

ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE LAS REDES DE SUMINISTRO DE AGUA

Life Cycle Analysis of water Networks

Michael Ambrose - Environmental scientist, Commonwealth Scientific and Industrial
Research Organisation (CSIRO)

Prof. Stewart Burn – Team leader, Urban Water Infrastructure, CSIRO

Dr Dhammika DeSilva - Research scientist, CSIRO

Mike Rahilly - Programmer, CSIRO

**Corresponding author*

Contenido

RESUMEN.....	3
INTRODUCCIÓN.....	3
COSTO TOTAL DE VIDA.....	3
ESTIMACIÓN DE FALLA EN EL TUBO.	4
DATOS DE FALLA DE TUBERÍAS.....	4
MODELOS ESTADÍSTICOS Y FÍSICOS.	5
EL ENFOQUE LICAN.	6
PREDICCIÓN DEL COSTO DEL CICLO DE VIDA.	7
DISEÑO DE RED.....	7
TASA DE FALLA VS CURVAS DE EDAD.....	8
COSTES DE FUGAS.....	11
LICAN.....	12
EJEMPLO DE CASO DE ESTUDIO.	12
CONCLUSIÓN	14
AGRADECIMIENTOS.....	15
REFERENCIAS.....	16

RESUMEN.

Las autoridades del agua en todo el mundo se enfrentan al problema del envejecimiento de las redes de distribución y, a menudo, solo cuentan con datos de largo plazo históricos limitados sobre los cuales basan una política de reemplazo. Se presenta el enfoque de LICAN, por sus siglas en inglés, para calcular el costo de vida total y se usa un estudio de caso hipotético para demostrar la importancia de dicho enfoque. Una selección de redes de tuberías que utilizan diferentes materiales (PVC, DI, PEAD) se modelan para determinar su costo total de vida, tomando en cuenta los costos de instalación, mantenimiento y reparación.

INTRODUCCIÓN.

Las redes de tuberías de distribución de agua perduran décadas y, por tanto, es fundamental basar cualquier estrategia de cambio sobre la base de ciclo de vida, en lugar de los posibles beneficios a corto plazo, tales como el costo inicial del tubo. Sin embargo, la evaluación de los beneficios del ciclo de vida de las redes del tipo alternativo de tubería generalmente se basa en el análisis detallado del sistema existente de una empresa y muchos no cuentan con los datos, el tiempo o los recursos necesarios para permitir dicho estudio.

Es necesario un método simple pero efectivo para llevar a cabo un análisis del ciclo de vida a largo plazo para estas utilidades.

COSTO TOTAL DE VIDA.

Los conceptos de costo del ciclo de vida o costo total de la vida han sido bien entendidos para muchos años (1, 2) y han sido practicados por muchas compañías en todo el mundo que son responsables de una variedad de activos, incluidos edificios y redes de servicios públicos. Para una red de agua, los costos totales de vida se reflejan en los costos de adquisición (incluidos los costos de consultoría, diseño y construcción, y equipo), los costos de operación y los costos de mantenimiento durante toda su vida hasta su eliminación, es decir, los costos totales de propiedad. Estos costos incluyen recursos internos y gastos generales de gestión; también incluyen las asignaciones de riesgo según sea necesario; flexibilidad (modificaciones previstas para cambios conocidos en los requisitos comerciales, por ejemplo), costos de reacondicionamiento y los costos relacionados con la sostenibilidad y los aspectos de salud y seguridad (3). Países como Australia, Nueva Zelanda y el Reino Unido lideran el mundo en la implementación de dicho enfoque de gestión (4), pero Estados Unidos se está quedando rezagado, lo que puede conducir a decisiones inadecuadas sobre la renovación de la infraestructura.

La Asociación Estadounidense de Obras Públicas (APWA) ha observado que es esencial que la industria pase de una estrategia de adquisición de ofertas baja a una estrategia de costos del ciclo de vida (5). También señalan que, actualmente, dentro de los Estados Unidos, la mayoría de la infraestructura pública se construye a través de algún sistema de adquisición de bajo precio que no necesariamente produce el sistema más efectivo o eficiente cuando se consideran la totalidad del mantenimiento, reparación y rehabilitación.

Muchas, si no la mayoría, de las reglamentaciones de adquisiciones federales, estatales y locales son engorrosas o directamente barreras para implementar un análisis de adquisiciones sobre la base del costo del ciclo de vida. Concluyen diciendo que gran parte de la resistencia al costo del ciclo de vida proviene de funcionarios electos y designados que tienen una perspectiva a corto plazo que se mide en una fracción de la vida útil del activo (5). Para superar esta visión a corto plazo, es esencial contar con herramientas simples y efectivas que demuestren los beneficios del costo total de vida.

ESTIMACIÓN DE FALLA EN EL TUBO.

La parte esencial de cualquier análisis de ciclo de vida para redes de agua es la estimación precisa en el rendimiento a lo largo de la vida de las tuberías que forman la red, incluidas las fallas esperadas, las reparaciones y el reemplazo eventual y los costos asociados (tanto directos como indirectos) para cada etapa. Varios modelos de planificación están actualmente disponibles para permitir que se evalúen los costos futuros de fallas en tuberías para redes de reticulación de agua, tales como KANEW (6) desarrollado bajo fondos AwwaRF y PARMS-Planning desarrollado por CSIRO (7). Sin embargo, estos modelos requieren un análisis detallado de los datos de fallas para todos los activos de tubería, y algunos requieren curvas de falla específicas para cada clase.

Si una autoridad del agua tiene una base de datos de fallas registradas, puede usarse en el desarrollo de modelos de falla estadística. Sin embargo, las bases de datos sobre estadísticas de fallas de tuberías a menudo están incompletas y / o limitadas a un corto período de tiempo y en muchos casos es difícil determinar si una falla ocasionó una reparación o reemplazo o si la tubería fue reemplazada al final de su vida económica. Además, los modelos estadísticos desarrollados a partir de estos datos de fallas, en el uso práctico, suponen que el sistema de tuberías está en un estado estable, lo que significa que todos los valores atípicos y transitorios deben eliminarse de la base de datos antes de que comience la estimación.

En consecuencia, las fallas futuras en la tubería se estiman a partir de los datos de falla contenidos en las bases de datos de fallas, sujetas a limpieza y manipulación, o al utilizar el material conocido y las características de operación para desarrollar modelos de falla física. Independientemente del método utilizado, existe un cierto nivel de incertidumbre en cada uno de estos modelos debido a datos desconocidos o inciertos, y uno debe determinar si el nivel de incertidumbre es lo suficientemente bajo como para permitir el uso de estos modelos.

DATOS DE FALLA DE TUBERÍAS.

Como se indicó anteriormente, muchas autoridades tienen conjuntos de datos incompletos o que cubren períodos de tiempo limitados, dificultando el análisis. En algunos casos, aunque las autoridades han estado recopilando datos, ha sido inconsistente, no suficientemente detallado o simplemente el tipo de datos incorrecto. La recopilación de datos es una parte esencial de las actividades de cualquier autoridad de agua, pero se requiere una planificación cuidadosa para determinar qué datos se deben recopilar, cómo se deben recopilar y cómo se deben almacenar.

Los datos para el análisis de fallas de tuberías se basan en datos precisos y consistentes a lo largo de varios años (por lo general, al menos cinco años) para lograr predicciones significativas de tendencias futuras. El tipo de datos requeridos incluirá:

- Material de tubería: utilizando la clasificación de tuberías acordada por la industria (American Water Works Association - AWWA).
- Fecha de instalación: proporcione el año de instalación (el mes y el día generalmente no son críticos).
- Ubicación de la tubería: se requiere el suburbio, la ciudad o el código postal y también en qué está enterrada la tubería (carretera, sendero, borde, etc.).
- Datos de suelo y topografía: nuevamente, use los códigos estándar de la industria para esta información.
- Datos de falla: cuando ocurre una falla, se requiere un conjunto de datos que incluye qué tipo de falla fue (use terminología o códigos estándar de la industria), cuándo ocurrió (la fecha y hora son útiles aquí) y qué acción se tomó (tubería reparado o reemplazado).

Tener buenos protocolos de datos y asegurarse de que se cumplan ayudará en gran medida a futuros proyectos de análisis. Discutir con los analistas cuáles son sus requisitos de datos a menudo evitará prácticas comunes como reutilizar códigos de identificación únicos para tuberías que han sido reemplazadas o descartar datos en tuberías abandonadas o reemplazadas que pueden parecer eficientes, pero pueden causar frustración durante el análisis.

MODELOS ESTADÍSTICOS Y FÍSICOS.

Los datos estadísticos modelan los procesos de falla en un nivel por encima del nivel físico, donde la probabilidad de falla se deriva de una regresión logística basada en los atributos de la tubería, su entorno y manejo. Se requieren muchos registros independientes sobre fallas reales para una estimación estadística exitosa. También significa que a medida que se usan más variables explicativas, el número de observaciones necesarias aumenta.

En los modelos de por vida, se debe tener cuidado al diferenciar entre la vida económica (incluidas las decisiones financieras) y la vida física. El final de la vida económica de una tubería se define normalmente como el momento en que el valor actual de los costos de reparación futuros excede el costo de reposición actual. Para estimar el tiempo de vida físico remanente de una tubería, sus propiedades de material deben medirse en varios intervalos de tiempo como tensión, profundidad de pozo, etc. El proceso de deterioro puede entonces estimarse por regresión y predecir el tiempo hasta condiciones críticas de estallido.

Los modelos físicos (en algún momento conocido como modelos mecánicos) se han centrado principalmente en el deterioro de las tuberías, particularmente para la corrosión. Con las tuberías de plástico, como la disponibilidad de datos de falla es limitada, la aplicación de modelos estadísticos es difícil. Los ingenieros pueden describir los procesos físicos en una tubería individual para predecir roturas y perforaciones de los materiales en estudio. Este es el único método disponible para estimar el tiempo de vida restante de las tuberías grandes, que a menudo no tienen observaciones de estallido. La mayoría de los modelos físicos son, según la tradición de la mecánica estructural, deterministas (8, 9).

EL ENFOQUE LICAN.

En respuesta a la falta de un conjunto simple de herramientas de vida disponibles para la industria del agua dentro de los Estados Unidos, el [Plastics Pipe Institute](#) patrocinó el desarrollo del sistema LICAN (Análisis del costo del ciclo de redes). La Organización de Investigación Científica e Industrial de la Commonwealth (CSIRO) con sede en Australia llevó a cabo la investigación y diseñó LICAN como un modelo simple basado en computadora que ilustra el impacto de seleccionar materiales alternativos para tuberías municipales sobre el costo total durante toda su vida. Utiliza un conjunto fijo de escenarios alternativos determinado por LICAN y se centra en el tamaño del sistema y el material de las tuberías y se basa en un modelo de tasa de fallas para cada uno de los materiales de la tubería para permitir a los usuarios comparar los costos anticipados del ciclo de vida de diferentes soluciones de tuberías. Los usuarios deben proporcionar los costos de instalación, reparación y reemplazo de tuberías en la red para diferentes tamaños y establecer un marco de tiempo para el análisis. LICAN incluye el costo de la pérdida de agua, pero excluye el costo de la falla debido a daños de terceros, ya que esto afecta a todos los materiales de manera uniforme. Los productos incluyen tablas y tablas de comparación de alternativas, cambios basados en tiempo, patrones de crecimiento y características de red, resúmenes de materiales de tubería por longitud y tamaño para cada tamaño de sistema, costo inicial del sistema de tubería (incluyendo costo de material y costo de construcción) para cada tamaño de sistema y material de tubería y costo de mantenimiento anual (para cada año de la ventana de análisis de tiempo) para cada tamaño de sistema y material de tubería.

El enfoque general del modelo LICAN fue pronosticar la probabilidad anual esperada de falla para cada tipo y tamaño de tubería para los próximos cien años, en función de la edad y otras características, como el material y la longitud de cada tubería. Para cada segmento de tubería, la probabilidad esperada de falla de cada tubería se estima para cada año en el período de pronóstico.

El inventario de la red de tuberías real permite obtener el rendimiento total de la misma a partir de modelos de rendimiento relativamente simples basados en solo unos pocos parámetros.

Los costos de mantenimiento son proporcionados por la reparación y el costo de las tuberías de reemplazo se calcula a partir de los costos por unidad de longitud. Los reemplazos reducen la longitud de las tuberías existentes y crean una nueva tubería en el año de reemplazo. Todas las fallas son reparadas. El hecho de si una tubería se reemplaza en un año en particular se determina comparando las consecuencias económicas de retener y mantener la tubería en el futuro, ya que falla en el costo de renovarla y reemplazarla si esta última es más económica. Las tuberías con fallas más rápidas son más importantes (especialmente para la satisfacción del cliente) que las tuberías de vida media o larga.

LICAN no modela todas las consecuencias potenciales de una falla de tubería, como multas a clientes, interrupción de tráfico y otros costos que los servicios públicos pueden encontrar cuando falla una tubería y estos deberían examinarse caso por caso en función de las condiciones locales.

PREDICCIÓN DEL COSTO DEL CICLO DE VIDA.

El modelo LICAN calcula los costos futuros potenciales para la colección de activos de tubería en un período de pronóstico definido (típicamente cien años). El modelo predice fallas e interrupciones año por año, reemplaza cualquier activo de tubería seleccionado y luego pasa al año siguiente en el período de pronóstico y repite el proceso en el conjunto de activos actualizado.

Los cálculos de costos incluyen:

- Costo de instalación: durante los primeros años del período de planificación, los activos se agregan a la red a medida que el sistema crece. El costo por pie asociado con el nuevo material y diámetro se multiplica por la longitud para dar el costo de instalación del activo. El programa LICAN agrega activos de tubería uno a la vez para cada combinación de material / diámetro / longitud. Si aún no se alcanza la tasa de crecimiento, entonces se considera la siguiente combinación con activos aún por instalar.
- Costo de reparación: el costo especificado de un evento de reparación más cualquier longitud reemplazada. El costo del evento se multiplica por la cantidad fraccional de eventos de reparación esperados en el año determinado para generar el costo total de reparación del activo para el año determinado.
- Costo de fugas: el modelo calcula las fugas de fondo de las juntas. El volumen de agua perdido por el activo se multiplica por el costo de fuga de la unidad (por 1000 galones) para determinar el costo de fuga.
- Costo de reemplazo: un activo se reemplaza cuando la predicción de los costos totales de reparación descontados para el activo es mayor que el costo de reemplazar el activo y experimentar una tasa (supuesta) más baja de fallas (y reparaciones) en el futuro. El período para el cual se realizan estos cálculos se ingresa en el programa como el "lapso de tiempo de descuento". Si en un año determinado no se reemplaza el activo, entonces el costo de reposición será cero.

Los costos que no son parte del modelo incluyen:

- Costo de bombeo y eficiencia hidráulica: la red de tuberías está diseñada como una red de gravedad, con bombeo limitado para llenar los tanques de suministro, por lo que estos costos serían similares para todas las redes.
- Costo de corrosión: los efectos de la corrosión se incluyen en los modelos de falla de tubería.
- Reembolsos y multas por servicio al cliente debido a fallas.

DISEÑO DE RED.

Redes hipotéticas de suministro de agua para cinco ciudades de diferentes tamaños, que incorporan el uso de diferentes tipos de material de tubería contemporáneo, han sido diseñados y analizados hidráulicamente para producir un conjunto particular de inventarios de tuberías, hidrantes, válvulas de compuertas y grifos de servicio de agua que pueden usarse como base de datos para desarrollar un costo total del sistema de distribución de agua. Cada conjunto de suposiciones de diseño, configuraciones del sistema y condiciones topográficas asumidas para un estudio de este tipo conducirá, por supuesto, a la producción de diferentes conjuntos de resultados. Sin embargo, los procesos de análisis y supuestos de diseño adoptados en este estudio se consideran racionales y robustos, y se cree que las bases de datos de tuberías generadas son representativas en términos del costo relativo del tubo y los tamaños determinados.

Se adoptaron los siguientes cinco tamaños de ciudad: 5,000, 50,000, 100,000, 200,000 y 400,000 conexiones. La metodología y los parámetros del sistema pretenden producir un conjunto representativo de redes de suministro de agua idealizadas utilizando un conjunto limitado de parámetros de diseño generalizados y un enfoque de diseño relativamente simple.

Cada uno de los sistemas de distribución hipotéticos de suministro de agua analizados provee una mezcla "típica" de usos de la tierra, que puede considerarse representativa de las ciudades urbanas. Los análisis se basan en un conjunto específico de parámetros de diseño "típicos" relacionados con:

- La combinación "representativa" de usos de la tierra dentro de la zona de suministro.
- Días promedio típicos, día máximo, hora máxima y demandas de incendios.
- Presiones típicas máximas y mínimas de suministro residual adoptadas dentro de las redes. La presión residual máxima dentro de cada sistema de distribución está limitada a 100 psi (690 kPa). La presión de trabajo máxima sostenida dentro de las tuberías, después de tener en cuenta la profundidad del enterramiento, es de aproximadamente 104 psi (718 kPa).
- Geometría y tamaño de la red, topografía de la zona de suministro y características hidráulicas de los materiales utilizados.

Se realizó un análisis para cada combinación de material y tamaño de la ciudad. Esto implicó un proceso de optimización que varió los diámetros de tubería asignados a cada longitud de tubería de entre los diámetros permitidos. Se seleccionó la red de menor costo encontrada, que cumplía los criterios de diseño especificados, y se extrajo el inventario de tuberías.

TASA DE FALLA VS CURVAS DE EDAD.

En el modelo LICAN se determinaron curvas de tasa de falla separadas para cada tubería individual en la red. Considerándose tres materiales de tubería: cloruro de polivinilo (PVC), cemento de hierro dúctil revestido (DI / DICL) y Polietileno de alta densidad (PEAD), y una red mixta que contiene longitudes iguales de los tres. Sin embargo, debido a la falta en los datos publicados sobre fallas disponibles en estos materiales (especialmente PEAD y PVC), los modelos estadísticos no proporcionarían una representación válida de fallas futuras; en consecuencia, solo se utilizaron modelos de falla física. Como estos modelos no tienen en cuenta una falla prematura debido a una instalación deficiente, LICAN no tiene en cuenta ningún tipo de evento.

Se usó un modelo de falla física probabilística para fallas de fractura en tuberías de PVC, que combina la teoría de la mecánica de fractura con los métodos de simulación de Monte Carlo (10, 11). Para un conjunto de condiciones de carga prescritas, la teoría de la mecánica de la fractura se usó para predecir el crecimiento lento de grietas y la eventual rotura de fracturas frágiles por defectos inherentes en la pared de la tubería. Como parte de un estudio separado, las propiedades de fractura de las tuberías de PVC fabricadas en América del Norte se determinaron para la entrada en el modelo (12). En la Fig. 1 se muestra un conjunto típico de tasa de fallas frente a curvas de edad para fracturas en tuberías de PVC.

Como se muestra, las tasas de fallas estimadas a partir del modelo probabilístico físico se predice que inicialmente aumentarán bruscamente, luego disminuirán durante un período prolongado a medida que la tubería envejezca. Como se esperaba, el efecto de la presión es aumentar las cargas operativas y producir un aumento correspondiente en la tasa promedio de fallas. Para esta simulación en particular, las tasas de falla a largo plazo aumentaron de

Aproximadamente 1 por cada 100 km / por año (1 / 62mi / año) a 6 por cada 100 km / por año a medida que la presión aumentó de 105 psi a 123 psi (18%).

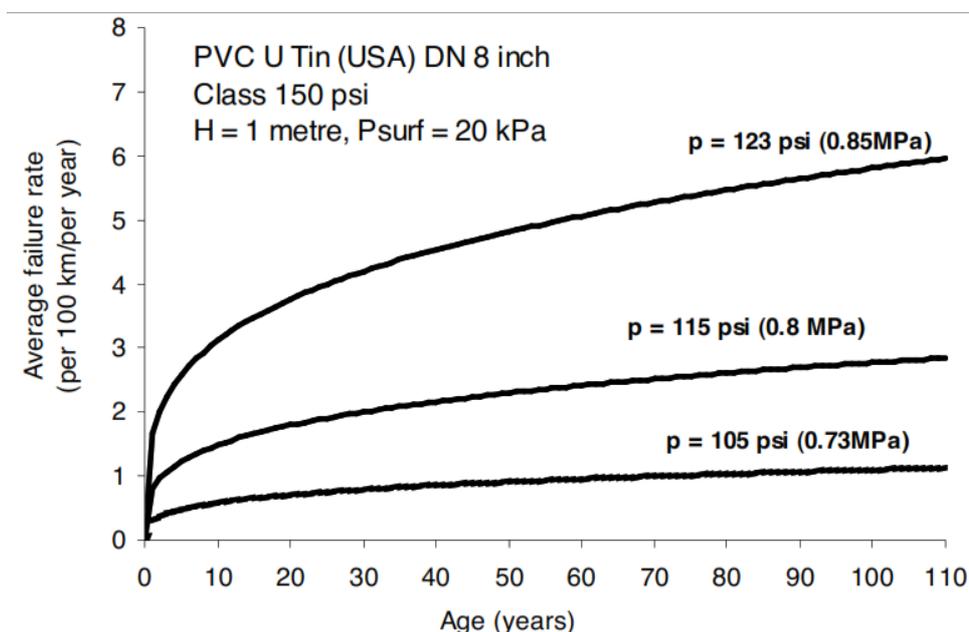


Fig. 1 Tasa de fracaso típica vs curvas de edad para uniones y conexiones PVC en EE.UU. (et al., 2005).

Además del modelo de falla de fractura para tuberías de PVC, también se desarrolló un modelo estadístico simple para pronosticar las tasas de fallas sin fractura (es decir, fallas de unión y ajuste). En ausencia de datos de fallas históricas de las empresas de servicios de agua de EE. UU, se utilizó la base de datos nacional de fallas de red del Reino Unido Water Industry Research (UKWIR) para generar este modelo simple. La base de datos UKWIR contiene descripciones de los atributos de tubería y años de instalación para diferentes materiales, junto con descripciones de fallas de tubería individuales (13). Cabe señalar que la base de datos UKWIR puede tender a proporcionar estimaciones conservadoras de las tasas de falla de ciertos materiales cuando se aplica al contexto de EE.UU. Donde la presión del agua y las sobrepresiones son consideradas más altas. Esto se debe a que los fallos en algunos materiales, como el PVC, a menudo se consideran relacionados con la presión (10, 11).

Se escribió un algoritmo para extraer fallas sin fractura en tubos de PVC de la base de datos UKWIR y generar una tasa de fallas en función de las curvas de edad. En la Fig. 2 se muestra un ejemplo de la tasa de fallas frente a los datos de edad (para juntas y accesorios) extraídos de la base de datos de UKWIR.

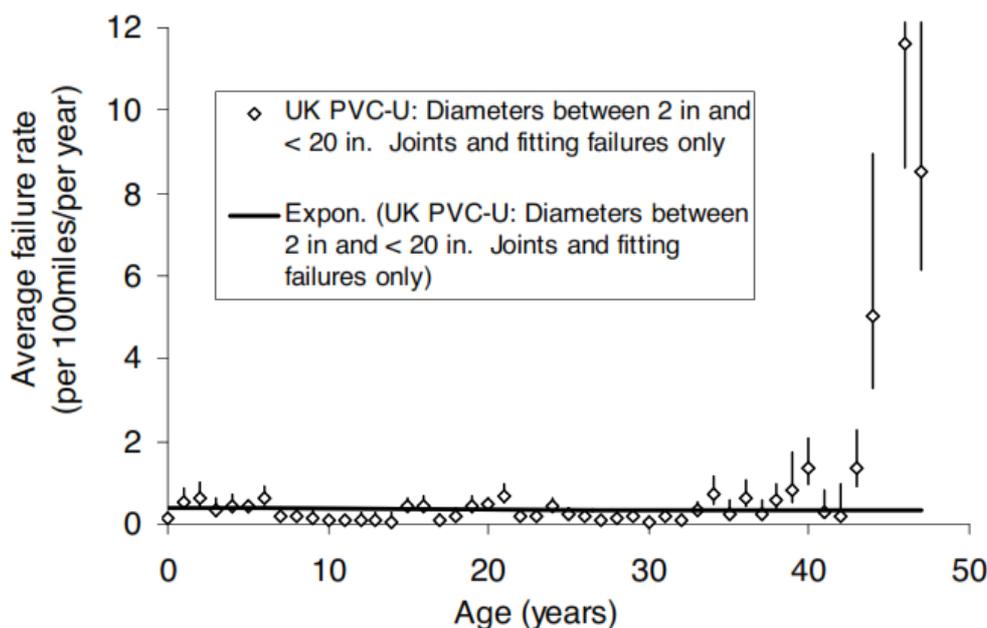


Fig. 2 índice de fracaso vs curva de edad para uniones y conexiones (base de datos UKWIR)

En ausencia de un modelo de falla física para tuberías PEAD y DICL, los antecedentes en la base de datos UKWIR también se usaron para generar curvas de tasa de falla frente a edad para estos materiales de tubería. Esto resultó en tasas de falla para PEAD de alrededor de 3.2 fallas / 100km / año (2.0 fallas / 100mi / año) y DICL alrededor de 20 fallas / 100km / año (12.4 fallas / 100mi / año). El uso de datos basados en el Reino Unido para tuberías DICL puede significar que el rendimiento es mejor que el experimentado en las partes septentrionales de EE. UU. Y Canadá ya que el ciclo de congelación / descongelación, que puede acortar la vida útil de las tuberías DICL, no se tiene en cuenta. Además, una mayor proporción de suelos corrosivos en los EE. UU. También tendría un impacto negativo en el rendimiento de DICL y, en consecuencia, las tasas de falla para DICL se consideran conservadoras.

COSTES DE FUGAS.

La pérdida de agua por fugas representa un costo significativo para muchas redes que a menudo son pasadas por alto. Estos costos se han estimado a través de un modelo de fuga que considera la fuga total como la fuga combinada de:

- Fuga de fondo, que ocurre principalmente a través de juntas en las tuberías y perforaciones.
- Fuga por fracturas.

Estos costos se incluyen en las tablas de gastos como un valor único en dólares por pérdida unitaria. Los costos tienen en cuenta la fuga de fondo y las pérdidas debidas a fallas de ráfagas como divisiones longitudinales y roturas circunferenciales.

Se consideró el deterioro temporal de los sistemas de tuberías DICL, PVC y PEAD en el desarrollo de algoritmos de fuga. Aunque la acción de ambientes agresivos del suelo difiere en los diferentes tipos de tubería, los efectos en la tubería de PVC y PEAD en sí no serán significativos. Sin embargo, si la tubería DI no está protegida, se deteriorará en suelos agresivos o si se infringe la protección debido a malas prácticas de instalación o daños a terceros. Un estudio canadiense que cubrió 1129 millas (344 m) de tubería de PVC y 2632 millas (802 m) de tubería DI indicó que las tasas promedio de falla conjunta fueron de 0.35 / 100miles / año y 0.42 / 100miles / año, respectivamente para las tuberías de PVC y DI (14). Por el contrario, las tasas de fallas promedio asociadas con fallas de picaduras de orificios / corrosión fueron 0 / 100miles / año y 11.8 / 100miles / año para PVC y DI respectivamente. Suponiendo que estas tuberías se instalaron de acuerdo con la práctica normal de la industria, los datos canadienses sugieren que a medida que aumenta la edad, las tuberías DI son más susceptibles al deterioro que las tuberías de PVC.

Los sistemas PEAD son menos susceptibles al deterioro temporal ya que tienen sistemas de unión completamente sólidos. No se espera que estos sistemas muestren un deterioro significativo, ya que no hay componentes que puedan desplazarse a través del movimiento del suelo o corroerse en ambientes de suelos agresivos.

FUGA DE FONDO.

Es producida por pequeñas fugas en las juntas entre las longitudes de las tuberías y en conexiones de propiedad (15). Se proporcionan algoritmos de fuga separados para secciones de tubería con y sin conexiones de propiedad. Para las secciones de tubería sin conexiones de propiedad, se adoptaron los modelos AWWA para la máxima fuga permitida durante las pruebas hidrostáticas AWWA M23 para PVC (16) y AWWA M41 para DI (17), esta última con modificaciones para tener en cuenta los efectos del envejecimiento. En ausencia de datos publicados, la estimación de las tasas de fuga para tuberías antiguas se basó en las tasas de fuga informadas de una red de suministro de agua en una ciudad australiana. En consecuencia, un aumento del 50% de fuga máxima permisible para los sistemas de DI es considerado por el deterioro de la junta inducida por la corrosión. Se asume una tasa de fuga constante para PVC, aunque algunos creen que la fuga en este material es un reflejo de los deslizamientos que sufre la tubería. Los algoritmos usan la mitad de una fuga máxima permitida, la base en la calidad de la mano de obra diferirá a lo largo de una red. AWWA M55 para PEAD (18) defiende que las fugas son cero para los sistemas de tuberías de PEAD con uniones soldadas por fusión y, sobre esta base, se supuso que la fuga en las tuberías de PE era cero. Donde estas uniones soldadas por fusión son defectuosas, es probable que falle prematuramente durante la prueba y, por lo tanto, antes de la puesta en marcha.

FUGA POR FRACTURA.

Los estudios de International Water Association (IWA) han demostrado (15) que el 95% de las fugas por fractura son reportadas y, en promedio, las pérdidas por cada evento se suman a 12m³ / hora (53 galones / minuto) durante 3 días a una presión de operación nominal de 500KPa (72 psi) antes de reparar la fuga. El 5% restante que no son reportadas promedian las pérdidas por evento de 6m³ / hora (26 galones / minuto) (a una presión de operación de 500 KPa.) durante 50 días antes de que se realicen las reparaciones. Sobre esta base, las pérdidas de cada evento de falla por fractura reportada y no reportada son 864 m³ (228270 US Gal) y 7200 m³ (1902245 US Gal) respectivamente a una presión de funcionamiento de 500 KPa.

A diferencia del caso en fugas de fondo, las tasas de fugas detectables como fallas por fractura son sensibles al tipo de material de tubería (19) y se aplican diferentes factores de corrección de presión para diferentes materiales de tubería, que han sido utilizados por LICAN.

LICAN.

Se implementa como un programa interactivo de Windows que requiere de entradas mínimas, en términos de seleccionar opciones y especificar costos. Puede mostrar los resultados de sus cálculos como tablas y gráficos que el usuario es capaz de seleccionar interactivamente qué valores mostrar. Las opciones disponibles incluyen la entrada de valores que controlan la tasa de crecimiento de la red, la selección de la ventana para ver los resultados y la definición del período de descuento y la tasa de descuento.

Para realizar sus cálculos, LICAN necesita costos de instalación, reparación y reemplazo para los tres materiales de tubería. También requiere un valor por el costo del agua que se pierde por las fugas de las tuberías. Los costos de instalación se especifican eligiendo inicialmente un diámetro de tubería particular e ingresando el costo real de tal tubería; luego usando una tabla de costos de instalación "estándar" y volviéndola a escalar en función de la entrada suministrada, LICAN calcula los costos de instalación para los demás diámetros de tubería. Cuando los tamaños de tubería requeridos son mayores a 20 pulgadas en las redes de PVC, se utilizan tubos DI, mientras que la red mixta tiene la misma longitud de los tres materiales.

La información sobre costos fue difícil de obtener y, en consecuencia, se utilizaron los costos indicativos, en lugar de los costos reales. Los costos de instalación "estándar" junto con el costo total "típico" para el suministro e instalación de tuberías, accesorios, bocas de incendio y válvulas, incluyendo excavación y relleno, se han basado en datos de costos tomados de RS Signos de Costos de Construcción Pesada (20), pero se presenta aquí como diferencias de costos relativos, en lugar de montos en dólares actuales.

EJEMPLO DE CASO DE ESTUDIO.

La Fig. 3 muestra los resultados de una simulación típica. En este caso, una red de tamaño mediano que contiene aproximadamente 100.000 clientes fue seleccionada y el total de los costos de vida se modeló a lo largo de 100 años. Como el principal objetivo de las empresas de agua es el mantenimiento continuo y los costos de reemplazo, todas las redes comienzan como nuevos sistemas de tuberías ya instalados, es decir, los costos iniciales de instalación se han excluido de esta simulación. La simulación muestra que la red DI tiene el costo más alto en un margen

considerable, seguido por la red mixta (DI / PVC / PEAD) y la red PVC / DI (DI para tuberías grandes). La red de polietileno tiene el costo / milla más bajo.

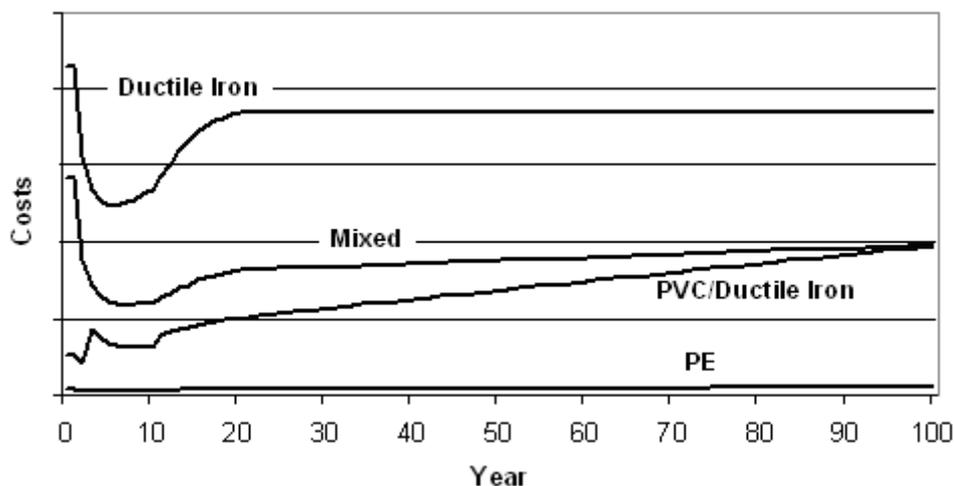


Fig. 3. Simulación de costos de vida (excluyendo los costos de instalación) para una red de tamaño mediano

El gráfico muestra que las redes de tuberías DI y mixta (DI/PVC/PEAD) experimentan una disminución en los costos, antes de que los costos comiencen a aumentar nuevamente. Los altos costos iniciales en los primeros años se deben a la alta tasa de fallas al inicio de la operación, ya que son más susceptibles a fallas relacionadas con la instalación de tuberías/uniones. Una vez que estas tuberías han estado en el suelo durante varios años, la edad una vez más comienza a causar un aumento en la tasa de fallas y así aumentar los costos. Los costos en estas redes continúan aumentando durante un período de 20 años y luego se nivelan. Esto representa el crecimiento en la red, que para este ejemplo se establece en 10% por año y se completa esencialmente después de 25 años. La red de PVC (con DI para grandes tuberías) también tiene un aumento más rápido en los costos durante el período de su crecimiento, pero en lugar de estabilizarse, los costos continúan aumentando durante el período de 100 años prácticamente nivelándose al costo de la red mixta en el mismo período de tiempo. La red PEAD, una vez que se completan las pruebas de puesta en marcha, casi no tiene un aumento en los costos durante el período de simulación y los costos que existen son significativamente menores.

El costo más bajo para la red de polietileno se debe a dos razones principales. En primer lugar, debido a que su índice de fallas es bajo, el costo por milla para la reparación/reemplazo también es bajo, a pesar de que el costo real del trabajo de reparación y reemplazo es similar al de otros tipos de tubería. Mantener las reparaciones a un mínimo tiene beneficios significativos, como muestra el modelo, los costos de reparación generalmente representan de un 70% a 80% del costo total experimentado por una red. El segundo gran beneficio de las redes de PEAD son las juntas soldadas por fusión que aseguran tasas de fuga muy bajas y, por lo tanto, bajos costos de pérdida de agua. Cambiar los tamaños de red también puede tener un impacto dramático en los costos asociados con las fugas. A medida que el tamaño de la red disminuye, el número de uniones por milla tiende a aumentar y, por consiguiente, también aumenta el número de fugas. La Fig. 4 muestra los costos de fugas durante los primeros veinte años para una red muy pequeña (5000 clientes). Se puede observar que las redes DI y mixtas (PVC / DI) tienen costos sustanciales asociados con las fugas durante los primeros 10 años de existencia de las redes antes de la estabilización. De hecho, en estos primeros

años los costos de fugas para estas redes representan hasta el 90% de los costos totales. Las redes mixtas y de PEAD tienen un costo relativo de fugas planas desde el año uno en adelante.

A medida que aumenta el tamaño de la red, el impacto de las fugas se reduce significativamente. Para redes muy grandes (400,000 clientes) los costos de fuga para DI y PVC/DI comienzan altos, pero rápidamente caen en los primeros años en alrededor del 75%. Para estas redes muy grandes, la mayoría de los costos están asociados a reparaciones y no a pérdidas.

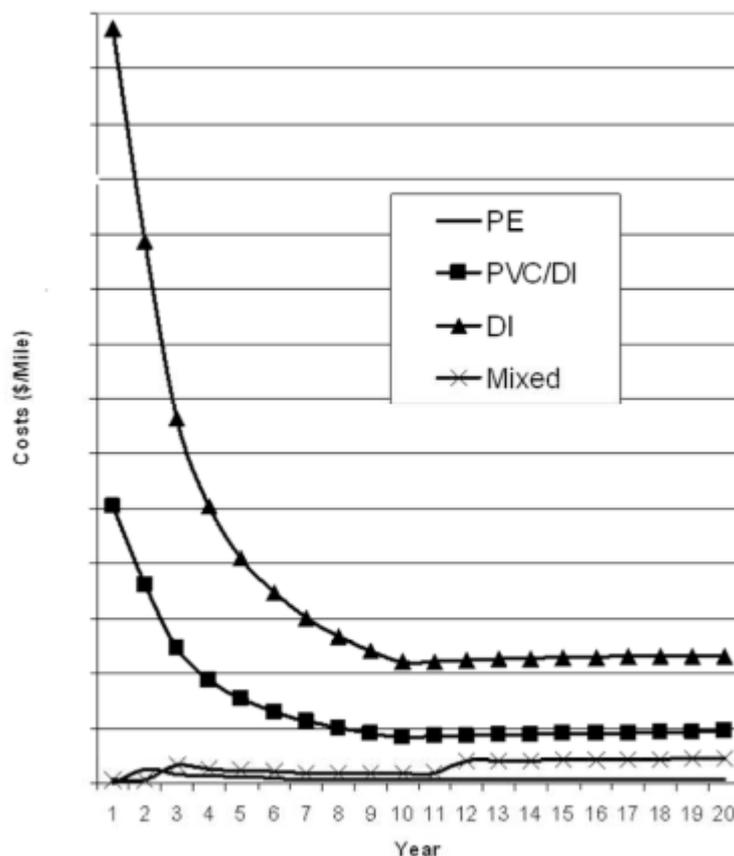


Fig. 4 Simulación de costo de fugas para una red muy pequeña.

CONCLUSIÓN

El análisis integral de las redes hidráulicas es esencial para que las empresas de servicios de agua pueden comprender los verdaderos costos a largo plazo de instalar, mantener y actualizar sus activos. La preferencia de los Estados Unidos de considerar estrictamente el precio de oferta más bajo podría tener graves consecuencias en el futuro cuando las redes experimenten mayores costos de reparación y pérdida de agua y requieran una mayor frecuencia de renovación de la instalación de tuberías como resultado del enfoque de precios iniciales más bajo.

El software LICAN muestra que muchos de los materiales de tuberías contemporáneos que se utilizan, como el hierro dúctil y el PVC, pueden tener importantes implicaciones en los costos a largo plazo a diferencia de la tubería de PEAD, sus índices de fallas relativamente más altos junto con tasas mayores de fugas podrían resultar en costos de mantenimiento significativos y costos por pérdidas de agua mayores durante la vida útil de la red de tuberías. Sin embargo, con base en los datos de costos y fallas disponibles, las redes de PEAD muestran costos significativamente más bajos a lo largo de su vida, y los beneficios combinados de bajas tasas de fallas y pérdida de agua pueden potencialmente resultar en ahorros mayores a largo plazo.

AGRADECIMIENTOS.

Las curvas de fallas para DI, PVC y PEAD fueron desarrolladas por el Dr. Paul Davis y las redes teóricas utilizadas por LICAN fueron desarrolladas por Bob Shipton, mientras trabajaban para la CSIRO. Sus contribuciones a este proyecto son muy apreciadas.

Los modelos LICAN fueron desarrollados y suministrados por el Plastics Pipe Institute por el y su apoyo a este trabajo es estimado. El proyecto fue dirigido por Camille George Rubeiz, PE.

REFERENCIAS.

1. P.N. Christensen, G.A. Sparks and K.J. Kosluk. (2005) A method-based survey of life cycle costing literature pertinent to infrastructure design and renewal. *Can. J. civ. Eng.* 32: 250-259
2. S.K. Durairaj, S.K. Ong, A.Y.C. Nee and R.B.H. Tan. (2002) Evaluation of Life Cycle cost analysis Methodologies. *Corporate Environment strategy*. Vol. 9(1) 30-39.
3. Office of Government Commerce (2003). Procurement guide: Whole-life costing and cost management, *Office of Government Commerce*, London, UK.
4. J. Woodhouse, (2001). Asset management, *Asset Management Processes & Tools*, The Woodhouse Partnership Ltd, Newbury, UK.
5. D.H. Ross, (2001). Infrastructure Research Needs: A Public Works Perspective, *First Annual Conference on Infrastructure Priorities: A National Infrastructure Research Agenda*, October 24-26, Washington, D.C., USA.
6. R.K. Herz. (1999). KANEW software for the Analysis of Infrastructure Rehabilitation Strategies. Technical University of Dresden. http://www.tu-dresden.de/stadtbau/stbw_kanew_e.html (accessed Aug 2008)
7. L.S. Burn, S.N. Tucker, M. Rahilly, P Davis, R. Jarrett and M. Po (2003). Asset planning for water reticulation systems - the PARMS model. *Water Science & Technology: Water Supply*, 3(1-2) 55-62
8. M. Heathcote and D. Nicholas, (1998) Life assessment of large cast iron watermains, *UWRAA Research Report No 146*.
9. P. Davis and L.S. Burn, (2001) Physical failure models for buried pipelines, *Proceedings of Pipeline Assets Planning and Operations at CSIRO Building, Construction & Engineering*, Ch 5.
10. P. Davis, S. Burn, M. Moglia and S. Gould, (2007) A physical probabilistic model to predict failure rates in buried PVC pipelines. *Reliability Engineering & System Safety* 92(9), September 2007, Pages 1258-1266.
11. P. Davis, M Moglia, S Gould and S. Burn, (2004) Physical Probabilistic Models to Estimate Failure Rates in PVC Pipe Networks, *Proceedings, 6th Annual Symposium on Water Distribution Systems Analysis. ASCE/EWRI World Water and Environmental Resources Congress*, Salt Lake City, Utah, USA, June 2004.
12. S. Burn, P Davis, T Schiller, B Tiganis, G Tjandraatmadja, M Cardy, S Gould and P Sadler, (2005) *Long Term Performance of PVC Pipes, AwwaRf Report (91092F)*
13. S. MacKellar and D. Pearson. 2003. *Nationally Agreed Failure Data and Analysis Methodology for Water Mains Volume 1: Overview and Findings*. Report Ref. No. 03/RG/05/7, UK Water Industry Research, London, UK.
14. B. Rajani, (2001). Personal communication. Published in a National Research Council Canada (NRC) Internal Report.
15. A Lambert, (2001) What do we know about pressure-leakage relationships in distribution systems? *IWA Conf. n Systems approach to leakage control and water distribution system management*. Brno, Czechoslovakia. ISBN 80-7204-197-5
16. AWWA M23 (2002) *Manual of water supply practices: PVC Pipe – Design and Installation, 2nd Ed.* American Water Works Association, ISBN 1-58321-171-3
17. AWWA M41 (2003) *Manual of water supply practices: Ductile Iron Pipe and Fittings, 2nd Ed.* American Water Works Association, ISBN 1-58321-218-3
18. AWWA M55 (2006) *Manual of water supply practices: PE Pipe – Design and Installation.* American Water Works Association, ISBN 1-58321-387-2
19. A.O. Lambert and R.D. McKenzie, (2002). Practical experience in using the Infrastructure Leakage Index. *IWA Leakage Management Conference – A practical approach. Cyprus*, Nov 2002. ISBN 9963-8759-0-4
20. R S Means (2003) *Heavy Construction Cost Data, 17th Annual Edition*, Reed Construction Data.