pipe-Institute. (2008). *Handbook of Polyethylene Pipe*. USA.

PolyPipe. (2009). *Design and Engineering Guide for Polyethylene Piping*. Code 09/08, USA.

Sánchez-Vergara, M.E. & Campos-Silva, I.E. (2009). *Tecnología de Materiales*. Ed. Trillas. ISBN: 978-607-17-0338-52020

Soares, A.K., Covas, D.I., & Reis, L.F. (2008). Analysis of PVC pipe-wall viscoelasticity during water hammer. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(9).

Thorley, A.R.D. (2004). *Fluid Transients in Pipeline Systems*. Ed. Wylie. ISBN: 978-1-860-58405-3

Wylie, E.B. and Streeter, V.L. (1993). *Fluid Transients in Systems*. Ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, Nj.