

**XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
SAN JOSÉ, COSTA RICA, 9 AL 12 DE SEPTIEMBRE DE 2012**

**FATIGA EN TUBERÍAS DE POLIETILENO SOMETIDAS A PRESIONES
EXTREMAS PRODUCIDAS POR GOLPE DE ARIETE**

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

* Policonductos, Cracovia 54, Distrito Federal, México 52(55)55501277, rautrique@prodigy.net.mx

**Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, Distrito Federal, México

(55)56233500 ext 1100, erc@pumas.ii.unam.mx

RESUMEN:

En un trabajo anterior se demostró, con mediciones en modelo físico, que las tuberías de polietileno de alta densidad (PEAD) son capaces de resistir, ante eventos puntuales de golpe de ariete, hasta cuatro veces su presión de diseño.

Para condiciones de flujo transitorio, las normas de diseño vigentes permiten presiones hasta de 1.5 veces la presión nominal de la tubería, ante eventos recurrentes de golpe de ariete, y hasta de 2 veces la presión nominal ante eventos ocasionales o accidentales.

Se presentan en este trabajo los resultados de experimentos en modelo físico, en los cuales la tubería de PEAD se somete un gran número de veces a las presiones extremas causadas por golpe de ariete.

Se concluye que el PEAD es un material altamente confiable, ya que puede resistir, sin pérdida de resistencia, las sobrepresiones y depresiones originadas por golpe de ariete que puedan presentarse durante su vida útil.

ABSTRACT:

In a previous study, developed in a physical model, it was found that high density polyethylene (HDPE) pipes can resist, during water hammer events, pressures as high as four times its design pressure.

For transient flow conditions, the existing design standards allow pressures up to 1.5 times the design pressure, for occasional pressure surges, and up to 2 times the design pressure, for occasional pressure surges.

The results of experiments, developed in a physical model, in which the HDPE pipe is exposed to extreme water hammer pressures for a large number of times, are presented in this paper.

It is concluded that HDPE is a highly reliable material which can resist, without loss of hydrostatic strength, the water hammer pressure surges to which it will be subject during its service life.

PALABRAS CLAVE: Fatiga, pruebas de fatiga, tubería de polietileno de alta densidad.

INTRODUCCIÓN

En término “fatiga” para el comportamiento de metales fue usado por primera vez por Poncelet, en Francia, en 1839. Los primeros estudios sistemáticos de fatiga, realizados para los ejes de los ferrocarriles, se deben a Wöhler, en Alemania, en el período 1850 – 1870, estudios que dieron lugar a las curvas σ - N y al concepto de límite de resistencia a la fatiga (Timoshenko, 1953).

En los estudios de fatiga en materiales, y en la disciplina de la mecánica de fractura, que evolucionó a partir de aquellos, se estudia el número de ciclos de carga y descarga que puede resistir un material, para distintos valores de la carga máxima ($\sigma_{\text{máx}}$) y para distintos valores del rango de carga ($\Delta\sigma$) aplicados (Figura 1).

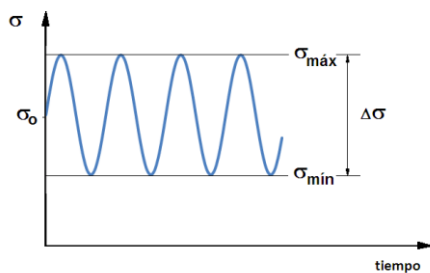


Figura 1.- Ciclos de carga y descarga de un material, partiendo de un esfuerzo σ_0 .

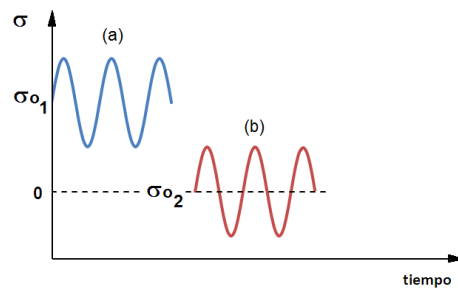


Figura 2.- Ciclos de carga y descarga con esfuerzos: (a) siempre positivos y (b) positivos y negativos.

Los ciclos de carga pueden corresponder a ciclos con esfuerzos de un solo signo, siendo todos positivos o de compresión, por ejemplo, o a ciclos en los que los esfuerzos cambian de signo, alternándose compresión y tensión, (Figura 2). La mecánica de fractura establece los conceptos de inicio de formación de grietas, desarrollo de grietas, y fractura del material, originada esta última por una grieta inicial totalmente desarrollada. Estos conceptos están también asociados al número de ciclos, y pueden representarse en figuras conocidas como gráficas $\sigma - N$ (Figura 3), en las cuales σ representa el valor de esfuerzo aplicado N el número de repeticiones de carga, que suele ser de miles, cientos de miles, o millones (Suresh, 1998; Frost et al, 1999). Uno de los campos típicos de aplicación de los estudios de fatiga es la industria aeronáutica, en la que los niveles de seguridad son muy elevados.

En un trabajo anterior (Autrique y Rodal, 2010) se había encontrado, en pruebas en modelo físico, que las tuberías de polietileno podían resistir las presiones producidas por el golpe de ariete en magnitudes hasta de 4 y 5 veces las presiones de diseño.

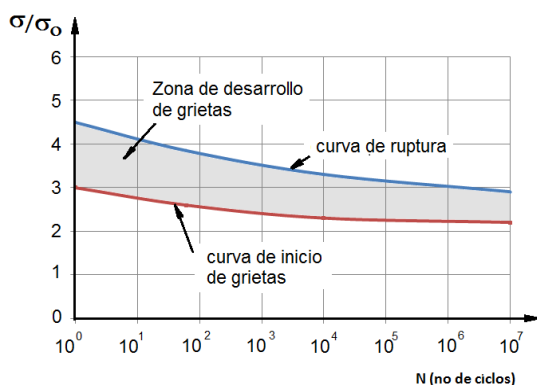


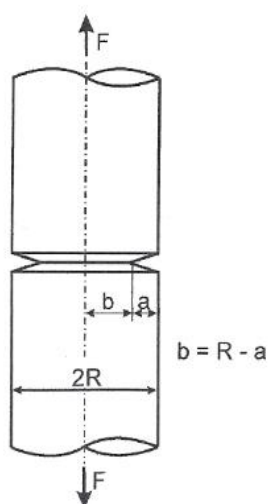
Figura 3.- Gráfica $\sigma - N$: esfuerzos en función del número de ciclos.

La constatación puntual en aquellos experimentos de la resistencia de la tubería ante grandes presiones dio lugar a este nuevo estudio, buscando responder a la pregunta “¿cuántas veces puede este material resistir una determinada sobrepresión súbita originada por golpe de ariete?”, entendiendo esta sobrepresión como una presión muy superior a la presión normal de diseño.

Se presentan ahora los resultados de pruebas en modelo físico de tuberías de polietileno de alta densidad sometidas a esfuerzos extremos, repetidos un elevado número de veces, producidos por fenómenos de golpe de ariete.

NORMAS DE DISEÑO ANTE GOLPE DE ARIETE PARA TUBERÍAS DE POLIETILENO

De acuerdo con las normas aceptadas por el Plastic Pipe Institute (PPI, 2009), las tuberías de polietileno de alta densidad (PEAD) pueden aceptar, sin modificación en su espesor, presiones hasta de 1.5 veces su resistencia de diseño durante eventos recurrentes originados por golpe de ariete, es decir, eventos que pueden presentarse repetidamente durante la operación de la tubería, y que por tal razón pueden dar lugar al fenómeno de fatiga, y pueden aceptar también presiones hasta de 2 veces su resistencia de diseño para eventos accidentales, también originados por golpe de ariete, es decir, eventos que pueden presentarse sólo ocasionalmente durante la vida útil de la tubería y que por su carácter esporádico no pueden estrictamente dar lugar al fenómeno de fatiga.



Tradicionalmente los estudios de fatiga se realizan en especímenes sólidos cilíndricos ranurados, en los cuales se realiza una ranura en una determinada sección para provocar ahí la falla, al someter la muestra a esfuerzos cíclicos mediante algún mecanismo de repetición de carga (Figura 4).

Los estudios previos de fatiga en polietileno se han realizado con este tipo de especímenes (Pinter et al, 2007).

En nuestro caso, las pruebas se realizaron directamente sobre tuberías de PEAD y ante el fenómeno específico, el golpe de ariete, que tales tuberías debían resistir, con su correspondiente velocidad de aplicación de carga y su duración típica de carga máxima. De esta manera se buscó ensayar la tubería de PEAD con la mayor representatividad y verosimilitud.

Figura 4.- Especimen típico para ensayos de fatiga.

DESARROLLO DE LAS PRUEBAS

Descripción del modelo

Las pruebas se realizaron en el modelo físico construido por la empresa Policonductos en San Luis Potosí, con la asesoría del Instituto de Ingeniería de la UNAM, y en el marco de una colaboración entre industria y universidad.

El modelo que se muestra en la Figura 5 y en la Foto 1, está constituido por una tubería de 110 m de longitud, diámetro nominal de 4 pulgadas (diámetro exterior de 114 mm), con dos tanques hidroneumáticos en los extremos que aseguran presión constante, válvulas de mariposa de cierre automático, con actuador neumático, programables, con tiempos de cierre o apertura mínimos de 0.2 segundos. Cada válvula cuenta con un contador mecánico que acumula el número de ciclos que opera la válvula. Las válvulas están situadas a la salida del primer tanque e inmediatamente aguas

arriba del segundo tanque. Con el tiempo de cierre indicado, las válvulas de mariposa pueden simular en la instalación los efectos más desfavorables del golpe de ariete.

Los controles de las válvulas automáticas tienen capacidad de ajuste en los tiempos de apertura y cierre, así como del período en el cual se repite el ciclo completo.

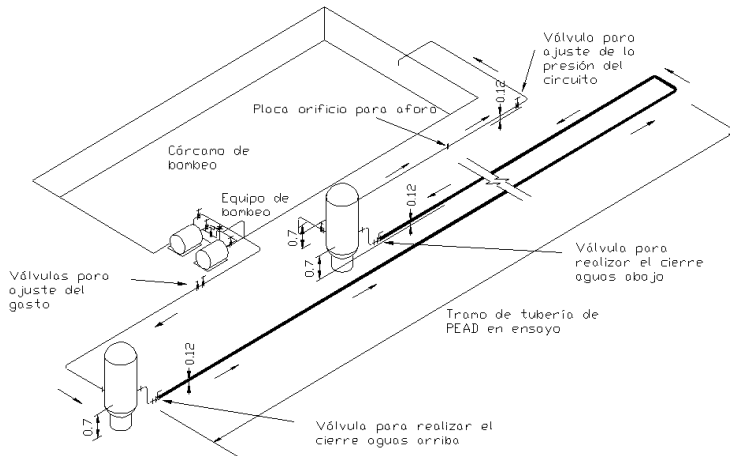


Figura 5.- Isométrico de la instalación experimental.

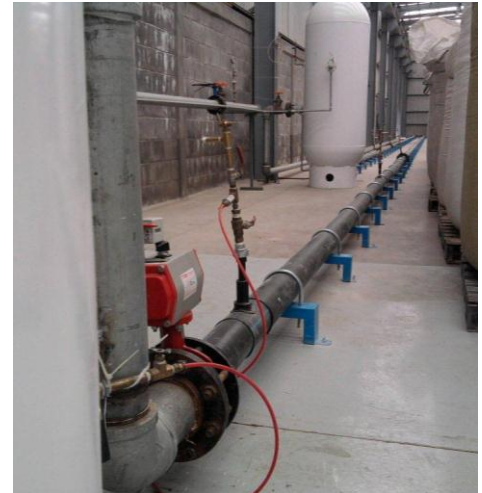


Foto 1: Modelo físico visto desde el primer tanque hidroneumático.

La tubería es alimentada por una o por dos bombas centrífugas 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.

Las presiones iniciales, con las bombas en serie, pueden alcanzar los 8 kg/cm², (80 mca) 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.

Las pruebas se realizaron en tuberías fabricadas con resina PPI 3608 (ISO PE 80), que es el material más usado en México. Los caudales y las presiones iniciales se ajustaron para lograr las presiones de operación y las sobrepresiones deseadas.

Prueba 1. Tubería con RD 21, $\sigma_o = \sigma_d$, $\sigma_{m\acute{a}x} = 2 \sigma_d$

La primera prueba se realizó para una tubería con una relación diámetro/espesor (RD) igual a 21, cuya presión de diseño es de 5.60 kg/cm² (56 mca). Los ciclos de cierre y apertura de la válvula permitieron alcanzar dos picos de presión por ciclo, similares en magnitud, y ligeramente superiores a 2 veces la presión de diseño: 11.2 kg/cm² (112 mca).

En la Figura 6 se muestran los picos de presión alcanzados y el ciclo de cierre y apertura de la válvula. Siendo el ciclo completo de la válvula de 7.7 segundos, se alcanzaron aproximadamente 11,200 ciclos/día, y el modelo estuvo funcionando ininterrumpidamente por más de 45 días, con excepción del tiempo dedicado a la obtención de especímenes de muestra afectados por un cierto número de ciclos de sobrepresión.

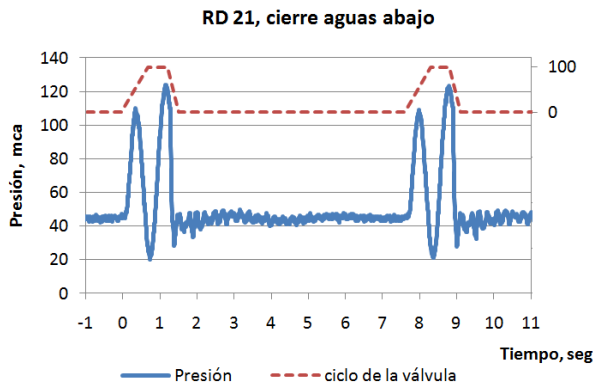


Figura 6.- Registros de presión Prueba 1.

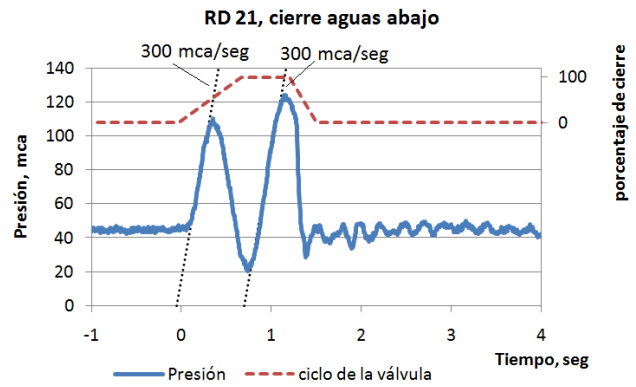


Figura 7.- Velocidades de aplicación de carga, Prueba 1.

La tubería resistió sin problema alguno medio millón de ciclos, o un millón de picos, con sobrepresiones que duplicaban las de diseño. Este comportamiento supera ampliamente lo que suponen las normas de diseño, que acepta duplicar las presiones de diseño únicamente para eventos muy ocasionales. Si suponemos que puede presentarse un evento diario de esta naturaleza durante una vida útil de 50 años, que es la que corresponde a las tuberías fabricadas con resina PPI 3608 (ISO PE 80), obtenemos 18,250 ciclos. Un millón de picos equivalen a 2.28 picos por hora durante 50 años, o si se considera que los dos picos equivalen a un evento completo, el medio millón de ciclos equivalen a 27.4 eventos de sobrepresión extrema por día durante 50 años.

Se tomaron muestras de tubo de 1 m de longitud afectados por 0 picos (tubo virgen), quinientos mil y un millón de picos de sobrepresión, y se ensayaron bajo la prueba de presión interna (NMX E-018), llevándolos a la ruptura. Los resultados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1.- Resultados de pruebas de presión interna en tubos sometidos a numerosos eventos de presión extrema.

Muestra	Número de picos de sobrepresión ($2 P_d$)	Presión de diseño, mca (P_d)	Presión normal de prueba, mca (P_d)	Presión de ruptura en ensayo, mca (P_r)	Relación entre presiones de ruptura y de diseño (P_r/P_d)	Días entre fin de pruebas y ruptura**
1	0	56	224	252	4.5	-
2	500,000	56	224	308	5.5	72
3	1,000,000	56	224	364	6.5	40
4	250,000*	56	224	258	4.6	173

*Ciclos de depresión (-8 mca) y de sobrepresión ($2 p_d$)

** Días transcurridos entre el final de las pruebas de fatiga en modelo y la prueba de ruptura en laboratorio

Los resultados de la Tabla 1 indican que la repetición de ciclos de sobrepresión no tiene efecto negativo alguno en la resistencia de la tubería. Por el contrario, los resultados sugieren una mejora en su resistencia. Este hecho ha sido ya expuesto en la literatura (PPI, 2009). En la Figura 7 se muestran las velocidades de aplicación de carga. La frecuencia de aplicación de carga es de 470 ciclos/hora, o 940 picos/hora.

Prueba 2. Tubería con RD 21, sometida a ciclos de depresión y sobrepresión.

La misma tubería de RD 21 se sometió a pruebas de separación y reunión de columna, mediante cierres y aperturas cíclicos de la válvula situada aguas arriba.

En la Figura 8 se muestra el ciclo de la válvula y las presiones mínimas y máximas alcanzadas.

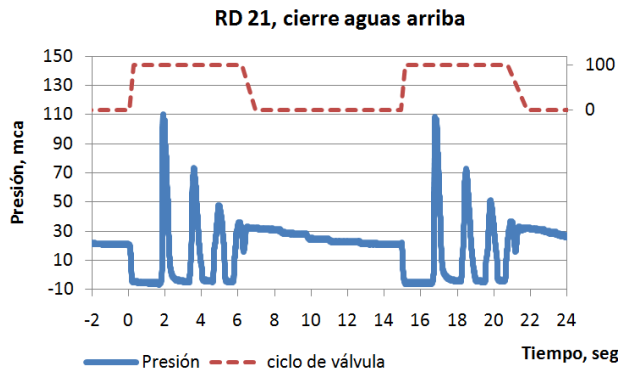


Figura 8.- Registros de presión, Prueba 2.

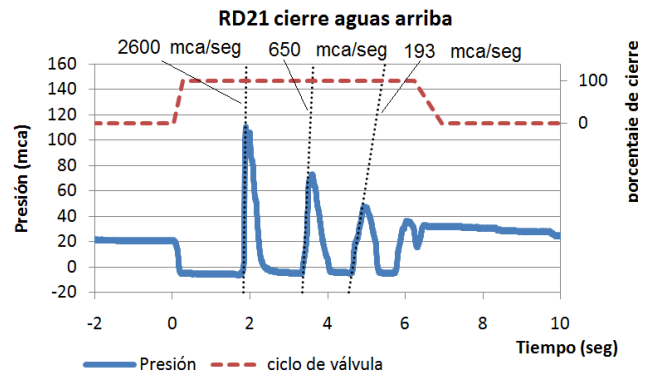


Figura 9.- Velocidades de aplicación de carga, Prueba 2.

Al ser $RD = 21$, la tubería no alcanza a deformarse al presentarse la presión de vaporización, que para la ciudad de San Luis Potosí, a 1900 msnm, es de -8 mca (Autrique y Rodal, 2010).

La tubería se sometió a 250,000 ciclos de depresión y sobrepresión, con presiones de vaporización alcanzadas 4 veces durante cada ciclo, y sobrepresiones máximas de 110 mca, o 2 veces la presión de diseño. Lo anterior equivale a 13.7 eventos de separación de columna por día, con sus correspondientes sobrepresiones, durante los 50 años de vida útil de la tubería.

En este caso, las presiones son del tipo de las indicadas en la Figura 2(b), al alternarse presiones negativas, hacia el interior de la tubería, con presiones positivas, hacia el exterior de la tubería.

Los resultados de las pruebas de ruptura por presión interna se indican también en la Tabla 1. En la Figura 9 se muestran también las velocidades de aplicación de la carga. La frecuencia de aplicación de carga es de 240 ciclos/hora.

Prueba 3. Tubería con $RD\ 41$, $\sigma_d = 2\sigma_{dis}$, $\sigma_{m\acute{a}x} = 4\sigma_{dis}$

En vista de los resultados más que satisfactorios obtenidos en la Prueba 1, se decidió realizar pruebas en condiciones realmente extremas para la tubería. Se preparó el modelo para operar a 2 veces la presión de diseño, en tubería con $RD\ 41$ (presión de diseño: 2.8 kg/cm^2 ó 28 mca), y para obtener picos de 4 veces la presión de diseño. En la figura 10 se muestran los ciclos de la válvula y los picos de sobrepresión, y en la figura 11 las velocidades de aplicación de la carga. La frecuencia es de 450 ciclos/hora.

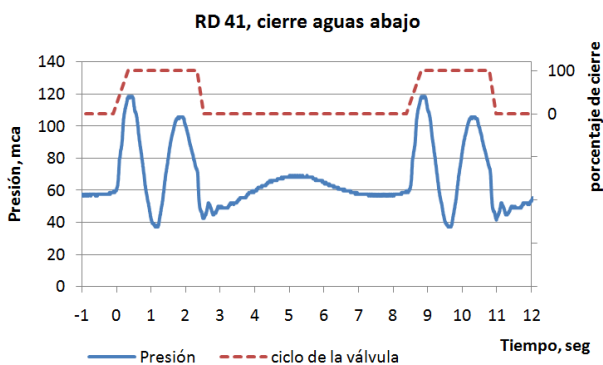


Figura 10.- Registros de presión, Prueba 3.

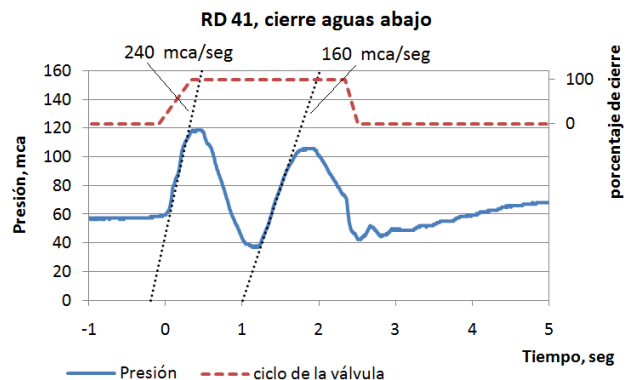


Figura 11.- Velocidades de aplicación de carga, Prueba 3.

La prueba se realizó dos veces, presentándose en ambos casos la ruptura de la tubería para un valor cercano a los 400 ciclos, u 800 picos. Los tubos fallados se muestran en las Fotografías 2 y 3.



Foto 2: Tubo fallado por repetición de sobrepresión extrema, Prueba 3a.



Foto 3: Tubo fallado por repetición de sobrepresión extrema, Prueba 3b.

El tipo de falla longitudinal corresponde con las fallas típicas por sobrepresión. En la Figura 11 se muestran las velocidades de aplicación de carga.

Prueba 4. Tubería con RD 41, sometida a ciclos de depresión y sobrepresión.

Se probó también la tubería con RD 41 ante eventos repetidos de depresión (- 8 mca) y sobrepresión (62 mca). Los ciclos de la válvula y las presiones alcanzadas se muestran en la Figura 12. El número de ciclos de prueba fue de 680.

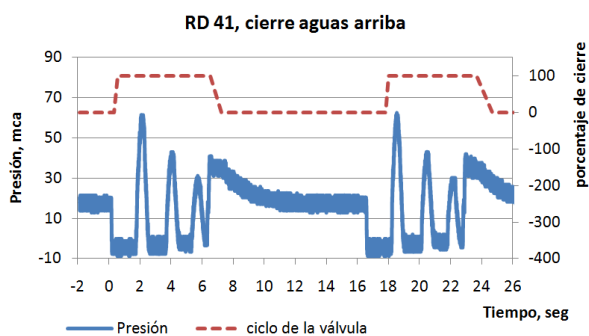


Figura 12.- Registros de presión, Prueba 4.

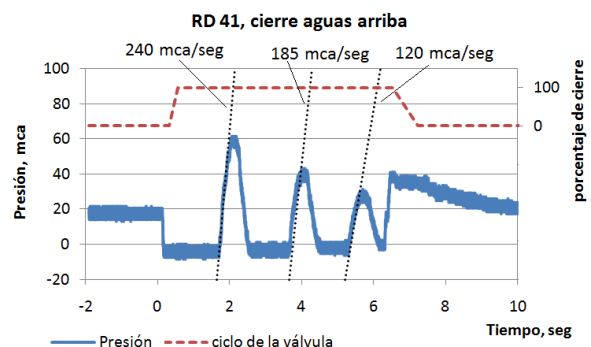


Figura 13.- Velocidades de aplicación de carga, Prueba 4.

Para esta relación diámetro/espesor, la tubería sufre deformaciones apreciables durante los ciclos de depresión (Autrique y Rodal, 2010).

Las fotografías 4 a 7 muestran la secuencia de las deformaciones extremas durante un ciclo de la válvula. La sección transversal recupera su forma y se expande ligeramente hacia el exterior durante los picos de sobrepresión, finalmente recuperándose la sección original durante los períodos de restablecimiento de las condiciones iniciales (Foto 8).

En la Figura 13 se muestran las velocidades de aplicación de carga, durante la sobrepresión por reunión de columna. Puede observarse que los valores son menores a los obtenidos para RD 21.



Foto 4: Deformación de la tubería RD 41 durante la primera depresión, Prueba 4.



Foto 5: Deformación de la tubería RD 41 durante la segunda depresión, Prueba 4.



Foto 6: Deformación de la tubería RD 41 durante la tercera depresión, Prueba 4.



Foto 7: Deformación de la tubería RD 41 durante la cuarta depresión, Prueba 4.



Foto 8: Recuperación final de la sección original, tubería con RD 41, Prueba 4.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Los resultados de las pruebas anteriores, considerando únicamente los casos de sobrepresión con cierres de válvula aguas abajo, se muestran en una gráfica $\sigma - N$ (Figura 14).

Puede considerarse que los resultados concuerdan con las gráficas típicas de la mecánica de fractura, obtenidas hasta ahora de pruebas en especímenes y piezas metálicas.

Por los resultados obtenidos, el punto correspondiente a la Prueba 1 debe estar claramente por debajo de la curva de inicio de formación de grieta.

Se ha indicado también el punto correspondiente a los tubos vírgenes, con cero esfuerzos de fatiga, para los cuales, en los casos en que son llevados a la ruptura, el resultado típico es de 4.5 veces la presión nominal de diseño. A partir de este punto podemos construir una curva de ruptura hipotética, por encima de la cual encontramos el resultado de la prueba 3.

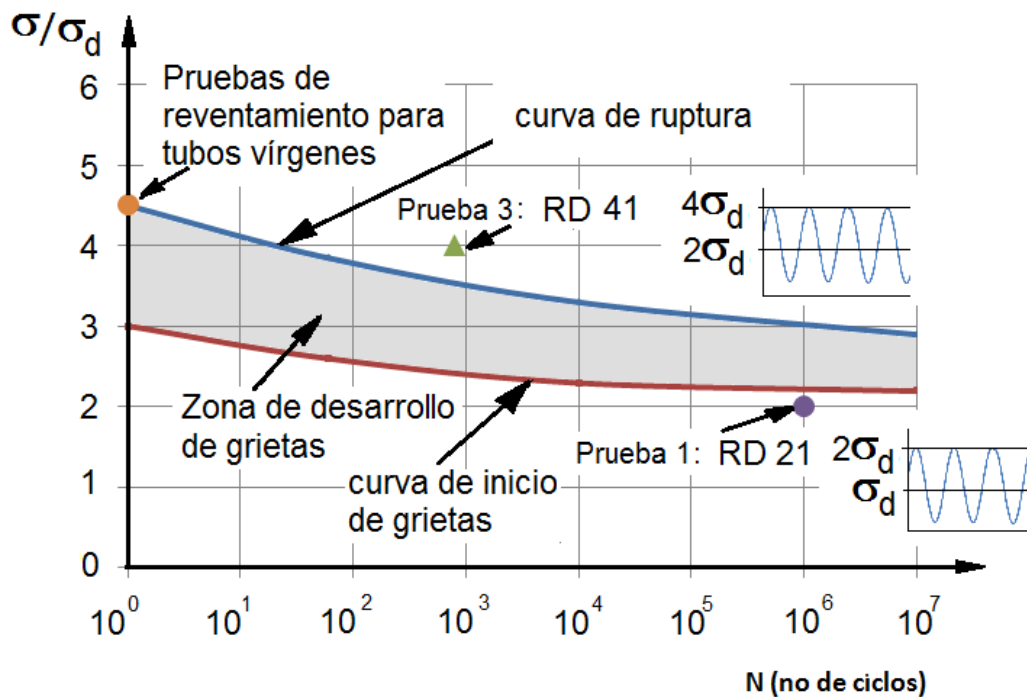


Figura 14.- Gráfica $\sigma - N$, correspondiente a las Pruebas de fatiga 1 y 3.

(Existe, para los tubos de PEAD, una prueba convencional y obligatoria (NMX-E-016), en la cual los tubos deben resistir una presión interna igual a 4 veces la de diseño, a la que son llevados en un período de 90 segundos. Existe también otra prueba (NMX-E-013), en la que los tubos son llevados a una presión interna igual a 2 veces la de diseño, presión que debe mantenerse durante 1000 horas (PPI, 2009)).

Será necesario de aquí en adelante, completar los experimentos, obteniendo la mayor cantidad posible de puntos intermedios, para completar la gráfica σ -N.

CONCLUSIONES

Se probaron en modelo físico tubos de polietileno de alta densidad (PEAD), en grado PPI 3608, correspondiente al ISO PE 80, ante eventos de sobrepresión extremos repetidos un gran número de veces, producidos por golpe de ariete.

Los resultados indican que las tuberías de polietileno cumplen ampliamente con las hipótesis y tolerancias de las normas de diseño, en lo referente a presiones admisibles por golpe de ariete.

Se encontró que las tuberías de polietileno no reducen su resistencia ni muestran efectos de fatiga cuando se mantienen dentro de las sobrepresiones que admiten las normas, por encima de su presión de diseño, y que dentro de estas condiciones el nivel de seguridad que ofrecen las tuberías de PEAD es realmente muy amplio.

Se demostró también que los tubos de PEAD son capaces de resistir repetidamente presiones negativas, correspondientes a las de vaporización del agua, y que en los casos en que la tubería se

deforma al presentarse la presión de vaporización por su alta relación diámetro/espesor, como en el caso del RD 41, recupera su forma original y su sección transversal al terminar el evento transitorio y al restablecerse las condiciones de flujo establecido.

Se demuestra, ahora desde el punto de vista de la fatiga ante eventos extremos, que el PEAD es un material de gran confiabilidad y que puede usarse sin riesgo alguno, y con ventaja sobre otros materiales, en las redes de distribución de agua potable.

Los registros de los experimentos están disponibles, a petición.

NOTACIÓN

σ	Esfuerzo de trabajo
σ_0	Esfuerzo de trabajo inicial
$\sigma_{\text{máx}}$	Esfuerzo máximo
$\sigma_{\text{mín}}$	Esfuerzo mínimo
σ_d	Esfuerzo de diseño
$\Delta\sigma$	Rango de esfuerzos
p_0	Presión inicial
$p_{\text{máx}}$	Presión máxima
p_d	Presión de diseño
p_r	Presión de ruptura
N	Número de repeticiones de carga
RD	Relación entre diámetro exterior y el espesor de una tubería

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA

Autriqué, R., y Rodal, E. (2010) “Golpe de Ariete en Tuberías de Polietileno de Alta Densidad para Conducción de Agua Potable”, Memorias, Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Punta del Este, Uruguay.

Bowman, J. (1988) “The Fatigue Response of PVC and PE pipe Systems”. Proceedings, Plastic Pipe VII, Bath, England, The Plastics and Rubber Institute, UK

Frost, N.E., Marsh, K.J., Pook, C.P. (1999). Metal Fatigue. Dover, New York

Marshall, A.P. Brogden, S. (1998) “Evaluation of the Surge and Fatigue Resistance of PVC and PE Materials for Use in the UK Water Industry”. Proceedings, Plastic Pipes X, Goteborg, Sweden

Pinter, G., Haager, M, Balika, W, Lang, R. (2007). “Cyclic crack growth tests with CRB specimens for the evaluation of the long-term performance of PE pipe grades” Polymer Testing, 26, pp 180-188.

Plastic Pipe Institute. (2009). Handbook of Polyethylene Pipe, 2nd Ed., PPI, (disponible en línea: http://plasticpipe.org/cart/pe_handbook.html).

Plastic Pipe Institute. (2005). “Nature of Hydrostatic Time to Rupture Curves”. *Publication TN 7, PPI.*

Suresh, S. (1998). Fatigue of Materials, Cambridge University Press, New York.

Timoshenko, S. (1953). History of Strength of Materials. Dover, New York.