

**XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
SANTIAGO DE CHILE, AGOSTO 2014.**

**MEDICIÓN EXPERIMENTAL DE CELERIDADES DE
ONDAS DE PRESIÓN EN TUBERÍAS DE
POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**

*** *Autrique Ruiz, René*; ***Rodal Canales, Eduardo Antonio***

* Policonductos, Cracovia 54, san Ángel, México, D.F., México, C.P 01000 Tel 52 (55)5550 1277, rautrique@prodigy.net.mx

**Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, Coyoacán, México, D.F., México, C.P. 04510

Tel 52 (55)5623 3500 ext 1100, erc@pumas.ii.unam.mx

RESUMEN

Se presentan los resultados de la medición experimental de celeridades de ondas de presión en tubería de polietileno de alta densidad (PEAD), fabricadas con la resina PPI 4710. Se presentan igualmente las mediciones de las sobrepresiones provocadas por golpe de ariete y su evolución en el tiempo. Los resultados experimentales se convierten en gráficas adimensionales que permiten estudiar la atenuación en el tiempo de las sobrepresiones en tuberías de polietileno, material viscoelástico, y compararla con la que se presenta en tuberías de acero, material elástico. Se determina la influencia de la relación diámetro/espesor (RD), y de la longitud relativa de la tubería (L/D) en dicha atenuación. Se presenta también evidencia de la atenuación de las presiones transitorias en la distancia. Se proponen gráficas adimensionales para el cálculo preliminar de los efectos del golpe de ariete en tuberías de PEAD.

ABSTRACT

Results of pressure wave celerity experimental measurements in high density polyethylene (HDPE) pipes fabricated with PPI 4710 resin are presented. Measurements of overpressures caused by waterhammer and its evolution in time are presented as well. Experimental results are converted to dimensionless graphs, allowing the study of the overpressure attenuation in PE pipes, viscoelastic, and compare it to the attenuation in steel pipes, elastic. The influence of dimensional ratio DR (diameter/thickness ratio) and relative length of the pipe (L/D) in such attenuation is also determined. Evidence of attenuation of transient pressures along the length of PE pipes is also presented. Dimensionless graphs are proposed for the preliminary calculation of waterhammer effects in HDPE pipes.

PALABRAS CLAVE: polietileno de alta densidad, PEAD, ondas de presión, celeridades, atenuación, tuberías largas.

KEYWORDS: high density polyethylene, HDPE, pressure waves, celerity, attenuation, long pipelines.

INTRODUCCIÓN

En un trabajo anterior (Autrique y Rodal, 2010) se presentaron los experimentos y los cálculos que llevaban a establecer las celeridades de las ondas de presión en tuberías de polietileno, obteniendo una curva que relacionaba la celeridad con la relación diámetro/espesor de la tubería (RD), y confirmando que ésta podría calcularse con la expresión clásica

$$c = \frac{c_w}{\sqrt{1 + C_1 \frac{E_w}{E_{PE}} (RD - 2)}} \quad (1)$$

En aquella ocasión, las tuberías se habían fabricado con resina PPI 3608, que con ciertas limitaciones puede considerarse equivalente a la designación europea PE 80. La curva de mejor ajuste correspondió a un módulo de elasticidad instantáneo del polietileno de 160 ksi (1.10 MPa), siendo C_1 , el factor de anclaje de la tubería, igual a 0.8, y el módulo de Poisson del polietileno igual a 0.45. La celeridad de la onda de presión en el agua es igual a 1420 m/s, y su módulo de elasticidad de 300 ksi (2.07 MPa). Las celeridades para la resina 3608 resultan así de 185 m/s para RD 41 y de 489 m/s para RD 7.

En este trabajo se realizaron experimentos para todas las relaciones dimensionales RDn (RD_r) (diámetro exterior/espesor, nominal y real) siguientes: 7, 9, 11, 13.5, 17, 26, 32.5 y 41, esta vez con la resina PPI 4710, cuyo uso se ha extendido en México, muy por encima de la resina PPI 3608, ya que el esfuerzo de diseño hidrostático (EDH) de la primera es un 25 % mayor que el de la segunda, permitiendo, para una misma presión interna, espesores menores y, por tanto, tuberías más ligeras y económicas. La resina PPI 4710, con ciertas limitaciones, puede considerarse equivalente a la designación europea PE 100. Las características principales de las resinas mencionadas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1

Resina	PPI 3608	PPI 4710	ISO PE 80	ISO PE 100
BDH	1600 psi (11.0MPa)	1600 psi (11.0MPa)		
MRS			8 MPa (1161 psi)	10 MPa (1451 psi)
FS	2	1.6	1.25	1.25
FD	0.5	0.625	0.8	0.8
EDH	800 psi (5.5 MPa)	1000 psi (6.9 MPa)		
MRS/FS			6.4 MPa (929 psi)	8.0 MPa (1161 psi)
EDH ó MRS/FS	56.2 mca 5.52 Mpa	70.3 mca 6.90 MPa	65.3 mca 6.4 MPa	81.6 mca 8.00 MPa

Se aborda también en este trabajo el problema de la evolución de las presiones transitorias producidas por golpe de ariete en tuberías de polietileno y su atenuación en el tiempo, comparándolas con las correspondientes a las tuberías de acero. Es conocido que, si bien el primer pico de sobrepresión durante un evento transitorio puede predecirse, en tuberías de PEAD, de acuerdo con la teoría clásica, es decir, empleando la expresión de Joukowsky, los picos sucesivos no corresponderán ya a lo previsto por la teoría clásica, dadas las características

viscoelásticas del PEAD, en el que, al aplicarse una carga o esfuerzo, se presenta una deformación instantánea de tipo elástico seguida de una deformación lenta y continua, conocida como flujo viscoso. Además, ante una deformación constante, se presenta una disminución o relajación del esfuerzo (Figura 1).

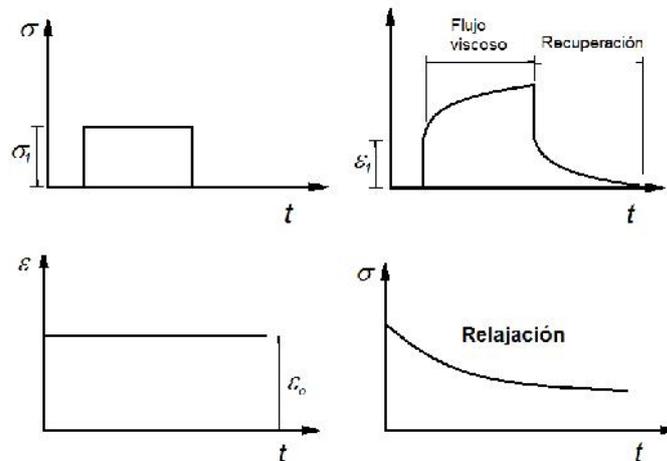


Figura 1. Deformaciones de los materiales viscoelásticos ante esfuerzos sostenidos y relajación del esfuerzo ante deformaciones constantes (Findley et al, 1976).

Lo anterior hará que la atenuación de la sobrepresión en tuberías de PEAD sea mayor y más rápida que en tuberías de acero, y que los transitorios se resuelvan en unos cuantos períodos. Se comparan también las evoluciones de las presiones transitorias y las atenuaciones en el tiempo para diferentes relaciones dimensionales (RD: diámetro exterior/espesor), así como para diferentes longitudes relativas (L/D) de las tuberías de prueba.

La intención de este trabajo, además de presentar los resultados de la medición experimental de las celeridades en la resina 4710, es presentar el panorama general y completo del golpe de ariete en tuberías de PEAD, presentando gráficas adimensionales con las que puedan obtenerse valores suficientemente precisos para el diseño preliminar de cualquier acueducto o conducción.

DESCRIPCION DEL MODELO

El modelo consiste en tuberías de polietileno de alta densidad, fabricados con resina PPI 4710, de diferentes diámetros y longitudes, con tanques hidroneumáticos que aseguran carga constante en los extremos, aguas arriba y aguas abajo de la tubería. En el extremo aguas abajo se instala también una válvula neumática de cierre rápido (0.2 s). La tubería es alimentada por una o dos bombas centrifugas de 11 kw, que succionan agua de una fosa de carga constante, y que pueden trabajar en serie o en paralelo, pudiendo regular así tanto las presiones iniciales como los caudales, y, por lo tanto, las velocidades de flujo. El modelo se muestra en la Figura 1.

Las presiones iniciales se miden con manómetros tipo bourdon, y las presiones transitorias con transductores de presión de 0 a 500 psi y frecuencia de muestreo de 500 Hz. Con las bombas en serie, pueden alcanzarse 8 kg/cm^2 (80 mca) de presión inicial, y los caudales máximos posibles, con bombas en paralelo, alcanzan los 20 l/s, que representan velocidades de 2.38 m/s en RD 21 y 2.15 m/s en RD 41.

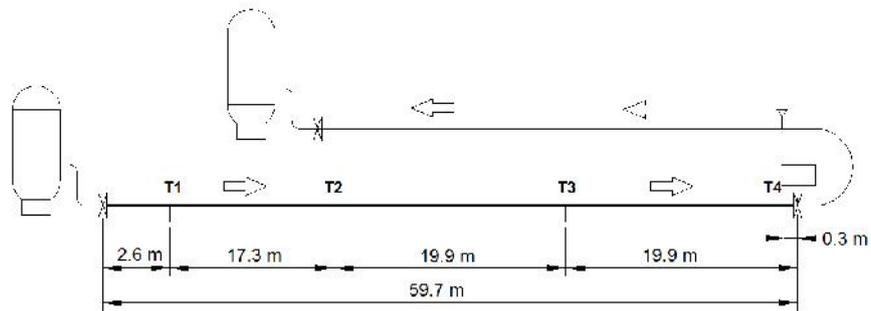
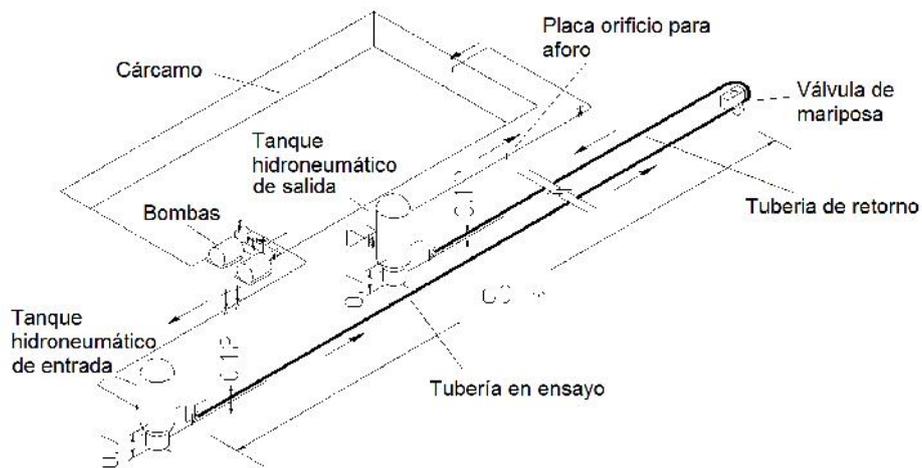


Figura 2. Modelo físico



Foto 1. Tubería recta



Foto 2. Tubería enrollada

La instalación experimental se localiza en la empresa Policonductos, en San Luis Potosí, México, y fue construida con la asesoría del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Los experimentos se desarrollaron en el marco de una colaboración entre universidad e industria. El modelo está disponible para proyectos de investigación con universidades o institutos.

En la Tabla 2 se muestran las distintas configuraciones de prueba.

Tabla 2

L (m)	D_{nom} (in)	D_{ext} (mm)	Q (l/s)	v (m/s)	Tubería	RD_s probados	No de pruebas
60	4	114	4 a 17.6	0.8 a 1.96	recta	7 a 41	46
110	4	114	5 a 7	1.0 a 1.4	recta	7	6
150	2	60	4.2 a 6.8	2.0 a 3.2	enrollada	17	6
300	2	60	4.2 a 6.8	2.0 a 3.2	enrollada	17	6

DESARROLLO DE LOS EXPERIMENTOS

Se llevaron a cabo los experimentos indicados en la Tabla 3. Para cada caso, las pruebas se duplicaron, obteniendo los resultados que se muestran en las gráficas. Durante las pruebas se apagaban las bombas al realizar el cierre de válvula aguas abajo, para evitar el incremento de la presión en el tanque de aguas arriba.

Tabla 3

	L (m)	Dext (mm)	RDn	RDr	Q (l/s)	V (m/s)	h_o (m)	C (m/s)	T (s)	h_j (m)
1	110	114	7	6.89	5.0	0.97	44.3	526	0.859	52
2	110	114	7	6.89	6.0	1.17	58.5	526	0.859	63
3	110	114	7	6.89	7.1	1.38	75.4	526	0.859	74
4	60	114	7	6.89	6.4	1.24	72.3	526	0.454	67
5	60	114	7	6.89	4.2	0.82	46.1	526	0.454	44
6	60	114	7	6.89	6.0	1.17	88.2	526	0.454	63
7	60	115	9	8.45	8.0	1.32	71.0	470	0.508	63
8	60	115	9	8.45	10.0	1.65	77.7	470	0.508	79
9	60	115	9	8.45	10.3	1.70	85.8	470	0.508	82
10	60	115	11	10.61	7.6	1.11	61.4	426	0.561	48
11	60	115	11	10.61	9.4	1.37	59.9	426	0.561	60
12	60	115	11	10.61	10.7	1.56	79.0	426	0.561	68
13	60	115	13.5	12.18	7.4	1.02	39.9	400	0.597	42
14	60	115	13.5	12.18	9.0	1.24	55.9	400	0.597	51
15	60	115	13.5	12.18	11.2	1.54	72.7	400	0.597	63
16	60	114	17	17.43	10.7	1.34	67.1	347	0.688	47
17	60	114	17	17.43	10.7	1.34	68.1	347	0.688	47
18	60	114	17	17.43	14.6	1.83	64.2	344	0.694	64
19	150	60	17	16.03	4.2	1.94	72.4	305	1.967	60
20	150	60	17	16.03	5.8	2.68	69.8	305	1.967	83
21	150	60	17	16.03	6.8	3.14	60.5	305	1.967	98
22	300	60	17	16.03	4.2	1.94	80.4	305	3.934	60
23	300	60	17	16.03	5.5	2.54	36.8	305	3.934	79
24	300	60	17	16.03	6.8	3.14	55.2	305	3.934	98
25	60	115	26	21.01	13.6	1.60	59.8	296	0.806	48
26	60	115	26	21.01	15.7	1.85	58.2	296	0.806	56
27	60	115	26	21.01	16.9	1.99	58.3	296	0.806	60

	L (m)	Dext (mm)	RDn	RDr	Q (l/s)	V (m/s)	ho (m)	C (m/s)	T (s)	hj (m)
28	60	115	32.5	29.38	11.7	1.30	34.5	245	0.975	32
29	60	115	32.5	29.38	15.7	1.74	52.3	245	0.975	43
30	60	115	32.5	29.38	17.6	1.95	47.6	245	0.975	49
31	60	115	41	37.69	8.8	0.94	35.7	220	1.085	21
32	60	115	41	37.69	11.4	1.22	37.9	220	1.085	27
33	60	115	41	37.69	14.7	1.58	31.2	220	1.085	35

RESULTADOS

Celeridades

En la Figura 3 se muestran las celeridades obtenidas en los experimentos así como la curva de mejor ajuste. Se muestra también la curva presentada en un trabajo anterior (Autrique y Rodal, 2010), para tuberías fabricadas con resina PPI 3608.

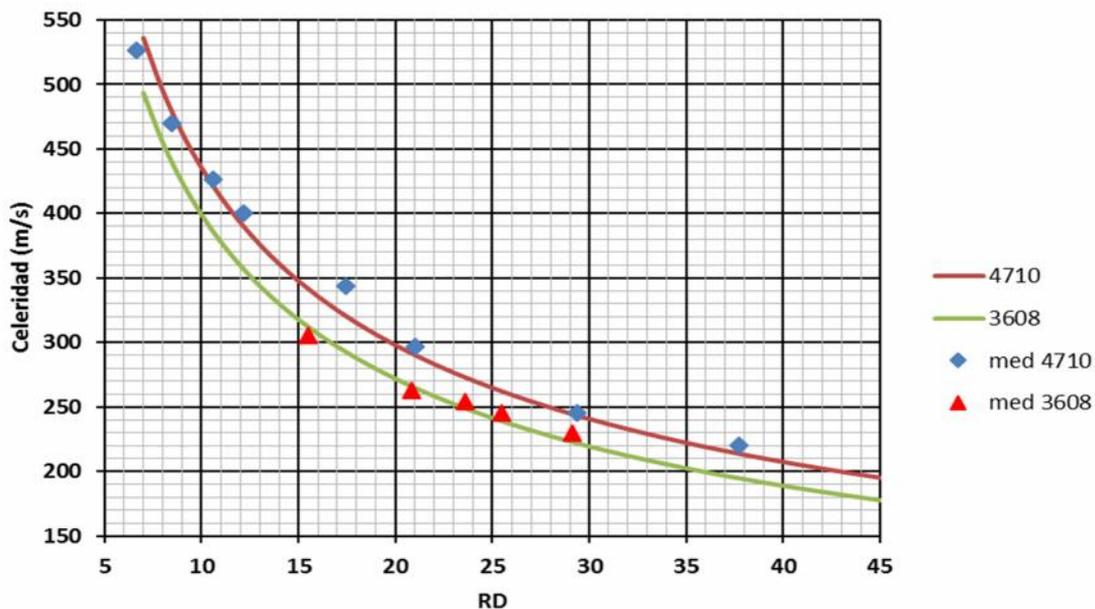


Figura 3. Celeridades en función de RD, para resinas 3608 y 4710

Las curvas son análogas y corresponden con la expresión clásica,

$$c = \frac{c_w}{\sqrt{1 + c_I \frac{EW}{E_{PE}} (RD - 2)}}$$

El incremento de las celeridades que se observa para las tuberías fabricadas con resina PPI 4710 corresponde con el incremento en el módulo de elasticidad instantáneo de la misma resina, que resulta ser de 200 ksi (1.38 MPa) para la curva de mejor ajuste. Para la resina PPI 3608, el módulo de elasticidad correspondiente al mejor ajuste es de 160 ksi (1.10 MPa). Puede observarse que

el incremento de la celeridad al cambiar a la resina PPI 4710 es del 10 al 12%, que corresponde aproximadamente con $(E_{4710}/E_{3608})^{1/2}$, valor que es igual a $(1.25)^{1/2}$, o bien 1.118.

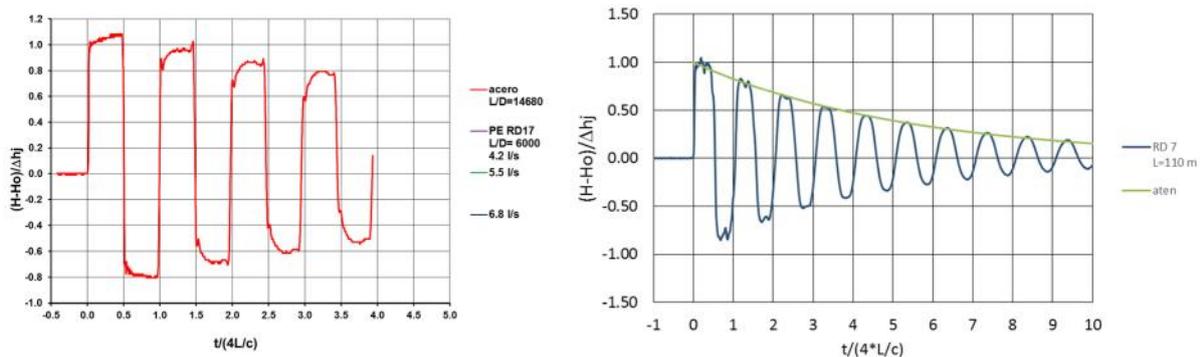
Evolución de las presiones transitorias y su atenuación en el tiempo

Comparación entre acero y polietileno

Experimentos anteriores de golpe de ariete (Autrique y Rodal, 2010) y los desarrollados para este trabajo, demuestran que el primer pico de sobrepresión en tuberías de polietileno puede calcularse con la expresión clásica de Joukowsky:

$$h_j = c \ v/g \quad (2)$$

desarrollada originalmente para tuberías de acero. Sin embargo, como ya se mencionó en la Introducción, la atenuación de la sobrepresión en tuberías de PEAD es mucho mayor que la observada en tuberías de acero, siendo que, en las primeras, la oscilación de presión desaparece prácticamente en unos cuantos períodos. Lo anterior puede apreciarse claramente en la Figura 3, adimensional, que corresponde a cierres de válvula aguas abajo en tuberías de acero y de polietileno.



Acero, L=1468 m

PE, RD 7, L=110 m

Figura 4. Atenuación de las presiones transitorias en tuberías de acero y PE

La curva en acero se obtuvo en el Laboratorio de Hidromecánica del Instituto de Ingeniería de la UNAM en 1987, con una tubería de acero de 105 mm de diámetro interno y 1469 m de longitud, para una relación L/D de 13,990. Las curvas en polietileno mostradas se obtuvieron en el modelo de Policonductos, en San Luis Potosí, para una tubería de 82 mm de diámetro interior, RD 7, resina 4710 y 110 m de longitud, para una relación L/D de 1,340. La tubería de acero tiene pérdidas relativas de fricción de 0.0042 m/m, y la de polietileno de 0.0137 m/m. Se observa claramente en la Figura 4 que la atenuación en PE es mayor y más rápida que en el acero.

Influencia de la relación dimensional RD (diámetro exterior/espesor)

En la Figura 4 se muestran los resultados para valores de RD de 7, 17, 26, y 41 en pruebas con tubería de 114 mm de diámetro exterior y 60 m de longitud. La mayor atenuación relativa corresponde a la tubería con RD 41 (Figura 5). En cada RD, las pruebas se hicieron para tres diferentes caudales, siendo las trazas adimensionales equivalentes.

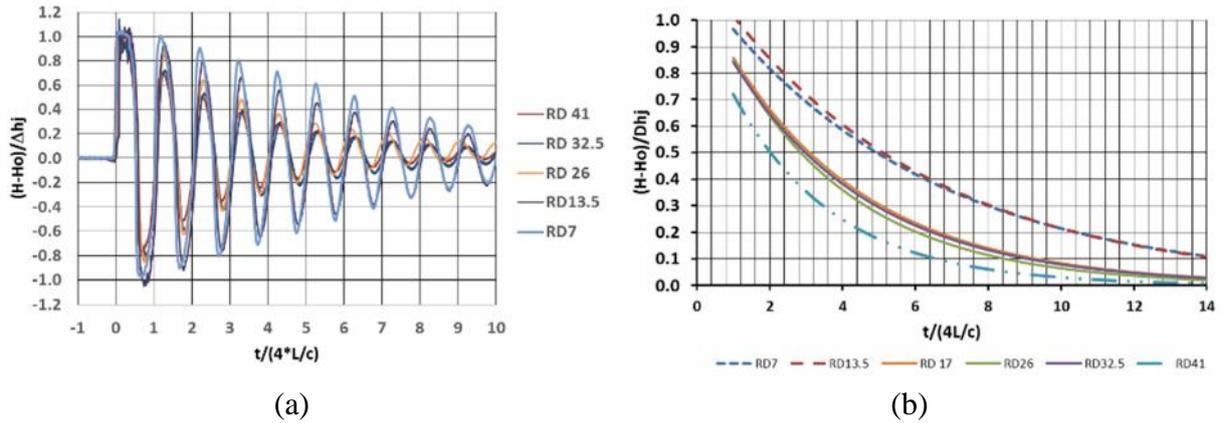


Figura 5. Evolución de presiones transitorias y su atenuación en el tiempo, para distintos RD.

Influencia de la longitud y de la relación L/D

En la Figura 6 se muestran las atenuaciones relativas para longitudes de 60 m ($D=114$ mm), y 150 y 300 m ($D=60$ mm), y para relaciones L/D de 595, 2,820 y 5,640, para un RD de 17, en los tres casos. Los resultados principales de la prueba se muestran en la tabla 5.

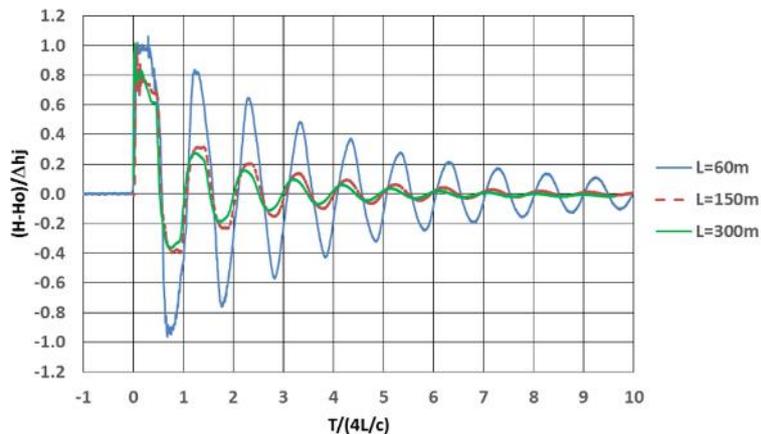


Figura 6. Presiones transitorias en el tiempo, para distintas longitudes.

Tabla 5

RD	L, m	Dext, mm	Dint, mm	L/D	Q l/s	v m/s	c m/s	h _J mca
17	60	114.3	100.9	595	10.3 - 14.6	1.3 - 1.8	344	45 - 64
17	150	60.3	53.2	2,820	4.2 - 6.8	1.9 - 3.2	305	61 - 98
17	300	60.3	53.2	5,640	4.2 - 6.8	1.9 a- 3.2	305	61 - 98

Se muestran también en la tabla 6 y en la Figura 7 la comparación entre las atenuaciones para dos longitudes diferentes, 60 y 110 m, en RD 7, que corresponde a relación L/D_i de 735 y 1350, respectivamente.

Atenuación a lo largo de la tubería

Como se aprecia en la Figura 7a, correspondiente a una tubería de 300 m ($D=60$ mm, RD 17), la atenuación que se presenta en el tiempo en la sección inmediatamente aguas arriba de la válvula,

se presenta también a lo largo de la tubería, para un tiempo dado, incluso para tuberías cortas (Figura 7b, 60 m, $D=114$ mm, RD 7). En la teoría clásica del golpe de ariete, las presiones máximas se alcanzan en toda la longitud de la tubería. En el polietileno, viscoelástico, las presiones transitorias se atenúan también en la distancia.

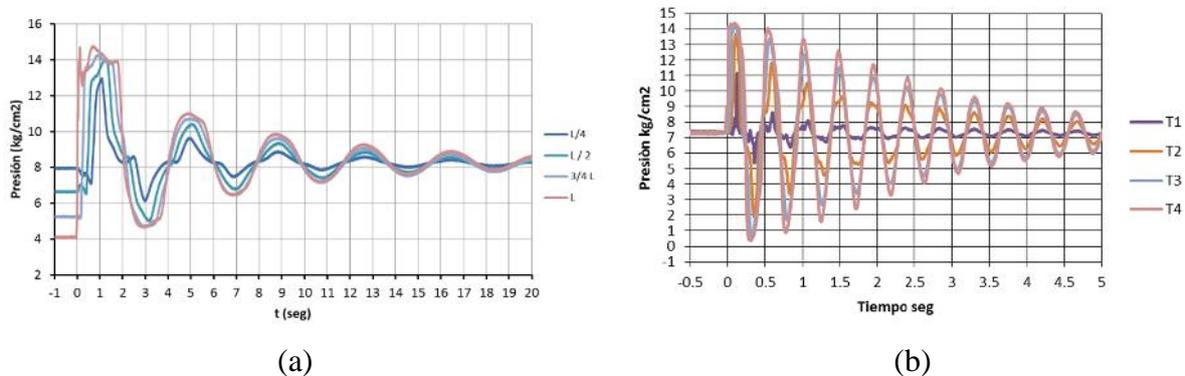


Figura 7. Atenuación de las presiones transitorias en la distancia (arreglo de transductores T1 a T4 en Figura 2).

CONCLUSIONES

Se presentaron resultados experimentales de medición de celeridades de ondas de presión en tuberías de PEAD fabricadas con la resina de alta resistencia PPI 4710, así como sus curvas y expresiones de mejor ajuste. Estas celeridades resultan mayores en un 12% a las correspondientes a las resinas en uso anteriormente (PPI 3608), lo que se explica por el mayor módulo de elasticidad instantáneo de la nueva resina.

Se presentaron y compararon las curvas adimensionales, relativas a la sobrepresión de Joukowsky y al período de las tuberías, tanto de evolución de las presiones transitorias como de su atenuación en el tiempo, en tuberías de acero y de PEAD, siendo las atenuaciones de las primeras las mayores, previstas por la teoría clásica, y las de PEAD las menores, explicables por la naturaleza viscoelástica del material.

Se presentaron igualmente curvas adimensionales de evolución de las presiones transitorias y de su atenuación en el tiempo, para distintas relaciones diámetro exterior/espesor (RD), mostrando que la atenuación es mayor para los tubos más delgados.

Finalmente, se presentaron curvas adimensionales de evolución de las presiones transitorias y de su atenuación en el tiempo, para distintas longitudes y para distintas longitudes relativas (L/D) de las tuberías, mostrando que la atenuación se incrementa con la longitud. La afirmación anterior es válida también para las secciones que se encuentran entre la válvula de cierre y la frontera de carga constante, en vista de que las presiones transitorias sufren también atenuación a lo largo de la tubería. Las curvas adimensionales presentadas pueden usarse para diseños preliminares de conducciones y acueductos, considerando los ajustes necesarios por pérdidas de presión debidas a la fricción entre el agua y las paredes de la tubería.

NOTACIÓN

BDH	Base de diseño hidrostático, obtenida en pruebas de larga duración
c	Celeridad de las ondas de presión en la tubería
C ₁	Coefficiente de anclaje de la tubería
c _w	Celeridad de las ondas de presión en un medio acuático infinito, 1420 m/s
D	Diámetro exterior de la tubería
e	Espesor de la tubería
EDH	Esfuerzo de diseño hidrostático, igual a BDH/2
E _{pe}	Módulo de elasticidad instantáneo del polietileno, 1.10 MPa para resina 3608 e igual a 1.38 MPa para la resina 4710
E _w	Módulo de elasticidad del agua, 2.07 Mpa
FD	Factor de diseño, 1/FS
FS	Factor de seguridad
g	Aceleración producida por la gravedad
h ₀	Presión inicial
L	Longitud de la tubería
MRS	Esfuerzo mínimo requerido, obtenido en pruebas de larga duración
P _{nom}	Presión de diseño nominal, igual a 2 EDH / (RD _n -1)
P _{nom r}	Presión nominal, correspondiente a RD _r
Q	Gasto o caudal de agua
RD	Relación dimensional de la tubería, igual a D/e
RD _n	Relación dimensional nominal
RD _r	Relación dimensional real
T	Periodo de la tubería, 4L/c
v	Velocidad del agua en la tubería
h _J	Sobrepresión de Joukowsky para el RD del tramo de polietileno probado, igual a c v/g

REFERENCIAS

Autrique, R. y Rodal, E. (2010). “Golpe de ariete en tuberías de polietileno de alta densidad para conducción de agua potable”. *Memorias*, XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Punta del Este, Uruguay.

Chaudhry, M.H. (1979). *Applied hydraulic transients*. Van Nostrand Reinhold, Nueva York, E.U.A.

Findley, W., Lai, J., y Onaran, K. (1976). *Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials (with an introduction to linear viscoelasticity)*. Dover, Nueva York, E.U.A.

Plastic Pipe Institute (2009). *Handbook of Polyethylene Pipe*. 2ª Ed, PPI, Irving Texas, E.U.A. Disponible en línea <http://plasticpipe.org>

Plastic Pipe Institute (2007). “High performance PE materials for water piping applications”, Publication TN 41, PPI, Irving, Texas, E.U.A.

Plastic Pipe Institute (2005). “Nature of hydrostatic time to rupture curves”. Publication TN7, PPI, Irving, Texas, E.U.A.

Wylie, E.B., Streeter, V., y Suo, Lisheng (1993). *Fluid transients in systems*. Prentice Hall, Nueva Jersey, E.U.A.