

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

**ESTUDIO EN LABORATORIO DE FATIGA EN
TUBERIAS DE POLIETILENO SOMETIDAS A
PRESIONES TRANSITORIAS EXTREMAS**

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

RESUMEN

Se presentan, para el polietileno de alta densidad (PEAD, resina PPI 4710), curvas S – N (curvas de fatiga), obtenidas experimentalmente en muestras de tubería sometidas a ciclos repetidos de presiones transitorias extremas. Los tubos probados fueron alterados mediante ranuras de sección transversal triangular cortadas en su superficie, de diferentes profundidades, para propiciar la formación de grietas a partir de esas ranuras. Se confirma que las fallas o roturas tienen su origen en grietas que se desarrollan en regiones debilitadas de las tuberías. Se confirma también que las tuberías de polietileno de alta densidad tienen una alta resistencia a la fatiga o a la aplicación cíclica de altas presiones internas, en vista de que la falla se presenta para presiones de prueba muy por encima de su resistencia nominal y muy por encima de la resistencia admitida para eventos transitorios extremos.

ABSTRACT

Fatigue curves (S – N curves) are presented for high density polyethylene (HDPE, PPI 4710 resin), obtained experimentally with pipe samples subject to repeated cycles of extreme transient pressures. The pipe samples tested were altered with triangular grooves of different depths machined in its surface, in order to favor the formation of cracks in those grooved sections. It is confirmed that failures have their origin in the cracks developed in weakened regions of the pipes. It is also confirmed that high density polyethylene pipes have a high resistance to fatigue or to the cyclic application of high internal pressures, given the fact that pipe failures occur under pressures much higher than its nominal resistance and also much higher than its allowed resistance under extreme transient events.

PALABRAS CLAVE: Fatiga, curvas S-N, polietileno de alta densidad, PEAD, presiones transitorias, resina 4710.

KEYWORDS: Fatigue, S-N curves, high density polyethylene, HDPE, transient pressures, 4710 resin.

INTRODUCCIÓN

En un trabajo anterior (Autrique y Rodal, 2012) se propusieron, para las tuberías de polietileno de alta densidad (PEAD, resina PPI 3608), usadas en la conducción de agua potable, curvas S – N que podían ser representativas del PEAD. En estas curvas se representan las cargas aplicadas, relativas a un valor de referencia o de diseño, contra el número de ciclos que resiste el material para una determinada carga. En ellas, se distingue una curva de inicio de grietas y una curva de falla o ruptura. Entre ambas curvas se encuentra la región de desarrollo de las grietas. La gráfica propuesta (Figura 1), obtenida a partir de experimentos de larga duración (10^6 ciclos) y de corta duración (10^0 y 10^3 ciclos), resultaba semejante a las curvas de fatiga S – N obtenidas para los aceros y otros metales, que son materiales típicamente elásticos.

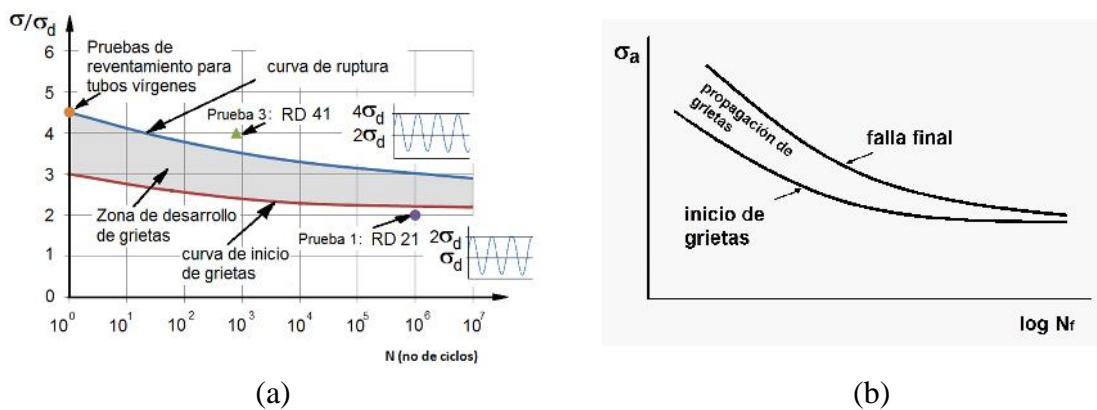
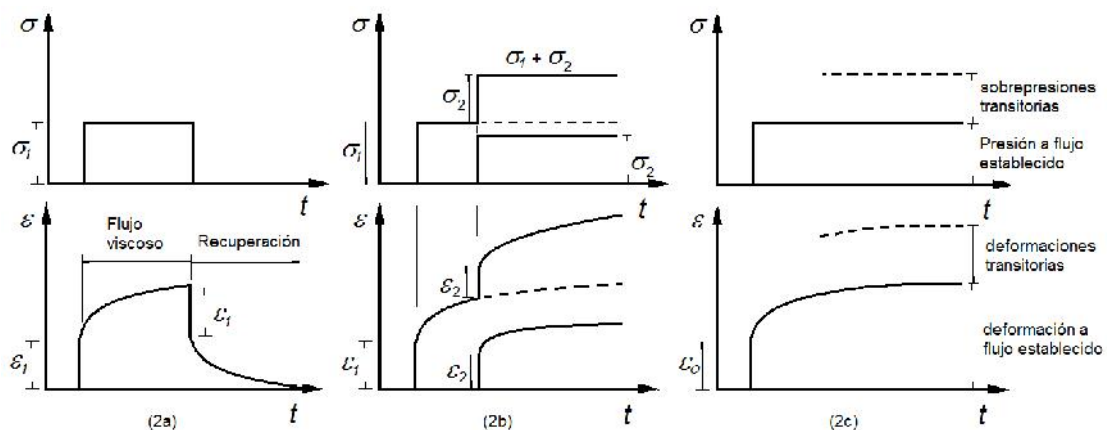


Figura 1a. Curvas S – N propuestas en Autrique y Rodal (2010); **Figura 1b.** Curvas S-N, Suresh (1998).

El polietileno de alta densidad es, como todos los plásticos, un material viscoelástico. Los materiales viscoelásticos se caracterizan por responder, ante la aplicación de una carga, con una deformación instantánea, de tipo elástico, seguida de una deformación lenta y continua (flujo viscoso, o “creep” en la literatura en lengua inglesa), que no cesa hasta la desaparición de la carga. Al desaparecer la carga, hay una recuperación instantánea de la deformación elástica y un flujo viscoso inverso que tiende a recuperar la deformación viscosa (Figura 2a). El flujo viscoso se presenta también en metales, a altas temperaturas (Timoshenko, 1953).

De acuerdo con el principio de superposición de Boltzmann (Findley et al, 1976), si dos esfuerzos o cargas se superponen, se superponen igualmente sus deformaciones (Figura 2b).



Figuras 2a y 2b: Deformaciones de materiales viscosos ante esfuerzos y esfuerzos superpuestos, Findley et al (1976); **Figura 2c:** deformaciones ante sobrepresiones transitorias.

En los estudios de fatiga que nos ocupan, las tuberías se someten a una presión interna inicial que da lugar a la deformación elástica y al flujo viscoso mencionado arriba. La aplicación de sobrepresiones cíclicas producidas por golpe de ariete dará lugar a una nueva curva de deformación, por encima de la de flujo viscoso. Las deformaciones asociadas a estos ciclos de carga y descarga transitorios se localizarán entre estas dos curvas (Figura 2c).

En esta nueva serie de experimentos, se llevaron a la falla un buen número de tuberías, sometiéndolas a presiones transitorias extremas repetidas cíclicamente, muy por encima de su capacidad nominal de trabajo a presión (P_{nom}) y muy por encima también de su presión máxima permitida durante eventos transitorios extremos producidos por el golpe de ariete, y que es igual al doble de su resistencia nominal a la presión $2 P_{nom}$ (PPI, 2009).

El objetivo de esta nueva serie de experimentos es completar y confirmar la curva S-N obtenida en el trabajo anterior, así como confirmar también la hipótesis de que las roturas ocurren a partir de una grieta inicial que se desarrolla en el tiempo, al estar sujeta a aplicaciones repetidas de carga.

INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

La instalación experimental se muestra en la Figura 3. Consiste en una tubería de acero de 100 mm de diámetro exterior y 1.5 mm de espesor ($D/e= 67$), de 277 m de longitud, con 2 tanques hidroneumáticos, al inicio y al final de la misma, que aseguran carga constante.

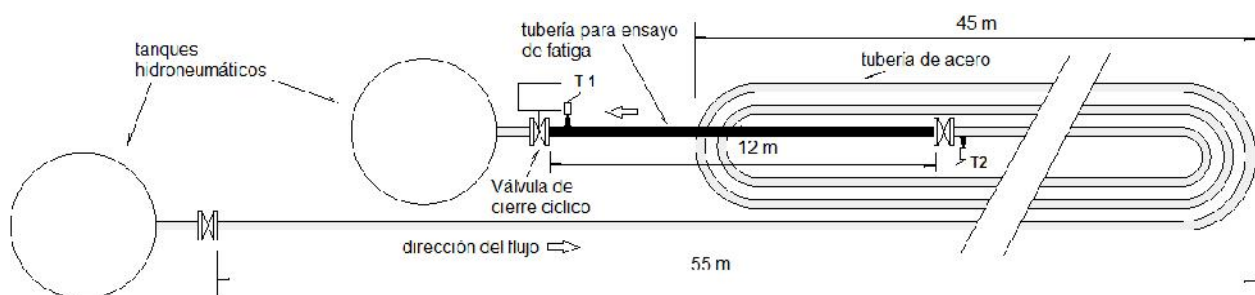


Figura 3. Arreglo con tuberías de acero y de prueba, válvula de cierre, y transductores T1 y T2.

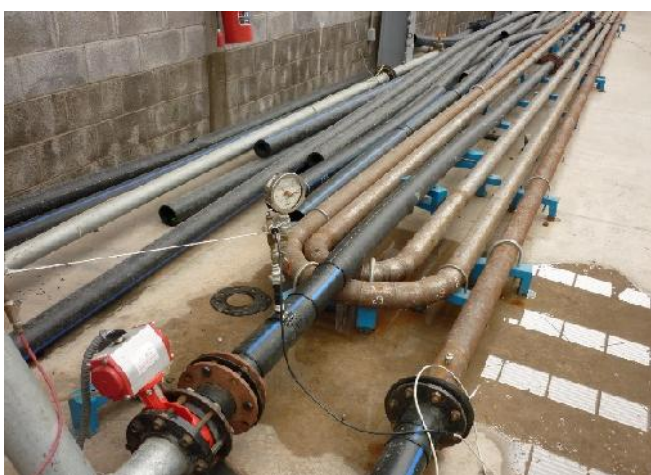


Foto 1 Tramo de pruebas, válvula de cierre y transductor de presión.

En ambos extremos de la tubería, aguas arriba y agua abajo, pueden instalarse tramos escogidos de tubería de polietileno, de 9 a 12 m de longitud, que son los que se someten a las presiones transitorias extremas. La presencia de la tubería de acero, y la alta celeridad de las ondas de presión en la misma (1120 m/s), permiten obtener las altas presiones requeridas para los experimentos. En el extremo aguas abajo se colocó una válvula de mariposa programable, con activador neumático, con tiempos de cierre o apertura de 0.2 segundos. Se programaron ciclos de cierre y apertura de 9 a 10 segundos de duración (Figura 7), en los que

se presentaban uno o dos picos de sobrepresión provocados por el cierre rápido, seguidos de un tiempo de recuperación de las condiciones de flujo establecido. La válvula contaba además con un contador mecánico, que acumulaba el número de ciclos que operaba la válvula. La tubería es alimentada por

En un primer experimento, para una tubería de prueba con RD nominal de 32.5 (con un RD real de 27), con resistencia nominal a la presión de 4.5 kg/cm² (44.6 mca), y de 5.4 kg/cm² (54.1 mca) para el RD real, se alcanzó un alto número de ciclos, con cargas pico máximas promedio de 15 kg/cm² (150 mca), sin llegar a la falla. En estas pruebas, se aplicaban entre 2500 y 3500 ciclos de sobrepresión durante un período de 7 a 10 horas por día. Terminada la prueba diaria, la tubería se dejaba reposar, para reiniciar pruebas al día siguiente. Se realizaron mediciones del diámetro exterior de la tubería antes de las pruebas diarias, durante las pruebas, en distintos tiempos, midiendo tanto el diámetro máximo, durante los picos de sobrepresión, como los diámetros al recuperarse el flujo establecido. Los crecimientos de estos diámetros en el tiempo se muestran en la Figura 6. Es necesario señalar la correspondencia de esta figura con la Figura 2c.

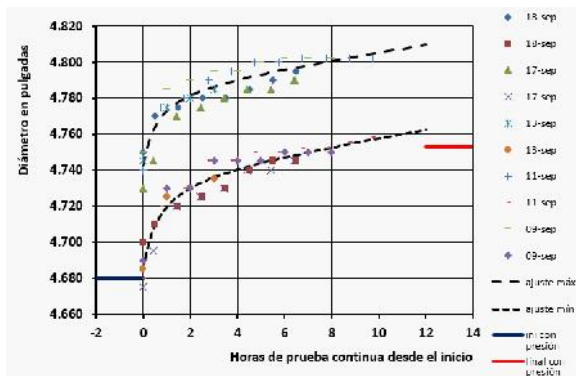


Figura 6. Diámetros medidos en flujo establecido y durante transitorios.

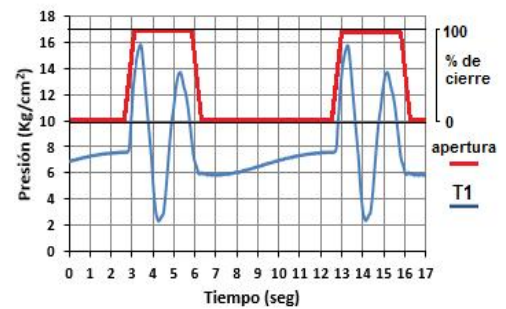


Figura 7. Presiones transitorias y ciclo de cierre y apertura de la válvula.

La curva inferior muestra el crecimiento del diámetro en el tiempo, correspondiente a la presión interna aplicada (7.5 kg/cm², 75 mca). La curva superior corresponde al crecimiento del diámetro al ser aplicadas las presiones transitorias. Durante los ciclos de aplicación de estas últimas, que son ciclos de carga y descarga, el diámetro variará entre las dos curvas. Se observa en que la variación en el tiempo del diámetro representada por la curva inferior corresponde con la deformación continua o flujo viscoso que sigue a la deformación elástica inicial, que es instantánea (Figura 2). Se observa también que la separación entre las curvas superior e inferior es prácticamente constante, lo que correspondería a deformaciones y recuperaciones prácticamente elásticas, lo que concuerda con el carácter transitorio de las sobrepresiones aplicadas. Se efectuaron además 8 tipos de pruebas de fatiga, mostradas en la Tabla 1, llevando esta vez los tubos a la falla.

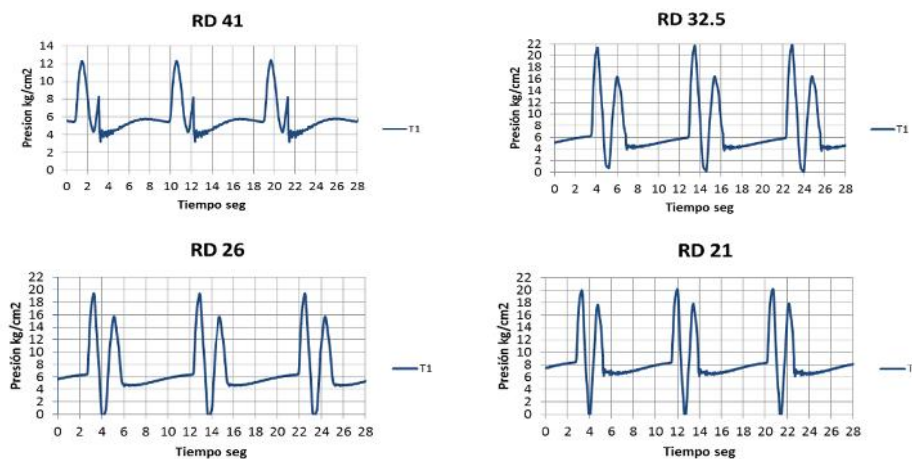


Figura 8. Presiones transitorias aplicadas, para los distintos RD nominales.

Las presiones iniciales fueron entre 1.3 y 1.9 veces las presiones nominales de las tuberías, y las sobrepresiones promedio alcanzadas por golpe de ariete resultaron entre 3.5 y 4.5 veces las presiones nominales de las tuberías. Los ciclos de carga típicos a los que se sometieron las tuberías probadas se muestran en la Figura 8. Con la excepción del RD 41, existen dos picos de presión por ciclo.

Tabla 1

	RD _n	RD _r	P _{nom mca}	P _{nom r mca}	r	P _{mod mca}	P _{i mca}	P _i /P _{mod}	P _{max p mca}	$\frac{P_{max p}}{P_{mod}}$	Q l/s	v m/s
1	41	37	35.2	39.1	0.10	35.2	62	1.76	124	3.52	8.9	0.97
2	41	37	35.2	39.1	0.15	33.2	62	1.87	124	3.73	8.9	0.97
3	32.5	27	44.6	48.7	0.10	48.7	62	1.27	191	3.92	12.7	1.44
4	32.5	27	44.6	54.1	0.15	46.0	62	1.35	191	4.15	12.7	1.44
5	26	25.1	56.2	58.3	0.20	46.7	62	1.33	181	3.88	12.5	1.44
6	26	25.1	56.2	58.3	0.30	40.8	62	1.52	181	4.44	12.5	1.44
7	21	18.8	70.3	79.0	0.30	55.3	83	1.50	191	3.45	8	0.98
8	21	18.8	70.3	79.0	0.40	47.4	83	1.75	191	4.03	8	0.98

Los resultados de las pruebas se muestran en la Tabla 2 y en la Figura 9. Se realizaron 21 experimentos, llevando en todos los casos los tubos a la falla. El número de los ciclos resistido por los tramos de tubería antes de falla se muestran en la Tabla 2. El valor relativo de la carga aplicada, en términos de la resistencia nominal y modificada de las muestras de tubería probadas, se calculó con el valor promedio de los picos obtenidos en cada ciclo de prueba [$P_{max p} = \frac{1}{2} (P_{max1} + P_{max2})$].



Figura 9. Resultados experimentales de las pruebas de fatiga y curva S-N ajustada logarítmicamente.

Las fallas, en todos los casos, se presentaron en las ranuras que se habían maquinado en la superficie de los tubos, precisamente para inducir las fallas en esas secciones. Las fallas son localizadas, únicas, a pesar del gran número de ranuras, y típicas. Fotografías de las mismas se presentan en las Fotos 2 a 9.



Foto 2 Falla tubo RD41

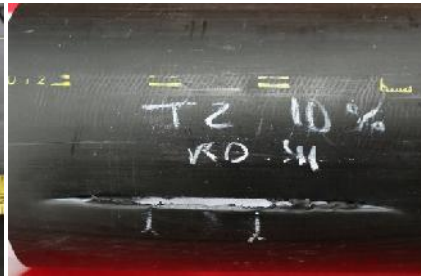


Foto 3 Falla tubo RD41



Foto 4 Falla tubo RD32.5

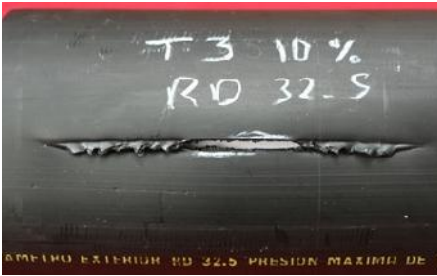


Foto 5 Falla tubo RD32.5



Foto 6 Falla tubo RD26

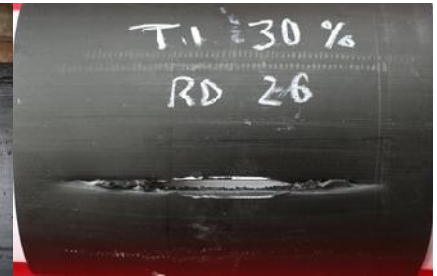


Foto 7 Falla tubo RD26

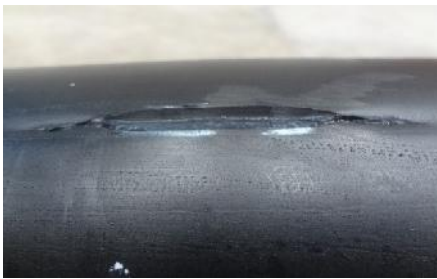


Foto 8 Falla tubo RD21

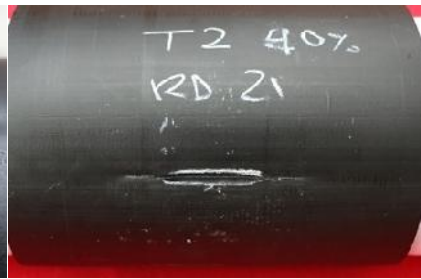


Foto 9 Falla tubo RD21

Tabla 2

	RD _n	RD _r	No. tubo	r	L _{falla} mm	S _{falla}	Ciclos a la falla	P _{nom r} mca	P _i mca	$\frac{P_i}{P_{nom r}}$	P _{max p} mca	$\frac{P_{max p}}{P_i}$	P _{max p} mca	$\frac{P_{max p}}{P_{nom r}}$
1	41	37	1	0.10	118	0.20	3271	35.2	62.0	1.76	124	2.0	124	3.52
2	41	37	2	0.10	122	0.28	2690	35.2	62.0	1.76	124	2.0	124	3.52
3	41	37	3	0.10	136	0.40	862	35.2	62.0	1.76	124	2.0	124	3.52
4	41	37	4	0.10	138	0.24	2257	35.2	62.0	1.76	124	2.0	124	3.52
5	41	37	1	0.15	118	0.29	2072	33.2	62.0	1.87	124	2.0	124	3.73
6	41	37	2	0.15	127	0.41	642	33.2	62.0	1.87	124	2.0	124	3.73
7	41	37	3	0.15	118	0.18	1355	33.2	62.0	1.87	124	2.0	124	3.73
8	41	37	4	0.15	132	0.41	650	33.2	62.0	1.87	124	2.0	124	3.73
9	41	37	5	0.15	120	0.05	689	33.2	62.0	1.87	124	2.0	124	3.73
10	32.5	27	1	0.10	130	0.01	320	48.7	62.2	1.27	191	3.1	191	3.92
11	32.5	27	2	0.10	135	0.13	464	48.7	62.2	1.27	191	3.1	191	3.92
12	32.5	27	3	0.10	140	0.02	348	48.7	62.2	1.27	191	3.1	191	3.92
13	32.5	27	1	0.15	120	0.23	410	46.0	62.0	1.35	191	3.1	191	4.15
14	32.5	27	2	0.15	140	0.04	560	46.0	62.0	1.35	191	3.1	191	4.15
15	32.5	27	3	0.15	125	0.45	600	46.0	62.0	1.35	191	3.1	191	4.15
16	26	25.1	3	0.20	124	0.04	118	46.7	62.0	1.33	181	2.9	181	3.88
17	26	25.1	4	0.20	120	0.04	642	46.7	62.0	1.33	181	2.9	181	3.88
18	26	25.1	1	0.30	110	0.16	6	40.8	62.0	1.52	181	2.9	181	4.44
19	26	25.1	2	0.30	115	0.15	8	40.8	62.2	1.52	181	2.9	181	4.44
20	21	18.8	1	0.30	68	0.13	3672	55.3	83.0	1.5	191	2.3	191	3.45
21	21	18.8	2	0.40	64	0.05	612	47.4	83.0	1.75	191	2.3	191	4.03

En general, las fallas se presentaron en ranuras localizadas en la parte central de los tramos probados. Su localización relativa, calculada como la distancia del centro de la falla al centro de la tubería probada, dividida entre la longitud de la tubería probada (1500 mm) se muestra en la Tabla 2. A simple vista, no fue posible encontrar indicaciones de grietas incipientes o en desarrollo en el interior de los tubos probados. Se realizaron cortes transversales maquinados en las secciones ranuradas de la tubería, en la búsqueda de grietas. En algunos casos, fue posible localizarlas. Por el tamaño de las muestras y sobre todo por su color, no es posible mostrarlas en fotografías.

Se cortaron y se separaron de los tubos probados las secciones en que se había presentado la falla, y los tramos libres de falla se sometieron a pruebas de reventamiento de corto período (ASTM D 1599 99R05). En estas pruebas, las muestras de tubería se sellan en sus extremos, se colocan dentro de un tanque lleno de agua, y se someten a una presión interior que se incrementa gradualmente, hasta que la tubería falla. En ese momento, se detiene la prueba. Nuevamente, al igual que en los experimentos, las fallas se presentaron en las ranuras practicadas, y en la parte central de las tuberías. Fotografías de las fallas se muestran en las Fotos 10 a 13.



Foto 10



Foto 11



Foto 12



Foto 13

Las fallas son menores en longitud y menos protuberantes que las ocurridas en los experimentos, aunque es necesario mencionar que las pruebas de reventamiento se efectúan bajo condiciones controladas, dentro de un tanque de agua, y la presión de ruptura no es instantánea, sino continua y creciente. Los resultados de las pruebas de reventamiento se muestran en la Tabla 3, y aparece también en la Figura 9, que es la curva S – N resultante de los experimentos.

Las fallas en las pruebas de reventamiento con tubos vírgenes, no sujetos aún a ninguna presión interna, se presentan típicamente para valores de la relación $P_{\text{máx}}/P_{\text{nom}}$ de 4.5. Los resultados de la Tabla 3, correspondientes a tubos fatigados o expuestos ya a un determinado número de ciclos de altas presiones, muestran valores superiores de la relación $P_{\text{máx}}/P_{\text{nom}}$, con un promedio de 5.27.

Tabla 3

	RD_n	RD_r	P_{nom} mca	$P_{nom r}$ mca	r	Muestra	P_{mod} mca	P_{mod} Mpa	P_{falla} Mpa	P_{falla} P_{mod}
1	41	37	35.2	39.1	0.10	T3	35.2	0.345	1.8	5.22
2	41	37	35.2	39.1	0.10	T2	33.2	0.326	1.8	5.52
3	41	37	35.2	39.1	0.10	T4	33.2	0.326	1.8	5.52
4	32.5	27	44.6	54.1	0.10	T2	48.7	0.477	2.6	5.45
5	32.5	27	44.6	54.1	0.10	T3	46.0	0.451	2.6	5.76
6	26	25.1	56.2	58.3	0.15	T3	46.7	0.458	2.4	5.24
7	26	25.1	56.2	58.3	0.15	T4	46.7	0.458	2.2	4.80
8	26	25.1	56.2	58.3	0.15	T2	40.8	0.401	2.4	5.99
9	21	18.8	70.3	79.0	0.20	T1	55.3	0.542	2.4	4.43
10	21	18.8	70.3	79.0	0.40	T2	47.4	0.465	2.2	4.77

Nuevamente, y al igual que lo obtenido en las pruebas de un trabajo anterior (Autrique y Rodal, 2012), se comprueba que las tuberías sujetas a fatiga o a ciclos de carga y descarga sucesivos muestran una resistencia al reventamiento o una resistencia última superior a la de los tubos vírgenes.

CONCLUSIONES

Se presentó una curva S – N, resultado de numerosos experimentos, que demuestran que el comportamiento del polietileno en lo que se refiere a fracturas y fatiga, es semejante al encontrado en los materiales más estudiados, es decir, los aceros y otros metales.

Se demostró también que las fallas en las tuberías son el producto de la aparición de pequeñas grietas en secciones debilitadas de la misma, que se desarrollan paulatinamente, al aplicarse cíclicamente cargas o sobrepresiones transitorias, hasta provocar la falla.

Se demostró que el polietileno de alta densidad, y en particular la resina de alto desempeño PPI 4710, tienen una alta resistencia a la fatiga, lo cual es garantía de su comportamiento a largo plazo.

Se demostró igualmente que los factores de seguridad son muy altos en el caso del polietileno, y que este material es capaz de resistir esfuerzos repetidos, muy por encima de sus capacidades nominales, y muy por encima también de lo admitido por las normas en el caso de eventos extraordinarios ocasionales, como el golpe de ariete.

NOTACIÓN

c	Celeridad de las ondas de presión en la tubería
d	Profundidad de las ranuras
D	Diámetro exterior de la tubería
D_0	Diámetro exterior inicial de la tubería
e	Espesor de la tubería
e_0	Espesor inicial de la tubería

EDH	Esfuerzo de diseño hidrostático, igual a 1000 psi (70.3 Kg/cm ²) para la resina PPI 4710
g	Aceleración producida por la gravedad
N	Número de ciclos
P _{falla}	Presión de ruptura en pruebas de reventamiento
P _i	Presión inicial
P _{max p}	Presión máxima promedio, igual a $\frac{1}{2} (P_{max1} + P_{max2})$
P _{max1}	Presión máxima (1) de prueba, igual al valor del primer pico de presión transitoria
P _{max2}	Presión máxima (2) de prueba, igual al valor del segundo pico de presión transitoria
P _{mod}	Presión de diseño modificada, para el espesor relativo de las ranuras, igual a $P_{nom r} (1-r)$
P _{nom}	Presión de diseño nominal, igual a $2 \text{ EDH} / (RD_n - 1)$
P _{nom r}	Presión nominal, correspondiente a RD _r
Q	Gasto o caudal de agua
r	Profundidad relativa de las ranuras, igual a d/e_0
RD	Relación dimensional de la tubería, igual a D/e
RD ₀	Relación dimensional inicial de la tubería, igual a D_0/e_0
RD _n	Relación dimensional nominal
RD _r	Relación dimensional real
σ, S	Esfuerzo
S _{falla}	Distancia relativa del centro de la falla al centro de la tubería muestra
v	Velocidad del agua en la tubería
Δh _J	Sobrepresión de Joukowsky para el RD del tramo de polietileno probado, igual a $c \cdot v/g$

REFERENCIAS

Autrique, R. y Rodal, E. (2012). “Fatiga en tuberías de polietileno sometidas a presiones extremas producidas por golpe de ariete” *Memorias, XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, San José, Costa Rica.

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.

Jana Laboratories (2012). “Fatigue of plastic water pipe: a technical review with recommendations for PE 4710 pipe design fatigue”. Technical Report, Aurora, Ontario, Canadá.

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

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

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

Suresh, S. (1998). *Fatigue of materials*. Cambridge University Press, 2a Ed, Cambridge, R.U.

Timoshenko, S. (1953). *History of strength of materials*, Reedición 1983, Dover, Nueva York, E.U.A.