

DISEÑO DE ACUEDUCTOS SEGURO CONTRA FATIGA DEL MATERIAL EN LOS TRANSITORIOS HIDRÁULICOS

Velitchko Tzatchkov¹, Víctor Hugo Alcocer Yamanaka¹, Víctor Javier Bourguett Ortiz¹

Resumen - El deterioro progresivo gradual de un material que está sometido a un gran número de esfuerzos variables cíclicos de cierta magnitud, se conoce como fatiga del material. En condiciones de fatiga las piezas o tuberías llegan a romperse con una presión mucho menor, comparada con la presión que pueden soportar normalmente. Los acueductos que operan con frecuentes paros y arranques están sujetos a fallas por fatiga, debido a la variación de la presión en los transitorios, pero ese peligro casi no se considera en las normas de diseño actuales. Este artículo explica el fenómeno de fatiga del material por transitorios hidráulicos en acueductos, con un ejemplo de falla por fatiga. La manera de proteger una tubería contra fatiga del material es diseñarla con un espesor lo suficientemente grande, que asegure que los esfuerzos que se produzcan en la vida del acueducto no sobrepasen ciertos límites. Se presentan tres métodos para calcular el espesor necesario en tuberías de acero e hierro dúctil, y consideraciones de la importancia de la fatiga del material en tuberías de concreto presforzado y PVC.

Abstract - The progressive gradual damage caused by a large number of repetitive pressure or stress cycles above certain level, is known as fatigue. Under fatigue conditions the pipes, valves and other pipeline equipment may fail under a stress considerably lower compared to their design stress. The pipelines that operate with frequent starts and shutdowns may be subject to fatigue, due to the highly variable pressure during the fluid transients, but this kind of danger is almost not considered in the present design practice and standards. This paper explains the phenomenon of material fatigue caused by hydraulic transients in pipelines, and presents a real-life example. A pipeline can be protected against fatigue by designing it with a suitable thickness that maintains the pipe stress below certain level. Three methods for computing the required wall thickness in steel and ductile iron pipes are presented, along with some fatigue consideration for prestressed concrete and PVC pipes.

Palabras clave: fatiga del material, diseño de tuberías, transitorios hidráulicos.

¹ Instituto Mexicano de Tecnología del Agua – Coordinación de Tecnología Hidráulica – Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso – CP 62550 – Jiutepec, Mor. (México) – Tel: (+52) 777 3293600 – Fax: (+52) 777 3293678
E-mail: velitchk@tlaloc.imta.mx; valcocer@tlaloc.imta.mx; vbougue@tlaloc.imta.mx

INTRODUCCIÓN

Por diferentes razones, como ahorro de energía eléctrica, capacidad de regularización insuficiente y otros, muchos acueductos operan de manera cíclica, con frecuentes paros y arranques que pueden ser incluso diarios. En cada paro y cada arranque se produce cierto transitorio en el acueducto, con la consiguiente variación, también cíclica, de la presión, normalmente de poca duración. Los efectos de los transitorios se asocian con dos peligros para la tubería y para los accesorios:

- 1) Falla catastrófica por presión muy alta o por presión negativa (aplastamiento de la tubería)
- 2) Falla por fatiga del material, debida al daño acumulativo que pueden ocasionar las variaciones de presiones repetidas un gran número de veces.

Como parte indispensable del proyecto ejecutivo, en el diseño de cada acueducto se analizan los posibles transitorios para obtener la presión máxima y la presión mínima que en ellos se producen, y se toman las medidas necesarias contra esas presiones, tales como usar tubería y accesorios capaces de soportar esas presiones, o prever medios de control de los transitorios como cámara de aire, válvulas de alivio, torres de oscilación, tanques unidireccionales, y otros (CNA 2001). Pero prácticamente nunca en el diseño de los acueductos se toman previsiones contra la fatiga del material. A pesar de que en algunos códigos de diseño internacionales, como el *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III*, se reconoce y se reglamenta la necesidad de un diseño seguro contra la fatiga del material de tuberías y otros componentes, en los manuales de diseño de tubería de acero y de hierro dúctil AWWA M11, ISO 2531 y ANSI/AWWA C150/A21.50-96, por ejemplo, no se trata la fatiga del material en absoluto.

La manera de proteger una tubería contra fatiga del material es diseñarla con un espesor lo suficientemente grande, que asegure que los esfuerzos que se produzcan en la vida del acueducto no sobrepasen ciertos límites, arriba de los cuales puede producirse la fatiga del material. Este artículo explica la importancia de la fatiga de material en los transitorios hidráulicos y la forma de protegerse contra ella en acueductos de diferentes materiales, como acero, hierro dúctil, concreto presforzado y PVC.

FATIGA DEL MATERIAL EN TUBERÍAS DE ACERO Y HIERRO DUCTIL

La fatiga del material se refiere al deterioro gradual de un material que está sometido a un gran número de esfuerzos variables cíclicos de cierta magnitud. Los daños por fatiga del material inician con grietas superficiales microscópicas no perceptibles, que se van abriendo lentamente ante la acción de los esfuerzos cíclicos hasta ocurrir bruscamente una falla total. En resultado, la pieza o tubería llega a romperse con una presión mucho menor, comparada con la presión que puede soportar sin fatiga. De acuerdo con el manual de diseño de la *Ductile Iron Society* (referencia accesible en <http://www.ductile.org/didata/Section3/3part2.htm>) y otras fuentes bibliográficas, la fatiga del material es la causa más probable de entre 75% y 90% de las fallas en diferentes máquinas y estructuras. Se reproduce a continuación, en traducción de inglés, un pequeño abstracto del citado manual:

- “La fatiga es probablemente la causa primaria de 75% de las fallas de servicio que ocurren en máquinas.
- Las fallas por fatiga pueden ocurrir a esfuerzos considerablemente inferiores al esfuerzo de cedencia.
- Las grietas por fatiga pueden crecer lentamente y sin un cambio fácilmente detectable en la dimensión o en el funcionamiento. Al llegar a un tamaño crítico, sucede una falla catastrófica.

- Los esfuerzos de diseño basados en criterios de fatiga serán más bajos que aquellos definidos por los valores de diseño a tensión monótona, y será reducidos más todavía por la concentración de esfuerzos causada por imperfecciones del material o diseño de componentes.”

El fenómeno de fatiga de material está bien estudiado y documentado en la literatura especializada, en particular se tienen curvas experimentalmente obtenidas del esfuerzo de tensión que rompe una muestra de material para diferentes números de ciclos aplicados de tensión variable. En inglés este tipo de curvas se conoce con el nombre *S-N curves* (de *Stress – Number of cycles*). La Ilustración 1 muestra una curva *S-N* típica para metales ferrosos de resistencia mediana, como lo son el acero y el hierro dúctil. En esta curva, el eje vertical representa el esfuerzo de ruptura por fatiga en porcentaje de la resistencia contra tensión. Aun cuando la resistencia contra tensión del metal es mucho más alta, éste llega a romperse ante esfuerzos considerablemente más bajos, cuando éstos se presentan cíclicamente un gran número de veces. Como un ejemplo, la resistencia de tensión del acero es del orden de los 60,000 psi y su límite de cedencia es de 42,000 psi, pero la pieza llega a romperse con un esfuerzo de 30,000 psi, para cierto número de ciclos. La curva de la Ilustración 1 está obtenida por medio de experimentos en que una muestra (o *espécimen*) de metal liso y de sección transversal uniforme se somete a ciclos de tensión en una máquina especial.

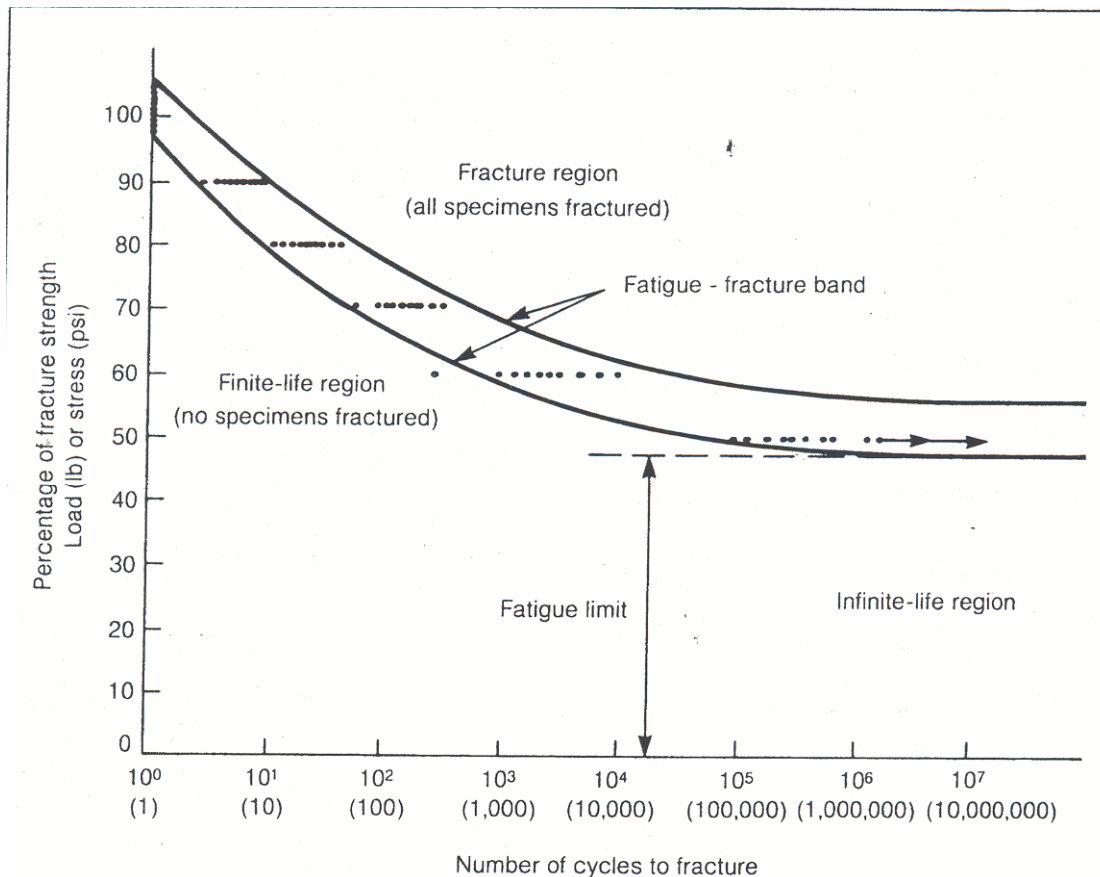


Fig. 11. Typical fatigue (S-N) diagram of laboratory fatigue testing of medium-strength ferrous metal. See text.

Ilustración 1. Curva de esfuerzo de ruptura por fatiga contra número de ciclos de presión para acero o hierro dúctil.

La presión de ruptura por fatiga es aún más baja cuando la pieza tiene muescas, por la concentración de los esfuerzos en el lugar de la muesca. En la Ilustración 2 se muestran curvas *S-N* obtenidas de especímenes sin y con muescas. Como se observa en esa ilustración, la pieza llega a romperse con un esfuerzo de 28,000 psi, si la pieza no tiene muescas, y hasta con 17,000 psi, si la

pieza tiene muescas, a pesar de que la resistencia de tensión del hierro dúctil es de 60,000 psi y su límite de cedencia es de 42,000 psi. Por esta razón, los puntos más susceptibles a dar origen de una falla por fatiga son las diferentes esquinas, muescas, u otros cambios que pueda haber en la geometría de la tubería y de las piezas, debido a que en estos puntos normalmente se produce cierta concentración de los esfuerzos. Las uniones de los tramos de tubería de acero o hierro dúctil, sean esas soldadas o de espiga-campana, son puntos de ese tipo.

La zona por debajo de la curva *S-N* representa la así llamada *zona de vida infinita* del material, en el sentido de que no hay riesgo de fatiga si la magnitud de los esfuerzos, y el número de veces que se presentan, corresponden a esa zona. Para materiales como el acero y el hierro dúctil, la curva *S-N* se vuelve horizontal después de cierto número de ciclos. El valor del esfuerzo que corresponde a esa parte de la curva se llama *límite de fatiga* del material. Por lo tanto, la tubería soportará cualquier número de ciclos de presión variable, cuando los esfuerzos que genera la presión no sobrepasan el límite de fatiga del material. El límite de fatiga es aproximadamente igual a 45% a 48% de la resistencia a tensión para el hierro dúctil, y 50% para el acero.

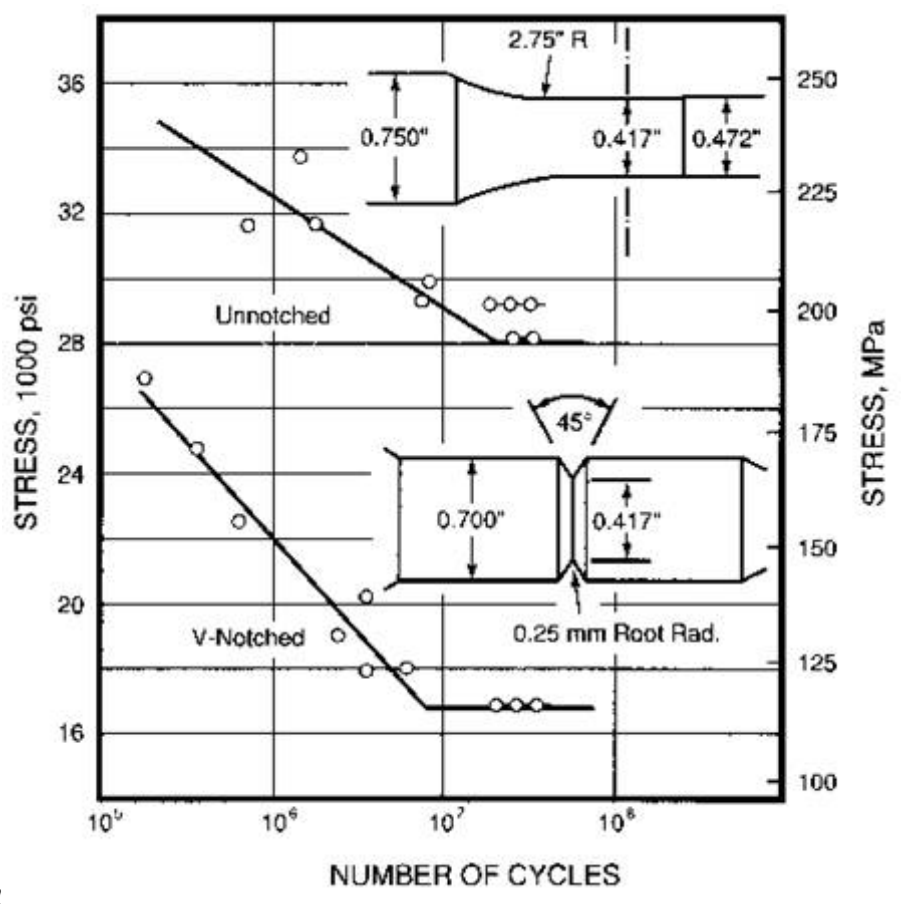


Ilustración 2. Curva típica “Esfuerzo-Número de ciclos (*S-N* curve)” para hierro dúctil

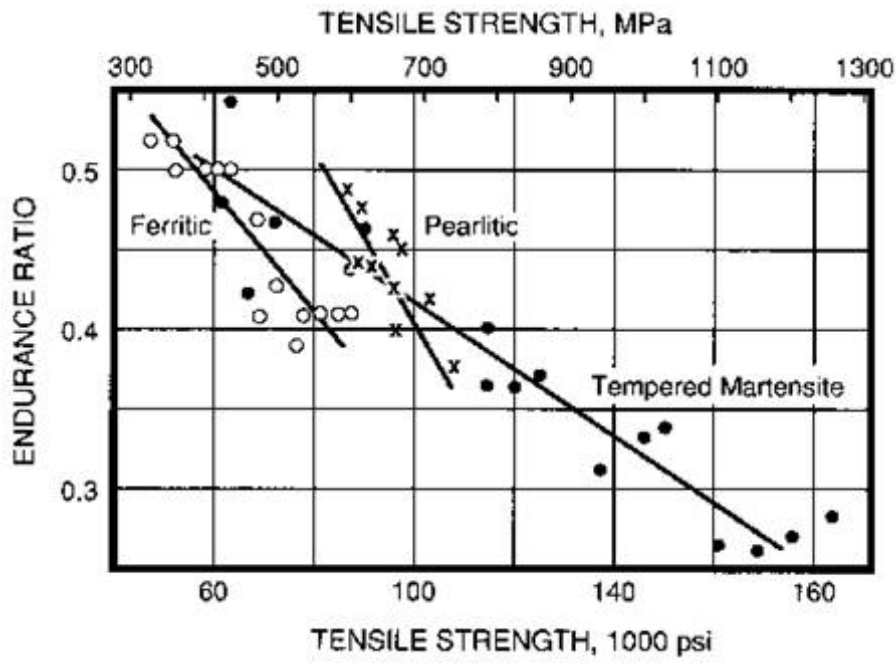


Ilustración 3. Límite de fatiga (en fracción de la resistencia de tensión) para hierro dúctil

VARIACIÓN DE LA PRESIÓN EN LOS TRANSITORIOS HIDRÁULICOS

Es bien conocido que en los transitorios hidráulicos se puede presentar una importante variación cíclica de la presión, que se atenúa rápidamente, en cuestión de segundos o minutos. Para los efectos de la fatiga del material, es importante estimar el número de ciclos de presión y la magnitud de su variación. Esto puede ser obtenido por medio de medición en el acueducto en operación, o por medio de un modelo matemático del transitorio. En la Ilustración 4 se presenta la evolución de la presión, registrada en un acueducto en operación en México. Como se observa en esa ilustración, el número de ciclos de presión en el transitorio es elevado, del orden de más de 30 ciclos.

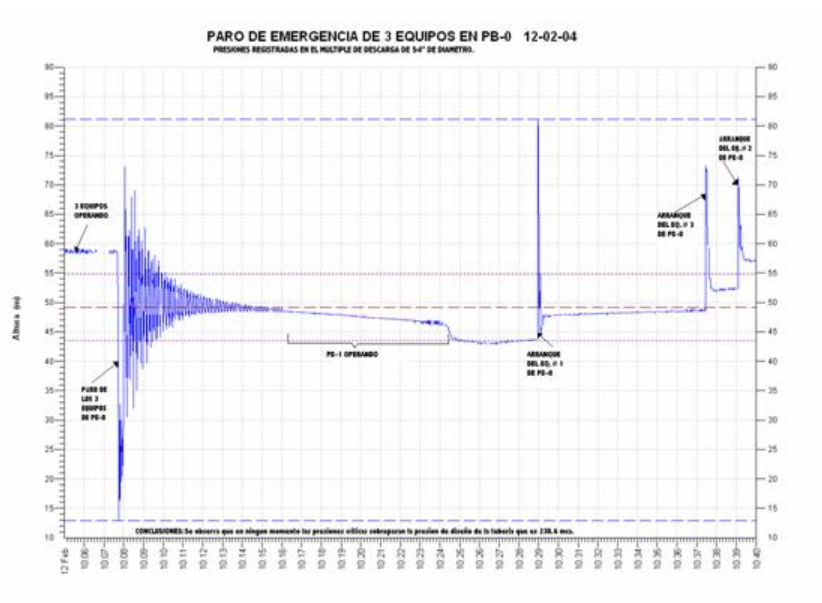


Ilustración 4. Variación de la presión en el paro de los equipos de bombeo, registrada en un acueducto en operación en México

DESCRIPCIÓN DE UN ACCIDENTE DEBIDO A FATIGA DEL MATERIAL

En el arranque de un grupo motor-bomba en un acueducto en operación en México, se fracturó una válvula de compuerta de 10" de diámetro, la válvula de expulsión de aire de 10" también salió expulsada hacia el techo de la casa de maquinas, posterior a romper el techo, en su caída daño la válvula de aire y la tubería de descarga del equipo subsecuente y la rejillas del drenaje de la planta de bombeo. La falla ocurrió en un componente diseñado para 125 libras/pulg² y según fabricante con resistencia hasta 200 libras/pulg², misma que se presentó en el arranque de la bomba la cual desarrolla una presión máxima a gasto cero de 114 libras/pulg² denotando que el equipo se diseñó con un factor de seguridad de 2.5, y aun así falló. La Fotografía 1 muestra la pieza fracturada, y la Fotografía 2 la instalación antes del accidente. Este tipo de fallas, cuando una tubería o una pieza diseñadas para soportar cierta presión sostenida se revientan con presiones mucho más bajas, se puede explicar con el fenómeno fatiga del material por esfuerzos cíclicos. Todo parece indicar que el accidente ocurrido, es un caso de falla por fatiga del material. Los daños por fatiga del material inician con grietas superficiales microscópicas no perceptibles, que se van abriendo lentamente ante la acción de los esfuerzos cíclicos hasta ocurrir bruscamente una falla total. El acueducto opera de manera cíclica desde hace bastante tiempo y la forma en que se fracturó la tubería, visible en la Fotografía 1, indica que se abrió una grieta en la válvula, como esto ocurre cuando hay fatiga del material.



Fotografía 1. Accidente de fractura de una válvula de compuerta de 10" clase 125



Fotografía 2. Instalación normal de la válvula expulsora de aire a la descarga de las bombas.

DISEÑO SEGURO CONTRA FATIGA DEL MATERIAL

Por todo lo anterior, es importante considerar la posible fatiga del material en la determinación del espesor de las tuberías en el diseño de los acueductos que operarían con frecuentes paros y

arranques. La pertinencia del diseño contra fatiga está reglamentado en la norma internacional ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III. De acuerdo con el inciso NC-3219.2, Condition A, de ese código internacional, la consideración de fatiga es obligatoria para materiales con resistencia a tensión menor de 80,000 psi, cuando el número de ciclos de presión es mayor que 1,000, incluyendo paros y arranques de los equipos. El cálculo del espesor de una tubería de acero o hierro dúctil se realiza por la bien conocida ecuación (1):

$$t = \frac{pD}{2S} \quad (1)$$

donde:

t = espesor de pared del tubo

p = la presión de diseño

D = diámetro del tubo

S = esfuerzo admisible que considera en si el factor de seguridad

De acuerdo con el Manual AWWA M11, se consideran dos situaciones para la presión de diseño y el esfuerzo admisible (coeficiente de seguridad). En la primera se calcula con la suma de la presión de trabajo más la sobrepresión del transitorio, y 75% del esfuerzo de cedencia del material. En la segunda el espesor se calcula con la presión de trabajo o la presión estática (la que resulte mayor de las dos), y la mitad del esfuerzo de cedencia del material. Para el diseño contra fatiga habría que agregar un tercer cálculo con diferente esfuerzo admisible, de acuerdo con el número esperado de ciclos de presión, la magnitud de la presión, y la curva $S-N$ del material. Son posibles tres escenarios en este cálculo, que se describen a continuación, en orden de más conservador a menos conservador.

Diseño basado en el límite de fatiga:

Un diseño totalmente seguro contra fatiga del material consiste en determinar el espesor de la tubería que garantiza que no se sobrepase el límite de fatiga correspondiente. En este caso la tubería quedaría segura contra fatiga para cualquier número total de ciclos de presión variable que pudiera presentarse en el acueducto, cualquiera que sea la duración de su vida útil. Esta sería la solución más segura, pero también la más cara.

El *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III* establece un coeficiente de seguridad de 2 para el esfuerzo admisible. Con esta consideración, la Tabla 1 presenta los esfuerzos admisibles para un diseño seguro contra fatiga con cierta clase acero e hierro dúctil.

Tabla 1. Esfuerzos admisibles para un diseño basado en el límite de fatiga

Material	Resistencia a tensión (psi)	Límite de fatiga (psi)	Coeficiente de seguridad	Esfuerzo admisible (psi)
Acero	60,000	30,000	2	15,000
Hierro dúctil	60,000	29,000	2	14,500

Diseño basado en el número de ciclos:

En este caso hay que estimar el número de ciclos de presión variable a que estará sometido el acueducto en su vida, y leer el esfuerzo admisible correspondiente de la curva $S-N$ del material. Como un ejemplo, si la vida útil del acueducto es de 20 años y será parado y arrancado diario, se

tendrían $365 \times 20 \times 2 = 14,600$ paros y arranques. Si en cada paro o arranque se produce un promedio de 20 ciclos de presión transitoria, el número total de ciclos de presión sería $14,600 \times 20 = 292,000$. El *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III* establece coeficiente de seguridad de 20 para el número de ciclos, con lo que el número de ciclos de diseño sería $292,000 \times 20 = 5,840,000$. Para este número de ciclos. De la curva *S-N* del material se lee el esfuerzo admisible, se le asigna su coeficiente de seguridad, y se aplica la ecuación con la presión más alta que se produce en los ciclos de presión.

Diseño basado en una clasificación de ciclos por magnitud de la presión (Palmgren-Miner):

Este diseño es el más exacto, pero también requiere de más datos. En los dos escenarios anteriores el cálculo del espesor que garantiza contra fatiga se realiza con la presión máxima. Esto es equivalente a asumir que en cada ciclo de presión se presenta la presión máxima, algo que no es cierto dado que la presión del transitorio se normalmente se amortigua rápidamente, como se muestra en Ilustración 4, por ejemplo. Para considerar la variabilidad de la presión se procede de la manera siguiente:

1. Las presiones máximas que se presentan en los ciclos se clasifican por intervalos
2. Se obtiene el número de ciclos n_i para cada posible presión máxima i
3. Se asume cierto espesor t
4. Para cada posible presión máxima i se despeja el esfuerzo S_i correspondiente de la Ecuación (1)
5. De la curva *S-N* del material se lee la vida N_i del material (en ciclos) para cada esfuerzo S_i
6. Se calcula la suma $\sum_i \frac{n_i}{N_i}$. Si esta suma es menor que uno, el material es seguro contra fatiga.

Este cálculo supone que el daño por la presión máxima que se presenta en cada ciclo es linealmente acumulativo, y es conocido como *regla de Miner* por ser publicada por M. A. Miner en el año 1945 (Miner 1945), aunque algunos autores argumentan que en realidad fue publicada anteriormente por Palmaren en el año 1924, por lo que es también conocida como *regla de Palmaren-Miner*. En otras palabras, $\frac{n_i}{N_i}$ representa la parte de la vida consumida por los ciclos clasificados en la magnitud i .

FATIGA DEL MATERIAL EN TUBERÍAS DE CONCRETO PRESFORZADO

En un tubo de concreto presforzado, desde el momento de su fabricación el alambre de preesfuerzo mantiene tensado el concreto. El alambre de preesfuerzo está sujeto a esfuerzos de tensión, y el concreto a esfuerzos de compresión. Una vez en operación, la presión del agua en el interior de la tubería actúa en sentido opuesto al pretensado, y el estado de los esfuerzos en el conjunto concreto-cilindro-alambre se determina por el balance de las fuerzas actuantes del pretensado y la presión interna del agua.

Si en un momento dado la presión interna del agua superara la presión del pretensado, el concreto estaría sujeto a esfuerzos de tensión y se incrementaría el esfuerzo de tensión en el alambre de preesfuerzo. Pero si la presión interna del agua no supera la presión del pretensado, el estado de los esfuerzos en el conjunto concreto-cilindro metálico-alambre se mantiene sin alteración alguna, comparado con el pretensado que ya tiene. Dicho en otras palabras y en forma figurada, el conjunto pretensado de concreto-cilindro -alambre “no siente” la presión del agua en el interior del tubo, cuando esa presión no rebasa el esfuerzo permanente del pretensado.

Por estas razones, el análisis por fatiga en las tuberías de concreto presforzado es pertinente únicamente si en la operación de la tubería la presión interna genera en el alambre esfuerzos superiores al esfuerzo de pretensado.

Las tuberías de concreto presforzado que se fabrican en México deben cumplir con los estándares de las normas NMX-C-252, 253 y AWWA C301. En esos estándares se indican los esfuerzos de tensión mínimos y máximos del alambre, que van desde 221,000 psi hasta 282,00 psi, de acuerdo con su calibre. La Sección 5.6.1 de la norma AWWA C304 establece que el preesfuerzo sea igual a 75% del esfuerzo de tensión del alambre, por lo que el alambre estará pretensado a un esfuerzo de $0.75 \times 221,000 = 165,750$ psi.

La siguiente ecuación (equivalente a la ecuación (8-4) en AWWA 304) relaciona la presión interna en el tubo con los esfuerzos resultantes en el alambre de preesfuerzo y en el cilindro metálico:

$$p = \frac{A_y f_y + A_s f_s}{6D_y} \quad (2)$$

donde: p = presión interna (psi), A_y =área de la sección transversal del cilindro metálico (pulg^2), A_s =área (pulg^2/pie lineal de tubo), f_y =esfuerzo en el cilindro metálico, y f_s =esfuerzo en el alambre de preesfuerzo.

De la Ecuación (2) se puede expresar f_s como:

$$f_s = \frac{6pD_y - A_y f_y}{A_s} \quad (3)$$

Despreciando el aporte del cilindro metálico (a favor de la seguridad), la ecuación (3) se simplifica en:

$$f_s = \frac{6pD_y}{A_s} \quad (4)$$

Las Tablas 13 y 14 de AWWA 304 indican la cantidad requerida de alambre de preesfuerzo de tubos de concreto presforzado para presiones de trabajo de 0, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175 y 200 psi, y diferentes profundidades y condiciones de instalación del tubo. La Tabla 2 abajo muestra el cálculo del esfuerzo en el alambre de preesfuerzo f_s con el área mínima de las Tablas 13 y 14 de AWWA 304, para las presiones de trabajo de 150, 175 y 200 psi, y diámetros de 54" y 60". Como se observa en esa tabla, el esfuerzo resultante no sobrepasa el esfuerzo mínimo de pretensado (que es de 165,750 psi, como se explicó anteriormente).

Tabla 2 Esfuerzo de tensión correspondiente a la presión interna en tubos de concreto presforzado

D_y (pulg)	Clase (psi)	A_s min (AWWA 304) (pulg ² /pie lin)	f_s (psi)
54	150	0.49	99,184
54	175	0.57	99,474
54	200	0.64	101,250
60	150	0.53	101,887
60	175	0.62	101,613

En conclusión, para tuberías de concreto presforzado de 54" con presión de diseño de 150, 175 y 200 psi, y de 60" con presión de diseño de 150 y 175 psi; fabricadas de acuerdo con AWWA 304, no es necesario revisar la tubería por fatiga del material, dado que los esfuerzos que se producen por presión interna no llegan a la presión de pretensado.

FATIGA DEL MATERIAL EN TUBERÍAS PLÁSTICAS

La siguiente ecuación, obtenida experimentalmente por (Vinson 1981), fue por largo tiempo el estándar en la estimación de la vida de tuberías de PVC sometidas a presión cíclica:

$$C = (5.05 \times 10^{21}) S^{-4.906} \quad (5)$$

donde: C es el número de ciclos que resistirá la tubería y S es el esfuerzo en su pared.

Posteriormente, Marshall, Brogden, and Shepherd (1998) estudiaron los efectos de fatiga derivada por transitorios en tuberías de PVC y polietileno. En la Ilustración 5 se muestra la curva S-N obtenida por ellos para tuberías de PVC.

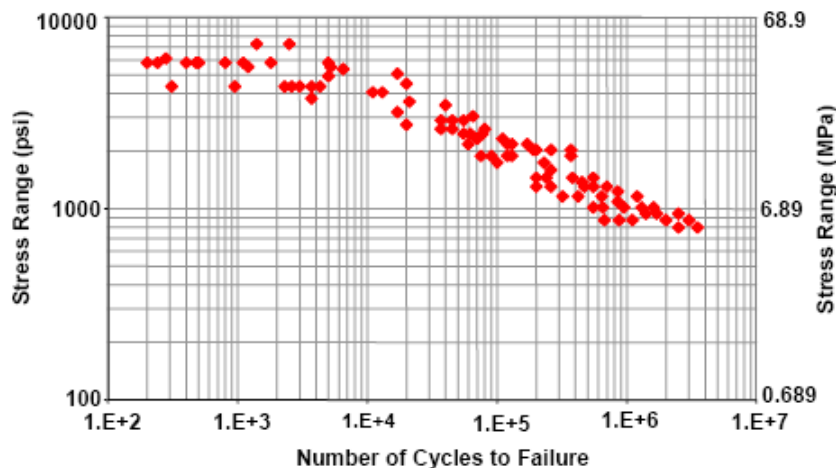


Ilustración 4. Datos de resistencia contra fatiga en tuberías de PVC (curva S-N) de Marshall, Brogden, y Shepherd (1998).

Otros estudios sobre los efectos de fatiga en tuberías plásticas fueron realizados por Hucks (1972) y Bowman (1990). Moser (2001) todos los estudios mencionados, y llegó a la conclusión que es necesario incluir dos variables independientes en la curva S-N, la amplitud del esfuerzo y el esfuerzo medio. La Ilustración 5 muestra la curva S-N correspondiente, con algunas recomendaciones para el diseño (Jeffrey, Moser y Folkman 2004).

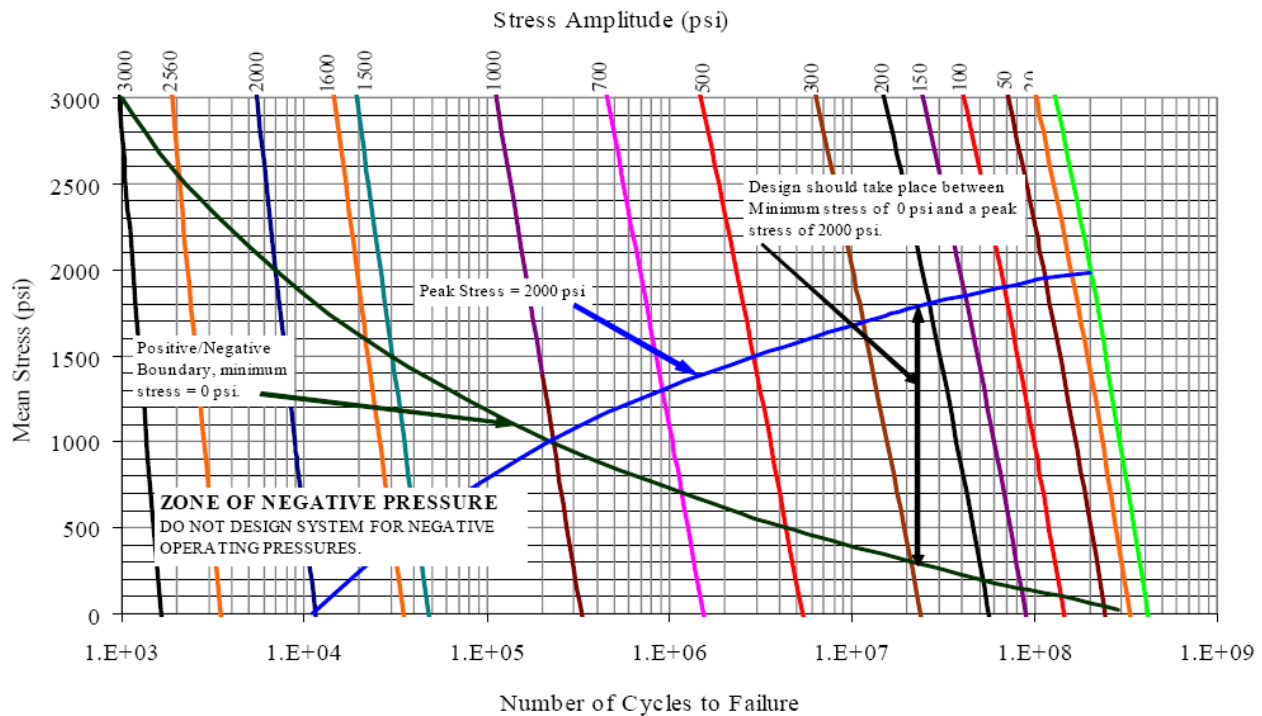


Ilustración 5. Curvas de diseño contra fatiga en tuberías de PVC
(Jeffrey, Moser y Folkman 2004).

CONCLUSIONES

Las tuberías y los accesorios de los acueductos que operan de manera cíclica, es decir, con frecuentes paros y arranques de los equipos, están sometidos a importantes variaciones transitorias de presión, que pueden propiciar el fenómeno *fatiga del material* en que las tuberías y los accesorios llegan a fallar con presiones mucho más bajas que su presión de diseño. Para prevenir fallas de ese tipo, que pueden tener consecuencias muy graves, es importante considerar la posible fatiga del material desde el diseño de los acueductos para los cuales es probable que operen con paros y arranques frecuentes. La manera de protegerse contra la fatiga, es mediante un espesor suficiente de la tubería que mantenga el nivel de esfuerzos por debajo de ciertos límites definidos por la curva *S-N* del material. Este artículo explica cómo hacer la determinación de ese espesor para diferentes materiales de tubería.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE, SECTION III. 2001. New York, New York.
- AWWA M11, 2004. "*Steel Water Pipe: A Guide for Design and Installation*", Fourth Edition, American Water Works Association, Denver, CO.
- AWWA C304 C 304 "*Design of Prestressed Concrete Cylinder Pipe*", American Water Works Association, Denver, CO.
- CNA (Comisión Nacional del Agua) 2001. "*Fenómenos transitorios en líneas de conducción*", Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento., México, D.F.
- DUCTILE IRON SOCIETY (accesible en <http://www.ductile.org/didata/Section3/3part2.htm>)

- JEFFREY, J.D., MOSER, A. P. AND FOLKMAN, S. L. 2004, “Long -Term Cyclic Testing of PVC Pipe”, Uni-Bell PVC Pipe Association, Dallas, Texas, Final Report by BURIED STRUCTURES LABORATORY, College of Engineering, Utah State University, Logan, Utah
- MARSHALL, GEORGE PHILIP, STEVEN BROGDEN, AND MICHAEL A. SHEPHERD. 1998. “Evaluation of the surge and fatigue resistance of PVC and PE pipeline materials for use in the U.K. water industry. Information and Guidance Note.” London, UK: Water Industry’s Trade Association.
- MINER, M. A. 1945. “Cumulative Damage in Fatigue”, J. Applied Mechanics, vol. 12.
- MOSER, ALMA P. 2001. “Cyclic life of PVC pipe”. Logan, UT: Utah State University, College of Engineering.
- VINSON, HERBERT W. 1981. “Response of PVC pipe to large, repetitive pressure surges.” Proceedings of the international conference on underground plastic pipe held in New Orleans 30 March – 1 April 1981, edited by B. Jay Schrock, 485-494. New York: American Society of Civil Engineers.